



**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Том 335, № 2, 2024  
Издается с 1903 г.**

**BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  
GEO ASSETS ENGINEERING**

**Volume 335, no. 2, 2024  
Published since 1903**



**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

---

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on-line) – 2413-1830

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 335, № 2, 2024

Издательство  
Томского политехнического университета  
2024

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Чогегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)  
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)  
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)  
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)  
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Мостовщиков А.В., д-р техн. наук (Россия)  
Хакимьянов М.И., д-р техн. наук (Россия)  
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)  
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2024

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on\_line) – 2413-1830

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геологических объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**

---

ISSN (print) – 2500\_1019  
ISSN (on\_line) – 2413\_1830

**BULLETIN  
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 335, № 2, 2024

Tomsk Polytechnic University Publishing House  
2024

## EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Belozеров V.B., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Aleksenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)  
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)  
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)  
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)  
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)  
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)  
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)  
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)  
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)  
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)  
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)  
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)  
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)  
Mostovshchikov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Khakimyanov M.I., Dr. Sc. (Russia)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

## AIMS AND SCOPES

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Процессы сжигания в камерной топке с тангенциально закрученным вихрем**  
Гиль А.В., Мальцев К.И., Абрамов Н.В., Заворин А.С., Старченко А.В. 7
- Влияние состава механических примесей на образование органических отложений**  
Илюшин П.Ю., Вяткин К.А., Козлов А.В., Андреев Д.В. 17
- Влияние способа приготовления смесей пиролизной жидкости с углем на характеристики ее зажигания и горения**  
Слюсарский К.В., Асылбеков А. 25
- Возможность рекультивации золоотвалов**  
Худякова Л.И., Гаркушева Н.М., Котова И.Ю., Палеев П.Л. 37
- Влияние расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики**  
Галашов Н.Н., Туболев А.А., Болдусhevский Е.С., Минор А.А. 48
- Visual inspection results and evaluation of Akhtala tailing safety based on tailing management facility safety methodology**  
Sahakyan K.S., Sarukhanyan A.A. 60
- Оценка влияния кислотных присадок на реологические свойства и технологическую эффективность смеси цвиттеррионных и анионных поверхностно-активных веществ**  
Мохсен А.М.А., Коновалов В.В., Склюев П.В. 69
- Разработка системы управления режимом алмазного бурения по показателю сопротивления разрушению горной породы**  
Нескоромных В.В., Попова М.С., Лалетина К.В., Лысаков Д.В. 78
- Сравнительная оценка случайной составляющей погрешности автоматических скважинных уровнемеров на основе обработки измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод**  
Заведий Т.Ю., Адонин Н.Р., Кокорев О.Н., Щипков А.А. 88
- Геолого-гидрогеологическое строение Шешминского терригенного комплекса Бельского поднятия**  
Ярков М.И., Лейбович Л.О., Красильников П.А., Батракова Г.М. 105
- Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы)**  
Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Мардасова Е.В. 120
- Настройка модели пласта методом материального баланса в программном обеспечении MBAL. Настройка интегрированной модели в GAP**  
Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И. 133
- Особенности определения металлоорганических соединений в углеродистых веществах** 141
- Combustion in a chamber furnace with a tangentially swirling vortex**  
Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. 7
- Effect of mechanical impurities composition on formation of organic deposits**  
Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V., Andreev D.V. 17
- Effect of preparation method of pyrolysis liquid mixed with coal on its ignition and combustion characteristics**  
Slyusarsky K.V., Asilbekov A. 25
- Possibility of reclamation of ash dumps**  
Khudyakova L.I., Garkusheva N.M., Kotova I.Yu., Paleev P.L. 37
- Impact of steam flow into a combustion chamber of a contact gas-steam installation on its energy characteristics**  
Galashov N.N., Tubolev A.A., Boldushevsky E.S., Minor A.A. 48
- Результаты визуального осмотра и оценка безопасности Ахталинского хвостохранилища на основе методологии безопасности хвостохранилищ**  
Саакян К.С., Саруханян А.А. 60
- Evaluation of the effect of acid additives on rheological properties and technological efficiency of zwitterionic and anionic surfactant mixtures**  
Mohsen A.M.A., Konovalov V.V., Sklyuev P.V. 69
- Development of a system for controlling a diamond drilling mode in terms of rock fault resistance**  
Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Laletina K.V., Lysakov D.V. 78
- Comparative estimation of a random error component of automatic well level gauges based on processing measurements of earth-tidal level of groundwater**  
Zavedy T.Yu., Adonin N.R., Kokorev O.N., Shchipkov A.A. 88
- Geological and hydrogeological structure of the Sheshma terrigenous complex of the Belsky uplift**  
Yarkov M.I., Leibovich L.O., Krasilnikov P.A., Batrakova G.M. 105
- Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study)**  
Galakhov V.P., Samoiloova S.Yu., Lovtskaya O.V., Mardasova E.V. 120
- Adjustment of a reservoir model by the material balance method in the MBAL program. Setting up the integrated model in GAP**  
Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. 133
- Features of determining organometallic compounds in organic matters** 141

- черносланцевых отложений с применением ИК-спектроскопии диффузного отражения**  
Иванов В.П., Тимкин Т.В., Болдина Д.А., Пахтаева М.Г.
- of black shale using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy**  
Ivanov V.P., Timkin T.V., Boldina D.A., Pakhtaeva M.G.
- Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ)**  
Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыржев А.Н., Исмагулов О.А.
- 157 Distribution of stable H, O and C isotopes in natural waters in the area of the Taz oil and gas condensate field (Yamalo-Nenets autonomous region)**  
Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyrzhayev A.N., Ismagulov O.A.
- Изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании Западно-Сибирской равнины в голоцене**  
Савичев О.Г.
- 170 Changes in conditions of interaction of ground, river and swamp water during swamping of the West Siberian plain in the Holocene**  
Savichev O.G.
- Особенности миграции химических элементов в природных водах и их отложения в виде минеральных новообразований в живых организмах (физико-химическое моделирование с верификацией на животных)**  
Барановская Н.В., Мазухина С.И., Паничев А.М., Вах Е.А., Тарасенко И.А., Серёдкин И.В., Ильенок С.С., Иванов В.В., Агеева Е.В., Макаревич Р.А., Стрепетов Д.А., Ветошкина А.В.
- 187 Features of chemical elements migration in natural waters and their deposition in the form of neocrystallisations in living organisms (physico-chemical modeling with animal testing)**  
Baranovskaya N.V., Mazukhina S.I., Panichev A.M., Vakh E.A., Tarasenko I.A., Seryodkin I.V., Ilenok S.S., Ivanov V.V., Ageeva E.V., Makarevich R.A., Strepetov D.A., Vetoshkina A.V.
- Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послыйного фрезерования**  
Фомин С.И., Лелен А.
- 202 Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines**  
Fomin S.I., Ljeljen A.
- Characteristics of water supply network zoning**  
Sahakyan A.A.
- 209 Характеристики зонирования сети водоснабжения**  
Саакян А.А.
- Оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей ряда действующих атомных электростанций**  
Городецкий В.Г., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В.
- 220 Assessment of radiation environmental risks for fish fauna of the cooling pools of a number of operating nuclear power plants**  
Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V.
- Пептизация и ингибирование набухания глин в присутствии угольной кислоты, бикарбонатных, карбонатных ионов и ионов кальция**  
Баранов Д.А., Вязниковцев С.Ф., Мамаева О.Г.
- 234 Clay peptization and clay swelling inhibition in the presence of carbonic acid, bicarbonate and carbonate ions and calcium ions**  
Baranov D.A., Vyaznikovtsev S.F., Mamaeva O.G.

УДК 621.181  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475  
Шифр специальности ВАК: 1.3.14

## Процессы сжигания в камерной топке с тангенциально закрученным вихрем

А.В. Гиль<sup>1</sup>✉, К.И. Мальцев<sup>1</sup>, Н.В. Абрамов<sup>1</sup>, А.С. Заворин<sup>1</sup>, А.В. Старченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

✉Andgil@tpu.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью анализа топочных процессов в котельных агрегатах с вертикальным вихрем при организации сжигания пылеугольного топлива с повышением экологических параметров посредством установки сопел третичного дутья. Несмотря на безуглеродную политику в современной энергетике, уголь остается одним из основных источников энергии, поэтому реконструкция котельных агрегатов с целью снижения вредных выбросов является весьма актуальной. *Цель:* исследование аэродинамики и процессов горения пылеугольного топлива в объеме топочной камеры котельного агрегата с тангенциальной компоновкой горелочных устройств при организации схемы сжигания с третичным дутьем. *Объекты:* камерная топка с вертикальным вихрем котельного агрегата мощностью 150 МВт при организации схемы сжигания с добавлением сопел третичного дутья. *Методы.* Применен Эйлерово-Лагранжев подход для численного исследования характеристик потока, процессов теплопередачи и горения в топке с тангенциальной компоновкой горелок. Для численных расчетов использовались: к-ε-модель турбулентности газа при взаимодействии частиц с турбулентностью, диффузионная модель дисперсии частиц, метод радиационного моделирования P-1 и модель горения частиц пылевидного угля, основанная на глобальной кинетике частиц и экспериментальных данных. *Результаты.* Получены зависимости концентраций продуктов сгорания, температуры, гидродинамики при сжигании кузнецкого угля марки Д в топочной камере с тангенциальной компоновкой горелок, спроектированной под бурые угли, а также при установке сопел третичного дутья. Выявлено недостаточное перераспределение воздуха между горелками и соплами третичного дутья, поскольку для поддержания стабильной закрутки вертикального вихря и соответственно наличия высоких значений скоростей на выходе из горелочных устройств не представляется возможным увеличение доли третичного воздуха без реконструкции горелок. Также установлена слабая вовлеченность в теплообмен объема топочной камеры ниже горелок.

**Ключевые слова:** Топочная камера, процессы горения, третичное дутье, численное моделирование, уголь

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274>.

**Для цитирования:** Процессы сжигания в камерной топке с тангенциально закрученным вихрем / А.В. Гиль, К.И. Мальцев, Н.В. Абрамов, А.С. Заворин, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475

---

UDC 621.181  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475

## Combustion in a chamber furnace with a tangentially swirling vortex

A.V. Gil<sup>1</sup>✉, K.I. Maltsev<sup>1</sup>, N.V. Abramov<sup>1</sup>, A.S. Zavorin<sup>1</sup>, A.V. Starchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉andgil@tpu.ru



**Abstract. Relevance.** The need to analyze the furnace processes in boiler units with vertical vortex when arranging pulverized coal combustion with the enhancement of environmental parameters through the installation of tertiary blast nozzles. Despite the carbon-free policy in modern power engineering coal remains one of the main sources of energy, so the reconstruction of boiler units in order to reduce harmful emissions is very relevant. **Aim.** To study aerodynamics and combustion processes of pulverized coal fuel in the furnace chamber of a boiler unit with a tangential arrangement of burner devices using a combustion scheme with tertiary air blowing. **Methods.** The Eulerian–Lagrangian approach was applied to numerical study of flow characteristics, heat transfer and combustion in a furnace with a tangential burner arrangement. Also, k- $\epsilon$  model of gas turbulence, particle-turbulence interaction, diffusion model of particle dispersion, P-1 radiation modeling method and pulverized coal particle combustion model based on global particle kinetics and experimental data were used for numerical calculations. **Results.** Based on numerical calculations and analysis, the dependences of combustion product concentrations, temperature, hydrodynamics at combustion of Kuznetsky coal grade D in the furnace chamber with tangential arrangement of burners for brown coal, as well as at installation of tertiary blast nozzles have been obtained. Insufficient redistribution of air between burners and tertiary nozzles is revealed, as for maintenance of stable twist of vertical vortex and accordingly presence of high values of velocities at the outlet of burner devices it is not possible to increase the portion of tertiary air without reconstruction of burners. It is also established that the volume of the furnace chamber below the burners is poorly involved in heat exchange.

**Keywords:** Furnace chamber, combustion, tertiary air, numerical modeling, coal

**Acknowledgements:** The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project no. 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274>).

**For citation:** Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Combustion in a chamber furnace with a tangentially swirling vortex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475

---

## Введение

На современном этапе развития общества потребление электроэнергии возрастает вследствие роста численности населения и уровня жизни [1]. При этом, несмотря на всеобъемлющие усилия по снижению негативного воздействия на окружающую среду тепловых электрических станций, работающих на органическом топливе, их доля в энергетическом балансе не сокращается [2]. Также стоит отметить, что наименее экологически чистые пылеугольные тепловые электрические станции (ТЭС), являющиеся крупнейшими производителями тепловой и электрической энергии в мире [3]. Доля угля в энергобалансе России составляет 13 %, но прогнозируется рост до 15 % [4], соответственно, несмотря на усилия по декарбонизации, внедрению возобновляемых источников энергии, угольные ТЭС останутся одним из ключевых источников генерации энергии.

В настоящее время проводятся ряд исследований по повышению экологических параметров использования угля в виде водоугольной суспензии или в смеси с сельскохозяйственными отходами, отходами деревообработки и др. [5, 6]. Но данные технологии не нашли широкого применения для организации сжигания в энергетических котлах по экономическим и/или технологическим соображениям.

Пылеугольные котельные агрегаты с тангенциальной компоновкой прямооточных горелочных устройств широко используются на тепловых электростанциях всего мира [7, 8], поскольку позволяют обеспечивать достаточно равномерный тепло-

вой поток к экранированным стенам топочной камеры, полноту выгорания топлива и более низкие выбросы оксидов азота при относительной простоте схемы сжигания. Но, несмотря на имеющиеся положительные факторы такой технологии, могут наблюдаться процессы шлакования, тепловая неравномерность, отклонения диаметра условной окружности, особенно при организации сжигания непроектного топлива.

Бесспорно, современные ТЭС должны стремиться к минимизации вредных выбросов в совокупности с высокой эффективностью топливоиспользования. Одним из наиболее перспективных способов снижения генерации оксидов азота является организация ступенчатого сжигания посредством установки сопел третичного дутья [9, 10].

Поскольку традиционно проектирование котельных агрегатов опирается на полуэмпирические методы, разработанные на основе испытаний пилотных установок, которые невозможно применять с высокой точностью для любых компоновочных и режимных вариантов, а проведение полномасштабных экспериментальных исследований на энергетических котельных агрегатах ограничено высокими экономическими издержками, то численное моделирование зарекомендовало себя как экономичный и эффективный исследовательский инструмент [11, 12].

В данной работе представлено исследование характеристик потока, процессов теплопередачи и горения, изменения концентраций веществ в топочной камере пылеугольного котельного агрегата мощностью 150 МВт с тангенциальной компонов-

кой горелочных устройств при сжигании кузнецкого угля марки Д. Наряду с этим рассмотрены варианты с установкой сопел третичного дутья с целью понижения выбросов  $\text{NO}_x$ .

### Объект исследования

Топочная камера пылеугольного котла спроектирована с тангенциальной компоновкой горелочных устройств (рис. 1, а; 2, а). Размеры топочной камеры: высота, ширина и глубина составляют 25050, 7424, 7808 мм, соответственно. Стены экранированы трубами контуров с естественной циркуляцией диаметром 60 мм с толщиной стенки 5,5 мм, расположенными с шагом 64 мм. Топочная камера с твердым шлакоудалением, для чего фронтальная и тыльная стены топочной камеры в нижней части образуют скаты холодной воронки. На выходе из топки тыльный экран образует аэродинамический выступ. Камера оборудована четырьмя прямоточными горелками, установленными в углах топки тангенциально к условной окружности диаметром 900 мм, ориентированной аксиально продольно к оси топки.

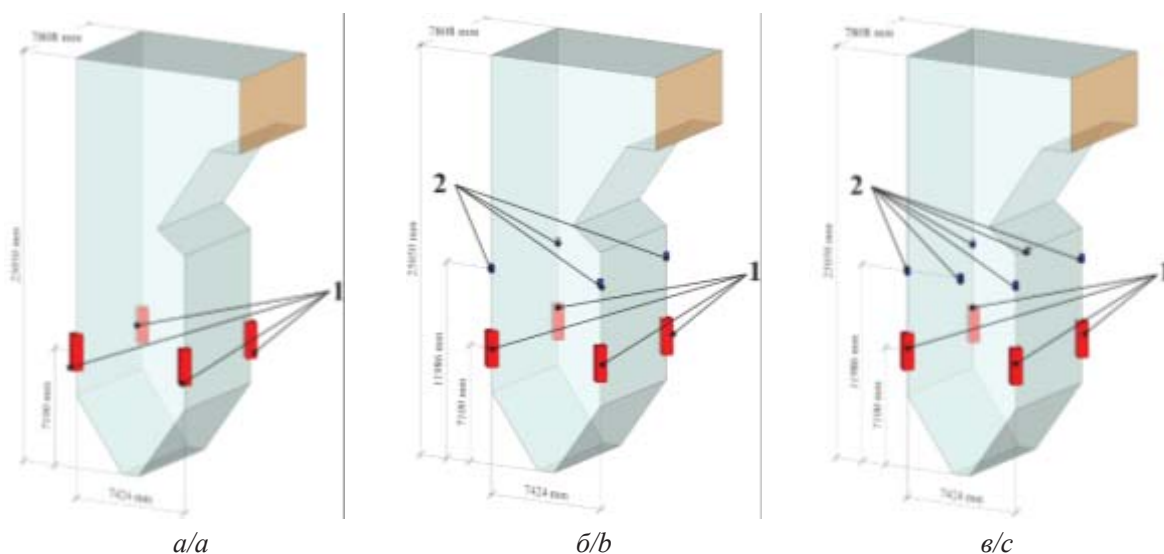
Горелки горизонтально-щелевые с чередованием каналов ввода первичного и вторичного воздуха (рис. 2, а). Для снижения генерации  $\text{NO}_x$  рассмотрены схемы с установкой сопел третичного дутья выше основных горелочных устройств (рис. 2, б, в). Размеры сопел и высота их расположения рассчитаны согласно [13]. Сечение сопел составляет  $286 \times 572$  мм, высота расположения – 11 986 мм, а диаметр условной окружности их ориентации – 700 мм.

Поскольку угли Кузнецкого бассейна активно предлагаются для использования в котельных агрегатах в качестве замещающего топлива вследствие истощения запасов проектного, то в данной работе рассмотрено сжигание кузнецкого угля марки Д, хотя исследуемая схема сжигания и тип горелок в проектном варианте ориентированы на бурые угли.

Для приведенных на рис. 1, 2 компоновочных схем при распределении объемов воздуха и оптимальных соотношений скоростей в горелочных устройствах с целью стабильного формирования тангенциально закрученного вертикального факела скорость третичного дутья составила 37 м/с при четырех соплах и 33 м/с – при шести. Во всех исследованных вариантах скорость первичного воздуха составляла 12,6 м/с, поскольку это уже достаточно низкое значение, а скорость вторичного изменялась. В базовом варианте скорость вторичного воздуха имеет значение 26,6 м/с, а с соплами третичного дутья 24,0 м/с – при четырех и 23,0 м/с – при шести.

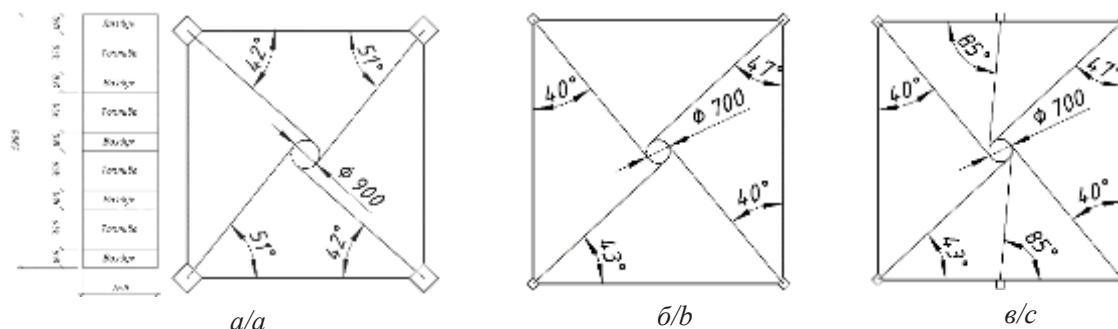
### Математическая модель

В качестве расчетной области принят объем топочной камеры от устья холодной воронки до горизонтального газохода. Для получения более точных результатов моделирования выполнена дискретизация объекта с использованием структурированной сетки. В зоне размещения горелочных устройств сетка имеет меньшие размеры ячеек для уменьшения численных ошибок. Чтобы избежать чрезмерно высоких вычислительных затрат дискретизация расчетной области составила 91200 ячеек.



**Рис. 1.** Геометрическая модель топочной камеры (1) горелки, (2) сопла третичного дутья: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами третичного дутья; в) с шестью соплами третичного дутья

**Fig. 1.** Geometric model of the furnace chamber of a burner (1), (2) tertiary nozzles: а) basic layout; б) with four tertiary blast nozzles; в) with six tertiary blast nozzles



**Рис. 2.** Схема расположения горелочных устройств и сопел третичного дутья: а) компоновка горелок и горелочное устройство; б) компоновка четырех сопел третичного дутья; в) компоновка шести сопел третичного дутья

**Fig. 2.** Layout of burner devices and tertiary air nozzles: a) burner arrangement and burner device; b) layout of four tertiary air nozzles; c) layout of six tertiary air nozzles

Численные расчеты проводились с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D, разработанного сотрудниками Томского государственного и Томского политехнического университетов [14]. Непрерывная фаза решается с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса в эйлеровой системе отсчета, тогда как горение топливных частиц моделируется в лагранжевой системе отсчета [15, 16]. Турбулентность моделируется с использованием реализуемой модели  $k-\epsilon$  [16, 17].

Осредненные по времени уравнения в частных производных сохранения массы, импульса, энергии, концентрации газообразных компонентов решены для прогнозирования скорости, температуры и концентрации частиц в объеме топочной камеры. Газовая фаза описывается осредненными по времени уравнениями Эйлера сохранения массы, импульса, энергии, компонента газовой смеси, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации.

Модель P-1 используется для расчета радиационного теплообмена. Данная модель точна для учета процессов сжигания, где оптическая толщина сравнительно велика, ее можно легко применить к сложной геометрии, и она потребляет мало процессорного времени [18, 19].

Учитывая размер частиц угля и их объемную долю по сравнению с газовой фазой, пылевидный уголь можно рассматривать как дискретную фазу, для которой используется лагранжево описание [20, 21]. Таким образом, необходимо смоделировать эволюцию массы и температуры каждой из частиц угля вдоль их траектории, а также обмен массой и энергией с газовой фазой. Соответственно дисперсная фаза описывалась в лагранжевом поле совместно с диффузионной моделью дисперсии частиц. Предполагается, что частицы имеют сферическую форму.

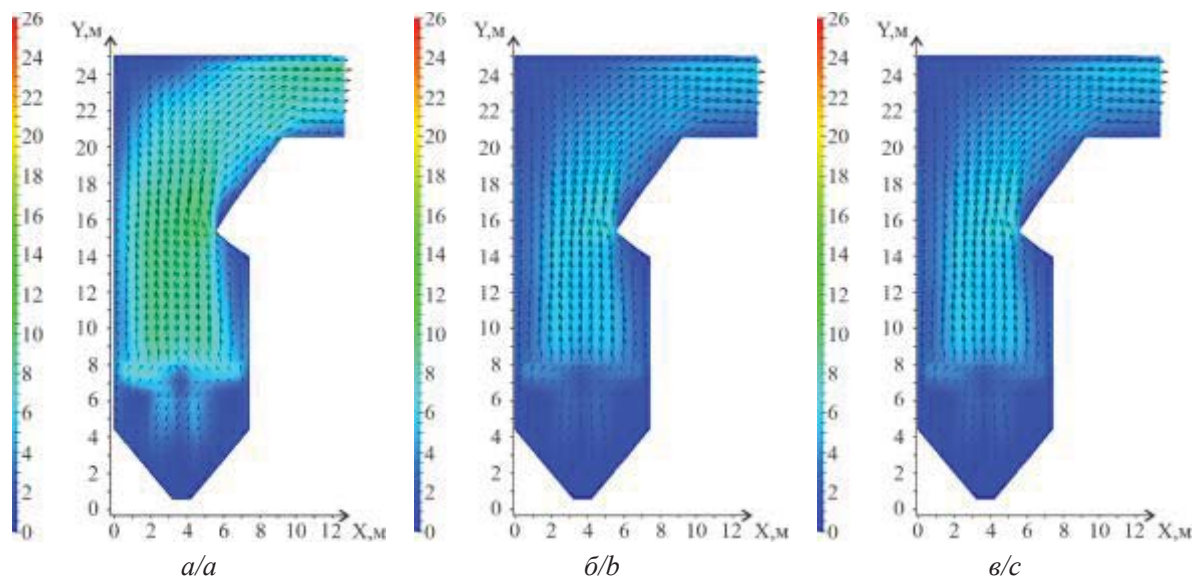
Уравнения импульса были связаны с уравнением неразрывности с помощью алгоритма SIMPLE [22, 23].

В качестве топлива в расчетах использовался кузнецкий уголь марки Д со следующим составом рабочей массы: зольность 10,2 %, влажность 17,6 %, содержание углерода 56 %, водорода 4 %, кислорода 10 %, серы 0,3 %, азота 1,9 %. Теплота сгорания топлива на рабочую массу 4949 ккал/кг при расходе топлива 26,51 т/ч.

### Результаты исследования

Аэродинамическая структура потока является основой стабильной работы котла, так как направление и величина скорости подачи первичного и вторичного воздуха важны для воспламенения угольной пыли, распространения пламени и теплопередачи в топке. Котлы с тангенциальной топкой характеризуются вращением газо-топливно-воздушного потока внутри топки. Этот поток, вращающийся вокруг вертикальной оси топки, улучшает смешивание воздуха с топливом и способствует сгоранию пылевидного угля, но может вызывать отклонения скорости и температуры, влияет на теплообмен в топочной камере и пароперегревателе. На рис. 3 показаны профили скорости газовой фазы по продольной оси топочной камеры в трех исследуемых вариантах.

Во всех вариантах наблюдается тороидальный вертикальный вихрь (рис. 3, 4). В нижней части топки до уровня горелочных устройств вихрь менее заметен из-за низкой скорости потоков. В зоне горения из четырех прямооточных горелок поступает большое количество воздуха и топлива, которое интенсивно сгорает, что приводит к значительному повышению скорости вихря. В верхней части топки, после аэродинамического выступа, вихрь имеет тенденцию к затуханию.



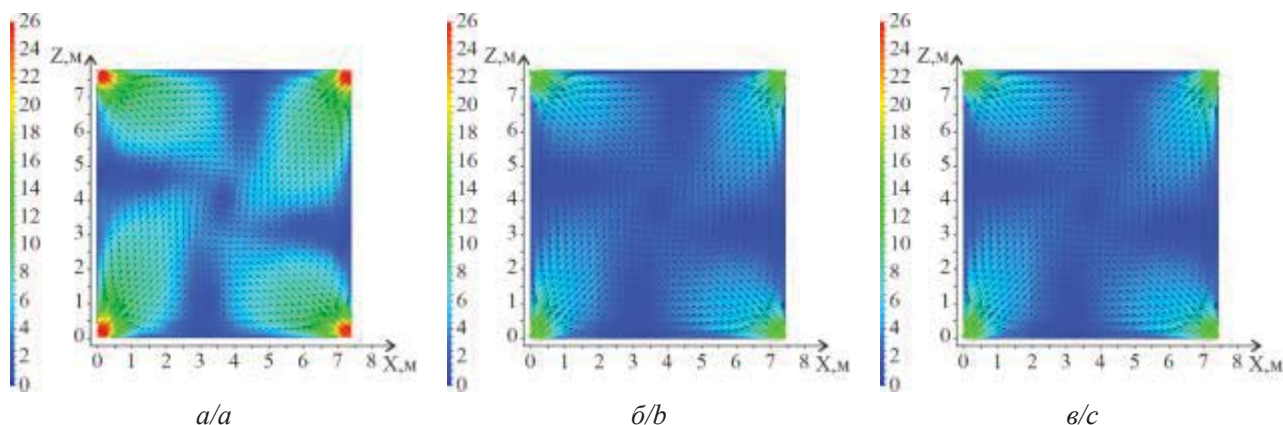
**Рис. 3.** Распределение скоростей (м/с) в продольном сечении топочной камеры: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами; в) с шестью соплами

**Fig. 3.** Velocity distribution (m/s) in the longitudinal section of the furnace chamber: a) basic layout; b) with four nozzles; c) with six nozzles

При установке сопел третичного дутья количество вторичного воздуха, подаваемого в основные горелочные устройства, снижается, соответственно, интенсивность вращения воздушного потока уменьшается, а размер касательной окружности увеличился. На уровне расположения сопел третичного дутья (рис. 5) отчетливо наблюдается расширение вихря, связанное не только с изменением расхода воздуха в основные горелки, но и с установкой сопел в противоположном направлении относительно вращения вихря.

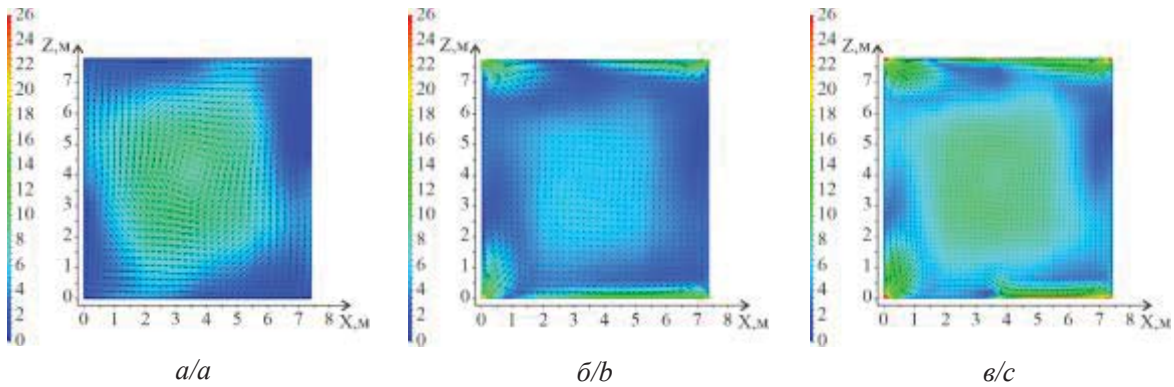
При этом, несмотря на снижение интенсивности вихревого движения под воздействием меньших объемов подаваемого воздуха в горелочные

устройства, воздушные потоки от сопел третичного дутья не проникают вглубь вихря, поскольку он обладает существенной кинетической энергией по отношению к струям третичного дутья и даже разворачивает их по направлению своего вращения (рис. 5). Данный факт обусловлен несоответствием значений скоростей третичного воздуха рекомендованным значениям [24], поскольку к моделированию приняты проектные горелочные устройства для бурого угля с большими сечениями щелей по первичному и вторичному воздуху (рис. 2, а). Соответственно это ухудшает синергетический эффект от взаимодействия основных горелочных устройств и сопел третичного дутья.



**Рис. 4.** Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры по оси горелок: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами; в) с шестью соплами

**Fig. 4.** Distribution of velocities (m/s) in the horizontal section of the furnace chamber along the burner axis: a) basic layout; b) with four nozzles; c) with six nozzles



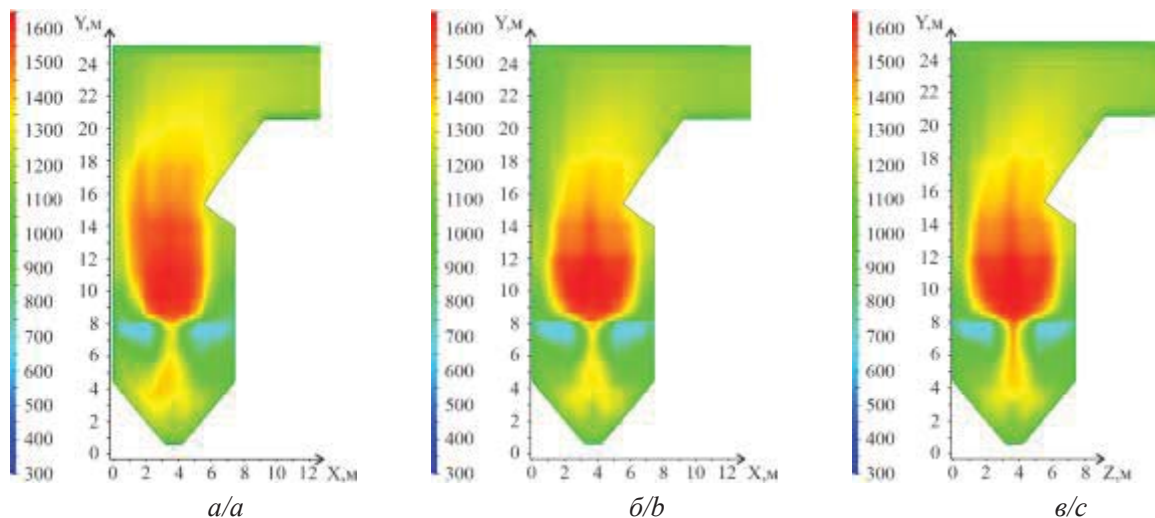
**Рис. 5.** Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры по оси сопел третичного дутья: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами; в) с шестью соплами

**Fig. 5.** Distribution of velocities (m/s) in the horizontal section of the furnace chamber along the tertiary nozzles axis: a) basic layout; b) with four nozzles; c) with six nozzles

На рис. 6 представлены температурные поля внутри топочной камеры по продольной оси топки. Значения и конфигурация температурных полей в нижней части топочной камеры различаются незначительно во всех представленных вариантах. В данной области температура относительно невысокая, поскольку в ней не происходит интенсивного горения, но стоит отметить эжекцию раскаленных продуктов сгорания и топливных частиц через центральную часть холодной воронки вследствие столкновения двух горизонтальных вихрей (рис. 3).

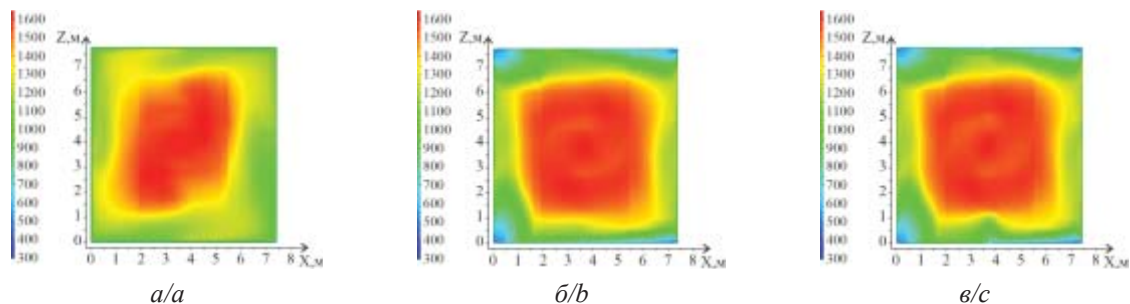
В зоне активного горения угольные частицы воспламеняются с выделением большого количества теплоты, и температура в топочной камере возрастает до максимальной. После этого за счет теплообмена между высокотемпературными продуктами сгорания и экранами топочной камеры температура постепенно снижается.

В соответствии с аэродинамикой топочной камеры в горизонтальной плоскости поля температур с максимальными значениями располагаются в центральной части топки в виде кольцевой структуры (рис. 7). При рассмотрении горизонтальных сечений на уровне расположения сопел третичного дутья можно выделить различие в конфигурации полей температур с наличием сопел третичного дутья и без них (рис. 7). В частности, при отсутствии сопел третичного дутья температурное поле имеет эллиптическую форму, вытянутую по одной из диагоналей топки (рис. 7, а). Это может негативно отразиться на равномерности обогрева стен топочной камеры, а также на шлаковании экранных поверхностей. При наличии сопел третичного дутья профиль высокотемпературного поля приближен к окружности и, соответственно, способствует более равномерному распределению температур по ширине и глубине топки (рис. 7, б, в).



**Рис. 6.** Распределение температуры (K) в продольном сечении топочной камеры: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами; в) с шестью соплами

**Fig. 6.** Temperature distribution (K) in the longitudinal section of the furnace chamber: a) basic layout; b) with four nozzles; c) with six nozzles



**Рис. 7.** Распределение температуры (K) в горизонтальном сечении топочной камеры по оси сопел третичного дутья: а) базовая компоновка; б) с четырьмя соплами; в) с шестью соплами

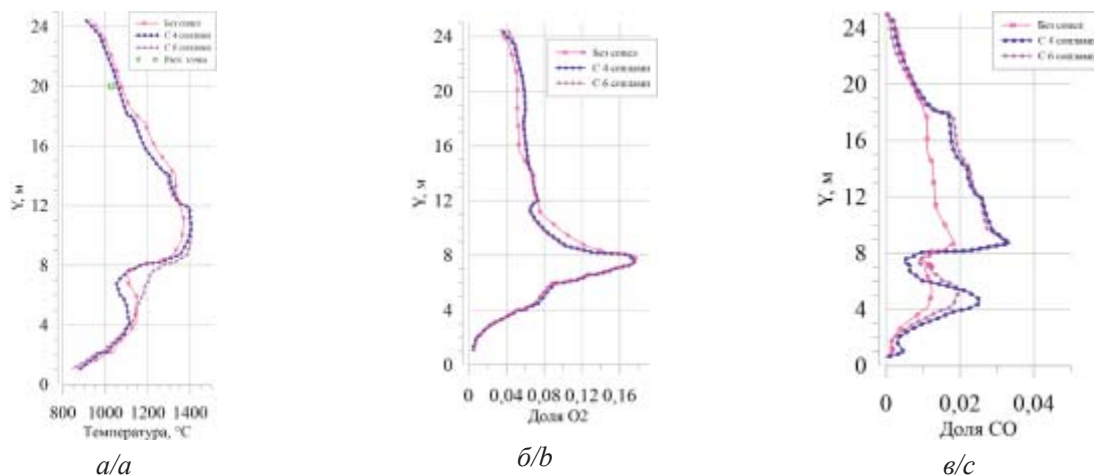
**Fig. 7.** Temperature distribution (K) in the horizontal section of the furnace chamber along the axis of tertiary blast nozzles: а) basic layout; б) with four nozzles; в) with six nozzles

Распределение температур по высоте топочной камеры (рис. 8, а) не имеет выраженной закономерности влияния сопел третичного дутья. Так, в области холодной воронки температура возрастает до 1100 °С во всех случаях. На уровне расположения основных горелочных устройств температуры незначительно снижаются в базовом варианте и с четырьмя соплами под воздействием горелочных струй первичного (70 °С) и вторичного (250 °С) воздуха, а в варианте с шестью соплами продолжают возрастать, поскольку в последнем случае скорость горелочных струй наиболее низкая из рассматриваемых вариантов, что привело к смещению высокотемпературных областей. Выше горелок температуры достигают максимальных значений до 1400 °С, и после высоты 12 м происходит постепенное охлаждение продуктов сгорания.

На основе распределения температур выполнено сравнение результатов математического моделирования с аналитическим расчетным значением температуры на выходе из топки, которое, согласно [13], составляет 1030 °С. При этом расхождение значения температуры не превышает 50 °С.

Распределение концентрации  $O_2$  в исследуемых вариантах имеет одинаковые профили при графическом представлении (рис. 8, б). Максимальные значения наблюдаются на уровне расположения основных горелок, при этом наибольшее значение относится к варианту без сопел третичного дутья. В зоне горения содержание  $O_2$  значительно снижается из-за интенсивной реакции горения. На уровне расположения сопел третичного дутья подается дополнительно воздух, что приводит к повышению концентрации  $O_2$  на 1 % на выходе из топки по отношению к базовому варианту.

На рис. 8, в представлены профили концентрации CO по высоте топочной камеры для различных исследованных вариантов. Концентрация CO имеет противоположные профили кривых по отношению к  $O_2$ . В топочной камере CO является промежуточным продуктом сгорания угольной пыли, который образуется в результате окисления угля и может вступать в реакцию с  $O_2$  и  $NO_x$ . Соответственно в области с высоким содержанием  $O_2$  появляется низкое содержание CO.



**Рис. 8.** Распределение в горизонтальных сечениях по высоте топки среднееинтегральной величины: а) температуры; б) кислорода; в) монооксида углерода

**Fig. 8.** Distribution in horizontal sections along the height of the furnace of the average integrated magnitude of: а) temperature; б) oxygen; в) carbon monoxide

## Заключение

При длительной эксплуатации котельных агрегатов на пылеугольных ТЭС зачастую возникают предложения по их переводу на сжигание непроектных марок углей, в том числе по переходу на сжигание бурых углей взамен каменных или наоборот. Определяющими являются факторы, связанные с эффективностью топочных процессов и возможностью эксплуатации системы пылеприготовления с минимальными реконструкционными мероприятиями.

В данном исследовании представлены результаты численного моделирования топочных процессов в камерной топке с тангенциальной компоновкой горелочных устройств, спроектированной для сжигания бурого угля. Как представлено в работе, при организации сжигания каменного угля без реконструкции горелочных устройств существенный объем топочной камеры «не загружен», поэтому от середины холодной воронки и до зоны активного

горения не наблюдается высокотемпературных полей.

Вследствие наличия больших проектных сечений горизонтальных щелей в горелочных устройствах затруднительно обеспечить требуемого количества воздуха на третичное дутье, поскольку необходимо выдерживать скоростной режим истечения аэропыли и вторичного воздуха для обеспечения формирования вертикального вихря. В соответствии с принятыми при моделировании значениями доли третичного воздуха можно констатировать, что данные объемы незначительны и не оказывают существенного влияния на топочные процессы. Тем не менее рекомендуется при организации схем сжигания с третичным дутьем и при переводе на непроектный уголь реконструировать горелочные устройства с целью обеспечения рационального соотношения между аэропылью, вторичным воздухом и третичным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar / K. Bhatia, A. Palai, A. Kumar, R. Bhatia, A. Patel., V. Thakur, Y. Yang // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 340. – 125644.
2. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options / J. Morris, H. Khesghi, S. Paltsev, H. Herzog // *Climate Change Economics*. – 2021 – Vol. 12. – 2150001.
3. Constenla I., Ferrin J.L., Saavedra L. Numerical study of a 350 MWe tangentially fired pulverized coal furnace of the as pontes power plant // *Fuel Processing Technology*. – 2013. – Vol. 116. – P. 189–200.
4. В России к 2050 году доля угля в генерации энергии может вырасти. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/08/25/991818-v-rossii-k-2050-godu-dolya-uglya-v-generatsii-energii-mozhet-virasti> (дата обращения 10.11.2023).
5. Янковский С.А., Кузнецов Г.В., Галактионова А.А. Экспериментальное обоснование механизма снижения концентрации оксидов серы в продуктах пиролиза смесей частиц угля и биомассы // *Теплоэнергетика*. – 2022. – № 8. – С. 64–71.
6. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции / М.А. Курганкина, К.Ю. Вершинина, И.П. Озерова, В.В. Медведев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 72–82.
7. Habib M.A., Ben-Mansour R., Antar M.A. Flow field and thermal characteristics in a model of a tangentially fired furnace under different conditions of burner tripping // *Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 41. – P. 909–920.
8. Liu Y.C., Fan W.D., Wu M.Z. Experimental and numerical studies on the gas velocity deviation in a 600 MWe tangentially fired boiler // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 553–563.
9. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO<sub>x</sub>, tangentially fired pulverized coal boiler / Y. Park, S. Kim Baek, H. Tae, S. Dong, W. Dong // *Fuel*. – 2013. – Vol. 104. – № 2. – P. 341–346.
10. Yongqiang W., Yuegui Z. Numerical optimization of the influence of multiple deep air-staged combustion on the NO<sub>x</sub> emission in an opposed firing utility boiler using lean coal // *Fuel*. – 2020. – Vol. 269. – 116996.
11. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.
12. Modeling coal combustion: the current position / A. Williams, R. Backreedy, R. Habib, J. Jones, M. Pourkashanian // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81. – № 5. – P. 605–618.
13. *Тепловой расчет котлов (нормативный метод)*. Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
14. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников, С.В. Обухов, А.В. Старченко // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 175–181.
15. Low-NO<sub>x</sub> study of a 600 MW tangentially fired boiler based on pulverized coal preheating method / Y. Guojia, H. Xiaojun, L. Zuodong, T. Hong, Z. Yongqing, W. Zhi // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 48. – 103156.
16. CFD modeling of flow, combustion and NO<sub>x</sub> emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions / W. Haopeng, J. Haoze, Y. Zhi, D. Shanshan, W. Xuehong, A. Jingxue, S. Ranran, T. Shuguang // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 236. – 121824.
17. Jingwen L., Yifan Z., Hao Z. Numerical simulation study on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission of COREX gas swirl burner and boiler // *Fuel*. – 2023. – Vol. 352. – 129128.
18. A method of designing an SNCR installation for small pulverized coal-fired boilers on the example of OP-50 boiler / P. Krawczyk, M. Kurkus-Gruszecka, A. Dzido, K. Badyda // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 235. – 121321.

19. Numerical optimization of separated overfire air distribution for air staged combustion in a 1000 MW coal-fired boiler considering the corrosion hazard to water walls / W. Jin, F. Si, Y. Cao, H. Ma, Y. Wang // *Fuel*. – 2022. – Vol. 309. – 122022.
20. Modliński N., Janda T. Mathematical procedure for predicting tube metal temperature in the radiant superheaters of a tangentially and front fired utility boilers // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2023. – Vol. 40. – 101763.
21. Numerical investigations on overfire air design for improved boiler operation and lower NOx emission in commercial wall-firing coal power plants / W. Kang, H. Jo, J. Lee, K. Jang, C. Ryu // *Applied Thermal Engineering*. 2023. – Vol. 219. – 119604.
22. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas / Z. Li, Q. Yi, Y. Zhang, H. Zhou, Y. Zhao, Y. Huang, D. Gao, Y. Hao // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 252. – 119656.
23. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Бурдуков А.П. Расчетное исследование факельного горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2013. – Т. 6. – № 6. – С. 625–636.
24. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 297 с.

### Информация об авторе

**Андрей Владимирович Гиль**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. andgil@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>

**Кирилл Иванович Мальцев**, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kim3@tpu.ru

**Никита Валерьевич Абрамов**, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nva12@tpu.ru

**Александр Сергеевич Заворин**, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. zavorin@tpu.ru

**Александр Васильевич Старченко**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. starch@math.tsu.ru

Поступила в редакцию: 23.11.2023

Поступила после рецензирования: 01.12.2023

Принята к публикации: 06.12.2023

### REFERENCES

1. Bhatia K., Palai A., Kumar A., Bhatia R., Patel A., Thakur V., Yang Y. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 340, 125644.
2. Morris J., Khesghi H., Paltsev S., Herzog H. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options. *Climate Change Economics*, 2021, vol. 12, 2150001.
3. Constenla I., Ferrin J.L., Saavedra L. Numerical study of a 350 MWe tangentially fired pulverized coal furnace of the as pontes power plant. *Fuel Processing Technology*, 2013, vol. 116, pp. 189–200.
4. *In Russia by 2050, the share of coal in energy generation may increase* (In Russ.) Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2023/08/25/991818-v-rossii-k-2050-godu-dolya-uglya-v-generatsii-energii-mozhet-virasti> (accessed 10 November 2023).
5. Yankovskii S.A., Kuznetsov G.V., Galaktionova A.A. Experimental substantiation of the sulfur oxide concentration reduction mechanism in coal and biomass particle mixture pyrolysis products. *Thermal power engineering*, 2022, no. 8, pp. 64–71. (In Russ.)
6. Kurgankina M.A., Vershinina K.Yu., Ozerova I.P., Medvedev V.V. Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 72–82. (In Russ.)
7. Habib M.A., Mansour R.B., Antar M.A. Flow field and thermal characteristics in a model of a tangentially fired furnace under different conditions of burner tripping. *Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 41, pp. 909–920.
8. Liu Y.C., Fan W.D., Wu M.Z. Experimental and numerical studies on the gas velocity deviation in a 600 MWe tangentially fired boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 553–563.
9. Park Y., Kim Baek S., Tae H., Dong S., Dong W. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NOx, tangentially fired pulverized coal boiler. *Fuel*, 2013, vol. 104, no. 2, pp. 341–346.
10. Yongqiang W., Yuegui Z. Numerical optimization of the influence of multiple deep air-staged combustion on the NOx emission in an opposed firing utility boiler using lean coal. *Fuel*, 2020, vol. 269, 116996.
11. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of effect of primary air excess on combustion in a furnace chamber of a utility boiler with multi-channel swirl burners. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27. (In Russ.)



12. Williams A., Backreedy R., Habib R., Jones J., Pourkashanian M. Modeling coal combustion: the current position. *Fuel*, 2002, vol. 81, no. 5, pp. 605–618.
13. *Boiler thermal design (standard approach)*. St Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p. (In Russ.)
14. Gil A.V., Zavorin A.S., Krasilnikov S.V., Obukhov S.V., Starchenko A.V. Study of aerodynamics and combustion in the furnace of the BKZ-420-140 boiler in relation to options for replacing the design fuel. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1. pp. 175–181. (In Russ.)
15. Guojia Y., Xiaoju H., Zuodong L., Hong T., Yongqing Z., Zhi W. Low-NO<sub>x</sub> study of a 600 MW tangentially fired boiler based on pulverized coal preheating method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 48, 103156.
16. Haopeng W., Haoze J., Zhi Y., Shanshan D., Xuehong W., Jingxue A., Ranran S., Shuguang T. CFD modeling of flow, combustion and NO<sub>x</sub> emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236, 121824.
17. Jingwen L., Yifan Z., Hao Z. Numerical simulation study on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emission of COREX gas swirl burner and boiler. *Fuel*, 2023, vol. 352, 129128.
18. Krawczyk P., Kurkus-Gruszecka M., Dzido A., Badyda K. A method of designing an SNCR installation for small pulverized coal-fired boilers on the example of OP-50 boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 235, 121321.
19. Jin W., Si F., Cao Y., Ma H., Wang Y. Numerical optimization of separated overfire air distribution for air staged combustion in a 1000 MW coal-fired boiler considering the corrosion hazard to water walls. *Fuel*, 2022, vol. 309, 122022.
20. Modliński N., Janda T. Mathematical procedure for predicting tube metal temperature in the radiant superheaters of a tangentially and front fired utility boilers. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, vol. 40, 101763.
21. Kang W., Jo H., Lee J., Jang K., Ryu C. Numerical investigations on overfire air design for improved boiler operation and lower NO<sub>x</sub> emission in commercial wall-firing coal power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 219, 119604.
22. Li Z., Yi Q., Zhang Y., Zhou H., Zhao Y., Huang Y., Gao D., Hao Y. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 252, 119656.
23. Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Burdukov A.P. Numerical research of pulverized combustion of micro-grinded lignocellulose raw materials. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 625–636. (In Russ.)
24. Fursov I.D. *Design and thermal calculation of steam boilers*. Barnaul, AltSTU Publ., 2016. 297 p. (In Russ.)

### Information about the author

**Andrey V. Gil**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. andgil@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>

**Kirill I. Maltsev**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kim3@tpu.ru

**Nikita V. Abramov**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; nva12@tpu.ru

**Alexander S. Zavorin**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; zavorin@tpu.ru

**Alexander V. Starchenko**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; starch@math.tsu.ru

Received: 23.11.2023

Revised: 01.12.2023

Accepted: 06.12.2023

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4568

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

## Влияние состава механических примесей на образование органических отложений

П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов<sup>✉</sup>, Д.В. Андреев

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь*

<sup>✉</sup>anton.kozlov@girngm.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования заключается в необходимости изучения влияния твёрдых частиц в потоке нефти на образование, состав и структуру асфальтосмолопарафиновых отложений. Современные модели образования асфальтосмолопарафиновых отложений, основанные на корреляционных зависимостях или эмпирических данных, не учитывают влияние содержания твёрдых частиц в нефти в должной мере. Последние исследования показывают, что различные твёрдые частицы в нефти могут влиять как на критическую скорость, так и на структуру формирующихся отложений парафина, однако воздействие различных частиц на интенсивность образования асфальтосмолопарафиновых отложений остаётся не изученным. **Цель:** изучить влияние различных фракций песка на интенсивность образования, состав и структуру асфальтосмолопарафиновых отложений. **Методы:** моделирование процесса образования асфальтосмолопарафиновых отложений на лабораторной установке «Холодный стержень» при добавлении различных фракций песка в нефть; изучение состава и структуры асфальтосмолопарафиновых отложений после проведённых исследований при помощи микроскопа. **Результаты.** По результатам исследований наблюдается значительное увеличение интенсивности образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добавлении в нефть крупных фракций песка при концентрации 5 % и выше. Стоит отметить, что малые фракции почти не влияют на количество образующихся отложений парафина. Также если добавлять в нефть различные фракции в равных пропорциях, воздействия на интенсивность образования асфальтосмолопарафиновых отложений почти не наблюдается. В ходе анализа снимков отложений с микроскопа можно сделать вывод, что молекулы парафина при взаимодействии с частицами песка размерности более 0,05 мм образуют комплексы, причём с увеличением фракции их прочность повышается. **Выводы.** Изучение современных моделей образования асфальтосмолопарафиновых отложений и актуальных работ позволило понять, что вопрос исследования факторов образования асфальтосмолопарафиновых отложений, в частности влияния наличия твёрдых частиц в нефти, остаётся открытым. Результаты данной работы могут быть направлены на совершенствование существующих технологий в области моделирования процесса образования асфальтосмолопарафиновых отложений, а также будут способствовать дальнейшей работе исследователей в данном направлении.

**Ключевые слова:** асфальтосмолопарафиновые отложения, песок, нефть, состав, структура отложений

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10403.

**Для цитирования:** Влияние состава механических примесей на образование органических отложений / П.Ю. Илюшин, К.А. Вяткин, А.В. Козлов, Д.В. Андреев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 17–24. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4568

---

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4568

## Effect of mechanical impurities composition on formation of organic deposits

P.Yu. Ilyushin, K.A. Vyatkin, A.V. Kozlov<sup>✉</sup>, D.V. Andreev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>✉</sup>anton.kozlov@girngm.ru

**Abstract. Relevance.** The need to study the effect of solid particles in oil stream on formation, composition and structure of deposits. Modern models of formation of asphalt-resin-paraffin deposits, based on correlation dependencies or empirical data, do not take into account the influence of the content of solid particles in oil to the proper extent. Recent studies show that various solid particles in oil can affect both the critical velocity and the structure of the formed deposits, but the effect of various particles on the intensity of formation of asphalt-resin-paraffin deposits remains unexplored. **Aim.** To study the effect of various sand fractions on the intensity of formation, composition and structure of asphalt-resin-paraffin deposits.

**Methods.** Modeling of formation of asphalt-resin-paraffin deposits at the laboratory installation “Cold Finger” when adding various sand fractions to oil; studying composition and structure of deposits after the conducted investigations using a microscope. **Results.** According to the research results, there is a significant increase in the intensity of formation of asphalt-resin-paraffin deposits when large fractions of sand are added to oil at a concentration of 5% or higher. It is worth noting that small fractions have almost no effect on the amount of deposits formed. Also, if various fractions are added to oil in equal proportions, there is almost no effect on the intensity of formation of asphalt-resin-paraffin deposits. When analyzing the deposits images from a microscope, it can be concluded that paraffin molecules, when interacting with sand particles of a dimension greater than 0.05 mm, form homols, and with an increase in the fraction, their structural strength grows.

**Conclusions.** The study of modern models of formation of asphalt-resin-paraffin deposits and current articles made it possible to understand that the issue of studying the factors of formation of asphalt-resin-paraffin deposits, in particular the effect of the presence of solid particles in oil, remains open. The results of this article can be aimed at improving existing technologies in the field of modeling paraffin formation, as well as contribute to the further work of researchers in this direction.

**Keywords:** asphalt-resin-paraffin deposits, sand, oil, composition, structure of deposits

**Acknowledgements:** The research was carried out using the grant of the Russian Science Foundation no. 21-79-10403.

**For citation:** Ilyushin P.Yu., Vyatkin K.A., Kozlov A.V., Andreev D.V. Influence of mechanical impurities composition on formation of organic deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 17–24. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4568

---

### Введение

На сегодняшний день добыча нефти на множестве нефтяных месторождений сопровождается образованием асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренних стенках нефтедобывающих скважин [1, 2]. Вследствие этого уменьшается гидравлический радиус лифтовой колонны, что приводит к возрастанию нагрузки на нефтепромысловое оборудование и увеличивает риск аварийных ситуаций [3, 4]. Для борьбы с АСПО применяется множество методов, среди них выделяют две группы: методы удаления отложений и методы предупреждения их образования. Однако многие исследователи подтверждают, что для эффективного выбора способа борьбы с отложениями необходимо корректно оценить их профиль [5, 6]. Несмотря на это, неразрешённым остаётся вопрос о

влиянии некоторых факторов на процесс образования отложений.

В настоящее время известно о следующих факторах, влияющих на интенсивность выпадения парафина: температуре нефти, зависимости давления на забое от давления насыщения попутным газом, скорости потока и компонентном и химическом составе нефти [7, 8]. Температура нефти оказывает значительное влияние на образование АСПО. При охлаждении стенок лифтовой колонны ниже температуры начала кристаллизации парафина (ТНКП) происходит образование отложений [9, 10]. При низких значениях забойного давления относительно давления насыщения дестабилизируется система «жидкость–газ». Это происходит вследствие интенсивного газовыделения и приводит к увеличению скорости образования АСПО [11]. Высокая скорость

потока срывает накопившиеся отложения и сохраняет температуру нефти [12]. Немаловажным фактором появления отложений является состав нефти. Отношение концентрации асфальтенов к концентрации смол напрямую влияет на температуру насыщения. При увеличении количества асфальтенов температура насыщения уменьшается, что приводит к понижению интенсивности образования отложений. При высоких значениях температуры насыщения процесс выпадения парафина ускоряется [13].

С увеличением темпов цифровизации нефтяных месторождений вопрос о моделировании образования АСПО с учётом известных факторов парафинообразования встает наиболее остро. На сегодняшний день выделяют три основные модели: RRR (Rygg, Rydahl и Rønningsen), Matzain и Тепловую аналогию (Heat Analogy). Основным и главным фактором образования АСПО в каждой из перечисленных моделей является температура [14]. Однако представленные модели не учитывают данные лабораторных исследований и основаны на корреляционных зависимостях. При этом в работе [15] проведен масштабный анализ данных моделей, указывающий на необходимость разработки модели, основанной на эмпирических данных. В НОЦ ГиРНГМ разработана собственная эмпирическая модель по результатам исследований на лабораторном стенде Wax Flow Loop. Данная установка моделирует процесс движения нефти в скважине с учётом множества параметров с возможностью регулирования температуры, скорости нефти и давления в установке. Подробнее представленная модель описывается в работе [16].

Однако, несмотря на развитие методов моделирования образования парафиновых отложений, в них не учитывается влияние твердых взвешенных частиц, которые способны оказать значительное влияние на образование данных отложений. Так, в работе [17] отмечается, что крупные частицы песка могут изменять структуру АСПО, тем самым увеличивая прочность образующихся отложений. Лепорини описывает, что песок в нефти влияет на критическую скорость, причём это зависит от диаметра добавляемых частиц [18]. Помимо этого, до сих пор не изучено влияние различных твёрдых взвешенных частиц на процесс образования АСПО. Содержание механических примесей в нефти на территории Пермского края достигает 45 г/л, среднее значение – 3 г/л. В данной работе исследуется вопрос о воздействии содержания в нефти различных фракций песка на количество выпадающих отложений.

#### Материалы и методы

Для выполнения лабораторных исследований применялась проба нефти, физико-химические свойства которой приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Физико-химические свойства нефти

**Table 1.** Physical and chemical properties of oil

Параметр Parameter		Размерность Dimension	Величина Value
Плотность Oil density	Пластовая/In reservoir	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	853
	Дегазированная Degassed		883,9
Динамическая вязкость Dynamic viscosity	Пластовая/In reservoir	мПа·с Pa·s	8,25
	Дегазированная Degassed		12,39
Содержание в нефти Content in oil	Асфальтены Asphaltenes	%	2,5
	Смолы/Resins		23,3
	Парафины/Paraffins		3,6
Температура начала кристаллизации парафина Wax appearance temperature		°C	26

Исследования по оценке влияния частиц песка на количество отложений проводились на установке «Холодный стержень» [19, 20]. Данный лабораторный стенд используется для моделирования процесса образования АСПО во время движения нефти в лифтовой колонне или трубопроводе при заданных значениях температуры нефти и стенки. Температурный градиент в процессе исследования составлял 40 °C. Скорость перемешивания нефти составляла 350 об/мин, что соответствует течению 70 м<sup>3</sup>/сут жидкости по трубопроводу с внутренним диаметром 62 мм. Принцип работы данной установки представлен на рис. 1.

Оценка интенсивности образования АСПО выполнялась с использованием формулы (1):

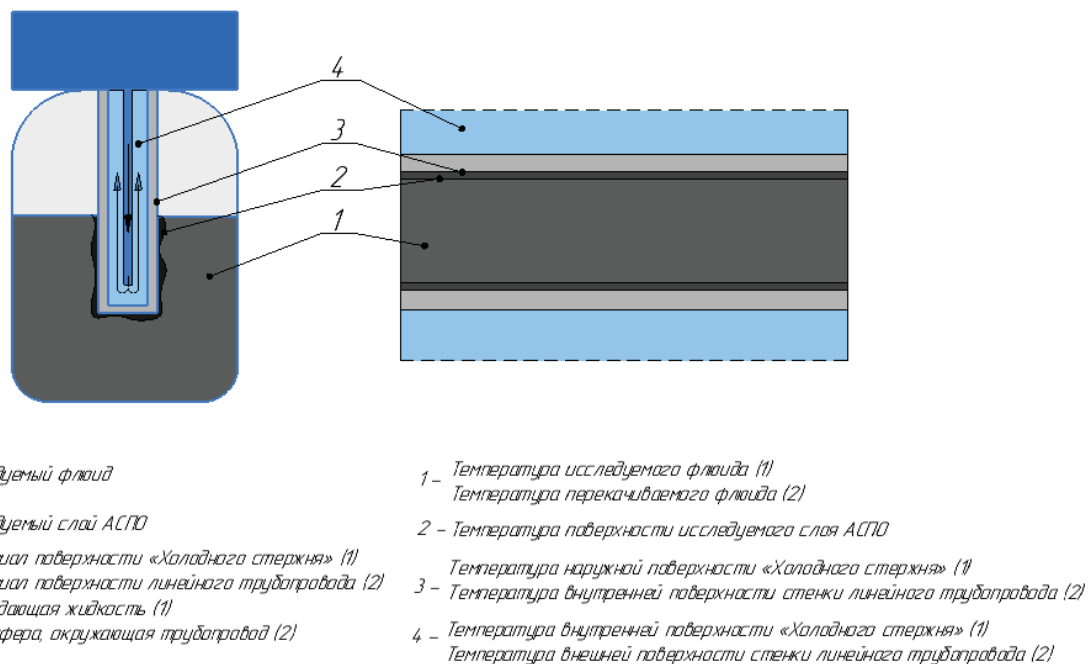
$$\mu_{аспо} = \frac{m_{аспо}}{m_{нефти}}, \quad (1)$$

где  $\mu_{аспо}$  – интенсивность образования АСПО;  $m_{аспо}$  – масса отложившегося парафина на стержне, г;  $m_{нефти}$  – масса нефти до начала исследования, г.

Опыты проводились с использованием фракций следующей размерности: менее 0,05; 0,25–0,05 и 0,5–0,25 мм. Навески песка получены при помощи комплекта сит соответствующего диаметра и вибросита. Для определения массы АСПО стержни взвешивались на аналитических весах «METTLER TOLEDO» с погрешностью 0,1 мг до и после исследования на «Холодном стержне».

Для оценки влияния содержания твердых частиц на интенсивность образования органических отложений проведено две серии исследований, программы которых приведены в табл. 2, 3:

- В первой серии исследований в нефть добавлялось различное количество смеси песчаных фракций в равных пропорциях.
- Во второй серии исследований в нефть добавляли каждую фракцию по отдельности в различных концентрациях.



**Рис. 1.** Принцип работы лабораторной установки «Холодный стержень»

**Fig. 1.** Principle of operation of the laboratory installation «Cold Finger»

**Таблица 2.** Параметры проведения серии исследований № 1

**Table 2.** Parameters of the research series no. 1

Номер опыта Experiment number	Размерность фракции Fraction dimension	Концентрация песка в нефти, % Concentration of sand in oil, %
1	Без песка/Without sand	0
2	Все фракции в равных пропорциях All fractions in equal pro- portions	0,5
3		2
4		5
5		10
6		30

**Таблица 3.** Параметры проведения серии исследований № 2

**Table 3.** Parameters of the research series no. 2

Номер опыта Experiment number	Размерность фракции, мм Fraction dimension, mm	Концентрация песка в нефти, % Concentration of sand in oil, %			
1	Без песка Without sand	0			
2	<0,05	1	2	5	15
3	0,25–0,05				
4	0,5–0,25				

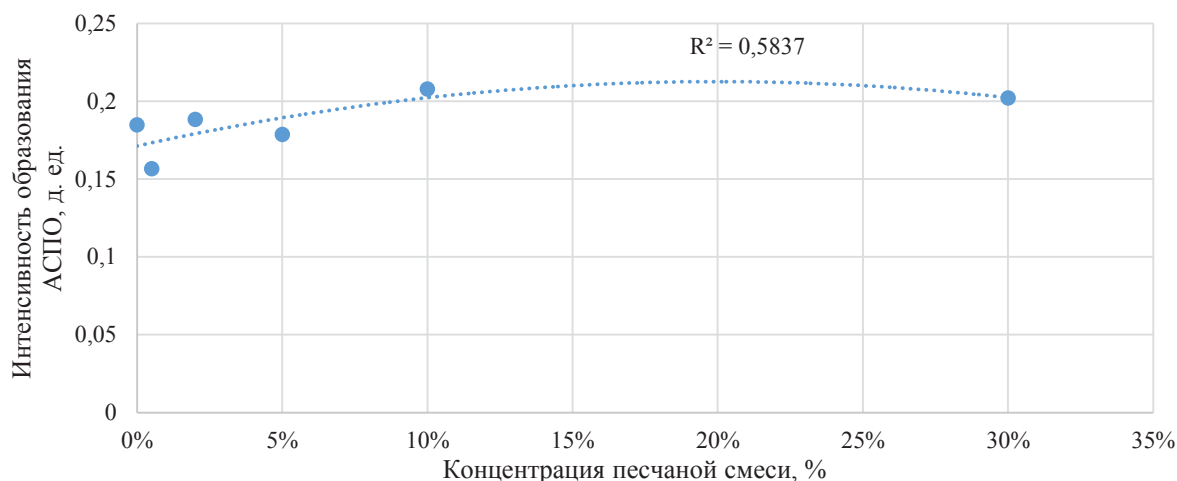
Для оценки состава и структуры отложений, формирующихся при добавлении в нефть навески песка, данные отложения после исследования растворяли в толуоле и анализировали нерастворённые частицы под микроскопом. Анализ проводился на микроскопе модели МБС-10 с максимальным увеличением в 100 раз.

## Результаты расчета

В результате выполнения первой серии исследований, представленной в табл. 2, была составлена точечная зависимость интенсивности образования АСПО от концентрации песчаной смеси с равной пропорцией фракций в нефти. Данная зависимость приведена на (рис. 2).

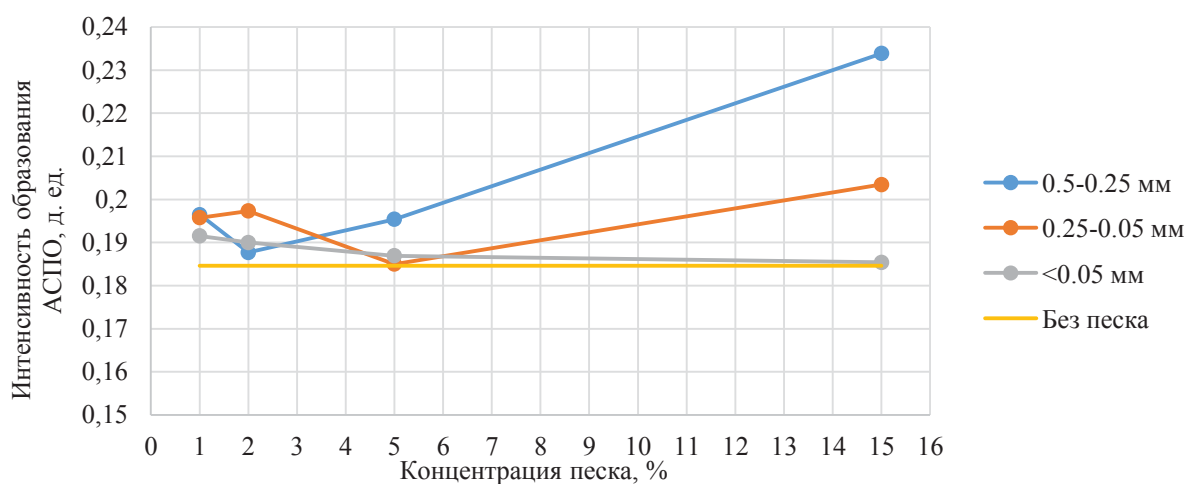
По графику можно сделать вывод, что масса отложений, осаждающихся на поверхности «холодных» стержней, незначительно увеличивается с повышением концентрации равномерной смеси песка всех фракций, в равных пропорциях добавляемых в исследуемую нефть. Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,764, что говорит о высокой корреляции между рассматриваемыми величинами. Данный процесс может быть вызван включением в объем отложений частиц песчаной смеси, заполняющих поровую структуру отложений. Однако для оценки диаметров частиц, оказывающих наибольшее влияние на процесс парафиноотложения, проведена вторая серия опытов. По результатам второй серии опытов составлена точечная зависимость интенсивности образования АСПО от концентрации определённой фракции песка в нефти. Данная зависимость приведена на рис. 3.

Анализируя полученный график, можно отметить, что увеличение концентрации фракций песка диаметром до 0,05 мм не приводит к увеличению интенсивности образования отложений. При этом добавление частиц песка диаметрами 0,25–0,05 и 0,5–0,25 мм с концентрацией более 5 % приводит к увеличению интенсивности образования органических отложений.



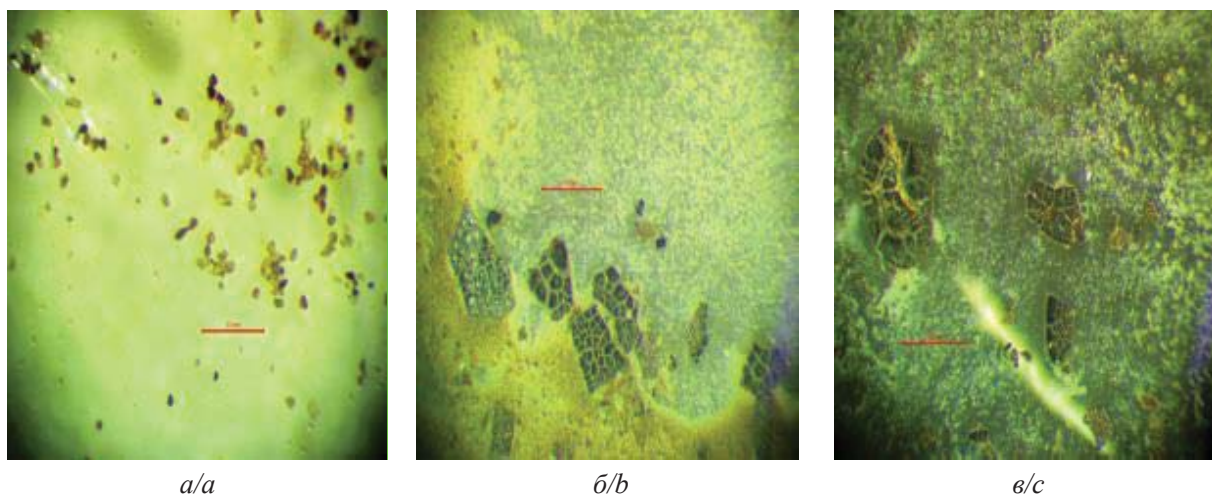
**Рис. 2.** Результаты проведения серии исследований № 1

**Fig. 2.** Results of the research series no. 1



**Рис. 3.** Результаты проведения серии исследований № 2

**Fig. 3.** Results of the research series no. 2



**Рис. 4.** Снимки растворённых асфальтосмолопарафиновых отложений, полученных в ходе серии исследований № 2 для фракции: а) <0,05; б) 0,25–0,05; в) 0,5–0,25 мм

**Fig. 4.** Images of dissolved asphalt-resin-paraffin deposits obtained during the series of studies no. 2 for a fraction: а) <0.05; б) 0.25–0.05; в) 0.5–0.25 mm

На рис. 4 представлены снимки растворённых в толуоле отложений парафина, полученных после серии исследований № 2. Для наглядности рассматривались опыты с наибольшей концентрацией песка в нефти, равной 15 %. Размерность частиц на снимках оценивалась с помощью масштабной красной линии.

Как видно на представленных снимках, при взаимодействии с частицами песка малой фракции парафин полностью растворяется в толуоле. В случае размерности фракции более 0,05 мм наблюдается связывание молекул парафина и частиц песка в комплексы. Стоит отметить, что комплексы, образованные при взаимодействии отложений с наибольшей фракцией песка, имеют более прочную структуру. Это связано с тем, что крупные частицы песка имеют большую площадь и шероховатость поверхности, за счёт чего увеличивается сила связывания с АСПО.

#### Заключение

В данной работе изучена зависимость интенсивности образования АСПО от добавления раз-

личных фракций песка в нефть. Определено, что добавление навески песка с равномерным распределением различных фракций незначительно влияет на интенсивность образования отложений парафина. По результатам дополнительных исследований можно сделать вывод, что фракции песка с диаметром от 0,05 до 0,5 мм при концентрациях 5 % и выше значительно увеличивают интенсивность образования АСПО. Помимо этого, проведён анализ АСПО после исследований с помощью микроскопа. На снимках наблюдается связывание молекул парафина с крупными частицами песка в комплексы, причём с увеличением фракции отмечается повышение их прочности. Полученные результаты могут быть использованы для повышения точности существующих моделей образования АСПО. Прикладным применением данной работы является оценка диаметров фракций породы, которые способны оказать влияние на образование парафиновых отложений. Также это способствует более пристальному изучению влияния состава нефти на образование отложений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – № 20. – P. 6673.
2. Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N. Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 5016.
3. Зарипова Л.М. Вибрационная очистка нефтесборных трубопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 1. – С. 28–31.
4. Thota Surya T., Onyeonuna C.C. Mitigation of wax in oil pipelines // *International Journal of Engineering Research and Reviews*. – 2016. – Vol. 4. – № 4. – P. 39–47.
5. Ilyushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of an approach for determining the effectiveness of inhibition of paraffin deposition on the wax flow loop laboratory installation // *Inventions*. – 2021. – Vol. 7. – № 1. – P. 3.
6. Мартюшев Д.А. Моделирование и прогнозирование отложений асфальтосмолопарафиновых веществ в нефтедобывающих скважинах // *Георесурсы*. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 86–92.
7. Иванова Л.В., Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. – 2011. – № 1. – С. 268–284.
8. Гуторов А.Ю., Петрова Л.В. Механизм и условия образования асфальтосмолопарафиновых отложений в условиях завершающей стадии разработки нефтяных месторождений // *Нефтепромысловое дело*. – 2014. – № 2. – С. 23–27.
9. Bidmus H.O., Mehrotra A.K. Solids deposition during “cold flow” of wax– solvent mixtures in a flow-loop apparatus with heat transfer // *Energy & Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – № 6. – P. 3184–3194.
10. Wax formation in oil pipelines: a critical review / A. Aiyejina, D.P. Chakrabarti, A. Pilgrim, M.K.S. Sastry // *International journal of multiphase flow*. – 2011. – Vol. 37. – № 7. – P. 671–694.
11. Соболева Е.В. Влияние забойного давления на отложения АСПВ, рекомендации по изменению режимов работы скважин с целью предотвращения АСПО на примере бобриковской залежи Уньвинского месторождения // *Нефтепромысловое дело*. – 2013. – № 8. – С. 46–51.
12. Люшин С.В., Репин Н.Н. О влиянии скорости потока на интенсивность отложения парафинов в трубах // *Сборник борьба с отложениями парафина*. – М.: Недра, 1965. – С. 340.
13. Прогнозирование проблем при добыче нефтей на основе анализа их химического состава и физико-химических свойств / Барская Е.Е., Ганеева Ю.М., Юсупова Т.Н., Даянова Д.И. // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2012. – Т. 15. – № 6. – С. 166–169.
14. Pipeline wax deposition modeling: a sensitivity study on two commercial software / G. Giacchetta, B. Marchetti, M. Leporini, A. Terenzi, D. Dall’Acqua, L. Capece, R.C. Grifoni // *Petroleum*. – 2019. – Vol. 5. – № 2. – P. 206–213.
15. Van der Geest C. Critical review on wax deposition in single-phase flow // *Fuel*. – 2021. – Vol. 293. – P. 120358.
16. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of a new model for the formation of wax deposits through the passage of crude oil within the well // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 12. – P. 9616.
17. Zhang X. The coarse particle influence on the strength of wax deposition // *International Pipeline Conference*. – Calgary, Canada, 2020. – Vol. 84454. – P. 9351–9358.
18. Leporini M. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 175. – P. 519–535.

19. Lekomtsev A. Designing of a washing composition model to conduct the hot flushing wells producing paraffin crude oil // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 217. – P. 110923.
20. Chi Y., Daraboina N., Sarica C. Effect of the flow field on the wax deposition and performance of wax inhibitors: cold finger and flow loop testing // *Energy & Fuels*. – 2017. – Vol. 31. – № 5. – P. 4915–4924.

### Информация об авторах

**Павел Юрьевич Илюшин**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. [ilushin-pavel@yandex.ru](mailto:ilushin-pavel@yandex.ru)

**Кирилл Андреевич Вяткин**, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. [kirill.vyatkin@girngm.ru](mailto:kirill.vyatkin@girngm.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

**Антон Вадимович Козлов**, аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. [anton.kozlov@girngm.ru](mailto:anton.kozlov@girngm.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

**Даниил Вячеславович Андреев**, лаборант-исследователь кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. [d.andreev@girngm.ru](mailto:d.andreev@girngm.ru)

Поступила в редакцию: 12.05.2023

Поступила после рецензирования: 31.05.2023

Принята к публикации: 06.12.2023

### REFERENCES

1. Nurgalieva K.S., Saychenko L.A., Riazi M. Improving the efficiency of oil and gas wells complicated by the formation of asphalt-resin-paraffin deposits. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 20, pp. 6673.
2. Rogachev M.K., Nguyen Van T., Aleksandrov A.N. Technology for preventing the wax deposit formation in gas-lift wells at offshore oil and gas fields in Vietnam. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16, pp. 5016.
3. Zaripova L.M. Vibration cleaning of oil-collecting pipelines. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2011, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.)
4. Thota Surya T., Onyeanuna C.C. Mitigation of wax in oil pipelines. *Int J Eng Res Rev*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 39–47.
5. Ilushin P., Vyatkin K., Kozlov A. Development of an approach for determining the effectiveness of inhibition of paraffin deposition on the wax flow loop laboratory installation. *Inventions*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 3.
6. Martyushev D.A. Modeling and prediction of asphaltene-resin-paraffinic substances deposits in oil production wells. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 86–92. (In Russ.)
7. Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N. Asphalt-resin-paraffin deposits in the processes of extraction, transport and storage. *Electronic scientific journal Oil and Gas business*, 2011, no. 1, pp. 268–284. (In Russ.)
8. Gutorov A.Yu., Petrova L.V. Mechanism and conditions of formation of asphalt-resin-paraffin deposits in the conditions of the final stage of oil field development. *Oilfield business*, 2014, no. 2, pp. 23–27. (In Russ.)
9. Bidmus H.O., Mehrotra A.K. Solids deposition during “cold flow” of wax-solvent mixtures in a flow-loop apparatus with heat transfer. *Energy & Fuels*, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 3184–3194.
10. Aiyejina A., Chakrabarti D.P., Pilgrim A., Sastry M.K.S. Wax formation in oil pipelines: a critical review. *International journal of multiphase flow*, 2011, vol. 37, no. 7, pp. 671–694.
11. Soboleva E.V. The impact of bottom-hole pressure on the deposits of ASF, recommendations for changing the operating modes of wells in order to prevent ASF on the example of the Bobrikovskaya deposit of the Unvinsky field. *Oilfield business*, 2013, no. 8, pp. 46–51. (In Russ.)
12. Lyushin S.V., Repin N.N. On the effect of flow velocity on the intensity of paraffin deposition in pipes. *Collection. Fight against paraffin deposits*. Moscow, Nedra Publ., 1965. pp. 340. (In Russ.)
13. Barskaya E.E., Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N., Dayanova D.I. Forecasting problems in oil production based on the analysis of their chemical composition and physico-chemical properties. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 6, pp. 166–169. (In Russ.)
14. Giacchetta G., Marchetti B., Leporini M., Terenzi A., Dall’Acqua D., Capece L., Grifoni R.C. Pipeline wax deposition modeling: a sensitivity study on two commercial software. *Petroleum*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 206–213.
15. Van der Geest C. Critical review on wax deposition in single-phase flow. *Fuel*, 2021, vol. 293, pp. 120358
16. Ilyushin P.Y., Vyatkin K.A., Kozlov A.V. Development of a new model for the formation of wax deposits through the passage of crude oil within the well. *Sustainability*, 2023, vol. 15, pp. 9616.
17. Zhang X. The coarse particle influence on the strength of wax deposition. *International Pipeline Conference*. Calgary, Canada, 2020. Vol. 84454, pp. V002T08A002.
18. Leporini M. On the numerical simulation of sand transport in liquid and multiphase pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 175, pp. 519–535.
19. Lekomtsev A. Designing of a washing composition model to conduct the hot flushing wells producing paraffin crude oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 217, pp. 110923.



20. Chi Y., Daraboina N., Sarica C. Effect of the flow field on the wax deposition and performance of wax inhibitors: cold finger and flow loop testing. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 5, pp. 4915–4924.

**Informations about the authors**

**Pavel Yu. Ilyushin**, Cand. Sc., Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. [ilushin-pavel@yandex.ru](mailto:ilushin-pavel@yandex.ru)

**Kirill A. Vyatkin**, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. [kirill.vyatkin@girngm.ru](mailto:kirill.vyatkin@girngm.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3464-1493>

**Anton V. Kozlov**, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. [anton.kozlov@girngm.ru](mailto:anton.kozlov@girngm.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2350-2153>

**Daniil V. Andreev**, Research Assistant, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russian Federation. [d.andreev@girngm.ru](mailto:d.andreev@girngm.ru)

Received: 12.05.2023

Revised: 31.05.2023

Accepted: 06.12.2023

УДК 620.92  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4458  
Шифр специальности ВАК: 01.03.17

## Влияние способа приготовления смесей пиролизной жидкости с углем на характеристики ее зажигания и горения

К.В. Слюсарский<sup>✉</sup>, А. Асильбеков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>✉</sup>slyuskonst@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность* исследования заключается в необходимости разработки технологических решений для повышения конкурентоспособности пиролизной переработки различных отходов. Сжигание пиролизной жидкости в составе смеси с углем является одним из подобных решений, позволяющим стабилизировать свойства полученного топлива и использовать его в стандартном энергетическом оборудовании. *Цель:* определение влияния способа приготовления смеси пиролизной жидкости и низкосортного угля на характеристики его зажигания и горения, а также на состав выделяющихся газофазных продуктов в зависимости от температуры греющей среды и концентрации добавки. *Методы.* Характеристики пиролиза и окисления исследовались с помощью термогравиметрического анализа, а расчет констант формальной кинетики – с помощью метода Коатс–Рэдферна. Образцы смесевых топлив готовились методами равномерного смешения и поверхностного смачивания пиролизной жидкости переработки резины и низкосортного угля. Характеристики зажигания и горения определились с использованием экспериментального стенда, а состав газофазных продуктов горения – с помощью проточного газоанализатора. *Результаты.* Были определены закономерности пиролиза и окисления пиролизной жидкости, а также значения констант формальной кинетики, свидетельствующие о физическом характере факторов, определяющих скорость данных процессов. Установлено, что при 600 °С зажигание исследованных смесей слабо зависело от концентрации пиролизной жидкости, в то время как при 700 и 800 °С зависимость носила линейный характер, причем различия между образцами, приготовленными по разным методикам, были несущественными. Для образцов, полученных методом поверхностного смачивания, горение добавки происходило в газовой фазе вблизи поверхности образца, в то время как для образцов, полученных методом равномерного смешения, оно осуществлялось преимущественно в объеме засыпки. Это приводило к более интенсивному и полному выгоранию угля в составе данных композиций за счет более равномерного тепловыделения и инициации частиц угля. Концентрационные кривые выделения NO, CO и CO<sub>2</sub> продемонстрировали аддитивный характер поведения компонент топливной смеси в отношении выделяющихся газофазных продуктов горения, а также отсутствие существенных нелинейных эффектов во всем исследованном диапазоне температур и концентраций добавки.

**Ключевые слова:** пиролизная жидкость, зажигание, газофазные продукты, равномерное смешение, поверхностное смачивание

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (проект № МК-2563.2022.1.2).

**Для цитирования:** Слюсарский К.В., Асильбеков А. Влияние способа приготовления смесей пиролизной жидкости с углем на характеристики ее зажигания и горения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 25–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4458

---

UDC 620.92  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4458

## Effect of preparation method of pyrolysis liquid mixed with coal on its ignition and combustion characteristics

K.V. Slyusarsky<sup>✉</sup>, A. Asilbekov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>✉</sup>slyuskonst@gmail.com

**Abstract. Relevance.** The need to develop technological solutions to increase the competitiveness of pyrolysis processing of various wastes. Combustion of pyrolysis liquid in a mixture with coal is one of these solutions, which makes it possible to stabilize the properties of the obtained fuel and use in standard energy equipment. **Aim.** To determine the influence of the method of preparing a mixture of pyrolysis liquid and low-grade coal on its ignition and combustion characteristics, as well as on composition of the released gas-phase products, depending on the temperature of heating medium and concentration of the additive. **Methods.** Pyrolysis and oxidation characteristics were studied using thermogravimetric analysis, and formal kinetic constants were calculated using the Coates–Radfern method. Samples of mixed fuels were prepared by the methods of homogeneous mixing and surface wetting of pyrolysis liquid of rubber processing and low-grade coal. Ignition and combustion characteristics were determined using an experimental stand, and composition of gas-phase combustion products was determined using once-through gas analyzer. **Results.** The authors have determined the features of pyrolysis and oxidation of the pyrolysis liquid as well as the values of formal kinetics constants, indicating the physical nature of the factors that defining the rate of these processes. It was found that at 600°C the ignition of the studied mixtures weakly depended on concentration of the additive, while at 700 and 800°C the dependence was linear, and the differences between the samples prepared using different methods were insignificant. For samples obtained by the method of surface wetting, combustion of the additive occurred in the gas phase near the surface of the sample. For the samples obtained by the method of uniform mixing, it occurred predominantly in the bulk of the backfill. This led to more intense and complete coal combustion in these compositions due to more uniform releasing of heat and initiation of coal particles. The concentration curves of the NO, CO and CO<sub>2</sub> release demonstrated, that behavior of the fuel mixture components was additive in terms of released gas-phase combustion products, as well as the absence of significant nonlinear effects over the entire studied range of temperatures and additive concentrations.

**Keywords:** pyrolysis liquid, ignition, gas-phase products, surface wetting, homogeneous mixing

**Acknowledgements:** The study was realized with financial support of Grant of the President of Russian Federation (project no. MK-2563.2022.1.2).

**For citation:** Slyusarsky K.V., Asilbekov A. Effect of preparation method of pyrolysis liquid mixed with coal on its ignition and combustion characteristics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 25–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4458

## Введение

Более широкое внедрение углерод-нейтральных топлив различного вида в современную энергетику является устойчивым трендом последних лет, связанным с необходимостью снижения выбросов парниковых газов в окружающую среду. В настоящее время биотопливо (в т. ч. отходы) обеспечивает порядка 10 % общемирового потребления первичной энергии, что составляет 56 ЭДж [1]. По прогнозам, к 2060 г. данное значение вырастет более чем в три раза. При этом следует отметить исключительные среди возобновляемых источников энергии стабильность и доступность данных топлив [2], что делает его особенно подходящим для целей теплоснабжения, преимущественно путем сжигания [3]. При этом основными ограничениями для их повсеместного и экономически целесообразного использования являются высокое содержание балласта и низкая энергоёмкость, что повышает стоимость транспортировки и ограничивает эффективный радиус энергоснабжения [3]. В связи с этим в последнее время все больший интерес привлекают технологии пиролизной переработки отходов и биомассы благодаря возможности получения продуктов с высокой добавленной стоимостью и энергоёмкостью [4]. Глубокая переработка указанных веществ позволит обеспечить их более широкое вовлечение в различные области энергетики, транспорта и промышленности для замещения ископаемых топлив [5].

В результате пиролиза формируются продукты в твердой, жидкой и газовой фазах, пригодные для использования в качестве энергетического топлива [6]. При этом их сжигание сопряжено с определенными проблемами, вызванными отличными от традиционных ископаемых топлив свойствами [7], в первую очередь – низкой теплотой сгорания и нестабильностью теплофизических свойств. Стабилизация указанных характеристик путем использования пиролизной жидкости в составе смесей с традиционным жидким топливом является распространенным техническим решением [8, 9], при этом в последнее время все больший интерес привлекают технологические решения по сжиганию данных веществ вместе с различными твердыми топливами. В литературе также отмечается, что применение смесевых топлив позволяет достигать синергетических эффектов в части неаддитивного снижения температур зажигания и повышения реакционной способности [10, 11]. При этом комплексность возникающих эффектов существенно усложняет определение характеристик полученных смесей.

В [12] указано, что температуры зажигания смесей кокса пиролизной переработки биомассы повышались при добавлении различных пиролизных жидкостей, при этом отмечалось неаддитивное поведение относительно свойств использованной добавки. При этом наблюдаемый эффект менялся в зависимости от метода исследования – для опреде-

ленных посредством термогравиметрии значений наблюдалась большая волатильность, чем для значений, полученных посредством измерений в муфельной печи. В [13] отмечается, что данные результаты могут быть вызваны преимущественно газофазным механизмом зажигания в печи в отличие от камеры термоанализатора. При этом смеси пиролизного масла с древесным углем зажигались при меньшей температуре, чем исходная жидкость, вне зависимости от использованного метода. Аналогичные результаты представлены в [14] для пеллетированных смесей древесного угля с пиролизной жидкостью при низких температурах, соответствующих условиям самовозгорания топлива при его хранении. Отмечалось, что содержание летучих было ключевым фактором, определяющим данную величину, причем влияние концентрации жидкого компонента на температуры зажигания и интенсивного горения было наиболее сильным, а соответствующая зависимость носила линейный характер. В [15] в ходе исследования влияния добавок пиролизной жидкости на реакционную способность кокса, полученного в результате термической конверсии отходов переработки древесины и пшеницы, было установлено, что характеристики древесного кокса практически не изменились, в то время как для кокса сельхозотходов наблюдалось существенное снижение скорости реакции. В [16] также отмечается сложный характер поведения смесей высокорекреационного угля с нефтью в диапазоне концентраций последней от 0 до 20 мас. %. Отмечалось, что минимальная температура зажигания достигалась для образцов с 10 мас. % добавки, максимальная интенсивность горения – для исходного угля без добавок, а наиболее полное выгорание – для образца с 25 мас. % нефти (при этом наибольшая зольность была зафиксирована для образца с 2 мас. % добавки). В [17] отмечается отсутствие явно выраженной зависимости между минимальной температурой зажигания, временем задержки зажигания смесей угля с различными фракциями пиролизной жидкости и теплотворной способностью полученной смеси.

Существует несколько возможных технологических решений для приготовления смесей на основе пиролизной жидкости и различного твердого топлива. Наиболее очевидным является параллельная подача разных топлив с использованием соответствующих горелок. Например, в [18] предлагается совместное сжигание обогащенной кальцием пиролизной жидкости в камерах сгорания, использующих твердое топливо, для снижения выбросов оксидов серы. При этом положительный эффект достигается за счет макроскопического взаимодействия между компонентами в топке, и синергетические эффекты не возникают. Достаточно проработ-

танным решением является применение смесей органических жидкостей совместно с углем и водой в составе органоводоугольных топлив [19]. Применительно к процессам их сжигания отмечается ряд неаддитивных относительно состава смеси эффектов в отношении времен задержки зажигания. В результате оценки влияния метода приготовления органоводоугольного топлива (в частности – продолжительности кавитационного воздействия [20]) было установлено, что оно существенно влияет на характеристики полученных топлив. Комплексность возникающих при этом процессов предопределила преимущественно эмпирический характер подобных исследований. В [12], в свою очередь, предлагается использовать смесь мелкодисперсного кокса и труднокипящей фракции, полученной в результате дистилляции пиролизной жидкости с содержанием последней до 60 мас. %. При этом отмечается сложный характер взаимодействия между компонентами подобных смесей, приводящих к возникновению синергетических эффектов в части изменения температур зажигания и полноты сгорания топлив. Аналогичные результаты приведены в [21] в отношении смесей четырех видов угля с органическим маслом в различной концентрации, полученных путем вымачивания угля до достижения предельной емкости. Отмечалось нелинейное снижение времен задержки зажигания и повышение полноты выгорания всех топлив. Наибольший эффект (как в абсолютном, так и относительно выраженности) наблюдался для каменного угля, величина добавки масла для которого была наименьшей. Другим возможным способом введения пиролизной жидкости в состав угольного топлива, предложенным в [22] применительно к слоевым котлам с подвижным шнеком, является её распыление по поверхности топлива перед его подачей в топку. Исследования по влиянию способа внесения жидкой фракции в состав смесевоего топлива на основе угля в литературе в настоящее время не представлены.

В связи со сказанным выше была сформулирована цель данной работы – проведение исследования влияния способа приготовления смесевоего топлива на основе угля и пиролизной жидкости на характеристики его зажигания и горения, а также на закономерности выделения газофазных продуктов горения.

## **Методика исследования**

### **Объект исследования**

В качестве низкорекреационного твердого топлива был выбран низкосортный уголь Красногорского месторождения (Кемеровская область). Данное топливо достаточно хорошо исследовано в контексте его поведения при зажигании и горении в со-

ставе смеси с жидкими продуктами пиролиза. Детально свойства данного топлива представлены в [23]. Основные характеристики приведены в табл. 1. Для экспериментальных исследований исходный образец топлива измельчался и просеивался через сито с размером ячейки 80 мкм. Образец пиролизной жидкости был получен в результате конденсации парогазовой смеси, выделяющейся в ходе медленного пиролиза измельченных покрышек в самоизолирующей среде остаточного воздуха. Свойства полученной жидкости определялись с помощью стандартных методик, используемых для жидких углеводородных топлив, приведенных в [24]. Значения основных характеристик свидетельствуют о том, что свойства полученной жидкости являются достаточно типичными для жидких продуктов переработки резинотехнических изделий. Следует отметить более высокую теплотворную способность пиролизной жидкости по сравнению с исследованным углем, что позволит получить большую температуру в ядре горения при совместном сжигании. Значительное содержание легколетучих веществ (с температурой кипения до 300 °С) также позволяет сделать вывод о его более высокой реакционной способности. Следует отметить относительно высокую зольность образца пиролизной жидкости, что связано с присутствием абляционных твердых частиц в составе выделяющихся парогазовых продуктов.

**Таблица 1.** Характеристики исследованных низкосортного угля и пиролизной жидкости

**Table 1.** Characteristics of the studied low-grade coal and pyrolysis liquid

Низкосортный уголь/Low-grade coal					
Влажность Moisture $W^a$	Зольность Ash content $A^d$	Выход летучих веществ Yield of volatile substances $V^{daf}$	Низшая теплота сгорания $Q_f^i$ , МДж/кг Lower calorific value $Q_f^i$ , MJ/kg		
мас. %/wt %					
2,1	17,7	7,2	24,8		
Элементный состав <sup>daf</sup> , мас. %/Elemental composition <sup>daf</sup> , wt %					
$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$	
84,9	1,7	1,5	0,2	11,7	
Пиролизная жидкость/Pyrolysis liquid					
Содержание воды Water content $W^a$	Зольность Ash content $A^d$	Температура вспышки Flash point	Фракционный состав, об. % Fractional composition, vol. %		
мас. %/wt %		°С	<300 °С	300–400 °С	>400 °С
0,9	5,8	82	10	20	70
Элементный состав <sup>daf</sup> , мас. %/Elemental composition <sup>daf</sup> , wt %					
$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$	
86,5	11,0	0,5	0,5	1,5	

### Термогравиметрический анализ

Для определения кинетических характеристик процессов пиролиза и окисления полученной пиролизной жидкости проводилось исследование с помощью термогравиметрического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия). Измерения проводились для навесок массой ~5 мг в температурном диапазоне 50–1000 °С при скорости нагрева 10 °С/мин в среде азота (для пиролиза) и воздуха (для окисления) с расходом 150 мл/мин. Кинетические параметры соответствующих процессов определялись с помощью метода Коатс–Рэдферна [25]:

$$\ln \left[ \frac{g(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left( \frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT},$$

где  $g(\alpha)$  – интегральный вид кинетической функции;  $\alpha$  – степень конверсии топлива;  $T$  – температура, К;  $A$  – предэкспоненциальный множитель, 1/с;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К);  $\beta$  – скорость нагрева, 1/с;  $E$  – энергия активации, Дж/моль.

Степень конверсии определялась по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{m_0 - m(t)}{m_0 - m_k},$$

где  $m_0$  – начальная масса образца, г;  $m(t)$  – масса образца в момент времени  $t$ , г;  $m_k$  – масса образца в конечный момент измерений (в данном случае данная масса равнялась массе образца в момент достижения 1000 °С), г.

### Экспериментальный стенд зажигания и горения

Характеристики зажигания и горения исследовались с помощью экспериментального стенда, включающего муфельную печь TSMP Ltd R14-U, высокоскоростную видеокамеру Photron FASTCAM CA4, а также проточный газоанализатор БОНЭР. Более детальное описание данной установки представлено в [24].

Экспериментальная процедура заключалась в следующем. Навеска топлива заданной массы (в данном исследовании равной ~2 мг) помещалась на предварительно охлажденный держатель координатного механизма. После этого включался привод и топливо помещалось в печь, предварительно прогретую до заданной температуры. Время задержки зажигания определялось как разница между моментами времени поступления образца в печь и его зажигания, фиксируемого по появлению свечения на его поверхности или в непосредственной близости от неё.

Смесь пиролизной жидкости с низкосортным углем приготавливалась двумя методами: путем

предварительного смешения до получения однородной смеси (метод равномерного смешения) и путем пропитки поверхности образца за счет помещения отдельных капель на её поверхность (метод поверхностного смачивания). Для первого метода смесь нужного состава предварительно готовилась и гомогенизировалась с помощью ступки и пестика. Масса приготавливаемой за раз партии топливной смеси выбиралась таким образом, чтобы количество жидкости, оставшейся на поверхности пестика, составляло не более 1 % от массы добавляемой пиролизной жидкости. Данный остаток определялся путем взвешивания ступки до и после приготовления топлива. Для второго метода внесение пиролизной жидкости заданной массы осуществлялось непосредственно на навеску топлива перед её поступлением в печь с помощью мерного шприца, специально откалиброванного для используемой жидкости. Были исследованы образцы с 5, 10 и 15 мас. % добавки пиролизной жидкости к низкосортному углю.

## Обсуждение результатов

### Характеристики пиролиза и окисления пиролизной жидкости

Полученные в результате термического анализа кривые убыли массы и скорости убыли массы для процессов окисления и пиролиза исследованной жидкости представлены на рис. 1. Полученные ТГ и ДТГ кривые процессов пиролиза (рис. 1, а) свидетельствуют об одностадийном характере убыли массы в ходе нагрева пиролизной жидкости в инертной среде. Убыль массы протекает в диапазоне температур 200–500 °С, при этом наиболее интенсивная убыль массы наблюдается в температурном диапазоне 300–450 °С. Процесс окисления (рис. 1, б) пиролизной жидкости протекает в две

стадии: первая протекает в диапазоне температур 50–250 °С, а вторая – в диапазоне 250–450 °С, практически идентичном температурному процессу пиролиза. При этом следует отметить, что максимальная скорость убыли массы при окислении – 4,5 мас. %/мин – более чем в два раза больше, чем при пиролизе – 9,8 мас. %/мин. Это связано с более поздней инициацией процесса, т. е. с его смещением в область более высоких температур. На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что процесс убыли массы в диапазоне температур 250–450 °С имеет одну и ту же природу и в окислительной, и в инертной среде, например, связанную с испарением пиролизной жидкости.

Значения энергии активации для процессов пиролиза и окисления, рассчитанные с использованием наиболее распространенных кинетических функций  $g(\alpha)$ , взятых согласно [26], представлены в табл. 2. Поскольку процесс пиролиза протекал в одну ярко выраженную стадию, а процесс окисления – в две, для экспериментов в инертной среде было определено одно значение энергии активации, а для экспериментов в воздухе – два. Для процесса пиролиза наибольшие значения коэффициента детерминации были получены для диффузионных моделей, предполагающих, что скорость процесса ограничивается внешней диффузией. Близкие значения были получены для кинетических моделей, предполагающих, что скорость процесса определяется выгоранием/снижением площади реакционной поверхности. Полученные для первой группы значения энергии активации варьируются в диапазоне 81–89 кДж/моль, для второй группы – 39–43 кДж/моль. Данные величины существенно ниже значений, характерных для химических реакций, – от 100 кДж/моль и выше, что позволяет сделать вывод о физическом характере данного процесса.

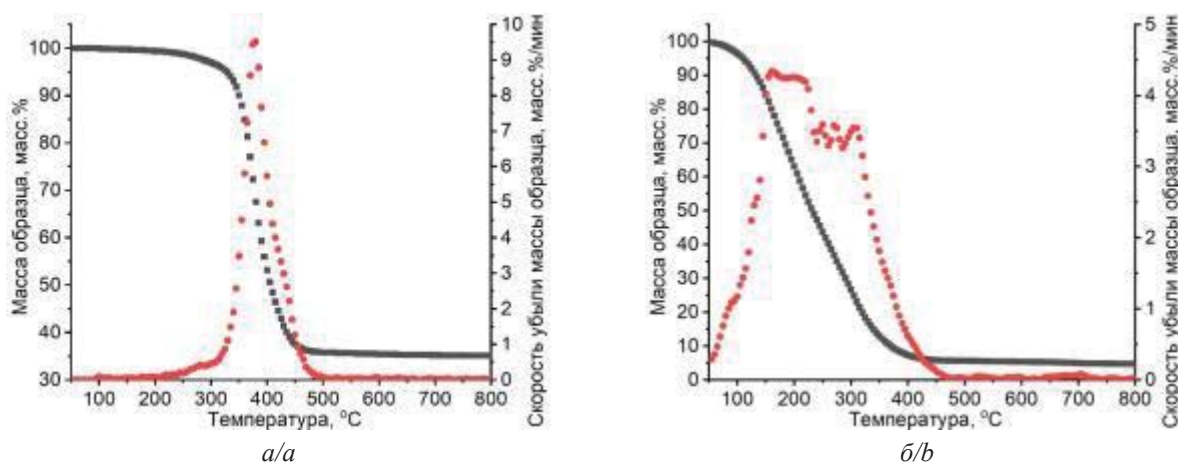


Рис. 1. ТГ и ДТГ кривые пиролиза (а) и окисления (б) пиролизной жидкости переработки резинотехнических изделий (■ – масса образца, ● – скорость убыли массы образца)

Fig. 1. TG and DTG curves for pyrolysis (a) and oxidation (b) of pyrolysis liquid of rubber materials (■ – sample mass, ● – mass loss rate)

**Таблица 2.** Значения энергии активации  $E$  и коэффициента детерминации  $R^2$  пиролиза и окисления использованной пиролизной жидкости для различных кинетических моделей

**Table 2.** Values of activation energy  $E$  and determination coefficient  $R^2$  of pyrolysis and oxidation of pyrolysis liquid studied at different kinetic models

Группа моделей Group of models	$g(\alpha)$	Пиролиз Pyrolysis		стадия окисления/oxidation stage			
		$E$ , кДж/моль kJ/mole	$R^2$	1		2	
				$E$ , кДж/моль kJ/mole	$R^2$	$E$ , кДж/моль kJ/mole	$R^2$
Каталитические Catalytic	$\alpha^{1/4}$	2,46	0,558	0,9	0,339	-7,5	0,954
	$\alpha^{1/3}$	6,05	0,794	3,5	0,829	-6,4	0,902
	$\alpha^{1/2}$	13,7	0,882	8,6	0,941	-4,2	0,658
	$\alpha^{3/2}$	58,6	0,928	39,4	0,980	9,1	0,538
Диффузионные Diffusional	$\alpha^2$	81,0	0,931	54,8	0,982	15,8	0,666
	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha)+\alpha$	84,4	0,922	58,2	0,991	27,0	0,819
	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$	89,2	0,909	62,5	0,997	49,0	0,941
Аврами-Ерофеев Avraami-Erofeev	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$	4,16	0,588	2,5	0,971	0,18	0,014
	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	8,44	0,750	5,5	0,993	3,85	0,804
	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	17,1	0,831	11,7	0,997	11,2	0,945
Кинетические Kinetic	$1-(1-\alpha)$	42,9	0,876	30,2	0,998	33,3	0,977
	$1-(1-\alpha)^{1/2}$	39,0	0,903	26,8	0,992	13,6	0,816
	$1-(1-\alpha)^{1/3}$	40,2	0,895	27,9	0,996	19,1	0,901

Внешний вид кривой убыли массы при пиролизе достаточно хорошо коррелирует с фракционным составом пиролизной жидкости, что выражается в согласованности между характерными температурами и значениями массы образца, полученным по результатам фракционного и термического анализа. Схожие значения энергии активации приведены в отношении пиролизной жидкости переработки резины [27] и органического масла [28], где они объясняются преобладающим вкладом крекинга и дистилляции органических компонент жидкости. В [28] также отмечается, что наибольшая точность была получена при использовании модели Авраами-Ерофеева, что подтверждает сделанный вывод о существенном вкладе процессов испарения в скорость убыли массы.

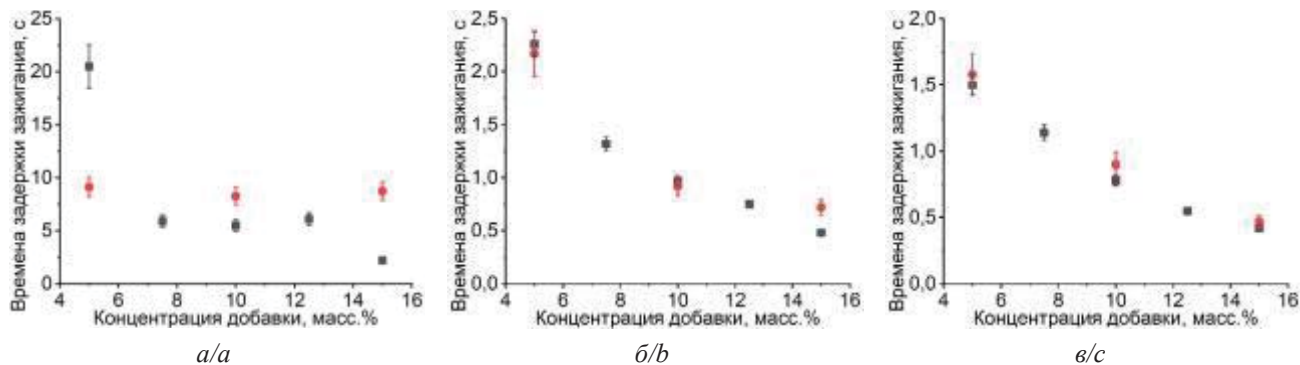
Аналогичные результаты были получены как для первой, так и для второй стадий процесса окисления. Наиболее высокие значения коэффициента детерминации были получены при использовании кинетической модели первого порядка с соответствующими значениями энергии активации, равными 30,2 и 33,3 кДж/кг для первой и второй стадий, соответственно. Также высокие значения  $R^2$  были получены при использовании диффузионных моделей и модели Авраами-Ерофеева, что вкупе с крайне низкими значениями энергии активации позволяет сделать аналогичный вывод о физическом характере факторов, лимитирующих скорость окисления. Близость значений энергии активации, полученных для первой и второй стадий окисления, свидетельствует о схожести их характеров. Аналогичные значения приведены в литературе в отношении аналогичной пиролизной жидкости [27] и продуктов нефтепереработки [29], что также объясняется лимитирующим характером процессов

крекинга и дистилляции пиролизной жидкости при горении.

#### **Характеристики зажигания исследованных смесей с различным методом нанесения**

Зависимости времен задержки зажигания образцов смесей пиролизной жидкости с низкорекреакционным углем, приготовленных методами равномерного смешения и поверхностного смачивания, от концентрации добавки при различной температуре греющей среды, варьруемой в диапазоне 600–800 °С, представлены на рис. 2.

Во всем исследованном диапазоне температур греющей среды наблюдалось относительно линейное снижение времен задержки зажигания при увеличении концентрации добавки и температуры греющей среды. Исключением является образец с 5 мас. % добавки пиролизной жидкости, приготовленный методом равномерного смешения при 600 °С, что связано с недостаточным тепловыделением при горении добавки, не позволяющим инициировать зажигание образца. Практически постоянные времена задержки зажигания при 600 °С для образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания, свидетельствуют о том, что полученные значения в большей степени характеризуют поведение пиролизной жидкости, а не смеси. Аналогичное поведение наблюдается и для образцов, приготовленных методом равномерного смешения, в диапазоне концентраций добавки 7,5–12,5 мас. %. Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными [23, 24], свидетельствующими о более сложном характере поведения аналогичных смесей при низких температурах, определяемых процессами испарения и диффузии жидкофазной компоненты.

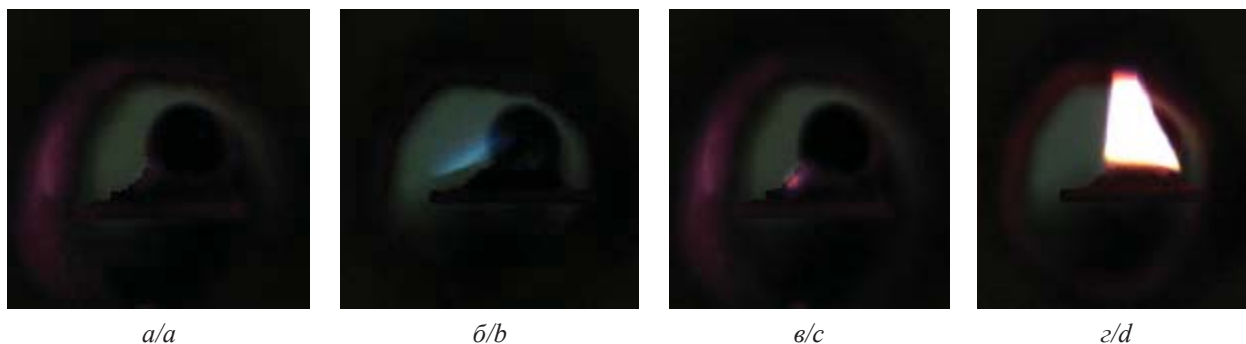


**Рис. 2.** Зависимость времени задержки зажигания смесей низкорекреационного угля с пиролизной жидкостью, приготовленных двумя методами, от концентрации добавки при различной температуре греющей среды: а) 600; б) 700; в) 800 °С (■ – образцы, приготовленные методом равномерного смешения, ● – образцы, приготовленные методом поверхностного смачивания)

**Fig. 2.** Dependence of ignition delay time of low-reactivity coal mixed with pyrolysis oil via two methods on additive concentration at various temperatures of heating medium: a) 600; b) 700; c) 800°C (■ – samples prepared by homogeneous mixing method, ● – sample prepared by surface wetting method)

Следует отметить, что при 700 и 800 °С различия между значениями времен задержки зажигания для образцов, приготовленных различными способами, практически отсутствовали, а зависели лишь от концентрации добавки в смеси. При этом следует отметить лучшую повторяемость результатов для образцов, приготовленных методом равномерного смешения, выраженную в меньшей величине доверительного интервала. Также при использовании данного метода наблюдалась более стабильная инициация горения угля. В частности, почти все образцы, приготовленные данным методом, горели более интенсивно, чем исходный уголь. В то же время для образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания, времена выгорания практически не отличались от таковых для исходного угля. Это связано с неравномерным тепловыделением при зажигании и горении добавки, внесенной методом поверхностного смачивания, которое инициирует зажигание угля только в локальной

области вблизи места её внесения (рис. 3, б), в то время как при равномерном смачивании образцов тепловыделение осуществлялось более равномерно (рис. 3, а). Также видно, что горение пиролизной жидкости для смоченных образцов происходит в газовой фазе вдали от угля (рис. 3, з), что приводит к существенному рассеиванию теплоты в окружающую среду. В то же время для пропитанных образцов горение протекает преимущественно в объеме засыпки (рис. 3, в). Наблюдаемые эффекты коррелируют с данными термического анализа в отношении пиролиза и окисления пиролизной жидкости, которые свидетельствуют о физическом характере факторов, определяющих скорость соответствующих процессов. Анализ кадров горения позволяет сделать вывод о том, что в обоих случаях пиролизная жидкость испаряется и горит в газовой фазе, а определяющим фактором являются условия теплообмена между пламенем и частицами угля.



**Рис. 3.** Характерные кадры зажигания (а, б) и горения (в, з) образцов, приготовленных методами равномерного смешения (а, в) и поверхностного смачивания (б, з) при 600 °С

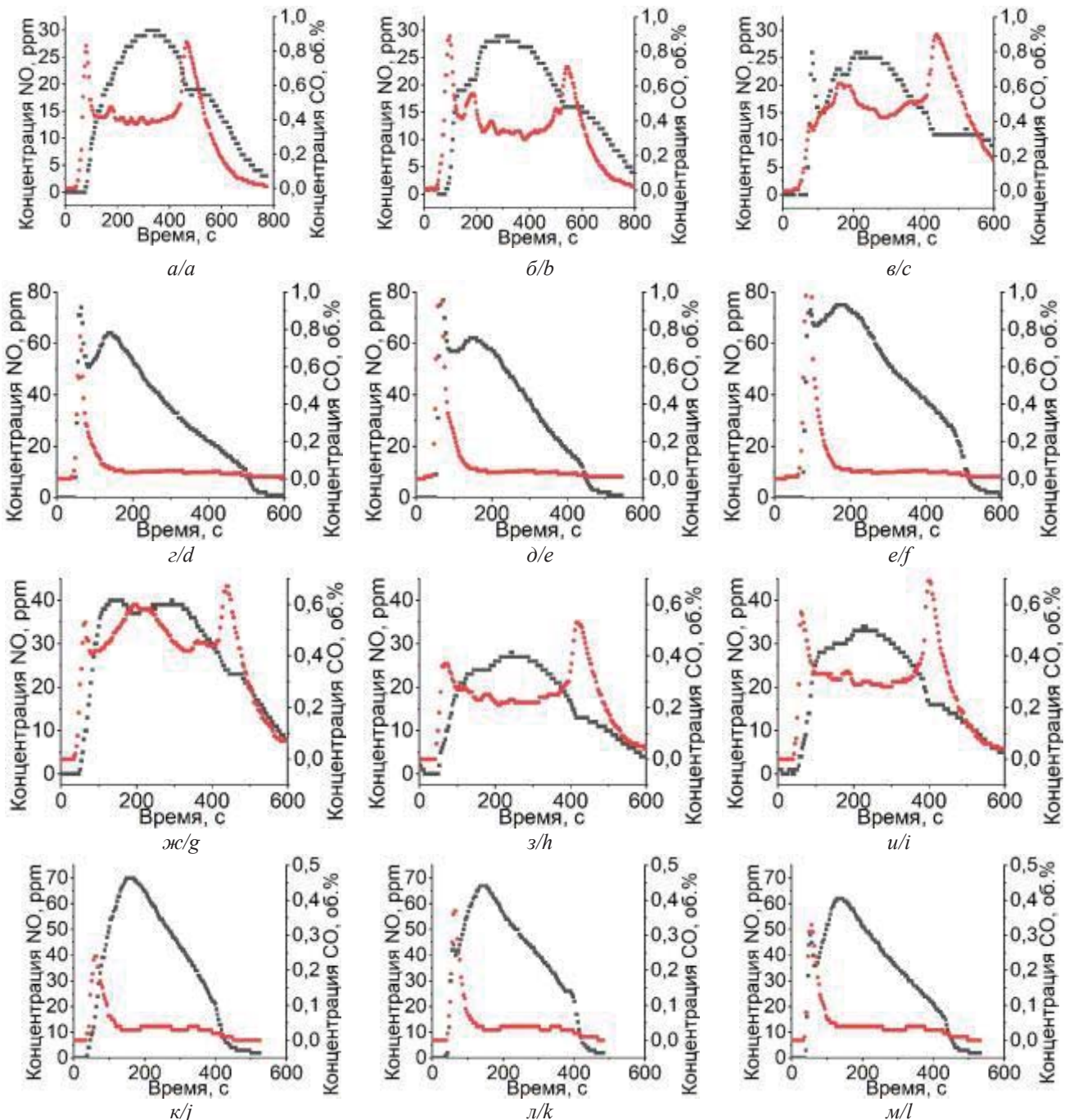
**Fig. 3.** Typical images of ignition (a, b) and combustion (c, d) of samples, which were prepared by homogeneous mixing (a, c) and surface wetting (b, d) methods at 600°C



**Закономерности выделения газофазных продуктов горения исследованных смесей с различным методом нанесения**

Закономерности выделения газофазных продуктов при горении смесей низкосортного угля с пи-

ролизной жидкостью различного состава на примере концентрационных кривых выделения CO и NO приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Концентрационные кривые выделения CO и NO при горении смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью при 600 °С (а, б, в, ж, з, и) и 800 °С (г, д, е, к, л, м), приготовленных методами равномерного смешения (а–е) и поверхностно пропитки (ж–л), при различной концентрации компонент: 5 мас. % – а, г, ж, к; 10 мас. % – б, д, з, л; 15 мас. % – в, е, и, м (■ – концентрация NO, ● – концентрация CO)

**Fig. 4.** Concentration curves of CO and NO release during combustion of low-grade coal mixed with pyrolysis liquid at 600°C (a, b, c, g, h, i) and 800°C (d, e, f, j, k, l) prepared by homogeneous mixing (a–f) and surface wetting (g–l) methods with different concentration of components: 5 wt % – a, d, g, j; 10 wt % – b, e, h, k; 15 wt % – c, f, i, l (■ – concentration of NO, ● – concentration of CO)

Полученные результаты так же, как и данные измерения времен задержки зажигания, свидетельствуют об относительно аддитивном поведении компонент исследованных смесей при 600 °С. Наиболее ярко это иллюстрируется формой кривых выделения CO, причем наблюдалось для всех исследованных значений концентраций добавок и методов приготовления смесей. Явно выделяются отдельные концентрационные пики, соответствующие зажиганию и горению сначала пиролизной жидкости (первый пик), а потом – низкосортного угля (второй пик). При этом значения пиковых концентраций слабо коррелировали с величиной добавки пиролизной жидкости. При 800 °С наблюдался только один пик выделения CO, в начальный момент, соответствующий зажиганию пиролизной жидкости в составе топлива. При этом второй пик, соответствующий горению низкосортного угля, отсутствовал. Это соответствует сделанному ранее выводу о наличии взаимодействия между пиролизной жидкостью и низкосортным углем при температурах греющей среды 700 и 800 °С, заключающегося в инициации зажигания последнего. В результате уголь горит при высокой температуре, что обуславливает минимальное образование оксидов углерода. При этом в случае приготовления смешанного топлива методом равномерного смешения наблюдалось незначительное остаточное выделение CO в конце процесса, после сгорания основного объема пиролизной жидкости, вероятно, связанное с его выделением из пор и внутренних полостей частиц угля. При этом для образцов, приготовленных методом равномерного смешения, наблюдалось кратно (в 1,5–2 раза) меньшее выделение CO при всех температурах греющей среды в исследованном диапазоне концентраций добавки по сравнению с образцами, полученными методом поверхностного смачивания. Это связано с более равномерным распределением тепловыделения по объему засыпки образца и, как результат, более полным окислением оксида углерода (рис. 3). Также следует отметить, что интенсивность выделения CO при 800 °С, выраженная в величине максимальной концентрации для первого пика, была достаточно близка к соответствующим значениям при 600 °С. Это может свидетельствовать о физическом характере процесса, определяющего скорость выделения оксидов углерода, что достаточно хорошо коррелирует со сделанным в результате термического анализа выводом о природе процесса пиролиза и окисления пиролизной жидкости.

Следует отметить, что закономерности выделения NO существенно отличались от описанных ранее закономерностей выделения оксидов углерода. Это связано с низким содержанием топливного азота как в низкосортном угле, так и в пиролизной

жидкости. В таком случае выделяющиеся оксиды были сформированы преимущественно по термическому механизму, т. е. их концентрация сильно зависит от температуры в ядре горения образца. Это подтверждается более высокими средними и максимальными концентрациями оксидов азота для экспериментов, проведенных в условиях более высокой температуры греющей среды, а также аналогичным видом соответствующих концентрационных кривых. При этом следует отметить, что для образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания, концентрационные кривые выделения оксидов азота имели ярко выраженный пик в начальной стадии процесса, соответствующей зажиганию и горению пиролизной жидкости с образованием высокотемпературного пламени, сформированном на удалении от поверхности угля. Это хорошо коррелирует с кадрами высокоскоростной видеосъемки (рис. 3), свидетельствующей о выделении и горении пиролизной жидкости в качестве независимой компоненты. На концентрационных кривых выделения NO, полученных для сжигания образцов, приготовленных методом равномерного смешения, не наблюдалось присутствие отдельных пиков. Вместо этого данная кривая была представлена единственным широким профилем выделения NO, что связано с более равномерным прогревом образца. Следует отметить, что для данных образцов выделение оксидов азота было менее интенсивным (в среднем на 10–15 %), что в целом свидетельствует о меньших температурах горения образцов, связанных с меньшей скоростью горения гомогенной смеси по сравнению с быстрым газофазным горением пиролизной жидкости образца, приготовленного методом поверхностного нанесения.

### Заключение

Были синтезированы образцы пиролизной жидкости, полученной за счет конденсации парогазовой смеси, выделяющейся при нагреве в инертной среде резины автомобильных покрышек. Определены характеристики процессов пиролиза и окисления полученной жидкости в условиях термогравиметрического анализа. Установлено, что процесс пиролиза протекает в одну стадию с энергией активации, варьирующейся в диапазоне 40–90 кДж/моль, в зависимости от вида используемой кинетической функции, в то время как окисление протекало в две стадии со значениями активации, варьируемыми в диапазоне 20–50 кДж/моль для обеих стадий. Полученные значения свидетельствуют о физическом характере процессов, определяющих скорость пиролиза и окисления исследованной жидкости, таких как испарение и диффузия. Данные выводы позволяют сделать заключение о том, что пиролизная жидкость испаряется, диффундирует и сгорает в газовой фазе.

Данный механизм характерен для многих традиционных жидких топлив.

Установлены закономерности зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью в диапазоне концентраций последней от 0 до 15 мас. %, приготовленных двумя методами – равномерного смешения и поверхностного смачивания. Установлено, что при 600 °С компоненты смеси не взаимодействуют, а зажигание пиролизной жидкости, возникающее на ранней стадии процесса нагрева, практически не зависит от концентрации данной добавки в смеси. Особенно ярко данное поведение проявлялось для образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания. При 700 и 800 °С имело место аддитивное, линейное снижение времен задержки зажигания в зависимости от концентрации пиролизной жидкости в смеси, причем различия между образцами, приготовленными различными методами, были несущественными. Кадры видеосъемки процесса зажигания образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания при 600 °С, свидетельствовали о формировании ярко выраженного пламени горения пиролизной жидкости в удалении от объема засыпки. Для образца, приготовленного методом равномерного смешения, ядро горения располагалось в объеме засыпки, а выгорание и пиролизной жидкости, и низкосортного угля протекало более равномерно.

Получены и проанализированы концентрационные кривые выделения оксидов азота и углерода при горении приготовленных смесей. При 600 °С наблюдалось формирование двух отдельных стадий выделения CO, характеризующее независимое поведение пиролизной жидкости и низкосортного угля при нагреве, в то время как при более высоких температурах наблюдалось совместное действие, выраженное в снижении концентрации выделяющегося оксида углерода на стадии догорания твердого топлива. Выделение оксидов азота протекало в одну стадию для образцов, приготовленных методом равномерного смешения, и в несколько стадий для образцов, приготовленных методом поверхностного смачивания. Это связано с формированием дополнительной высокотемпературной области в пламени горения пиролизной жидкости, что приводило к стадийному характеру выделения NO. В то же время образцы, приготовленные методом равномерного смешения, горели более равномерно, что приводило к формированию одного ярко выраженного пика выделения NO. Величины выбросов и оксидов углерода, и оксидов азота были значительно ниже для образцов, приготовленных методом равномерного смешения, за счет более равномерного тепловыделения при их горении во всем исследованном диапазоне температур и концентраций добавок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scarlat N., Dallemand J.-F. Future role of bioenergy // *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*. – London: Elsevier, 2019. – P. 435–547.
2. Ruiz-Mercado G.J., Segovia-Hernández J.G., Castro-Montoya A.J. Transformation towards sustainable bioenergy systems // *Clean Technologies and Environmental Policy*. – 2018. – Vol. 20. – № 7. – P. 1385–1385.
3. A profitability index for rural biomass district heating systems evaluation / V.M. Soltero, G. Quirosa, D. Rodríguez, M.E. Peralta, C. Ortiz, R. Chacartegui // *Energy*. – 2023. – Vol. 282. – P. 128395.
4. Recent advances, current issues and future prospects of bioenergy production: a review / T. Liu, P. Miao, Y. Shi, K.H.D. Tang, P.S. Yap // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 810. – P. 1–15.
5. Biomass for energy in the EU – the support framework / M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola, J.F. Dallemand // *Energy Policy*. – 2019. – Vol. 131. – P. 215–228.
6. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems / M. Balat, M. Balat, E. Kırtay, H. Balat // *Energy Conversion and Management*. – 2009. – Vol. 50. – № 12. – P. 3147–3157.
7. Beran M., Axelsson L.-U. Development and experimental investigation of a tubular combustor for pyrolysis oil burning // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014*. – Dusseldorf: International Gas Turbine Institute, 2014. – Vol. 137. – P. 1–9. DOI: 10.1115/1.4028450/
8. Performance of binary and ternary blends of gasoline, pyrogasoline and ethanol in spark ignition engines / L. Duraã, J. Costa, M. Gonçalves, F.P. Brito, J. Martins // *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*. – 2022. – Vol. 15. – № 2/3/4. – P. 95–111.
9. Kareddula V.K., Puli R.K. Influence of plastic oil with ethanol gasoline blending on multi cylinder spark ignition engine // *Alexandria Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 57. – № 4. – P. 2585–2589.
10. Preparation of biochar via dry torrefaction of wood meal in a batch reactor under pressure and its co-combustion behavior with anthracite coal / W. Yang, F. Yang, X. Zhang, P. Zhu, H. Peng, Z. Chen, L. Che, S. Zhu, S. Wu // *BioResources*. – 2020. – Vol. 16. – № 1. – P. 997–1008.
11. Li H., Xia S., Ma P. Thermogravimetric investigation of the co-combustion between the pyrolysis oil distillation residue and lignite // *Bioresource Technology*. – 2016. – Vol. 218. – P. 615–622.
12. A review on bioslurry fuels derived from bio-oil and biochar: Preparation, fuel properties and application / H. Chen, H. Xu, H. Zhu, S. Yan, S. Zhang, H. Zhang, X. Guo, X. Hu, W. Gao // *Fuel*. – 2024. – Vol. 355. – P. 129283.
13. Gao W., Zhang M., Wu H. Ignition temperatures of various bio-oil based fuel blends and slurry fuels // *Fuel*. – 2017. – Vol. 207. – P. 240–243.
14. On the self-heating behavior of upgraded biochar pellets blended with pyrolysis oil: effects of process parameters / L. Riva, A. Cardarelli, G.J. Andersen, T.V. Buø, M. Barbanera, P. Bartocci, F. Fantozzi, H.K. Nielsen // *Fuel*. – 2020. – Vol. 278. – P. 118395.

15. Contribution to the understanding of secondary pyrolysis of biomass-based slurry under entrained-flow gasification conditions / P. Stoesser, J. Ruf, R. Gupta, N. Djordjevic, T. Kolb // *Energy & Fuels*. – 2016. – Vol. 30. – № 8. – P. 6448–6457.
16. Oxidation characteristics and active group evolution of oil-immersed coal / Q. Ruxiang, Z. Liang, G. Yu, H. Youwei // *Environmental Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 80. – № 12. – P. 433.
17. Utilization of different fractions of pyrolysis water in coal water fuel for additional heat recovery / A.Z. Kaltaev, K.V. Slyusarskiy, M.V. Kirgina, I.A. Bogdanov, K.B. Larionov // *Waste and Biomass Valorization*. – 2022. – Vol. 14. – P. 989–1003.
18. Co-firing of bio-oil with simultaneous SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> reduction / R.H. Venderbosch, B.M. Wagenaar, E. Gansekoele, S. Sotirchos, H.D.T. Moss // *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. – 2001. – Vol. 131. – P. 1586–1602.
19. Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. Органоводугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 10. – С. 31–41. DOI: 10.1134/S0040363616100039/
20. Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводугольных топлив // *Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика*. – 2013. – № 5. – P. 39–47.
21. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up / D.V. Feoktistov, D.O. Glushkov, A.E. Nurpeis, E.G. Orlova, A.S. Samoilo, A.M. Zhizhaev, A.V. Zhuikov // *Fuel Processing Technology*. – 2022. – Vol. 236. – P. 107422.
22. Activation of anthracite combustion by copper acetate: mechanism, effect of particle size and introduction method / K.B. Larionov, I. V. Mishakov, N.I. Berezikov, A.S. Gorshkov, A.Z. Kaltaev, K.V. Slyusarskiy, A.S. Ruban, A.A. Vedyagin // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2023. – Vol. 10. – № 1. – P. 13–31.
23. Activation of anthracite combustion using pyrolysis oil from thermal conversion of waste car tires / K.B. Larionov, K.V. Slyusarskiy, S.A. Tsibulskiy, A.Z. Kaltaev, N.I. Berezikov, A.S. Gorshkov, S.V. Lavrinenko, V.E. Gubin // *ACS Omega*. American Chemical Society. – 2021. – Vol. 6. – № 30. – P. 19731–19739.
24. Исследование закономерностей окисления и зажигания смесей пиролизной жидкости с низкорекционным углем / К.В. Слюсарский, К.Б. Ларионов, А. Асильбеков, М.К. Шуатаев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – P. 140–150. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3913
25. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // *Nature*. – 1964. – Vol. 201. – № 4914. – P. 68–69.
26. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data / S. Vyazovkin, A.K. Burnham, J.M. Criado, L.A. Pérez-Maqueda, C. Popescu, N. Sbirrazzuoli // *Thermochimica Acta*. – 2011. – Vol. 520. – № 1–2. – P. 1–19.
27. Thermal decomposition characteristics of the tire pyrolysis oil derived from a twin-auger reactor: Study of kinetics and evolved gases / F. Campuzano, J. Ordonez, J.D. Martínez, A.F. Agudelo, S.M. Sarathy, W.L. Roberts // *Fuel*. – 2023. – Vol. 338. – P. 127448.1-11.
28. Catalytic pyrolysis of waste cooking oil for hydrogen-rich syngas production over bimetallic Fe-Ru/ZSM-5 catalyst / L. Xu, Y. Li, M. Liao, Q. Song, C. Wang, J. Weng, M. Zhao, N. Gao // *Fuel Processing Technology*. – 2023. – Vol. 247. – P. 107812.1-10.
29. Sharikov F.Yu., Rudko V.A., Smyshlyaeva K.I. Oxidation thermolysis kinetics of asphaltenes with various chemical prehistory // *Thermochimica Acta*. – 2023. – Vol. 726. – P. 179550.1-8.

### Информация об авторах

**Константин Витальевич Слюсарский**, кандидат физико-математических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутанова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. slyuskonst@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-9732-9093>

**Аскар Асильбеков**, инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. aka2@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3100-4261>

Поступила в редакцию: 31.10.2023

Поступила после рецензирования: 13.11.2023

Принята к публикации: 20.12.2023

### REFERENCES

1. Scarlat N., Dallemand J.-F. Future role of bioenergy. *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*. Eds. C. Lago, N. Caldes, Y. Lechon. London, Elsevier, 2019. pp. 435–547.
2. Ruiz-Mercado G.J., Segovia-Hernández J.G., Castro-Montoya A.J. Transformation towards Sustainable Bioenergy Systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2018, vol. 20, pp. 435–547.
3. Soltero V.M., Quirosa G., Rodríguez D., Peralta M.E., Ortiz C., Chacartegui R. A profitability index for rural biomass district heating systems evaluation. *Energy*, 2023, vol. 282, pp. 128395. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128395.
4. Liu T., Miao P., Shi Y., Tang K.H.D., Yap P.S. Recent advances, current issues and future prospects of bioenergy production: a review. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 810. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.152181.
5. Banja M., Sikkema R., Jégard M., Motola V., Dallemand J.F. Biomass for energy in the EU – the support framework. *Energy Policy*, 2019, vol. 131, pp. 215–228. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2019.04.038.
6. Balat M., Balat M., Kirtay E., Balat H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 3147–3157. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.08.014.
7. Beran M., Axelsson L.-U. Development and experimental investigation of a tubular combustor for pyrolysis oil burning. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014*. Dusseldorf, International Gas Turbine Institute, 2014. pp. 1–9.

8. Duraã L., Costa J., Gonçalves M., Brito F.P., Martins J. Performance of binary and ternary blends of gasoline, pyrogasoline and ethanol in spark ignition engines. *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, 2022, vol. 15, pp. 95–105. DOI: 10.1504/PIE.2022.125578.
9. Kareddula V.K., Puli R.K. Influence of plastic oil with ethanol gasoline blending on multi cylinder spark ignition engine. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, pp. 2585–2589. DOI: 10.1016/j.aej.2017.07.015.
10. Yang W., Yang F., Zhang X., Zhu P., Peng H., Chen Z., Che L., Zhu S., Wu S. Preparation of biochar via dry torrefaction of wood meal in a batch reactor under pressure and its co-combustion behavior with anthracite coal. *BioResources*, 2020, vol. 16, pp. 997–1008. DOI: 10.15376/biores.16.1.997-1008.
11. Li H., Xia S., Ma P. Thermogravimetric investigation of the co-combustion between the pyrolysis oil distillation residue and lignite. *Bioresource Technology*, 2016, vol. 218, pp. 615–622. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.104.
12. Chen H., Xu H., Zhu H., Yan S., Zhang S., Zhang H., Guo X., Hu X., Gao W. A review on bioslurry fuels derived from bio-oil and biochar: preparation. Fuel properties and application. *Fuel*, 2024, vol. 355, pp. 129283.1-12. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129283.
13. Gao W., Zhang M., Wu H. Ignition temperatures of various bio-oil based fuel blends and slurry fuels. *Fuel*, 2017, vol. 207, pp. 240–243. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.06.090.
14. Riva L., Cardarelli A., Andersen G.J., Buø T.V., Barbanera M., Bartocci P., Fantozzi F., Nielsen H.K. On the self-heating behavior of upgraded biochar pellets blended with pyrolysis oil: effects of process parameters. *Fuel*, 2020, vol. 278, pp. 118395.1-10. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118395.
15. Stoesser P., Ruf J., Gupta R., Djordjevic N., Kolb T. Contribution to the understanding of secondary pyrolysis of biomass-based slurry under entrained-flow gasification conditions. *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30, pp. 6448–6457. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00935.
16. Ruxiang Q., Liang Z., Yu G., Youwei H. Oxidation characteristics and active group evolution of oil-immersed coal. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, pp. 433–445. DOI: 10.1007/s12665-021-09671-x.
17. Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Kirgina M. V., Bogdanov I.A., Larionov K.B. Utilization of different fractions of pyrolysis water in coal water fuel for additional heat recovery. *Waste and Biomass Valorization*, 2022. DOI: 10.1007/s12649-022-01913-8.
18. Venderbosch R.H., Wagenaar B.M., Ganskoole E., Sotirchos S., Moss H.D.T. Co-firing of bio-oil with simultaneous SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> reduction. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. Eds. A.V. Bridgwater. Aston, Wiley, 2001. pp. 1586–1602.
19. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: problems and advances (review). *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, pp. 707–717. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0040601516100037.
20. Arkhipov V.A., Sidor A.M., Surkov V.G. Study on the physical-chemical and energy characteristics of organic water coal fuels. *Tekhnicheskaya teplofizika i promishlennaya teploenergetika*, 2013, no. 5, pp. 39–47. (In Russ.)
21. Feoktistov D.V., Glushkov D.O., Nurpeiis A.E., Orlova E.G., Samoilo A.S., Zhizhaev A.M., Zhuikov A.V. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 236, pp. 107422. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107422.
22. Larionov K.B., Mishakov I. V., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Ruban A.S., Vedyagin A.A. Activation of anthracite combustion by copper acetate: mechanism, effect of particle size and introduction method. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2023, vol. 10, pp. 13. DOI: 10.1007/s40789-023-00573-w.
23. Larionov K.B., Slyusarskiy K.V., Tsibulskiy S.A., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Lavrinenko S.V., Gubin V.E. Activation of anthracite combustion using pyrolysis oil from thermal conversion of waste car tires. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, pp. 19731–19739. DOI: 10.1021/acsomega.1c02404.
24. Slyusarskiy K.V., Larionov K.B., Asilbekov A.K., Shuataev M.K. Study on oxidation and ignition of mixtures of pyrolysis liquids with low-reactivity coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 140–150. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3913.
25. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*, 1964, vol. 201, pp. 68–69. DOI: 10.1038/201068A0.
26. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Pérez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 520, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.tca.2011.03.034.
27. Campuzano F., Ordóñez J., Martínez J.D., Agudelo A.F., Sarathy S.M., Roberts W.L. Thermal decomposition characteristics of the tire pyrolysis oil derived from a twin-auger reactor: Study of kinetics and evolved gases. *Fuel*, 2023, vol. 338, pp. 127448.1-11. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127248.
28. Xu L., Li Y., Liao M., Song Q., Wang C., Weng J., Zhao M., Gao N. Catalytic pyrolysis of waste cooking oil for hydrogen-rich syngas production over bimetallic Fe-Ru/ZSM-5 catalyst. *Fuel Processing Technology*, 2023, vol. 247, pp. 107812.1-10. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107812.
29. Sharikov F.Yu., Rudko V.A., Smyshlyaeva K.I. Oxidation thermolysis kinetics of asphaltenes with various chemical prehistory. *Thermochimica Acta*, 2023, vol. 726, pp. 179550.1-8. DOI: 10.1016/j.tca.2023.179550.

### Information about the authors

**Konstantin V. Slyusarsky**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. slyuskonst@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-9732-9093>  
**Askar Asilbekov**, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. aka2@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3100-4261>

Received: 31.10.2023

Revised: 13.11.2023

Accepted: 20.12.2023

УДК 631.618  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196  
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

## Возможность рекультивации золоотвалов

Л.И. Худякова<sup>✉</sup>, Н.М. Гаркушева, И.Ю. Котова, П.Л. Палеев

*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, г. Улан-Удэ*

<sup>✉</sup>lkhud@binm.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Улан-Удэ, которые негативно воздействуют на окружающую среду. Перспективным способом устранения экологического вреда является биологическая рекультивация золоотвалов, результат которой проявляется в озеленении отвалов и снижении дефляции золы. **Цель:** изучить золошлаковые отходы теплоэлектроцентралей г. Улан-Удэ и установить возможность рекультивации золоотвалов для снижения негативного воздействия на окружающую среду. **Объекты:** золошлаковые отходы из золоотвалов ТЭЦ-1 (ЗШО-1) и ТЭЦ-2 (ЗШО-2) г. Улан-Удэ. **Методы:** химический, рентгенофазовый, гранулометрический, микроскопический методы анализа. **Результаты.** Определен химический, минералогический и зерновой составы золошлаковых отходов теплоэлектроцентралей. Установлено, что они имеют высокое содержание кремния, алюминия и низкое – кальция, магния. Отмечено, что золошлаки содержат стекловидные, кристаллические и органические составляющие. В отходах в большей степени присутствует кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит и в меньшей – стеклофаза, представленная в основном минералами группы ортоклаза. По гранулометрическому составу в отходах ТЭЦ-1 преобладает более мелкая фракция по сравнению с ТЭЦ-2. Проведены лабораторные исследования почвенных смесей на основе золошлаковых отходов и местных мелиорантов (осадки сточных вод, лигнин и куриный помет). Определено оптимальное соотношение компонентов почвогрунта, равное 4:1:1:1. Выявлено благоприятное воздействие осадков сточных вод, а также негативное влияние высоких доз птичьего помета на рост и развитие растений. Отмечено, что чистые золошлаки ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 без внесения мелиорантов могут выступать в качестве самостоятельного субстрата для многолетних трав.

**Ключевые слова:** золоотвалы, золошлаковые отходы, рекультивация, фитомелиорация, многолетние травы

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук № АААА-А21-121011890003-4 с использованием приборов и оборудования Центров коллективного пользования Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук и Института общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук.

**Для цитирования:** Возможность рекультивации золоотвалов / Л.И. Худякова, Н.М. Гаркушева, И.Ю. Котова, П.Л. Палеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 37–47. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

---

UDC 631.618  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

## Possibility of reclamation of ash dumps

L.I. Khudyakova<sup>✉</sup>, N.M. Garkusheva, I.Yu. Kotova, P.L. Paleev

*Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude, Russian Federation*

<sup>✉</sup>lkhud@binm.ru

**Abstract. Relevance.** The need to dispose ash and slag waste from CHPP-1 and CHPP-2 in Ulan-Ude, which have a negative impact on the environment. A promising way to eliminate environmental damage is the biological reclamation of ash dumps. Its result is manifested in greening dumps and reducing ash deflation. **Aim.** To study ash and slag wastes from thermal power plants in Ulan-Ude and establish the possibility of reclamation of ash dumps to reduce the negative impact on the environment. **Objects.** Ash and slag wastes from the ash dumps of CHPP-1 (ASW-1) and CHPP-2 (ASW-2) in Ulan-Ude. **Methods.** Chemical, X-ray phase, granulometric, microscopic methods of analysis. **Results.** The authors have determined chemical, mineralogical and grain compositions of ash and slag wastes from thermal power plants. It was established that they have a high content of silicon, aluminum and a low content of calcium and magnesium. Ash and slag contain vitreous, crystalline and organic components. In the waste, to a greater extent, there is a crystalline phase containing silica, mullite, hematite, magnetite and, to a lesser extent, a glass phase, represented mainly by minerals of the orthoclase group. In terms of granulometric composition, the waste from CHPP-1 is dominated by a finer fraction compared to CHPP-2. Laboratory studies of soil mixtures based on ash and slag waste and local ameliorants (sewage sludge, lignin and chicken manure) were carried out. The optimal ratio of soil components was determined, equal to 4:1:1:1. A beneficial effect of sewage sludge was revealed, as well as a negative effect of high doses of bird droppings on growth and development of plants. Pure ash and slag from CHPP-1 and CHPP-2 without introduction of ameliorants can act as an independent substrate for perennial grasses.

**Keywords:** ash dumps, ash and slag waste, reclamation, phytomelioration, perennial grasses

**Acknowledgements:** The research was carried out as part of state programs of Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences no. AAAA- A21-121011890003-4 using equipment of the Center of collective usage Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and Institute of General and Experimental Biology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Khudyakova L.I., Garkusheva N.M., Kotova I.Yu., Paleev P.L. Possibility of reclamation of ash dumps. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 37–47. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4196

## Введение

Угольная энергетика есть и будет одним из основных поставщиком электроэнергии в мире. Однако ее функционирование сопровождается образованием побочных продуктов (зола, шлака), негативно воздействующих на окружающую среду. Накопление огромного количества золошлаковых отходов стало глобальной проблемой мировой цивилизации. На это влияет и то, что золошлакоотвалы расположены преимущественно в границах муниципальных образований и занимают огромные территории. Находясь в них, отходы теплоэнергетики представляют серьезную угрозу не только для окружающей среды, но и для человека [1–6]. Одной из них является пыление отвалов. Частицы золошлаковых отходов потоками воздушных масс переносятся на дальние расстояния, загрязняя территории площадью в несколько сот квадратных километров, ухудшая их санитарное состояние. Они не только осаждаются на почвенно-растительном покрове, но и легко проникают в дыхательную систему животных и человека, вызывая заболевания органов дыхания [7–9]. В связи с этим утилизация золошлаковых отходов является актуальной задачей.

В научной литературе встречается достаточно много работ по применению отходов тепловых электростанций в различных отраслях промышленности [10–18], а также в качестве мелиорантов и удобрений в сельском хозяйстве, в лесном хозяйстве, для ремедиации почв, рекультивации земель и т. д. [19–23]. Однако степень их практического использования на сегодняшний день остается

на достаточно низком уровне. Они продолжают накапливаться в золоотвалах, что обуславливает необходимость снижения негативного воздействия на окружающую среду. Наиболее актуальным и перспективным способом устранения экологического вреда является рекультивация золоотвалов [24, 25]. Она включает в себя техническую и биологическую составляющие и выполняет разные функции.

Техническая рекультивация заключается в планировке и создании плодородного слоя почвы на поверхности золы [26]. Наиболее актуальной является биологическая рекультивация, результат которой проявляется в озеленении отвалов и снижении дефляции золы [27, 28]. Это достигается с помощью растительной мелиорации с использованием подобранных фитомелиорантов [29–31]. Выбор вида перспективных растений зависит как от природно-климатических условий в зоне нахождения золоотвалов, так и от характеристик самих растений, позволяющих произрастать на данной местности. Кроме того, учитывается возможность создания самоподдерживающихся растительных сообществ, не требующих дополнительного ухода и затрат, таких как дикорастущие виды растений [32, 33]. В качестве фитомелиорантов предлагается использовать культурные многолетние злаковые, бобовые травы, а также их смеси [34–36]. Например, эспарцет, пырей, кострец, колумбова трава имеют высокие показатели роста на золоотвалах, а смесь первых трех трав – наилучшие показатели биомассы [37].

Поскольку золоотвалы малопригодны для создания устойчивой растительности с целью улучшения их физико-химических свойств и возможностей для произрастания растений в субстрат вводят различные добавки. Их смешивают с почвенным слоем на глубину 5–10 см, вносят органические удобрения, вермикулит, биоуголь, осадки сточных вод и т. д. [38–40]. Так, кора хвойных деревьев, используемая при рекультивации, оказывает заметное влияние на флористическое своеобразие видов, предпочитающих местообитания с низкими значениями pH [41]. Добавка навоза в золошлаковые отходы влияет на рост корневой системы и способствует высокому выходу биомассы растений [42]. Смесь отходов с активным илом образует плодородный гумусовый слой для произрастания растений, корни которых на второй год после посева формируют плотную дернину, предотвращающую пыление отвалов [43].

Таким образом, вид используемых минеральных и органических субстратов и их качество являются основными факторами, влияющими на долгосрочное разнообразие растений, произрастающих на золоотвалах. Поэтому поиск новых направлений их рекультивации является актуальной задачей, требующей скорейшего решения.

В связи с этим целью настоящего исследования является изучение золошлаковых отходов теплоэлектростанции г. Улан-Удэ и установление возможности рекультивации золоотвалов для снижения негативного воздействия на окружающую среду.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовались золошлаковые отходы (ЗШО) из золоотвалов ТЭЦ-1 (ЗШО-1) и ТЭЦ-2 (ЗШО-2) г. Улан-Удэ.

Определение химического состава выполнено с использованием фотометрического, титриметрического, гравиметрического, пламенно-фотометрического, атомно-адсорбционного и атомно-эмиссионного спектральных методов на спектрофотометре UNICO 1201 (США), анализаторе эмиссионных спектров «МАЭС» (Россия) и атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR-6M (Англия) с соответствующим программным обеспечением.

Рентгенофазовый анализ проводился на порошковом автоматическом дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker AXS (Германия) с соответствующим программным обеспечением со скоростью угломера  $2^\circ$  в минуту в интервале от  $10$  до  $70^\circ$ .

Для микроскопического анализа применялся сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM-1000 (Япония).

При выполнении гранулометрического анализа использовался стандартный набор сит.

#### Результаты исследования и обсуждение

Сжигая уголь и вырабатывая тепловую энергию, теплоэлектростанции образуют большое количество отходов в виде летучей золы (зола уноса) и топливного шлака, которые при совместном мокром удалении транспортируются в золоотвалы. Каждая из ТЭЦ имеет свой золоотвал (рис. 1), и находящиеся там отходы различаются по своим свойствам.



**Рис. 1.** Золоотвал ТЭЦ-1 г. Улан-Удэ  
**Fig. 1.** Ash dump of CHPP-1, Ulan-Ude



Золошлаки содержат стекловидные, кристаллические и органические составляющие, которые можно зафиксировать с помощью микроскопа. Количество их зависит от вида угля, технологических параметров его сжигания и удаления образуемых отходов.

Стекловидная составляющая является продуктом неполного сжигания угля, имеет четыре вида, различающихся цветом (бесцветная, желтая, бурая, черная). Она представлена преимущественно ферроалюмосиликатной стеклофазой, в которой основные стеклообразующие компоненты  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  составляют до 80–90 % [44]. Форма частиц данной фазы зависит от их размера. При размере до 10 мкм форма в виде шара, эллипса, капли, лепешки; при размере свыше 10 мкм – неправильная угловатая форма. Кроме того, встречаются частицы пластинчатой и нитевидной формы.

В состав кристаллической фазы входят как первичные минералы угля (кварц, муллит, гематит, магнетит), так и образовавшиеся в процессе его сжигания (силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция) [44].

Органическая составляющая представлена негоревшими частицами угля остроугольной формы с неровными краями, преобразованными в топке в полукокс и кокс [44]. Кроме того, имеются пористые частицы аморфизированного глинистого вещества неправильной формы. Встречаются неоднородные агрегаты, образованные в результате спекания множества мелких зерен.

Частицы всех видов фаз присутствуют в составе золошлаковых отходов теплоэлектростанций г. Улан-Удэ (рис. 2, 3).

Наличие различных фаз подтверждается результатами рентгенофазового анализа (РФА) (рис. 4).

По результатам РФА на рентгенограммах золошлаковых отходов присутствуют интенсивные пики кварца. Кроме того, зафиксированы рефлексы небольшой интенсивности, относящиеся к соединениям железа (гематит и магнетит), муллиту, а также минералов группы ортоклаза. Надо отметить, что содержание фаз с железом немного больше в образцах ЗШО ТЭЦ-1.

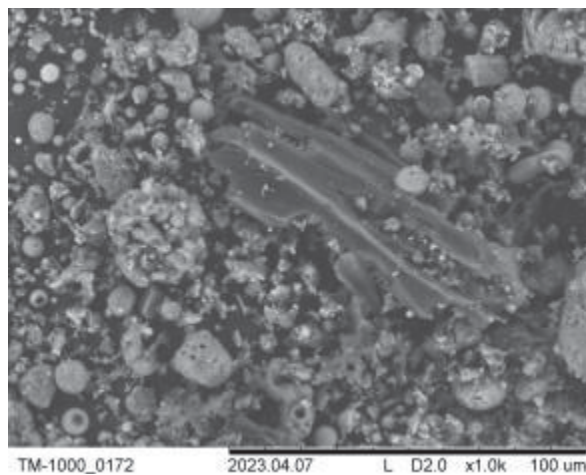


Рис. 2. Микрофотография золошлаковых отходов ТЭЦ-1

Fig. 2. Microphotographs of ash and slag waste CHPP-1

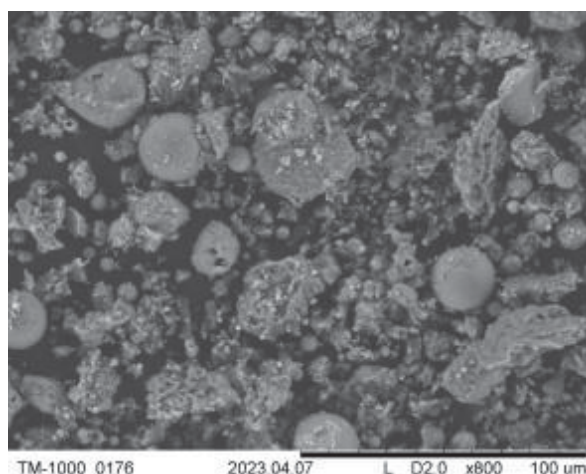


Рис. 3. Микрофотография золошлаковых отходов ТЭЦ-2

Fig. 3. Microphotographs of ash and slag waste CHPP-2

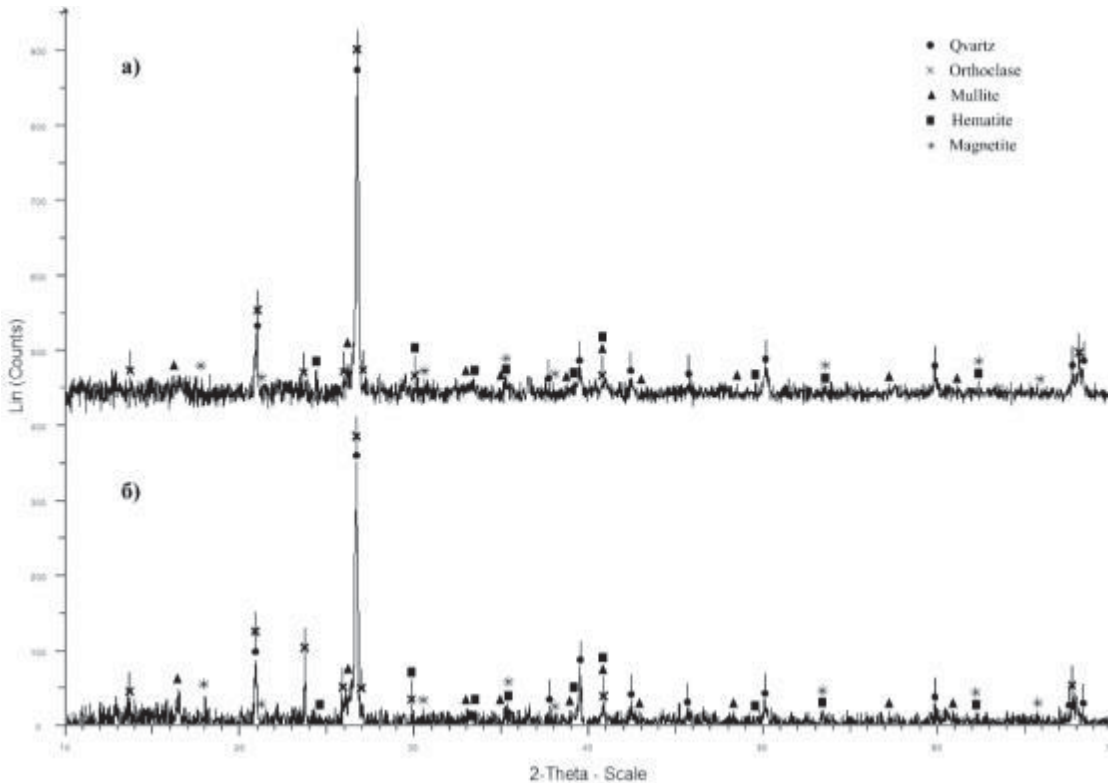
Как видно из представленных данных, минералогический состав ЗШО обеих ТЭЦ практически идентичен. В основном преобладает кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит. В меньшем количестве наблюдается ферроалюмосиликатная стеклофаза.

Химический состав золошлаковых отходов теплоэлектростанций г. Улан-Удэ представлен в табл. 1.

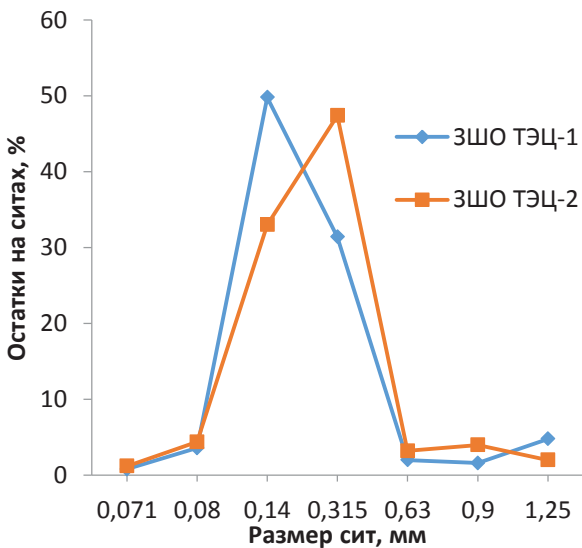
Таблица 1. Химический состав золошлаковых отходов

Table 1. Chemical composition of ash and slag waste

Отходы Waste	Содержание основных компонентов, масс. % Content of the main components, wt %										
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ппп LOI
ЗШО ТЭЦ-1/ASW CHPP-1	52,9	0,92	21,4	8,1	0,11	1,03	2,51	0,52	1,56	0,46	10,54
ЗШО ТЭЦ-2/ASW CHPP-2	53,9	1,03	23,4	4,65	0,07	1,12	3,22	0,53	1,56	0,64	9,96



**Рис. 4.** Рентгенограммы золошлаковых отходов ТЭЦ-1 (а) и ТЭЦ-2 (б)  
**Fig. 4.** X-ray diffraction pattern of ash and slag waste CHPP-1 (a) and CHPP-2 (б)



**Рис. 5.** Гранулометрический состав золошлаковых отходов  
**Fig. 5.** Granulometric composition of ash and slag waste

Состав исследуемых материалов характеризуется высоким содержанием кремния, алюминия и низким – кальция, магния. По количеству основных оксидов они различаются незначительно. Исключение составляет оксид железа  $Fe_2O_3$ , содержание которого в ЗШО-1 практически в два раза больше,

чем в ЗШО-2. Исходя из классификации по количеству  $CaO_{общ}$  исследуемые золошлаки относятся к низкокальциевым.

Выполнен ситовой анализ золошлаковых отходов (рис. 5).

Гранулометрический состав показывает, что золошлаковые отходы ТЭЦ-1 более мелкие, чем отходы ТЭЦ-2. Частицы размером более 0,315 мм составляют в них 39,8 и 56,6 % соответственно. При этом ЗШО ТЭЦ-1 содержат большее количество частиц размером более 1,25 мм и менее 0,071 мм.

Наличие высокого содержания мелкой фракции способствует образованию пылевой структуры субстрата золошлаков, что вызывает их интенсивное пыление, которое негативно влияет на здоровье населения. Данную проблему можно решить рекультивацией золоотвалов посредством посева многолетних трав.

Для изучения возможности биологической рекультивации техногенных ландшафтов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 были приготовлены почвенные смеси (почвосмеси) на основе золошлака и местных мелиорантов. В качестве составляющих использовались следующие отходы предприятий Республики Бурятия:

- золошлаковые отходы ТЭЦ-1 (ЗШО-I) и ТЭЦ-2 (ЗШО-II), г. Улан-Удэ;
- осадки сточных вод (ОСВ) очистных сооружений МУП «Водоканал», г. Улан-Удэ;

- лигнин (Л) ОАО «Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат» (СЦКК) Кабанский район, п. Селенгинск;
- куриный помет (П) ОАО «Улан-Удэнская птицефабрика», г. Улан-Удэ.

Нами в течение года были проведены предварительные лабораторные исследования по определению фитотоксичности почвосмесей с использованием вегетационных сосудов с отверстиями в дне объемом 0,36 кг. Повторность трехкратная. В ходе работы наблюдали за ростом и развитием растений многолетних трав на разнокомпонентных почвосмесях и определяли оптимальные соотношения компонентов по схеме опыта, представленной в табл. 2. Основываясь на литературных данных [45–47], выявлены соотношения компонентов ЗШО:П:ОСВ:Л, равные 2:1:1:1 и 4:1:1:1 (в пересчете на сухую массу). В качестве контроля использованы ЗШО-I, ЗШО-II и каштановая почва (Почва) местности п. Тапхар (Республика Бурятия). Перед набивкой в сосуды многокомпонентный субстрат тщательно перемешивался.

**Таблица 2.** Схема лабораторного опыта

**Table 2.** Scheme of laboratory test

Состав почвосмеси/Soil mixture composition	
ЗШО-I – контроль I/ASW-I – control I	
ЗШО-II – контроль II/ASW-II – control II	
Почва – контроль III/Soil – control III	
Соотношение 2:1:1:1/Ratio 2:1:1:1	
ЗШО-I+П/ASW-I+ CM*	ЗШО-II+П/ASW-II+ CM
ЗШО-I+Л/ASW-I+L**	ЗШО-II+Л/ASW-II+L
ЗШО-I+ОСВ/ASW-I+SS***	ЗШО-II+ОСВ/ASW-II+SS
ЗШО-I+П+Л/ASW-I+ CM +L	ЗШО-II+П+Л/ASW-II+ CM +L
ЗШО-I+П+ОСВ/ASW-I+ CM +SS	ЗШО-II+П+ОСВ/ASW-II+ CM +SS
ЗШО-I+Л+ОСВ/ASW-I+L+SS	ЗШО-II+Л+ОСВ/ASW-II+L+SS
ЗШО-I+П+Л+ОСВ/ASW-I+CM+L+SS	ЗШО-II+П+Л+ОСВ/ASW-II+CM+L+SS
Соотношение 4:1:1:1/Ratio 2:1:1:1	
ЗШО-I+П/ASW-I+ CM	ЗШО-II+П/ASW-II+ CM
ЗШО-I+Л/ASW-I+L	ЗШО-II+Л/ASW-II+L
ЗШО-I+ОСВ/ASW-I+SS	ЗШО-II+ОСВ/ASW-II+SS
ЗШО-I+П+Л/ASW-I+ CM +L	ЗШО-II+П+Л/ASW-II+ CM +L
ЗШО-I+П+ОСВ/ASW-I+ CM +SS	ЗШО-II+П+ОСВ/ASW-II+ CM +SS
ЗШО-I+Л+ОСВ/ASW-I+L+SS	ЗШО-II+Л+ОСВ/ASW-II+L+SS
ЗШО-I+П+Л+ОСВ/ASW-I+CM+L+SS	ЗШО-II+П+Л+ОСВ/ASW-II+CM+L+SS

\* – куриный помет (П)/chicken manure (CM); \*\* – лигнин (Л)/lignin (L); \*\*\* – осадки сточных вод (ОСВ)/sewage sludge (SS).

Для лабораторного опыта выбраны растения клевер красный (*Trifolium pratense*) и овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), биологические особенности которых позволят создавать устойчивый фитоценоз на рекультивируемых нарушенных землях [48–52]. Как отмечено в работах [50, 52, 53], данные виды трав выдерживают стрессовые условия произрастания, менее требовательны к почвам и климатическим факторам. Злаковые травы, к которым относится овсяница луговая, благодаря

мощной корневой системе способны создавать прочный и устойчивый дерн, тем самым защищая поверхностный слой субстрата от ветровой дефляции. В свою очередь кормовые бобовые травы влияют на образование гумуса и накопление азота, уменьшают концентрацию тяжелых металлов, улучшают физические свойства почв, снижают почвенную эрозию [50, 54, 55].

Перед закладкой опыта определялась в многократной повторности всхожесть семян исследуемых культур. Норма высева из расчета 25 кг/га взята с учетом литературных данных [50, 56], что в среднем выше стандартной нормы примерно в 1,5–2 раза. Глубина заделки семян опытных культуры многолетних трав составила 1,5–2 см.

Полив растений проводился по мере необходимости водопроводной водой объемом 50 мл.

В ходе наблюдений за опытными культурами начало всходов отмечено на 4 день. Полная всхожесть наступила на 6 день от закладки опыта. Отсутствие всхожести зафиксировано для почвосмесей соотношением 2:1:1:1 с куриным пометом. Растения овсяницы луговой на протяжении всего периода наблюдений отличались более дружными всходами и силой роста. Всходы клевера красного были изреженны и на 13 день погибли, за исключением вариантов ЗШО-I, ЗШО-II и Почва. В оставшихся вариантах до конца эксперимента растения клевера красного характеризовались слабым ростом и тонкими вытянутыми стеблями.

На почвогрунтах, в состав которых входил птичий помет, наблюдали подавление роста и развития растений или же их полную гибель, что, вероятно, связано с завышенной дозой данного компонента. Так, в исследованиях по изучению фитотоксичности птичьего помета [57, 58] отмечено ингибирование роста растений при использовании свежего, не подвергнутого обработке, птичьего помета и повышенных концентраций вытяжки из него. Данной эффект наблюдается при внесении высоких доз птичьего помета и связан с содержанием азота в форме мочевой кислоты, которая подавляет рост молодых растений. Также свежий птичий помёт токсичен для растений из-за водорастворимых продуктов жизнедеятельности птицы, и прямой его контакт с растениями может привести к ожогам, заболеваниям и даже к их гибели. В вариантах, содержащих осадки сточных вод, зафиксирована повышенная продуктивность вегетативной массы овсяницы луговой в отличие от других составов.

## Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований определен химический, минералогический и зерновой составы золошлаковых отходов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Улан-Удэ. Установлено, что они имеют

высокое содержание кремния, алюминия и низкое – кальция, магния. В отходах в большей степени преобладает кристаллическая фаза, содержащая кремнезем, муллит, гематит, магнетит. В меньшем количестве наблюдается стеклофаза, представленная в основном минералами группы ортоклаза. По гранулометрическому составу в отходах ТЭЦ-1 преобладает более мелкая фракция по сравнению с ТЭЦ-2.

Лабораторные исследования показали, что золошлаковые отходы можно использовать в получении почвосмесей для рекультивации нарушенных земель. Выявлено оптимальное соотношение компонентов 4:1:1 почвогрунта на основе золошлака. Отмечено благоприятное воздействие осадков сточ-

ных вод, а также негативное влияние высоких доз птичьего помета на рост и развитие растений. Кроме того, чистые золошлаки ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 без внесения мелиорантов могут выступать в качестве самостоятельного субстрата для многолетних трав. Надо отметить, что на почвосмесях, используемых в данной работе, растения овсяницы луговой отличались лучшим ростом и развитием вегетативной массы, в отличие от клевера красного, для которого представленные субстраты оказались неблагоприятными.

Работа по изучению возможности рекультивации золоотвалов будет продолжена как в лабораторных, так и в полевых условиях непосредственно на золоотвалах ТЭЦ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leachability and adverse effects of coal fly ash: a review / N.N. Wang, X.Y. Sun, Q. Zhao, Y. Yang, P. Wang // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 396. – № 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
2. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant / J. George, R.E. Masto, L.C. Ram, T.B. Das, T.K. Rout, M. Mohan // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2015. – Vol. 68. – P. 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
3. Proximity to coal-fired power plants and neurobehavioral symptoms in children / C.H. Zhang, L. Sears, J.V. Myers, G.N. Brock, C.G. Sears, K.M. Zierold // *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. – 2022. – Vol. 32. – P. 124–134. DOI: 10.1038/s41370-021-00369-7.
4. Petrović M., Fiket Z. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: a critical review of risk assessment methodologies // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 299. – № 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410.
5. Chebanova S.A., Polyakov I.V., Strelyaeva A.B. On the dispersed composition of ash and slag waste from boiler-house // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 272. – № 022149. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022149.
6. Sears C.G., Zierold K.M. Health of children living near coal ash // *Global Pediatric Health*. – 2017. – Vol. 4. – P. 1–8. DOI: 10.1177/2333794X17720330.
7. Protocol for measuring indoor exposure to coal fly ash and heavy metals, and neurobehavioural symptoms in children aged 6 to 14 years old / K.M. Zierold, C.G. Sears, A.N. Hagemeyer, G.N. Brock, B.J. Polivka, C.H. Zhang, L. Sears // *BMJ Open*. – 2020. – Vol. 10. – № e038960. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-038960.
8. Kravchenko J., Lyerly H.K. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities // *North Carolina Medical Journal*. – 2018. – Vol. 79. – P. 289–300. DOI: 10.18043/ncm.79.5.289.
9. Modeling radionuclides dispersion and deposition downwind of a coal-fired power plant / M.L. Dinis, A. Fiúza, J. Góis, J.M.S. Carvalho, A.C.M. Castro // *Procedia Earth Planetary Science*. – 2014. – Vol. 8. – P. 59–63. DOI: 10.1016/j.proeps.2014.05.013.
10. Аникеев В., Силка Д. От отходов угольных электростанций к производству строительных материалов // *Энергетическая политика*. – 2021. – № 1 (155). – С. 48–55. DOI: 10.46920/2409-5516\_2021\_1155\_48
11. Alterary S.S., Marei N.H. Fly ash properties, characterization, and applications: a review // *Journal of King Saud University – Science*. – 2021. – Vol. 33. – № 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536
12. Ram A.K., Mohanty S. State of the art review on physiochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00472-6
13. Developing a model based on the radial basis function to predict the compressive strength of concrete containing fly ash / A.M. Mayet, A.A. Al-Qahtani, R.M.A. Qaisi, I. Ahmad, H.H. Alhashim, E. Eftekhari-Zadeh // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – № 1743. DOI: 10.3390/buildings12101743
14. High-End reclamation of coal fly ash focusing on elemental extraction and synthesis of porous materials / T. Ju, S. Han, Y. Meng, J. Jiang // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. – 2021. – Vol. 9 (20). – P. 6894–6911. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00587
15. Liu H. Conversion of harmful fly ash residue to zeolites: innovative processes focusing on maximum activation, extraction, and utilization of aluminosilicate // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (23). – P. 20347–20356. DOI: 10.1021/acsomega.2c02388
16. Ash as an example of an efficient circular economy: a stakeholder approach recycling of coal fly / O. Marinina, M. Nevskaya, I. Jonek-Kowalska, R. Wolniak, M. Marinin // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – № 3597. DOI: 10.3390/en14123597
17. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 272. – № 022053. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
18. Towards sustainable coal industry: turning coal bottom ash into wealth / H. Zhou, R. Bhattarai, Y. Li, B. Si, X. Dong, T. Wang, Z. Yao // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 804. – № 149985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149985
19. Dahiya H.S., Budania Y.K. Prospects of fly ash application in agriculture: a global review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2018. – № 7 (10). – P. 397–409. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.710.043
20. Unexpectedly higher soil organic carbon accumulation in the evapotranspiration cover of a coal bottom ash mixed landfill / G.W. Kim, M.I. Khan, P.J. Kim, H.S. Gwon // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 268. – № 110659. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110659

21. Shaheen S.M., Hooda P.S., Tsadilas C.D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – a review // *Journal of Environmental Management*. – 2014. – Vol. 145. – P. 249–267. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.005
22. Singh G., Kaur K. Influence of fly ash incorporation on soil properties and productivity of crops: review // *International Research Journal of Engineering and Technology*. – 2020. – № 7 (11). – P. 1563–1567.
23. Fly-ash pollution modulates growth, biochemical attributes, antioxidant activity and gene expression in *Pithecellobium Dulce* (Roxb) Benth / S.U. Qadir, V. Raja, W.A. Siddiqui, Mahmooduzzafar, E.F. Abd\_Allah, A. Hashem, P. Alam, P. Ahmad // *Plants*. – 2019. – Vol. 8. – № 528. DOI: 10.3390/plants8120528
24. Delić D., Stajković-Srbinić O., Buntić A. Hazards and usability of coal fly ash // *Advances in Understanding Soil Degradation, Innovations in Landscape Research*. – Springer, 2022. – P. 571–608. DOI: 10.1007/978-3-030-85682-3\_26
25. Абдусаламова Р.Р., Баламирзоева З.М. Преимущество и значимость рекультивированных земель // *Вестник Социально-Педагогического Института*. – 2022. – № 3 (43). – С. 14–24.
26. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – challenges and research needs // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90. – P. 43–53. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.07.003
27. Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Оценка опыта биологической рекультивации золоотвалов // *Известия ОГАУ*. – 2012. – № 6 (38). – С. 213–215.
28. Szwalec A., Mundała P., Kedzior R. Suitability of selected plant species for phytoremediation: a case study of a coal combustion ash landfill // *Sustainability*. – 2022. – № 14. – P. 7083. DOI: 10.3390/su14127083
29. Гурина И.В., Иванова Н.А., Михеев П.А. Теоретическое обоснование биологической рекультивации золоотвалов методом растительной мелиорации // *Природообустройство*. – 2012. – № 4. – С. 26–29.
30. Pandey V.C. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants // *Ecological Engineering*. – 2015. – № 82. – P. 1–5. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.002
31. Use of the grass *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification and phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants / M. Ghosh, J. Paul, A. Jana, A. De, A. Mukherjee // *Ecological Engineering*. – 2015. – № 74. – P. 258–265. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.011
32. Meravi N., Prajapati S.K. Reclamation of fly ash dykes using naturally growing plant species // *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. – 2019. – № 9 (4). – P. 137–148.
33. Rawat K., Pathak B., Fulekar M.H. Heavy metal accumulation by plant species at fly-ash dumpsites: thermal Power Plant, Gandhinagar, Gujarat // *International Journal of Plant and Environment*. – 2019. – № 5 (2). – P. 111–116. DOI: 10.18811/ijpen.v5i02.7
34. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes / G. Gajić, L. Djurdjević, O. Kostić, S. Jarić, M. Mitrović, P. Pavlović // *Frontiers in Environmental Science*. – 2018. – № 6 (124). DOI: 10.3389/fenvs.2018.00124
35. Панова Е.Н., Стифеев А.И. Создание устойчивых фитоценозов на золоотвале теплоэлектроцентрали № 1 г. Курска // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2016. – № 3. – С. 66–72.
36. An appraisal of *Miscanthus x giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration / D. Técher, P. Laval-Gilly, A. Bennisroune, S. Henry, C. Martinez-Chois, M. D’Innocenzo, J. Falla // *Industrial Crops and Products*. – 2012. – № 36 (1). – P. 427–433. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.10.009
37. Гурина И.В. Обоснование выбора культур для растительных мелиораций золоотвалов // *Вестник МичГАУ*. – 2011. – № 1. – Ч. 1. – С. 96–103.
38. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals // *Applied Ecology and Environmental Research*. – 2016. – № 14 (2). – P. 185–212. DOI: 10.15666/aeer/1402\_185212
39. Dyguś K.H. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy // *Journal of Ecological Engineering*. – 2015. – № 16 (1). – P. 8–22. DOI: 10.12911/22998993/581
40. Relationships between waste physicochemical properties, microbial activity and vegetation at coal ash and sludge disposal sites / M.W. Woch, M. Radwańska, M. Stanek, B. Łopata, A.M. Stefanowicz // *Science of the Total Environment*. – 2018. – № 642. – P. 264–275. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.038
41. Impact of different reclamation modes of fly ash deposits on species richness of spontaneous flora / R. Gamrat, T. Tomaszewicz, M. Wróbel, T. Miller, J. Chudecka, S. Stankowski // *Polish Journal of Ecology*. – 2020. – № 67 (4). – P. 271–285. DOI: 10.3161/15052249PJE2019.67.4.001
42. Maiti D., Prasad B. Reclamation of fly ash waste dumps by biological means: a scientific approach // *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries*. – 2017. – № 2. – P. 1011–1022.
43. Миронов А.В. Опытная биологическая рекультивация золошлакового материала Читинской ТЭЦ-1 // *Природообустройство*. – 2019. – № 4. – С. 29–33. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-29-34
44. Косарев А.С. Исследование химического и фазового составов золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС // *Центральный Научный Вестник*. – 2018. – Т. 3. – № 21. – С. 41–44.
45. Способ приготовления техногенного почвогрунта БЭП на основе золошлаковых отходов (варианты) и техногенный почвогрунт БЭП: пат. Рос. Федерация, № 2688536, заявл. 20.09.2018; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. – 18 с.
46. Фомина Н.В. Ферментативная активность почвогрунтов, созданных с добавлением золошлаковых отходов // *Вестник Государственного Аграрного Университета Северного Зауралья*. – 2015. – № 1 (28). – С. 37–42.
47. Белозёрова Т.И. Рекультивация золоотвалов тепловых электростанций в условиях Севера: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Архангельск, 2006. – 20 с.
48. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands / I. Tymchuk, M. Malovanyy, O. Shkvirko, N. Chornomaz, O. Popovych, R. Grechanik, D. Symak // *Ecological Engineering and Environmental Technology*. – 2021. – Vol. 22 (1). – P. 24–30. DOI: 10.12912/27197050/132097
49. Banov M., Tsołova V., Kirilov I. Reclamation of heaps and industrial sites built in the region of Madjarovo mine (Bulgaria) // *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. – 2020. – Vol. 26 – № 1. – P. 192–197.

50. Панова Е.Н. Влияние дефляции с поверхности техногенного ландшафта ТЭЦ-1 г. Курска на прилегающую территорию // Вестник Курской Государственной Сельскохозяйственной Академии. – 2018. – № 3. – С.44–49.
51. Белюченко И.С. Методы рекультивации нарушенных земель // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 4–13.
52. Structuring a database of remote sensing methods and GIS in reclamation of disturbed land / M. Banov, S. Rousseva, E. Markov, N. Miteva // Journal of Remote Sensing and GIS. – 2017. – Vol. 6. – № 1. – 1000192. DOI: 10.4172/2469-4134.1000192
53. Range grasses to improve soil properties, carbon sustainability, and fodder security in degraded lands of semi-arid regions / H.M. Halli, P. Govindasamy, M. Choudhary, R. Srinivasan, M. Prasad, V.K. Wasnik, V.K. Yadav, A.K. Singh, S. Kumar, D. Vijay, H. Pathak // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 851. – 158211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158211
54. The impact of growing legume plants under conditions of biologization and soil cultivation on chernozem fertility and productivity of rotation crops / A. Mukhametov, N. Bekhorashvili, A. Avdeenko, A. Mikhaylov // Legume Research. – 2021. – Vol. 44. – № 10. – P. 1219–1225. DOI: 10.18805/LR-573
55. Multiple agroecosystem services of forage legumes towards agriculture sustainability: An overview / R. Kumar, M.R. Yadav, M. Arif, D.M. Mahala, D. Kumar, P.C. Ghasal, K.C. Yadav, R.K. Verma // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2020. – Vol. 90. – № 8. – P. 1367–1377. DOI: 10.56093/ijas.v90i8.105882
56. Васильченко А.В. Рекультивация нарушенных земель: в 2-х ч. – Оренбург: Изд-во ОГУ, 2017. – Ч. 1. – 214 с.
57. Тремасова А.М., Ерохондина М.А. Оценка фитотоксичности птичьего помета при применении биологического метода утилизации // Актуальные Вопросы Совершенствования Технологии Производства и Переработки Продукции Сельского Хозяйства. – 2019. – № 21. – С. 443–446.
58. Титова В.И., Белоусова Е.Г. Фитотоксичность куриного помета, полученного при разных способах содержания птицы // Пермский аграрный вестник. – 2022. – № 3 (39). – С. 12–19. DOI: 10.47737/2307-2873\_2022\_39\_12

### Информация об авторах

**Людмила Ивановна Худякова**, доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. lkhud@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1423-410X>

**Наталья Михайловна Гаркушева**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. garcusheva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6404-3021>

**Ирина Юрьевна Котова**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории оксидных систем Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. ikotova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3829-6516>

**Павел Леонидович Палеев**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. palpavel@mail.ru

Поступила в редакцию: 19.04.2023

Поступила после рецензирования: 22.06.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

### REFERENCES

1. Wang N.N., Sun X.Y., Zhao Q., Yang Y., Wang P., Leachability and adverse effects of coal fly ash: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 396, no. 122725. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.
2. George J., Mastro R.E., Ram L.C., Das T.B., Rout T.K., Mohan M. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, vol. 68, pp. 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
3. Zhang C.H., Sears L., Myers J.V., Brock G.N., Sears C.G., Zierold K.M. Proximity to coal-fired power plants and neurobehavioral symptoms in children. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2022, vol. 32, pp. 124–134. DOI: 10.1038/s41370-021-00369-7
4. Petrović M., Fiket Z. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: a critical review of risk assessment methodologies. *Chemosphere*, 2022, vol. 299, no. 134410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410
5. Chebanova S.A., Polyakov I.V., Strelyaeva A.B. On the dispersed composition of ash and slag waste from boiler-house. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, no. 022149. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022149
6. Sears C.G., Zierold K.M. Health of children living near coal ash. *Global Pediatric Health*, 2017, vol. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1177/2333794X17720330
7. Zierold K.M., Sears C.G., Hagemeyer A.N., Brock G.N., Polivka B.J., Zhang C.H., Sears L. Protocol for measuring indoor exposure to coal fly ash and heavy metals, and neurobehavioural symptoms in children aged 6 to 14 years old. *BMJ Open*, 2020, vol. 10, no. 038960. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-038960
8. Kravchenko J., Lyrly H.K. The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities. *North Carolina Medical Journal*, 2018, vol. 79, pp. 289–300. DOI: 10.18043/ncm.79.5.289.
9. Dinis M.L., Fiúza A., Góis J., Carvalho J.M.S., Castro A.C.M. Modeling radionuclides dispersion and deposition downwind of a coal-fired power plant. *Procedia Earth Planet Science*, 2014, vol. 8, pp. 59–63. DOI: 10.1016/j.proeps.2014.05.013.

10. Anikeev V., Silka D.N. From coal fired power plant waste to building materials production. *Energy policy*, 2021, no. 1 (155), pp. 48–55. DOI: 10.46920/2409-5516\_2021\_1155\_48. (In Russ.)
11. Alterary S.S., Marei N.H. Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University – Science*, 2021, vol. 33, no. 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536
12. Ram A.K., Mohanty S. State of the art review on physiochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2022, vol. 9. DOI: 10.1007/s40789-022-00472-6
13. Mayet A.M., Al-Qahtani A.A., Qaisi R.M.A., Ahmad I., Alhashim H.H., Eftekhari-Zadeh E. Developing a model based on the radial basis function to predict the compressive strength of concrete containing fly ash. *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 1743. DOI: 10.3390/buildings12101743
14. Ju T., Han S., Meng Y., Jiang J. High-end reclamation of coal fly ash focusing on elemental extraction and synthesis of porous materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2021, vol. 9 (20), pp. 6894–6911 DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c00587
15. Liu H. Conversion of harmful fly ash residue to zeolites: Innovative processes focusing on maximum activation, extraction, and utilization of aluminosilicate. *ACS Omega*, 2022, vol. 7 (23), pp. 20347–20356. DOI: 10.1021/acsomega.2c02388
16. Marinina O., Nevskaya M., Jonek-Kowalska I., Wolniak R., Marinin M. Recycling of coal fly ash as an example of an efficient circular economy: a stakeholder approach. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 3597. DOI: 10.3390/en14123597
17. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent Based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, no. 022053. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
18. Zhou H., Bhattarai R., Li Y., Si B., Dong X., Wang T., Yao Z. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 804, no. 149985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149985
19. Dahiya H.S. Budania Y.K. Prospects of fly ash application in agriculture: a global review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, no. 7 (10), pp. 397–409. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.710.043
20. Kim G.W., Khan M.I., Kim P.J., Gwon H.S. Unexpectedly higher soil organic carbon accumulation in the evapotranspiration cover of a coal bottom ash mixed landfill. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 268, no. 110659. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110659
21. Shaheen S.M., Hooda P.S., Tsadilas C.D. Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – a review. *Journal of Environmental Management*, 2014, vol. 145, pp. 249–267. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.005
22. Singh G., Kaur K. Influence of fly ash incorporation on soil properties and productivity of crops: Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, no. 7 (11), pp. 1563–1567.
23. Qadir S.U., Raja V., Siddiqui W.A., Mahmooduzzafar, Abd\_Allah E.F., Hashem A., Alam P., Ahmad P. Fly-ash pollution modulates growth, biochemical attributes, antioxidant activity and gene expression in *Pithecellobium Dulce* (Roxb) Benth. *Plants*, 2019, vol. 8, no. 528. DOI: 10.3390/plants8120528
24. Delić D., Stajković-Srbinić O., Buntić A. Hazards and usability of coal fly ash. *Advances in Understanding Soil Degradation, Innovations in Landscape Research*. Springer, 2022, pp. 571–608. DOI: 10.1007/978-3-030-85682-3\_26
25. Abdusalamova R.R., Balamirzoeva Z.M. The advantage and importance of reclaimed lands. *Bulletin of the Socio-Pedagogical Institute*, 2022, no. 3 (43), pp. 14–24. (In Russ.)
26. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – challenges and research needs. *Journal of Environmental Management*, 2009, vol. 90, pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.07.003
27. Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. Evaluation of the experience of biological reclamation of ash dumps. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2012, no. 6 (38), pp. 213–215. (In Russ.)
28. Szwalec A., Mundała P., Kedzior R. Suitability of selected plant species for phytoremediation: A case study of a coal combustion ash landfill. *Sustainability*, 2022, no. 14, pp. 7083. DOI: 10.3390/su14127083
29. Gurina I.V., Ivanova N.A., Mikheev P.F. Theoretical justification biological reclamation of ash dumps method of vegetable reclaim. *Environmental Engineering*, 2012, no. 4, pp. 26–29. (In Russ.)
30. Pandey V.C. Assisted phytoremediation of fly ash dumps through naturally colonized plants. *Ecological Engineering*, 2015, no. 82, pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.002
31. Ghosh M., Paul J., Jana A., De A., Mukherjee A. Use of the grass *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification an phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants. *Ecological Engineering*, 2015, no. 74, pp. 258–265. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.011
32. Meravi N., Prajapati S.K. Reclamation of fly ash dykes using naturally growing plant species. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2019, no. 9 (4), pp. 137–148.
33. Gajić G., Djurdjević L., Kostić O., Jarić S., Mitrović M., Pavlović P. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, no. 6 (124). DOI: 10.3389/fenvs.2018.00124
34. Gurina I.V. Substantiation for the selection of crops for phytoamelioration of the ash disposal area. *Vestnik of Michurinsk State Agrarian University*, 2011, no. 1, part 1, pp. 96–103.
35. Panova E.N., Stifeev A.I. Creation of sustainable phytocenoses on the ash dump of Kursk thermoelectric station № 1. *Vestnik of Kursk State Agricultural Academy Named After I.I. Ivanov*, 2016, no. 3, pp. 66–72. (In Russ.)
36. Técher D., Laval-Gilly P., Bennisroune A., Henry S., Martinez-Chois C., D’Innocenzo M., Falla J. An appraisal of *Miscanthus x giganteus* cultivation for fly ash revegetation and soil restoration. *Industrial Crops and Products*, 2012, no. 36 (1), pp. 427–433. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.10.009
37. Rawat K., Pathak K., Fulekar M.H. Heavy metal accumulation by plant species at fly-ash dumpsites: Thermal Power Plant, Gandhinagar, Gujarat. *International Journal of Plant and Environment*, 2019, no. 5 (2), pp. 111–116. DOI: 10.18811/ijpen.v5i02.7
38. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, no. 14 (2), pp. 185–212. DOI: 10.15666/aeer/1402\_185212

39. Dyguś K.H. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy. *Journal of Ecological Engineering*, 2015, no. 16 (1), pp. 8–22. DOI: 10.12911/22998993/581
40. Woch M.W., Radwańska M., Stanek M., Łopata B., Stefanowicz A.M. Relationships between waste physicochemical properties, microbial activity and vegetation at coal ash and sludge disposal sites. *Science of the Total Environment*, 2018, no. 642, pp. 264–275. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.038
41. Gamrat R., Tomaszewicz T., Wróbel M., Miller T., Chudecka J., Stankowski S. Impact of different reclamation modes of fly ash deposits on species richness of spontaneous flora. *Polish Journal of Ecology*, 2020, no. 67 (4), pp. 271–285. DOI: 10.3161/15052249PJE2019.67.4.001
42. Maiti D., Prasad B. Reclamation of fly ash waste dumps by biological means: a scientific approach. *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries*, 2017, no. 2, pp. 1011–1022.
43. Mironov A.V. Experimental biological reclaiming of the ash slag material of the Chita Thermal Power Station-1. *Environmental Engineering*, 2019, no. 4, pp. 29–33. (In Russ.) DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-29-34
44. Kosarev A.S. Research of the chemical and phase compositions of ash and slag waste Novocherkasskaya TPP. *Central Scientific Bulletin*, 2018, vol. 3, no. 21, pp. 41–44. (In Russ.)
45. Shkutnik D.V., Rybushkin S.V. *Method for production of technogenic soil of BEP on the basis of ash-slag wastes (versions) and technogenic soil of BEP*. Patent RF, no. 2688536, 2019. (In Russ.)
46. Fomina N.V. Soil enzymatic activity, created with the addition of bottom-ash waste. *Bulletin of the State Agrarian University of the Northern Trans-Urals*, 2015, no.1 (28), pp. 37–42. (In Russ.)
47. Belozeroва T.I. *Recultivation of ash dumps of thermal power plants in the conditions of the North*. Cand. Diss. Abstract. Arkhangelsk, 2006. 20 p. (In Russ.)
48. Tymchuk I., Malovanyy M., Shkvirko O., Chornomaz N., Popovych O., Grechanik R., Symak D. Review of the global experience in reclamation of disturbed lands. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 2021, vol. 22 (1), pp. 24–30. DOI: 10.12912/27197050/132097
49. Banov M., Tsołova V., Kirilov I. Reclamation of heaps and industrial sites built in the region of Madjarovo mine (Bulgaria). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 192–197.
50. Panova E.N. The effect of deflation from the surface of technogenic landscape CHPP-1 g. Kurska the surrounding area. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, 2018, no. 3, pp. 44–49. (In Russ.)
51. Belyuchenko I.S. Methods of recultivation of disturbed lands. *Ecological bulletin of the North Caucasus*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.)
52. Banov M., Rousseva S., Markov E., Miteva N. Structuring a database of remote sensing Methods and GIS in Reclamation of Disturbed Land. *Journal of Remote Sensing and GIS*, 2017, vol. 6, no. 1, 1000192. DOI: 10.4172/2469-4134.1000192
53. Halli H.M., Govindasamy P., Choudhary M., Srinivasan R., Prasad M., Wasnik V.K., Yadav V.K., Singh A.K., Kumar S., Vijay D., Pathak H. Range grasses to improve soil properties, carbon sustainability, and fodder security in degraded lands of semi-arid regions. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 851, 158211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158211
54. Mukhametov A., Bekhorashvili N., Avdeenko A., Mikhaylov A. The impact of growing legume plants under conditions of biologization and soil cultivation on chernozem fertility and productivity of rotation crops. *Legume Research*, 2021, vol. 44, no. 10, pp. 1219–1225. DOI: 10.18805/LR-573
55. Kumar R., Yadav M.R., Arif M., Mahala D.M., Kumar D., Ghasal P.C., Yadav K.C., Verma R.K. Multiple agroecosystem services of forage legumes towards agriculture sustainability: an overview. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, vol. 90, no. 8, pp. 1367–1377. DOI: 10.56093/ijas.v90i8.105882
56. Vasilchenko A.V. *Recultivation of disturbed lands*. Orenburg, OSU Publ. House, 2017. P. 1, 214 p. (In Russ.)
57. Tremasova A.M., Erokhondina M.A. Assessment of phytotoxicity of bird droppings when using a biological method of disposal. *Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products*, 2019, no. 21, pp. 443–446. (In Russ.)
58. Titova V.I., Belousova E.G. Phytotoxicity of chicken manure obtained with different methods of keeping poultry. *Perm Agrarian Journal*, 2022, no. 3 (39), pp. 12–19. (In Russ.) DOI: 10.47737/2307-2873\_2022\_39\_12.

#### Information about the authors

**Liudmila I. Khudyakova**, Dr. Sc., Senior Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. lkhud@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1423-410X>

**Natalia M. Garkusheva**, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. garcusheva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6404-3021>

**Irina Yu. Kotova**, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. ikotova@binm.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3829-6516>

**Pavel L. Paleev**, Cand. Sc., Researcher, Baikal Institute of Nature Management Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation. palpavel@mail.ru

Received: 19.04.2023

Revised: 22.06.2023

Accepted: 30.11.2023



УДК 621.311.238; 621.311.22  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4436  
Шифр специальности ВАК: 05.14.14

## Влияние расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики

Н.Н. Галашов<sup>✉</sup>, А.А. Туболев, Е.С. Болдушевский, А.А. Минор

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>✉</sup>gal@tpu.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования определяется сокращением расхода природного газа и выбросов вредных веществ в окружающую среду на основе ввода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки. **Цель:** проведение исследований по влиянию относительного расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики. **Объекты:** контактные газопаровые установки на основе газовых турбин с впрыском пара в камеру сгорания. **Методы:** численные методы на основе материальных и энергетических балансов систем и элементов газопаровых установок. **Результаты.** На основе расчета тепловой схемы контактной газопаровой установки проведено исследование влияния относительного расхода пара в камеру сгорания на ее энергетические характеристики. Определено, что абсолютный электрический коэффициент полезного действия контактной газопаровой установки линейно возрастает с увеличением относительного расхода пара в камеру сгорания. Диапазон изменения относительного расхода пара в камеру сгорания сильно зависит от температуры газов за камерой сгорания и степени сжатия в воздушном компрессоре, чем меньше эти параметры, тем больше диапазон изменения. Максимальный коэффициент полезного действия на уровне 56 % для всех вариантов достигается при максимальном относительном расходе пара в камеру сгорания. Установлено, что коэффициент избытка воздуха в зависимости от относительного расхода пара линейно падает, при этом чем выше температура газов за камерой сгорания и степень сжатия в воздушном компрессоре, тем больше темп падения и меньше диапазон изменения относительного расхода пара. Выявлено, что коэффициент полезной работы сильно зависит от относительного расхода пара в камеру сгорания, температуры газов за ней и степени сжатия в воздушном компрессоре, с ростом этих параметров он линейно возрастает. Определено, что температура газов на выходе газовой турбины также сильно зависит от относительного расхода пара в камеру сгорания, температуры газов на ее выходе и степени сжатия в компрессоре. С увеличением относительного расхода пара в камеру сгорания эта температура линейно возрастает от 600 до 700 °С, при этом чем выше температура газов на выходе камеры сгорания и степень сжатия в компрессоре, тем выше температура газов на выходе газовой турбины. Выявлена зависимость полезной работы на валу газовой турбины от относительного расхода пара в камеру сгорания. С увеличением относительного расхода пара полезная работа на валу газовой турбины возрастает по ветви параболы. Чем выше температура газов за камерой сгорания и степень сжатия в компрессоре, тем круче ветвь параболы, но меньше диапазон изменения относительного расхода пара. Установлено, что с увеличением относительного расхода пара расход газов на газовую турбину падает по гиперболе. При этом чем ниже температура газов за камерой сгорания и степень сжатия в компрессоре, тем сильнее падает расход газов на газовую турбину.

**Ключевые слова:** контактная газопаровая установка, камера сгорания, ввод пара, продукты сгорания, степень сжатия в компрессоре, температура газов на выходе камеры сгорания

**Для цитирования:** Влияние расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, Е.С. Болдушевский, А.А. Минор // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 48–59. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4436

---

UDC 621.311.238; 621.311.22  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4436

## Impact of steam flow into a combustion chamber of a contact gas-steam installation on its energy characteristics

N.N. Galashov<sup>✉</sup>, A.A. Tubolev, E.S. Boldushevsky, A.A. Minor

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>✉</sup>gal@tpu.ru

**Abstract. Relevance.** Reduction of natural gas consumption and emissions of harmful substances into the environment based on introduction of water vapor into a combustion chamber of a contact gas-steam installation. **Aim.** To carry out numerical studies on the influence of relative steam flow into the combustion chamber of the contact gas-steam installation on its energy characteristics. **Objects.** Contact gas-steam installations based on gas turbines with steam injection into the combustion chamber. **Methods.** Numerical methods based on material and energy balances of systems and elements of gas-steam installations. **Results.** Based on the calculation of the thermal circuit of the contact gas-steam installation, the authors have studied the influence of the relative steam flow into the combustion chamber on its energy characteristics. It was determined that the absolute electrical efficiency of the contact gas-steam installation increases linearly with growth of relative steam flow into the combustion chamber. The range of changes in the relative steam flow into the combustion chamber strongly depends on the temperature of the gases behind the combustion chamber and the compression ratio in the air compressor; the smaller these parameters, the greater the range of changes. The maximum efficiency of 56% for all options is achieved at the maximum relative steam flow into the combustion chamber. It was established that the excess air coefficient, depending on the relative steam flow rate, decreases linearly, and the higher the temperature of the gases behind the combustion chamber and the compression ratio in the air compressor, the greater the rate of decline and the smaller the range of changes in the relative steam flow rate. It was revealed that the efficiency coefficient strongly depends on the relative steam flow into the combustion chamber, the temperature of the gases behind it and the degree of compression in the air compressor; with increasing these parameters, it increases linearly. It was determined that the temperature of the gases at the outlet of the gas turbine also strongly depends on the relative flow of steam into the combustion chamber, the temperature of the gases at its outlet and the compression ratio in the compressor. With an increase in the relative flow of steam into the combustion chamber, this temperature increases linearly from 600 to 700°C, while the higher the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber and the compression ratio in the compressor, the higher the temperature of the gases at the outlet of the gas turbine. The authors revealed the dependence of useful work on a gas turbine shaft on the relative steam flow into the combustion chamber. With an increase in the relative steam flow, the useful work on the gas turbine shaft increases along the branch of the parabola. The higher the temperature of the gases behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor, the steeper the branch of the parabola, but the smaller the range of changes in the relative steam flow. It was established that with an increase in the relative steam flow, the gas flow to the gas turbine decreases according to a hyperbola. Moreover, the lower the temperature of the gases behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor, the more the gas flow to the gas turbine drops.

**Keywords:** contact gas-steam installation, combustion chamber, steam input, combustion products, compression ratio in a compressor, gas temperature at a combustion chamber outlet

**For citation:** Galashov N.N., Tubolev A.A., Boldushevsky E.S., Minor A.A. Influence of steam flow in a combustion chamber of a contact gas steam installation on its energy characteristics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 48–59. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4436

---

### Введение

Быстрый рост стоимости природных энергоносителей, таких как уголь, природный газ и нефть, требует разработки высокоэффективных энергосберегающих технологий снижения их расхода при сжигании. Как показано в [1]: «техническое перевооружение отечественных ТЭС, работающих на природном газе, с использованием высокоэкономичных парогазовых установок позволит более чем

в 1,5 раза снизить удельные расходы топлива на производство электроэнергии».

В настоящее время для выработки электроэнергии с максимальным КПД используется комбинация газотурбинного цикла Брайтона и паротурбинного цикла Ренкина.

При этом возможны два способа комбинации этих циклов: отдельный – при котором сначала в газотурбинной установке (ГТУ) в цикле Брайтона

при сжигании жидкого или газообразного топлива в камере сгорания (КС) теплота сгорания топлива преобразуется в газовой турбине (ГТ) в механическую мощность, которая в воздушном компрессоре (ВК) служит для подачи в камеру сгорания воздуха с необходимым давлением, а в газовой турбине – для привода ВК и генератора электрического тока. Далее продукты сгорания с температурой 550...700 °С из ГТ входят в котел-утилизатор, где позволяют получить перегретый водяной пар с температурой 500...650 °С, который в цикле Ренкина вырабатывает мощность в паровой турбине для привода генератора электрического тока. Для подачи топлива в КС служит топливный компрессор (ТК). Этот способ хорошо освоен на современных мощных парогазовых установках (ПГУ) и позволил получить электрический КПД до 64 % [2, 3]. Недостатком способа является сложность схемы, зависимость режимов работы цикла Ренкина от цикла Брайтона. Сложность пуска-остановочных операций.

Второй способ заключается в том, что оба термодинамических цикла работают в одной контактной газопаровой установке (КГПУ). При этом в камеру сгорания вводится под давлением вода или водяной пар, где за счет тепловой энергии сжигаемого топлива они переходят в состояние перегретого пара. В турбине работу совершает смесь продуктов сгорания и перегретого водяного пара. Поскольку удельная теплоемкость и плотность водяного пара выше, чем у продуктов сгорания, то 1 кг смеси создает мощность больше, чем 1 кг продуктов сгорания. При этом сокращается массовый расход воздуха на кг сжигаемого топлива, что снижает затраты мощности на привод воздушного компрессора. Ввод пара или воды сильно влияет на параметры и тепловое состояние камеры сгорания. Одно из первых исследований камеры сгорания с вводом пара было выполнено В.А. Зысиным и Б.В. Турчаниновым на экспериментальной камере сгорания ГТ-700 НЗЛ [4]. Испытания показали, что при относительном массовом расходе пара 0,0875 к расходу воздуха температура стенки жаровой трубы снизилась в среднем на 200–250 °С, а химический недожег топлива практически отсутствовал. Основы работы установок по второму способу разработаны В.А. Зысиным в [5], где автор назвал такие установки «контактными газопаровыми установками». В это же время КГПУ начали разрабатываться за рубежом, где получили название *STIG* (*Steam Injected Gas Turbine*).

Дальнейший теоретический анализ работы КГПУ по второму способу приведен в книге [6], где авторы обосновали влияние ввода пароводяного рабочего тела в камеру сгорания ГТУ. Были определены оптимальные и предельные параметры

продуктов сгорания, снижение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания и затраты мощности на привод ВК, уменьшение выбросов NOx в результате понижения температуры горения топлива, повышение примерно в два раза полезной удельной мощности ГТ. Также показано, что ввод воды в камеру сгорания может не только повысить КПД ГТУ, но и понизить из-за сжигания дополнительного расхода топлива на парообразование и перегрев пара, поэтому более эффективен ввод пара.

В ряде работ [7–19] показано, что ввод пара в КС позволяет снизить температуру металла КС и увеличить надежность ее работы, а также существенно уменьшить выбросы NOx и CO. В работах [14–19] определено, что оптимальный расход вводимого пара по влиянию на образование NOx и CO находится в пределах 1,5...2,5 кг пара/кг топлива. Для увеличения КПД требуется расход пара в КС больше 2,5 кг пара/кг топлива, для этого расход пара делят на две части: экологический вводят в зону горения топлива для поддержания допустимых выбросов оксидов азота NOx, а энергетический вводят за зоной горения для поддержания необходимой температуры на выходе КС.

Достоинством второго способа является более простая и дешевая схема КГПУ при меньших капитальных затратах. К недостаткам второго способа следует отнести повышенные потери теплоты с уходящими газами, а также вводимого в КС пара. Чтобы уменьшить эти потери за ГТ устанавливают котел-утилизатор, а на его выходе – теплоутилизатор для конденсации пара из парогазовой смеси продуктов сгорания, который используется для подготовки добавочной воды [20–23].

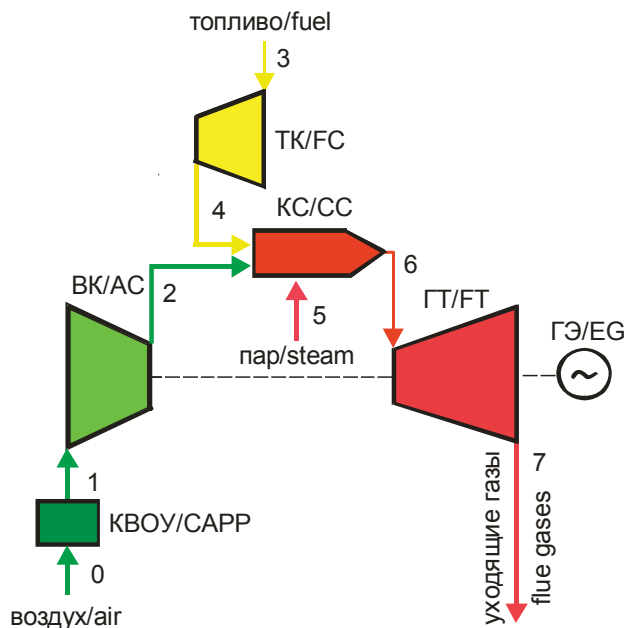
### Расчетная схема контактной газопаровой установки

Целью данной работы является проведение исследований по влиянию относительного расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики. Для расчета взята простая одновальная схема КГПУ с разомкнутыми циклами Брайтона и Ренкина, которая приведена на рис. 1.

Числа на схеме определяют точки процессов на входе и выходе элементов.

Схема работает следующим образом. В КВОУ происходит очистка воздуха от загрязнений, при этом протекает изотермический процесс 0–1 со снижением давления от  $P_0$  до  $P_1$ . ВК в политропном процессе 1–2 сжимает воздух от давления  $P_1$  до  $P_2$  с увеличением температуры от  $T_1$  до  $T_2$ . ТК в политропном процессе 3–4 сжимает газообразное топливо от давления  $P_3$  до  $P_4$  с увеличением температуры от  $T_3$  до  $T_4$ . Водяной пар в состоянии 5 подается в

КС при давлении  $P_5$  и температуре  $T_5$ . В КС в процессе окисления углеводородного топлива кислородом воздуха выделяется теплота и образуются продукты сгорания:  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , которые с  $\text{N}_2$ , избыточным воздухом и введенным паром с температурой  $T_6$  идут на ГТ, где, расширяясь в политропном процессе 6–7, выходят с температурой  $T_7$  и давлением  $P_7$ .



**Рис. 1.** Схема газопаровой установки: КВОУ – комплексная воздухоочистная установка; ВК – воздушный компрессор; КС – камера сгорания; ТК – топливный компрессор; ГТ – газовая турбина; ГЭ – генератор электрического тока

**Fig. 1.** Cycle diagram of combined-cycle plant: CAPP – complete air purification plant; AC – air compressor; CC – combustion chamber; FC – fuel compressor; FT – fuel turbine; EG – electric generator

### Методика расчета тепловой схемы КГПУ

В данной работе в качестве основы использована методика расчета схемы одновальнй ГТУ без ввода дополнительного пара в КС, описанная в [24]. Эта методика дополнена определением количества вводимого дополнительного пара в КС, а также расчетом параметров потоков не как идеальных газов, а как реальных веществ, что отличает ее от методики, рассмотренной в [25], в которой также не учитывается изменение средней теплоемкости в процессах сжатия и расширения при изменении температуры. Удельные расходы определяются не по отношению к расходу воздуха, а по отношению к расходу топлива.

В методике приняты следующие обозначения:  $B, b$  – абсолютный и удельный расход топлива;  $D, d$  – абсолютный и удельный расход вводимого

пара;  $G, g$  – абсолютные и удельные расходы воздуха и продуктов сгорания;  $N$  – мощность;  $\eta$  – КПД;  $H$  – удельная работа.

Приняты следующие обозначения параметров: температура:  $(T)$ , К;  $(t)$ , °С; давление  $(P)$ , МПа; удельная энтальпия  $(h)$ , кДж/кг; удельная энтропия  $(s)$ , кДж/(кг·К).

Параметры воды и водяного пара, воздуха, топлива и продуктов сгорания рассчитываются по функциям, определяемым в лицензированной библиотеке «CoolProp» [26], которая встроена в надстройки пакета Excel и позволяет с помощью функции *PropsSI* определить параметры для 110 веществ и их смесей. Эта функция позволяет по двум независимым параметрам определить для жидкости и перегретого пара, а также на пограничных кривых: удельные энтальпию, энтропию, объем, внутреннюю энергию, теплоемкость при постоянном давлении и объеме, функцию Гиббса, давление, температуру, плотность, вязкость, теплопроводность, поверхностное натяжение, критические давление и температуру. При расчете параметров на пограничных кривых используется второй параметр  $Q=0$  для жидкости и  $Q=1$  для насыщенного пара. Достоинством функции является то, что большинство параметров в ней имеет общепринятое обозначение, а названия веществ записываются в латинском написании.

В следующем примере определяется энтальпия воды в кДж/кг. Термодинамическое состояние задается двумя переменными:  $P$  и  $T$ , которые устанавливаются как 1 бар (100000 Па) и 15 °С (288,15 К) соответственно:

$$h = \text{PropsSI}("H"; "T"; 15 + 273,25; "P"; 100000; "Water") / 1000.$$

При расчете параметров с помощью функции *PropsSI* за начало расчета принята температура 0 К. Так как состав топлива приводится при нормальных условиях, т. е. при температуре 0 °С и давлении 101325 Па, то при этих параметрах расчетным путем определяется теплота сгорания топлива, поэтому для согласования с теплотой сгорания необходимо приведение параметров к нормальным условиям, для этого при расчете параметров необходимо дополнительно вычитать функцию *PropsSI* при температуре 273,15 К и давлении 101325 Па. Для приведенного выше примера это будет записано как

$$h = \text{PropsSI}("H"; "T"; 15 + 273,25; "P"; 100000; "Water") / 1000 - \text{PropsSI}("H"; "T"; 273,25; "P"; 101325; "Water") / 1000.$$

Подстрочные индексы у параметров обозначают: числа – вход и выход для соответствующих элементов (рис. 1); «вх» – вход; «вых» – выход; «вк» и «тк» – воздушный и топливный компрессор;

«кс» – камера сгорания; «гт» – газовая турбина; «в» – воздух; «гпс» – смесь продуктов сгорания и добавленного пара; «нв» – наружный воздух; «изб» – избыточный; «п» – пар; «с» – изоэнтروпийный процесс; «н» – низшая теплота сгорания топлива; «м» – механический; «эг» – электрогенератор; «эп» – электропривод; «э» – электрическая; «е» – эффективная; «ут» – утечки. Комплексные подстрочные индексы записываются через точку или дефис.

Блок-схема расчета КГПУ приведена на рис. 2.

**Исходные данные:**

- наружный воздух:  $P_{нв}, T_{нв}, \phi_{нв}$ ;
- природный газ:  $CH_4, C_2H_6, C_3H_8$  и т. д.;
- природный газ в газопроводе:  $P_T, T_T$ ;
- потери давления:  $\delta P_{квоу}, \delta P_{вк.вых}, \delta P_{тк.вых}, \delta P_{кс}, \delta P_{кс-гт}, \delta P_{гт.вых}$ ;
- КПД:  $\eta_{вк}, \eta_{тк}, \eta_{м.вк}, \eta_{м.тк}, \eta_{гт}, \eta_{гэ}, \eta_{эп}, \eta_{кс}$ ;
- потери от утечек в ВК  $\alpha_{ут}$ ;
- степень сжатия воздушного компрессора  $\epsilon$ ;
- температура на выходе КС  $T_{гпс}$ ;
- относительный расход вводимого пара  $d$ ;
- электрическая мощность генератора  $N_3$ .

**Расчет параметров воздуха, топлива и продуктов сгорания**

Для расчета параметров воздуха, топлива и продуктов сгорания используются уравнения [27]. По ним для заданного состава топлива рассчитываются: теоретическая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива  $L_0$ , кг/кг; удельная низшая теплота сгорания топлива  $Q_n$ , кДж/кг; удельные массы продуктов сгорания кг/кг топлива:  $g_{N_2}, g_{CO_2}, g_{H_2O}$ . Расчет ведется для нормальных условий:  $P=101325$  Па;

$T=273,15$  К. При этих условиях известны плотность  $\rho$ , молекулярная масса  $\mu$  и газовая постоянная  $R$  всех рассчитываемых веществ (табл. 1).



Рис. 2. Блок-схема расчета КГПУ

Fig. 2. Block diagram of contact gas-steam installation calculation

Таблица 1. Плотность, молекулярная масса и газовая постоянная

Table 1. Density, molecular weight and gas constant

Параметры Parameters	воздух air	пар steam	CO <sub>2</sub> carbon dioxide	N <sub>2</sub> nitrogen	CH <sub>4</sub> methane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ethane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> propane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> butane	топливо fuel
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> density, kg/m <sup>3</sup>	1,293	0,804	1,977	1,25	0,717	1,356	2,004	2,703	0,725
$\mu$ , г/моль molecular weight, g/mol	28,96	18,016	44,01	28,013	16,04	30,07	44,097	58,12	16,22
$R$ , Дж/(кгК) gas constant, J/(kgK)	281,10	461,50	188,22	296,81	518,36	276,50	188,55	143,06	512,52

**Расчет параметров в процессе сжатия в компрессоре**

Алгоритм расчета компрессора:

1. Принимаем  $m_k'=0,265$ .
2. По заданным  $P_{вх}, P_{вых}, Pa$  и  $T_{вх}, K$  определяем:
3. Энтальпию на входе  
 $h_{вх}=PropsSI("H"; "T"; T_{вх}, "P"; P_{вх}, "вещество")/1000$ .
4. Изобарную теплоемкость  $C_p=R/m_k'$ , где  $R$  – газовая постоянная вещества.

5. Температуру на выходе компрессора  $T_{вых}=T_{вх} \cdot (1+(\epsilon^{mk'}-1)/\eta_k)$ , где  $\eta_k$  – КПД воздушно-го или топливного компрессора.
6. Энтальпию на выходе  
 $h_{вых}=PropsSI("H"; "T"; T_{вых}, "P"; P_{вых}, "вещество")/1000$ .
7. Среднюю изобарную теплоемкость  
 $C_{p,ср}=(h_{вых}-h_{вх})/(T_{вых}-T_{вх})$ .
8. Уточняем  $m_k=R/C_{p,ср}$ .

9. Если  $(\text{abs}(m_k - m_k')/m_k)100 > 0,1$ , то  $m_k' = m_k$ , идем на 4.  
10. Работа, затраченная на сжатие кг воздуха или топлива,  $H_k = h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}$ .

### Расчет камеры сгорания

На рис. 3 приведена схема расходов и параметров КС.

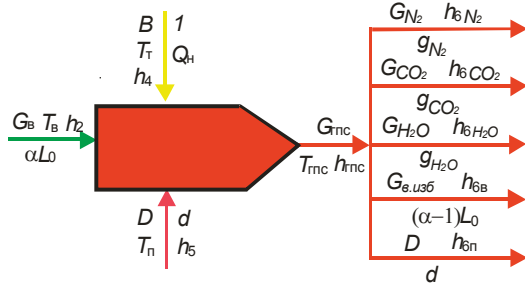


Рис. 3. Схема расходов и параметров КС  
Fig. 3. Scheme of costs and parameters of CC

Давления на входе и выходе КС:

$$P_{\text{КС.ВХ}} = P_2 \cdot (1 - \delta P_{\text{ВК.ВЫХ}}); P_{\text{КС.ВЫХ}} = P_{\text{КС.ВХ}} \cdot (1 - \delta P_{\text{КС}}).$$

Материальный баланс КС для абсолютных расходов

$$G_B + B + D = G_{\text{ГПС}} = G_{N_2} + G_{CO_2} + G_{H_2O} + G_{\text{в.изб}} + D,$$

и для относительных

$$\alpha L_0 + 1 + d = g_{N_2} + g_{CO_2} + g_{H_2O} + (\alpha - 1)L_0 + d.$$

На основе уравнения материального баланса можно получить коэффициент связи расхода воздуха через компрессор с расходом газа на выходе КС с учетом утечек в компрессоре  $\alpha_{\text{УТ}}$ :

$$b = G_B \cdot (1 + \alpha_{\text{УТ}}) / G_{\text{ГПС}} = \alpha \cdot L_0 \cdot (1 + \alpha_{\text{УТ}}) / (\alpha \cdot L_0 + (1 + d)).$$

Тепловой баланс КС для абсолютных расходов

$$B \cdot Q_n \cdot \eta_{\text{КС}} + G_B \cdot h_2 + B \cdot h_4 + D \cdot h_5 = G_{\text{ГПС}} \cdot h_{\text{ГПС}} = G_{N_2} \cdot h_{6N_2} + G_{CO_2} \cdot h_{6CO_2} + G_{H_2O} \cdot h_{6H_2O} + G_{\text{в.изб}} \cdot h_{6в} + D \cdot h_{6п},$$

и для относительных

$$Q_n \cdot \eta_{\text{КС}} + \alpha \cdot L_0 \cdot h_2 + h_4 + d \cdot h_5 = g_{N_2} \cdot h_{6N_2} + g_{CO_2} \cdot h_{6CO_2} + g_{H_2O} \cdot h_{6H_2O} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot h_{6в} + d \cdot h_{6п},$$

где  $h$  определяются по  $T$  и  $P$  для соответствующих точек и веществ с помощью функции *PropsSI*.

Из последнего уравнения находим коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = (Q_n \cdot \eta_{\text{КС}} + h_4 + d \cdot (h_{6п} - h_5) + L_0 \cdot h_{6в} - g_{N_2} \cdot h_{6N_2} - g_{CO_2} \cdot h_{6CO_2} - g_{H_2O} \cdot h_{6п}) / (L_0 \cdot (h_{6в} - h_2)).$$

Энтальпия газопаровой смеси на выходе КС

$$h_{\text{ГПС}} = d \cdot h_{6п} + (\alpha \cdot L_0 - 1) \cdot h_{6в} + g_{N_2} \cdot h_{6N_2} + g_{CO_2} \cdot h_{6CO_2} + g_{H_2O} \cdot h_{6п}.$$

Газовая постоянная газопаровой смеси на выходе КС

$$R_{\text{ГПС}} = d \cdot R_{\text{п}} + (\alpha \cdot L_0 - 1) \cdot R_{\text{в}} + g_{N_2} \cdot R_{N_2} + g_{CO_2} \cdot R_{CO_2} + g_{H_2O} \cdot R_{\text{п}}.$$

### Расчет процесса расширения в газовой турбине

Алгоритм расчета турбины:

Давление на входе и выходе ГТ:

$$P_{\text{ГТ.ВХ}} = P_{\text{КС.ВЫХ}} \cdot (1 - \delta P_{\text{ГТ.ВХ}}); P_{\text{ГТ.ВЫХ}} = P_{\text{В}} \cdot (1 + \delta P_{\text{ГТ.ВЫХ}}).$$

1. Принимаем  $m_{\text{ГТ}}' = 0,22$ .
2. Определяем изобарную теплоемкость
 
$$C_p = R_{\text{ГПС}} / m_{\text{ГТ}}'$$
3. Температура на выходе ГТ  $T_7 = T_6 (1 - (1 - \epsilon^{-m_{\text{ГТ}}'}) \eta_{\text{ГТ}})$ .
4. Для всех веществ газопаровой смеси по  $T_7$  и  $P_{\text{ГТ.ВЫХ}}$  определяется энтальпия с помощью функции *PropsSI*.
5. Энтальпия газопаровой смеси на выходе ГТ

$$h_{7\text{ГПС}} = d \cdot h_{7п} + (\alpha \cdot L_0 - 1) \cdot h_{7в} + g_{N_2} \cdot h_{7N_2} + g_{CO_2} \cdot h_{7CO_2} + g_{H_2O} \cdot h_{7п}.$$

6. Средняя изобарная теплоемкость

$$C_{p,\text{ср}} = (h_{6Г} - h_{7Г}) / (T_6 - T_7).$$

7. Уточняем  $m_{\text{ГТ}} = R_{\text{ГПС}} / C_{p,\text{ср}}$ .
8. Если  $(\text{abs}(m_{\text{ГТ}} - m_{\text{ГТ}}') / m_{\text{ГТ}}) 100 > 0,1$ , то  $m_{\text{ГТ}}' = m_{\text{ГТ}}$ , идем на 2.
9. Работа, полученная при расширении кг газов,

$$H_{\text{ГТ}} = h_{6Г} - h_{7Г}.$$

10. Полезная работа на валу ГТ, переданная на ГЭ,

$$H_e = (H_{\text{ГТ}} - b \cdot H_{\text{БК}}) \cdot \eta_{\text{М}}.$$

### Расчет показателей установки на заданную электрическую мощность $N_e$

$$G_{\text{ГПС}} = N_e \cdot \eta_{\text{ГЭ}} / H_e;$$

$$G_{\text{БК}}' = b \cdot G_{\text{ГПС}};$$

$$G_{\text{БК}} = G_{\text{БК}}' (1 - \alpha_{\text{УТ}});$$

$$B = (G_{\text{ГПС}} - G_{\text{БК}}) / (1 + d);$$

$$D = d \cdot B;$$

$$N_{\text{ГТ}} = G_{\text{ГПС}} \cdot H_{\text{ГТ}};$$

$$N_{\text{БК}} = G_{\text{БК}}' \cdot H_{\text{БК}};$$

$$\phi = (N_{\text{ГТ}} - N_{\text{БК}}) / N_{\text{ГТ}};$$

$$\eta_3 = G_{\text{ГПС}} \cdot H_e \cdot \eta_{\text{ГЭ}} / (Q_n \cdot B);$$

$$t_7 = T_7 - 273,15;$$

$$N_{\text{э.тк}} = B \cdot H_{\text{ТК}} / \eta_{\text{ЭП}}.$$

На основе представленного алгоритма написана программа расчета схемы КППУ в пакете электронных таблиц EXCEL с расчетом параметров веществ по уравнениям базы CoolProp.

### Результаты расчета и их анализ

Расчеты проведены для исходных данных:

- наружный воздух:  $P_{\text{нв}}=0,1013$  МПа,  $t_{\text{нв}}=15$  °С,  $\varphi_{\text{нв}}=0,6$ ;
- природный газ:  $\text{CH}_4=98,72$  %,  $\text{C}_2\text{H}_4=0,12$  %,  $\text{C}_3\text{H}_8=0,01$  %,  $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,009$  %,  $\text{CO}_2=0,14$  %,  $\text{N}_2=1$  %;
- природный газ на входе ТК:  $P_{\text{тк.вх}}=0,2$  МПа,  $t_{\text{тк.вх}}=5$  °С;
- потери давления:  $\delta P_{\text{квоу}}=0,01$ ,  $\delta P_{\text{к.вых}}=\delta P_{\text{кс}}=\delta P_{\text{тк-кк}}=\delta P_{\text{тк-ст}}=0,03$ ;
- КПД:  $\eta_{\text{вк}}=0,86$ ,  $\eta_{\text{тк}}=0,9$ ,  $\eta_{\text{м.вк}}=0,995$ ,  $\eta_{\text{кк}}=0,995$ ,  $\eta_{\text{м.тк}}=0,995$ ,  $\eta_{\text{гт}}=0,93$ ,  $\eta_{\text{эл}}=0,982$ ,  $\eta_{\text{эл}}=0,99$ ;
- степень сжатия компрессора  $\varepsilon$ : 20, 30, 40 и 50;
- температура газопаровой смеси на выходе КС  $t_{\text{гпс}}$ : 1300, 1400, 1500 и 1600 °С;
- относительный расход пара в КС  $d$ , кг/кг топлива: 0...13;
- электрическая мощность генератора  $N_3=100$  МВт.

Температура вводимого пара в КС принята на 40 °С ниже температуры газопаровой смеси на выходе из ГТ. Расчеты проведены при изменении относительного расхода ввода пара в КС для вариантов: 1)  $t_{\text{гпс}}=1300$  °С,  $\varepsilon=20$ ; 2)  $t_{\text{гпс}}=1400$  °С,  $\varepsilon=30$ ; 3)  $t_{\text{гпс}}=1500$  °С,  $\varepsilon=40$ ; 4)  $t_{\text{гпс}}=1600$  °С,  $\varepsilon=50$ . Для каждого варианта максимальная величина вводимого расхода пара  $d$  определялась по минимальному коэффициенту избытка воздуха в КС 1,05.

Результаты расчетов для наиболее значимых показателей КПГУ приведены на рис. 4–9.

Зависимость электрического КПД КПГУ от  $d$  для представленных выше вариантов приведена на рис. 4. Видим, что КПД КПГУ линейно возрастает с увеличением  $d$ : для первого варианта диапазон изменения  $d=0...12,5$ ; для второго –  $0...10$ ; для третьего –  $0...8$  и для четвертого –  $0...6,5$ . Максималь-

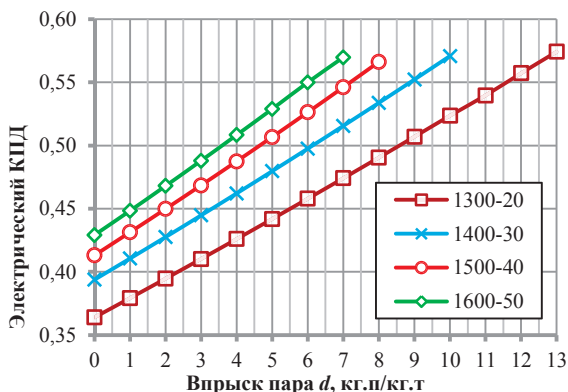


Рис. 4. Электрический коэффициент полезного действия в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре

Fig. 4. Electrical efficiency depending on the relative steam flow, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor

ный КПД на уровне 56 % для всех вариантов достигается при максимальном  $d$ .

На рис. 5 видим, что коэффициент избытка воздуха в зависимости от относительного расхода пара линейно падает, чем выше температура газопаровой смеси за КС и степень сжатия в ВК, тем больше темп падения и меньше диапазон изменения  $d$ .

На рис. 6 показано изменение коэффициента полезной работы в зависимости от относительного расхода пара в КС. Для рассмотренных выше вариантов видим, что, чем больше температура газопаровой смеси за КС и степень сжатия в ВК, тем более круто увеличивается коэффициент полезной работы, но при этом его максимальное значение меньше, чем у вариантов с меньшей температурой газов за КС и степенью сжатия в ВК. Так, у варианта 1 максимальный коэффициент полезной работы равен 0,77, а у варианта 4 – 0,69.

На рис. 7 показана зависимость температуры газопаровой смеси на выходе ГТ от  $d$ . С увеличением  $d$  температура газопаровой смеси на выходе ГТ линейно возрастает. Для варианта 1 от 600 до 665 °С, для варианта 2 от 595 до 660 °С, для варианта 3 от 620 до 680 °С и для варианта 4 от 630 до 700 °С.

Зависимость полезной работы на валу ГТ от  $d$  приведена на рис. 8. С увеличением  $d$  полезная работа на валу ГТ возрастает по ветви параболы. Чем больше температура газопаровой смеси за КС и степень сжатия в ВК, тем круче ветвь параболы, но меньше диапазон изменения  $d$ . Для варианта 1 полезная работа на валу ГТ возрастает в допустимом диапазоне изменения  $d$  в 2 раза – от 450 до 900 кДж/кг; для варианта 2 в 1,9 раз – от 510 до 975 кДж/кг; для варианта 3 в 1,8 раз – от 580 до 1045 кДж/кг; для варианта 4 в 1,7 раз – от 655 до 1130 кДж/кг.

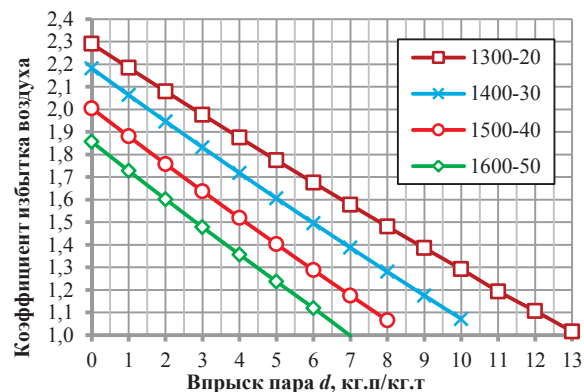
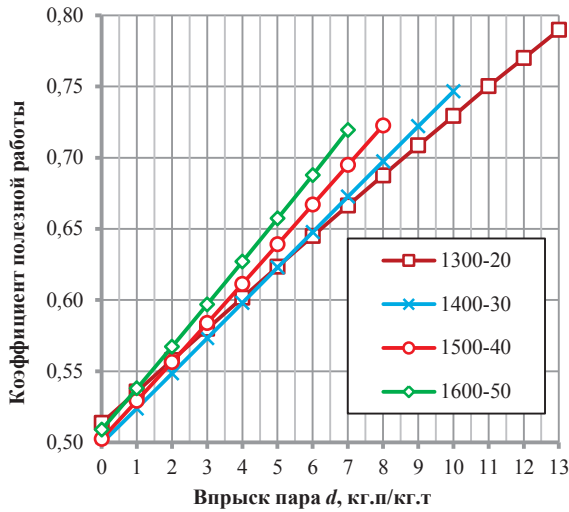


Рис. 5. Коэффициент избытка воздуха в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре

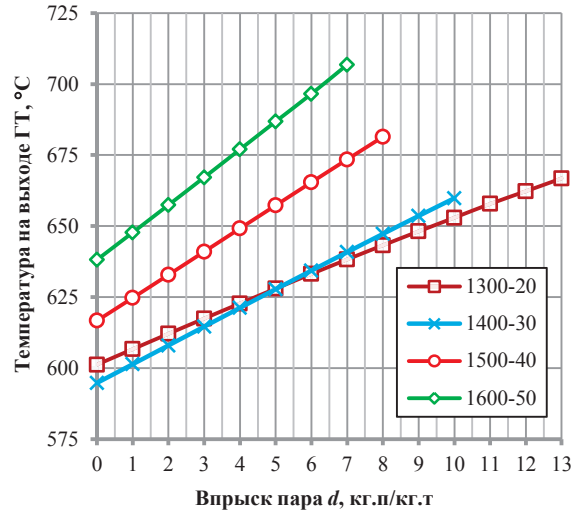
Fig. 5. Excess air coefficient depending on the relative steam flow, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor

На рис. 9 приведена зависимость расхода газопаровой смеси из КС на ГТ от  $d$ . Видим, что с увеличением  $d$  расход газопаровой смеси на ГТ падает по гиперболе. При этом для варианта 1 с изменением  $d$  от 0 до 12 расход газопаровой смеси

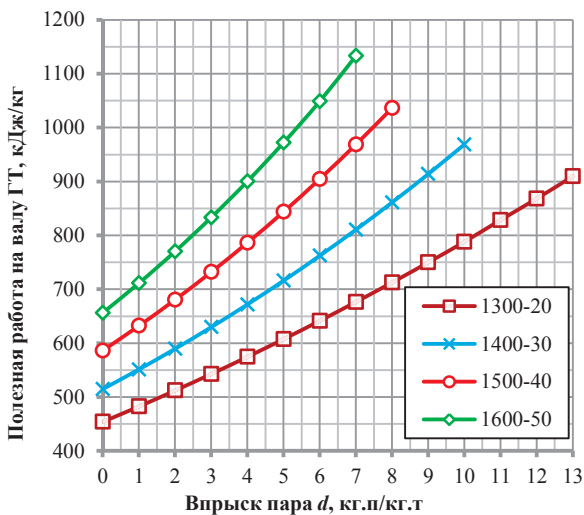
на ГТ падает в 1,86 раз – от 220 до 118 кг/с; для варианта 2 в 1,75 раз – от 193 до 110 кг/с; для варианта 3 в 1,66 раз – от 170 до 102 кг/с; для варианта 4 в 1,59 раз – от 153 до 96 кг/с.



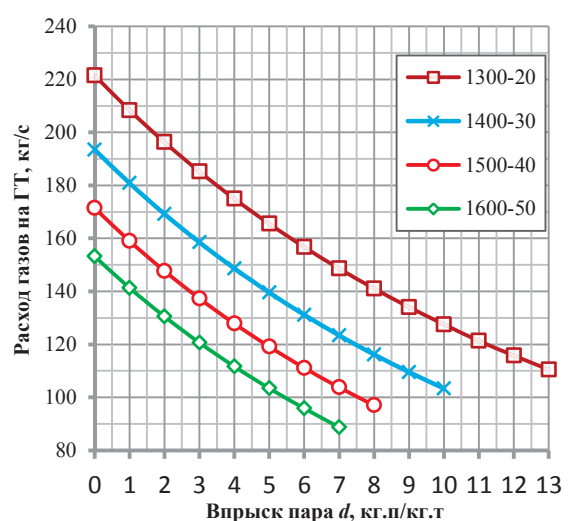
**Рис. 6.** Коэффициент полезной работы в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре  
**Fig. 6.** Efficiency factor depending on the relative steam flow, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor



**Рис. 7.** Температура на выходе газовой турбины в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре  
**Fig. 7.** Temperature at the gas turbine outlet depending on the relative steam flow, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor



**Рис. 8.** Полезная работа на валу газовой турбины в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре  
**Fig. 8.** Useful work on the gas turbine shaft depending on the relative steam flow, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor



**Рис. 9.** Расход газов на газовую турбину в зависимости от относительного расхода пара, температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в компрессоре  
**Fig. 9.** Gas consumption at the gas turbine depending on the relative steam consumption, gas temperature behind the combustion chamber and the compression ratio in the compressor



### Направление дальнейших исследований

Исследования показали, что в КГПУ с вводом пара в КС можно получить электрический КПД до 55 %. При этом не рассматривался вопрос способа получения вводимого в КС пара. Из рис. 6 следует, что температура уходящей из ГТ газопаровой смеси составляет 595...700 °С, что позволяет использовать ее в котле-утилизаторе для получения пара. Этот высокотемпературный пар можно непосредственно вводить в КС или, для повышения эффекта охлаждения КС и ГТ, вводить через паровую турбину с выходом из нее на ввод пара в КС, это позволит выработать на ней дополнительную электрическую мощность. Необходимо определить, что более эффективно. Также необходимо рассмотреть вопрос снижения потерь теплоты и пара в окружающую среду путем установки конденсационного теплоутилизатора на выходе котла-утилизатора, который позволит понизить температуру газопаровой смеси до 40...50 °С и сконденсировать из нее большую часть влаги. При этом низкотемпературная тепловая энергия уходящих газов может быть использована для отпуска теплоты потребителям [28] или в органическом цикле Ренкина для дополнительной выработки электроэнергии [29] с применением воздушных конденсаторов [30].

### Выводы

1. Исследования показали, что:

- электрический коэффициент полезного действия контактной газопаровой установки линейно возрастает с увеличением  $d$ . Диапазон изменения  $d$  сильно зависит от температуры газопаровой смеси за камерой сгорания и степени сжатия в воздушном компрессоре, чем они меньше, тем больше диапазон изменения  $d$ . Максимальный коэффициент полезного действия на уровне 56 % для всех вариантов достигается при максимальном  $d$ ;
- коэффициент избытка воздуха в зависимости от  $d$  линейно падает, при этом чем выше температура газопаровой смеси за камерой

сгорания и степень сжатия в воздушном компрессоре, тем больше темп падения и меньше диапазон изменения  $d$ ;

- коэффициент полезной работы сильно зависит от относительного расхода пара в камеру сгорания, температуры газопаровой смеси за ней и степени сжатия в воздушном компрессоре, с ростом этих параметров он линейно возрастает;
  - температура уходящих газов из газовой турбины также сильно зависит от  $d$ . С увеличением  $d$  эта температура линейно возрастает от 600 до 700 °С, при этом чем выше температура газопаровой смеси на выходе камеры сгорания и степень сжатия в воздушном компрессоре, тем больше температура газов на выходе газовой турбины;
  - полезная работа на валу газовой турбины с увеличением  $d$  возрастает по ветви параболы. Чем больше температура газопаровой смеси за камерой сгорания и степень сжатия в компрессоре, тем круче ветвь параболы, но меньше диапазон изменения  $d$ ;
  - расход газов из камеры сгорания на газовую турбину сильно зависит от  $d$ , с увеличением  $d$  расход газов падает по гиперболе, чем ниже температура газопаровой смеси на выходе камеры сгорания и степень сжатия в воздушном компрессоре, тем больше снижение расхода газа на газовую турбину.
2. Повысить эффективность контактной газопаровой установки с вводом пара в камеру сгорания можно установкой на выходе газовой турбины котла-утилизатора для подготовки вводимого пара и конденсационного теплоутилизатором на его выходе для утилизации теплоты и влаги из уходящих газов. При этом низкотемпературная тепловая энергия уходящих газов может быть использована для отпуска теплоты потребителям или в органическом цикле Ренкина для дополнительной выработки электроэнергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольховский Г.Г. Парогазовые установки для отечественных ТЭС // Электрические станции. – 2020. – № 1. – С. 21–28.
2. Манушин Э.А. Современные сверхмощные энергетические газотурбинные и парогазовые установки турбостроительных компаний мира // Газотурбинные технологии. – 2020. – № 3. – С. 2–8.
3. Ольховский Г.Г. Наиболее мощные энергетические ГТУ (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 6. – С. 87–93.
4. Зысин В.А., Турчанинов Б.В. О работе ГТУ по газопаровому циклу с котлом-утилизатором // Энергомашиностроение. – 1960. – № 9. – С. 18–21.
5. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
6. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
7. Колп Д.А., Меллер Д.Ж. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM 5000 (фирма Simpson Paper Company) // Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – № 11. – С. 1–14.
8. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, А.А. Минор, Е.С. Болдушевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 27–36.
9. Influence of water injection on performance of scramjet engine / Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang // Energy. – 2020. – Vol. 201. – P. 117477–117490.

10. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions / A.M. Abubaker, A. Darwish Ahmad, M.N.A. Magableh, Y.S.H. Najjar // *Journal of Energy Engineering – ASCE*. – 2021. – Vol. 147 (1). – P. 732–748.
11. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions / M. van Der Spek, D. Bonalumi, G. Manzolini, A. Ramirez, A.P.C. Faaij // *Energy and Fuels*. – 2018. – Vol. 32 (1). – P. 625–645.
12. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion / P. Stathopoulos, T. Rähse, J. Vinkeloe, N. Djordjevic. // *Energy*. – 2019. – Vol. 188. – P. 116020.
13. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection / P. Ziółkowski, T. Kowalczyk, M. Lemański, J. Badur // *Energy Conversion with Control and Management*. – 2019. – Vol. 192. – P. 374–384.
14. Chmielewski M., Niszczota P., Gieras M. Combustion efficiency of fuel-water emulsion in a small gas turbine // *Energy*. – 2020. – Vol. 211. – P. 118961–118985.
15. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов NOx и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // *Известия РАН. Энергетика*. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
16. Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А. Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // *Теплофизика высоких температур*. – 2013. – Т. 51. – № 6. – С. 937–944.
17. Даченко В.В., Зейгарник Ю.А., Косой А.С. Опыт использования воды и водяного пара для обеспечения экологических норм в конверсионных газотурбинных двигателях // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 4. – С. 49–56.
18. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions / Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu // *Energy*. – 2020. – Vol. 200. – P. 117487–117501.
19. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers // *Fuel*. – 2018. – Vol. 212. – P. 173–186.
20. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsubul'skiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // *MATEC Web of Conferences*. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
21. Mokhtari H., Ahmadisedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power plant // *Energy*. – 2017. – Vol. 118. – P. 399–413.
22. Promising direction of perfection of the utilization combine cycle gas turbine units / A.I. Gabdullina, N.N. Galashov, S.A. Tsubul'skiy, D.V. Melnikov, I.A. Asanov, A.S. Kiselev // *MATEC Web of Conferences*. – Tomsk, 2016. – P. 01004–01008.
23. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger / A. Macháčková, R. Kocich, M. Vočko, L. Kuncícká, K. Polko // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 124. – P. 1321–1333.
24. Паровые и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. Изд. 3-е. – М.: ИД МЭИ, 2008. – 561 с.
25. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, А.А. Минор, А.И. Баннова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 124–135.
26. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp / H. Bell Iain, J. Wronski, S. Quoilin, V. Lemort // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. – Vol. 53. – P. 2498–2508.
27. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и дополн. – СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
28. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, В.В. Беспалов, А.А. Минор, Е.С. Болдушевский // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 43–55.
29. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Анализ эффективности парогазовых установок тринарного типа // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 33–38.
30. Galashov N.N., Tsubul'ski S.A. Numerical analysis of the condensation characteristics of different heat-transfer media in an air-cooled condenser // *Power Technology and Engineering*. – 2016. – Vol. 49. – P. 365–370.

### Информация об авторах

**Николай Никитович Галашов**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gal@tpu.ru <http://orcid.org/0009-0005-5351-3584>

**Александр Анатольевич Туболев**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. Tubolev@tpu.ru

**Евгений Сергеевич Болдушевский**, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. franky575@rambler.ru

**Александр Александрович Минор**, главный эксперт ПТО АО «Томская генерация», Россия, 634041, г. Томск, пр. Кирова, 36. aam29061994@gmail.com

Поступила в редакцию: 20.10.2023

Поступила после рецензирования: 14.11.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

## REFERENCES

1. Olkhovskiy G.G. Combined cycle power plants in domestic thermal power engineering. *Elektricheskie stantsii*, 2020, vol. 1, pp. 21–28. (In Russ.)
2. Manushin E.A. Modern high-capacity gas-turbine power-generating and combined-cycle plants of the world companies. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2020, vol. 3, pp. 2–8. (In Russ.)
3. Olkhovskiy G.G. The most powerful power-generating GTUS (review). *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, pp. 490–495. (In Russ.)
4. Zysin V.A., Turchaninov B.V. Operation of gas-turbine combined-cycle plants in steam-and-gas cycle with a waste heat boiler. *Energomashinostroyeniye*, 1960, vol. 9, pp. 18–21. (In Russ.)
5. Zysin V.A. *Combined and combined-cycle gas installations and cycles*. Moscow, Leningrad, GEI Publ., 1962. 186 p. (In Russ.)
6. Arsenyev L.V., Tyryshkin V.G. *Combined installations with gas turbines*. St Petersburg, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 247 p. (In Russ.)
7. Kolp D.A., Meller D.Zh. Commissioning of the world's first full-cycle gas turbine STIG based on the LM 5000 gas generator (Simpson Paper Company). *Sovremennoye mashinostroyeniye. Seriya: A*, 1989, no. 11, pp. 1–14. (In Russ.)
8. Galashov N.N., Tupolev A.A., Minor A.A., Boldushevskiy E.S. Influence of the temperature of steam injection into the combustion chamber of a gas-steam plant on its energy characteristics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 27–36. (In Russ.)
9. Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang. Influence of water injection on performance of scramjet engine. *Energy*, 2020, vol. 201, pp. 117477–117490.
10. Abubaker A.M., Darwish Ahmad A., Magableh M.N.A., Najjar Y.S.H. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions. *Journal of Energy Engineering – ASCE*, 2021, vol. 147 (1), pp. 732–748.
11. Van Der Spek M., Bonalumi D., Manzolini G., Ramirez A., Faaij A.P.C. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions. *Energy and Fuels*, 2018, vol. 32 (1), pp. 625–645.
12. Stathopoulos P., Rähse T., Vinkeloe J., Djordjevic N. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion. *Energy*, 2019, vol. 188, p. 116020.
13. Ziółkowski P., Kowalczyk T., Lemański M., Badur J. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection. *Energy Conversion with Con and Management*, 2019, vol. 192, pp. 374–384.
14. Chmielewski M., Niszczota P., Gieras M. Combustion efficiency of fuel-water emulsion in a small gas turbine. *Energy*, 2020, vol. 211, pp. 118961–118985.
15. Ivanov A.A., Ermakov A.N., Shlyakhov R.A. On the deep suppression of NOx and CO emissions in gas turbines with water or steam injection. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2010, vol. 3, pp. 119–128. (In Russ.)
16. Gordin K.A., Maslennikov V.M., Filimonova E.A. Assessment of the emission level of nitrogen oxides when steam with natural gas is supplied to the combustion chamber of a gas turbine installation. *Thermophysics of high temperatures*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 937–944. (In Russ.)
17. Datsenko V.V., Zeygarnik Yu.A., Kosoy A.S. Experience in the use of water and steam to ensure environmental standards in conversion gas turbine engines. *Teploenergetika*, 2014, vol. 4, pp. 49–56. (In Russ.)
18. Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions. *Energy*, 2020, vol. 200, pp. 117487–117501.
19. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 173–186.
20. Galashov N., Tsubul'skiy S., Melnikov D., Kiselev A., Gabdullina A. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2017. pp. 01027–01031.
21. Mokhtari H., Ahmadisedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power. *Energy*, 2017, vol. 118, pp. 399–413.
22. Gabdullina A.I., Galashov N.N., Tsubul'skiy S.A., Melnikov D.V., Asanov I.A., Kiselev A.S. Promising direction of perfection of the utilization combine cycle gas turbine units. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2016. pp. 01004–01008.
23. Macháčková A., Kocich R., Bojko M., Kunc'ická L., Polko K. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, pp. 1321–1333.
24. Kostyuk A.G., Frolov V.V., Bulkin A.E., Truhnij A.D. *Steam and gas turbines for power plants*. Moscow, MEI Publ. house, 2008. 561 p. (In Russ.)
25. Galashov N.N., Tupolev A.A., Minor A.A., Bannova A.I. Parametric analysis of the gas-steam installation scheme using a mathematical model. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 124–135. (In Russ.)
26. Bell Ian H., Wronski J., Quoilin S., Lemort V. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508.
27. *Thermal calculation of boilers (standard method)*. 3<sup>rd</sup> ed. St Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 257 p.
28. Galashov N.N., Tupolev A.A., Bespalov V.V., Minor A.A., Boldushevskiy E.S. Calculation of the parameters of the scheme of a gas-steam plant with deep utilization and heat release. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 124–135. (In Russ.)
29. Galashov N.N., Tsubul'skiy S.A. Analysis of the efficiency of steam-gas plants of the trinary type. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 33–38. (In Russ.)
30. Galashov N.N., Tsubul'skiy S.A. Numerical analysis of the condensation characteristics of different heat-transfer media in an air-cooled condenser. *Power Technology and Engineering*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 365–370.

**Information about the authors**

**Nikolay N. Galashov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gal@tpu.ru <http://orcid.org/0009-0005-5351-3584>.

**Alexander A. Tubolev**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. Tubolev@tpu.ru

**Evgeny S. Boldushevsky**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. franky575@rambler.ru

**Alexander A. Minor**, Chief Expert, Tomsk Generation JSC, 36, Kirov avenue, Tomsk, 634041, Russian Federation. aam29061994@gmail.com

Received: 20.10.2023

Revised: 14.11.2023

Accepted: 25.01.2024

UDC 349.6

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4034

## Visual inspection results and evaluation of Akhtala tailing safety based on tailing management facility safety methodology

K.S. Sahakyan✉, A.A. Sarukhanyan

*National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, Armenia*

✉sks091279@gmail.com

**Abstract. *Relevance.*** Mining sector is one of the leading branches of the industry in Armenia. Therefore, effective government regulation of the sector based on a sound legal basis is a necessity. Accidents at tailing management facilities are posing a high risk to people and environment especially in their near vicinity and often have a transboundary impact. The tailing management facility safety methodology elaborated under the auspices of the German Environmental Agency is an efficient tool for quick assessment of the technical condition of the tailing management facilities. ***Aim.*** To present the results of application of the tailing management facility methodology in Armenia, which was applied to the operated Nahatak tailing management facility of the Akhtala Ore Dressing Combine (Lori region, Armenia). ***Objects.*** Tailing management facility methodology was applied to the operated tailing management facility Nahatak of the Akhtala Ore Dressing Combine, for which all documentation was checked. Enrichment wastes were stored at the tailing management facility during processing copper ore from the Shamlug mine and polymetals from the Akhtala mine. The main visual inspection was carried out in three parts of the tailing management facility: main dam, drainage canal and secondary dam. Special attention was drawn to the main dam conditions. The video recorded by a drone was used to explore the dam bottom-line. ***Methods.*** The tailing management facility methodology includes the following elements: the method of evaluation of Tailings Hazard Index; the tailing management facility checklists including the questionnaire for visual and documentation inspection, the evaluation matrix for the tailing management facility safety level; the measures catalogue for taking actions to improve tailing management facility safety. The questions of each tailing management facility checklist are stated in a way to encompass the minimum set of the requirements, critical for tailing management facility safety, which allows evaluating the tailing management facility conditions. Questions in all groups of the checklist are sorted by the tailing management facility lifecycle and each subsection contains relevant questions applied to a specific stage (design, construction, operation, re-cultivation, closure). Application of the tailing management facility checklist is supported by a measures catalogue with short-, medium- and long-term safety measures. ***Results.*** The tailing management facility methodology was used/tested for the operated tailing management facility in Armenia for the first time. The main problems of the Nahatak tailing management facility were identified and analyzed, and appropriate recommendations were provided based on them. Based on the obtained results it can be concluded that the main problems are related to the drainage system and the management of water flows, some parts of the primary dam that require restoration, as well as the improvement of monitoring systems. At the same time the experience of application of the tailing management facility methodology in Armenia, allowed improving this methodology and making it the most effective working tool for quick and efficient visual inspection of tailing management facilities and for thorough inspection of relevant documentations. The user-friendly tailing management facility safety methodology (with questionnaires of visual and documentation checking) is an efficient tool for quick assessment of the technical condition of the tailing management facilities, as well as for training staff both in the governance bodies and in mining enterprises.

**Keywords:** mining sector, tailing management facility safety methodology, checklists, tailing management facility safety level

**For citation:** Sahakyan K.S., Sarukhanyan A.A. Visual inspection results and evaluation of Akhtala tailing safety based on tailing management facility safety methodology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 60–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4034

---

УДК 349.6

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4034

## Результаты визуального осмотра и оценка безопасности Ахталинского хвостохранилища на основе методологии безопасности хвостохранилищ

К.С. Саакян<sup>✉</sup>, А.А. Саруханян

Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Республика Армения, г. Ереван

<sup>✉</sup>sks091279@gmail.com

**Аннотация. Актуальность.** Горнодобывающий сектор – одна из ведущих отраслей промышленности Армении, поэтому эффективное государственное регулирование отрасли на прочной правовой основе является необходимостью. Аварии на хвостохранилищах представляют высокий риск для людей и окружающей среды, особенно в непосредственной близости от хвостохранилищ, а также часто имеют трансграничное воздействие. Методология безопасности хвостохранилищ, разработанная под эгидой немецкого агентства по охране окружающей среды (Umweltbundesamt), эффективна в качестве инструмента для оперативной оценки технического состояния хвостохранилищ. **Цель:** представление результатов применения методологии безопасности хвостохранилища в Армении, которая была опробована на действующем хвостохранилище Нахатак Ахталинского горно-обогатительного комбината (Лорийская область, Армения). **Объекты.** Методология хвостохранилища была применена к действующему хвостохранилищу Ахталинского горно-обогатительного комбината Нахатак, для которого была проверена вся документация. Отходы обогащения на хвостохранилище складированы при переработке медной руды Шамлугского рудника и полиметаллов Ахталинского месторождения. Основной визуальный осмотр был проведён на трех участках хвостохранилища: основная дамба, дренажная канава и вторичная дамба. Особое внимание было уделено состоянию основной дамбы, и для исследования нижней линии плотины была использована видеозапись с дрона. **Методы.** Методология безопасности хвостохранилища включает следующие элементы: метод оценки индекса опасности хвостохранилища; контрольные списки хвостохранилища, включая анкету визуального и документального контроля; матрицу оценки уровня безопасности хвостохранилища; каталог мер по повышению безопасности хвостохранилища. Вопросы контрольных списков сформулированы таким образом, чтобы охватить минимальный набор требований, критических для безопасности хвостохранилища, позволяющий оценить состояние хвостохранилища. Вопросы контрольных списков отсортированы по жизненному циклу хвостохранилища, и каждый подраздел содержит актуальные вопросы, относящиеся к определенному этапу (проектирование, строительство, эксплуатация, рекультивация, закрытие). Применение контрольного списка хвостохранилища поддерживается каталогом мер с краткосрочными, среднесрочными и долгосрочными мерами безопасности. **Результаты.** Методология безопасности хвостохранилища была опробована на эксплуатируемом хвостохранилище в Армении впервые, в результате чего были выявлены и проанализированы основные проблемы хвостохранилища Нахатак, и на их основе даны соответствующие рекомендации. В ходе полученных результатов можно сделать вывод, что основные проблемы касаются дренажной системы и управления водными потоками некоторых участков первичной плотины, требующих восстановления, а также совершенствования систем мониторинга. В то же время опыт применения данной методологии в Армении позволил усовершенствовать методологию и сделать ее наиболее эффективным рабочим инструментом для быстрого и оперативного визуального осмотра хвостохранилищ и тщательной проверки соответствующей документации. Удобная в использовании методология безопасности хвостохранилищ (с анкетами визуальной и документальной проверки) является эффективным инструментом для оперативной оценки технического состояния хвостохранилищ, а также для обучения персонала как в органах управления, так и на горнодобывающих предприятиях.

**Ключевые слова:** горнодобывающий сектор, методология безопасности хвостохранилищ, контрольные списки, уровень безопасности хвостохранилища

**Для цитирования:** Саакян К.С., Саруханян А.А. Результаты визуального осмотра и оценка безопасности Ахталинского хвостохранилища на основе методологии безопасности хвостохранилищ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 60–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4034

### Introduction

Accidents at tailing management facilities (TMFs) are posing a high risk to people and environment in their near vicinity and often have a transboundary im-

pact. Accidents at TMFs, particularly in the countries with economies in transition, including Armenia, can result in catastrophes not only at local, but also at national and transboundary levels. The UNECE Conven-

tion on the Transboundary Effects of Industrial Accidents provides a legal basis for the countries in their efforts to prevent industrial accidents. It also promotes enhancing of international cooperation among the neighbouring countries in case of emergencies. The UNECE Safety Guidelines and Good Practices for TMFs (2014) were elaborated under the auspices of the German Environmental Agency (Umweltbundesamt) [1]. The user-friendly TMF safety methodology developed on this basis (with questionnaires of visual and documentation checking) is an efficient tool for quick assessment of the technical condition of the TMFs, as well as for staff training both in the governance bodies and in mining enterprises [2–14].

*General information about TMF methodology.* The successful experience of applying the TMF methodology in Armenia (within the framework of project on “Assistance in safety improvement of tailings management facilities (TMF) in Armenia and Georgia” [3, 11, 13]), where numerous TMF sites are located, allowed improving this methodology and making it the most effective working tool for quick and efficient visual inspection of TMFs and for thorough inspection of relevant documentations. The TMF methodology was applied to an operated TMF for the first time in Armenia [4].

The *TMF Methodology* includes the following elements:

1. The Method of evaluation of Tailings Hazard Index (THI Method).
2. The TMF Checklist including:
  - The Questionnaire (three groups of questions).
  - The Evaluation Matrix for the TMF safety level.
  - The Measures Catalogue for taking actions to improve TMF safety.

The *Tailings Hazard Index (THI)* is the index that demonstrates the measure of specific potential hazards/risks posed by tailings facilities to the environment, infrastructure, and humans. The THI is calculated by summing up the major TMF parameters that significantly effect the level of its safety. These are:

- volume of tailings;
- toxicity of substances in tailings;
- TMF management status;
- natural conditions (geological, seismological, and hydrological conditions) specific to the TMF site;
- dam safety.

Tailings Hazard/risk Index can be calculated in two ways depending on the availability of data on TMFs:

1. *Basic THI* is a simple calculation approach by using the data on two major parameters – volume and toxicity of tailings material

$$THI_{Basic} = THI_{Cap} + THI_{Tox}$$

where  $THI_{Cap}$  is the measure of hazard/risk caused by the volume of tailings stored in TMF (TMF capacity);

$THI_{Tox}$  is the measure of hazard/risk caused by toxicity of substances contained in tailings.

2. Extended THI is a detailed approach by using the data on two major parameters of basic THI and additionally three other parameters clarifying TMF status, natural conditions and dam safety

$$THI_{Extended} = THI_{Cap} + THI_{Tox} + THI_{Manag} + THI_{Site} + THI_{Dam}$$

where  $THI_{Manag}$  is the measure of hazard/risk related to improper management of facilities;  $THI_{Site}$  is the measure of hazard/risk related to specific geological and hydrological conditions at the TMF site [5, 6];  $THI_{Dam}$  is the measure of dam failure hazard/risk related to structural and component items of the dam, its integrity and functionality.

The *TMF Checklist* includes three groups of questions called as follows:

- “Basic Check” (Group A);
- “Detailed Check” (Group B);
- “Check of Inactive Sites” (Group C).

Each group includes two subgroups – the first subgroup is intended for visual inspection and the second subgroup is elaborated to work with documentation. Visual inspection is mandatory for all groups.

The questions of the TMF Checklist are formulated in a way to encompass the minimum set of the requirements, critical for TMF safety, which allows evaluating the TMF conditions. Questions in all groups of the Checklist are sorted by the TMF lifecycle and each subsection contains relevant questions applied to a specific stage (design, construction, operation, re-cultivation, closure).

During “Detailed Check” evaluation can be performed based on the analysis of available design information and operator records, reinforced with additional studies and tests clarifying all TMF parameters performed by external experts if required and using information received during site visit to the TMF company and interviewing TMF staff.

The tasks of the “Detailed Check” group comprise:

- assessment of all TMF systems and technical components;
- assessment of all risks/hazards, impacts and potential impacts, linked with TMF construction, operation, closure, and rehabilitation;
- determination of the needs and priorities for taking short-, medium-, and long-term measures aiming to improve the TMF safety level.

Evaluation of the TMF safety level within the Checklist is performed with the Evaluation Matrix (EM), which is the matrix of numerical values of answers to the Checklist questions. The matrix elements are calculated by special procedures depending on the scope of the check.

The developed Evaluation Matrix of TMF safety level offers an assessment of TMF, checked for com-

pliance with applicable safety requirements, formulated in the Questionnaire. The Evaluation Matrix unifies the answers to the questions; it includes both overall and categorial evaluations using specific categories, which allows a thorough check of all TMF elements. Besides, the Matrix enables evaluating uncertainties, caused by the lack of data on the inspected TMF.

**Table 1.** Identification of TMF safety level after evaluation

**Таблица 1.** Определение уровня безопасности хвостохранилища после проведения оценки

TMF safety level Уровень безопасности хвостохранилища	Criteria Критерии
Acceptable Приемлемый	90% of minimum set of safety requirements are met (MSR>90%) Соблюдается 90 % минимального набора требований по безопасности (МНТ>90 %)
Unacceptable Неприемлемый	Less than 90% of minimum set of safety requirements are met (MSR<90%) Соблюдается менее 90 % минимального набора требований по безопасности (МНТ<90 %).

An application of the TMF Checklist is supported by a Measures Catalogue with short-, medium- and long-term safety measures. The developed short- and medium-term measures should be based mainly on organisational and low cost measures; the long-term measures should be the goal to reach and therefore part of an investment plan meeting international safety standards.

*Visual inspection at Nahatak TMF.* TMF methodology was applied to the operated TMF of the Akhtala Ore Dressing Combine (Lori region, Armenia), for which all documentation was checked and thoroughly studied.

The Akhtala ore dressing combine operated in 1967–1988, with processing copper-bearing ore of Shamlugh mine and Akhtala polymetallic deposit.

The plant operation was suspended on 01.07.1989 according to the decision of USSR Cabinet of Ministry no. 66/317 justified by the fact that the reserves of the Akhtala mine have been exhausted [7].

In 2001 the Institute of Mining and Metallurgy of the Republic of Armenia developed and implemented a new design for the retrieve of the Akhtala ore dressing combine, which provided processing of only copper-pyrite ore of the Shamlugh mine. In 2009 the design was modified with enlargement and reconstruction of the Nahatak TMF; according to this document the TMF in the Nahatak river gorge was re-commissioned. Its operation restarted in 2011 [8].

Currently, the plant is recycling the Shamlugh copper ore, which is delivered from the underground mine to the plant by carriages or is unloaded at the storage near the underground gallery exit and transported by trucks to the plant. Besides, the ore is transported by trucks from the open casts. The copper content in the ore varies from 0,5 to 1,3% [9].

The TMF dimensions are following:

- maximum length is 993 m;
- maximum width is 446 m;
- smallest width is 101 m.



**Fig. 1.** Location/view of the Nahatak TMF of the Akhtala ore dressing combine

**Рис. 1.** Расположение/вид хвостохранилища Нахатак Ахталинского горно-обогатительного комбината



A visual inspection showed that the tailing dump was more than 80% full, and the surface of the lake was approximately 8 ha.

The total reclamation area of the tailings, including the area of the dam slopes, is estimated at approximately 17 ha. Full reclamation of the tailings is provided after the introduction/organization of storage of dry tailings in the worked-out section of the quarry [15–18].

The operating TMF “Nahatak” has the tailings of upstream type; it has been operated since 2011. The design capacity amounts 3.75 million m<sup>3</sup>. Tailings material deposition is performed by the zenith method. The starter dam is stone-filled of 7.0 m height; the height of the TMF dam with clayey sand material is 64 m.

It was to note, that from the end of 2019 the company use a new method for tailings disposal with dry tailings; in this case the TMF extension or construction of a new TMF is not planned [10].

*TMF site visit.* The visit to the Nahatak TMF site was carried out on July 2019. The site visit included the most important TMF parts. To explore the TMF and a dam bottom-line, a video recorded by a drone was used. The main study was carried out in three parts of the TMF: main dams, drainage canal, and secondary dam. Special attention was drawn to the main dam conditions.

*Check of the documentation.* As a result of these activities, the questionnaire on documentation checking was fully applied. The results of the documentation check were included in the Excel file, which was updated according to the updated version of the TMF methodology (answers to 259 questions of Subgroup C2; with short justification in column “S” of the Excel file).

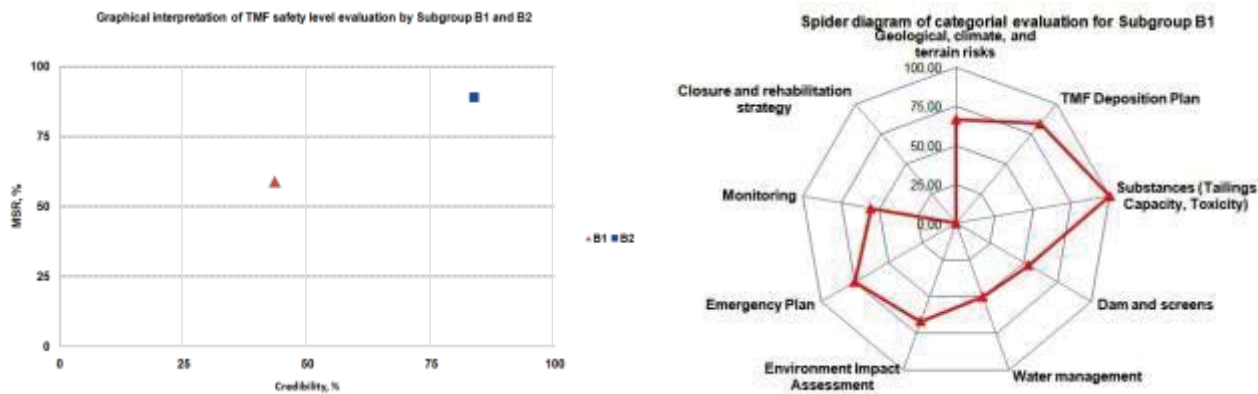
*Evaluation of the results.* The updated version of the TMF methodology (2019) for the TMF safety was applied to evaluate the safety level of the Nahatak TMF. The key novelties were (1) the equivalence of the evaluations obtained for visual and document checks, (2) introduction of the critical questions of doubled weight in comparison to general ones in both subgroups B1 and B2, and (3) more detailed categorial evaluation for visual check. The results of TMF safety evaluation are given in Table 2 and in Fig. 2, 3. The visual inspection provided answers to 35 questions of Subgroup B1 “Detailed visual inspection” with relevant justification/comments in column “S” of the Excel file, as well as to 259 questions of Subgroup B2 “Detailed Document Check”. The evaluation matrix was filled in at the TMF site during a week after the field reconnaissance. The measures were proposed after checking the answers/evaluation matrix and having insight into the drone footage.

**Table 2.** Overall evaluation results of the Akhtala ore dressing combine TMF\*

**Таблица 2.** Общая оценка хвостохранилища Акталинского горно-обогатительного комбината\*

Group of participants Группа участников	Checklist questions Вопросы контрольного списка	Not applicable Не применимо	Yes Да	Mostly yes В основном да	Mostly no В основном нет	No Нет	Minimum set of requirement (MSR) Минимальный набор требований (МНТ)	Credibility Достоверность
Main dam Основная дамба	Subgroup B1 Подгруппа B1	14.3	22.9	31.4	17.1	14.3	59.1	43.3
	Subgroup B2 Подгруппа B2	5.4	75.2	12	3.5	3.9	89	83.6
	Group B (B1+B2) Группа B (B1+B2)	6.5	68.9	14.3	5.1	5.1	74	63.5
Drainage canal Дренажный канал	Subgroup B1 Подгруппа B1	11.4	17.1	28.6	20	22.9	47.1	45.2
	Subgroup B2 Подгруппа B2	5.4	75.2	12	3.5	3.9	89	83.6
	Group B (B1+B2) Группа B (B1+B2)	6.1	68.3	14	5.5	6.1	68.1	64.4
Secondary dam Вторичная дамба	Subgroup B1 Подгруппа B1	11.4	28.6	34.3	8.6	17.1	61.6	51.6
	Subgroup B2 Подгруппа B2	5.4	75.2	12	3.5	3.9	89	83.6
	Group B (B1+B2) Группа B (B1+B2)	6.1	69.6	14.7	4.1	5.5	75.3	67.6

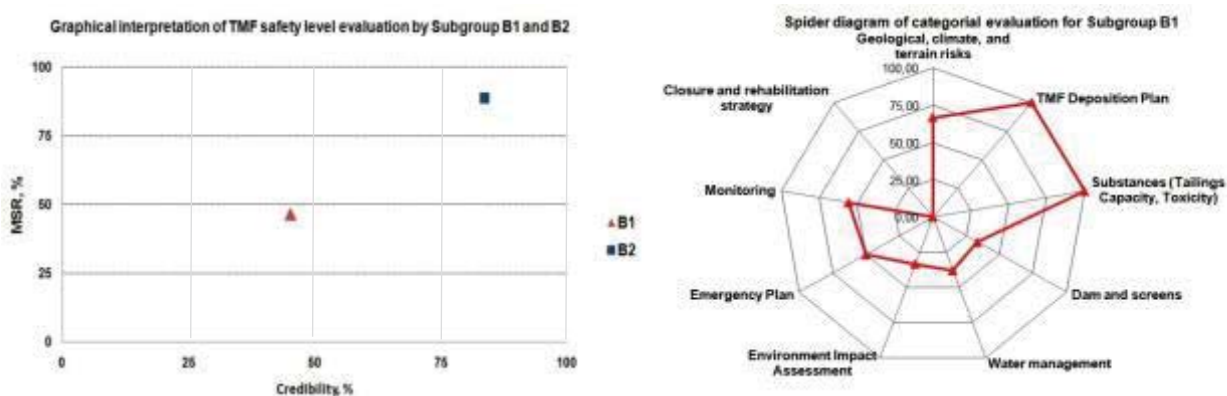
\*The table shows only the final results, because the details of the calculations are quite extensive, based on the answers to 294 questions (B1+B2). For this, a separate settlement document in Excel format was created with the ability to import the relevant data, which is an integral part of the TMF Methodology/В таблице показаны только окончательные результаты, поскольку детализация расчетов достаточно обширна и основана на ответах на 294 вопроса (B1+B2). Для этого создан отдельный расчетный документ в формате Excel с возможностью импорта соответствующих данных, который является неотъемлемой частью Методология безопасности хвостохранилища.



a

b

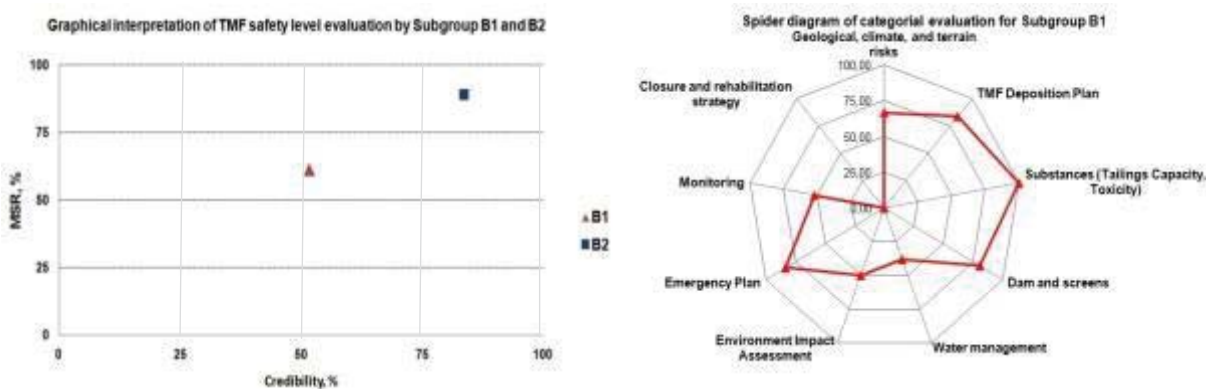
**Fig. 2.** Safety evaluation results for the main dam: a) overall evaluation; b) categorial evaluation for visual check  
**Рис. 2.** Результаты оценки безопасности главной плотины: а) общая оценка; б) категориальная оценка визуального осмотра



a

b

**Fig. 3.** Safety evaluation results for the drainage canal: a) overall evaluation; b) categorial evaluation for visual check  
**Рис. 3.** Результаты оценки безопасности дренажного канала: а) общая оценка; б) категориальная оценка визуального осмотра

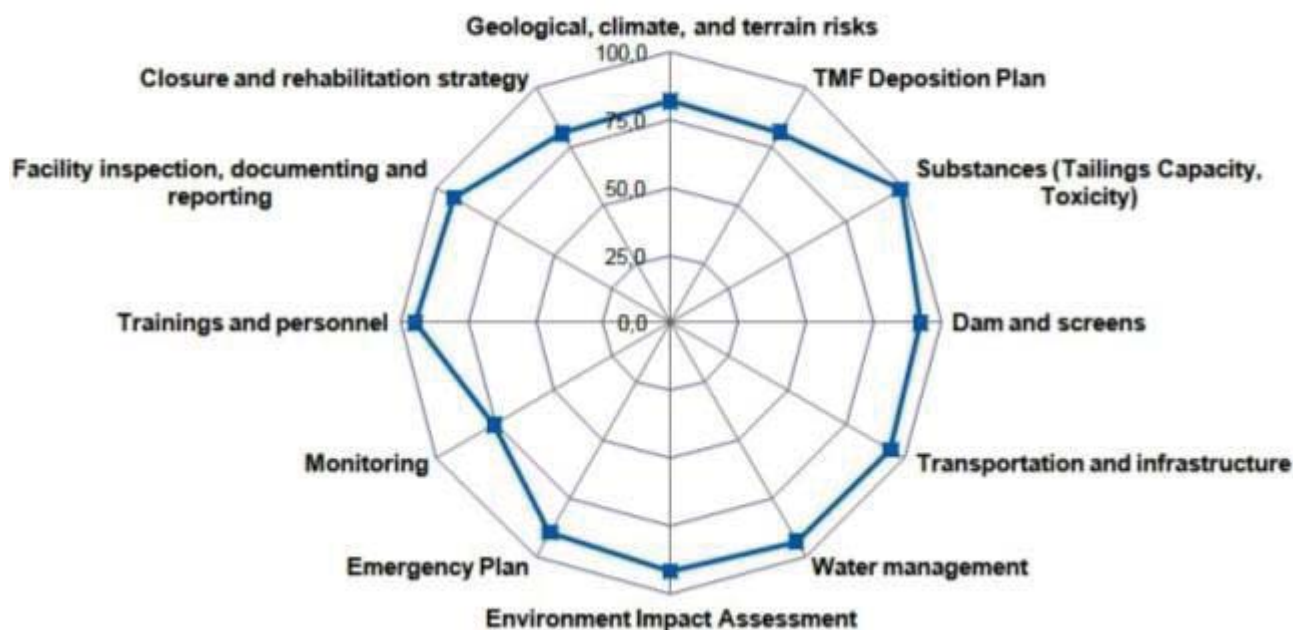


a

b

**Fig. 4.** Safety evaluation results for the secondary dam: a) overall evaluation; b) categorial evaluation for visual check  
**Рис. 4.** Результаты оценки безопасности вторичной плотины: а) общая оценка; б) категориальная оценка визуального осмотра

**Spider diagram of categorial evaluation for Subgroup B2**



**Fig. 5.** Safety evaluation results obtained by document check

**Рис. 5.** Результаты оценки безопасности, полученные при проверке документации

Measures recommended with direct using of Measure Catalogue of TMF methodology. As a result of the implemented studies, the following priority improvement measures were proposed:

• **Short-term measures:**

- increase through put of TMF drainage facilities (cleanse it of vegetation; remove plants in the diversion channel and check its integrity);
- permanently monitor drainage water streams using automatic analyzers;
- assess the possible dam failures and dam stability;
- equip the TMF with facilities preventing unauthorized access;
- develop a risk management strategy based on the assessment of risks posed by the abandoned TMF.

• **Mid-term measures:**

- strengthen the dam using grouting and/or drainage curtains:
  - rehabilitation with covering the tailings pond with soil and vegetation as long-term measures;
  - support ballast made of rocks and boulders to prevent from possible landslides at bottom line;
- equip the TMF with emergency spillways and additional tanks and ponds for collecting emergency overflows;
- detect locations of piping, water pathways/leakage through the dam body and locations of slope instability;

- create accumulating ponds for catching water in case of severe floods;
- equip the TMF site with additional wells and checkpoints for monitoring basic parameters (see Recommendations to TMF monitoring);
- carry out technical upgrading of checkpoints.

**Conclusions**

In spite of the fact that the TMF methodology (questionnaire of group B) was used/tested for the operated TMF in Armenia for the first time, the main problems of the TMF were identified, analysed, and appropriate recommendations were provided based on them, which were taken into account by the company management.

Based on the results it can be concluded that the main problems are related to the drainage system and the management of water flows, some parts of the primary dam that require restoration, as well as the improvement of monitoring systems.

The entire questionnaire B (including the questions B2 for the documentation check) was proposed to use not only for active, but also for temporarily suspended TMFs.

The results of applying TMF methodology also served as the basis for the international community to pay more attention to solving problems arising in the mining industry [19, 20].

## REFERENCES

1. Convention on the transboundary effects of industrial accidents. *UNECE*, 2017. Available at: <https://unece.org/info/Environment-Policy/Industrial-accidents/pub/21645> (accessed 15 May 2023).
2. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. *UN Office for Disaster Risk Reduction*, 2015. Available at: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (accessed 15 May 2023).
3. *Safety guidelines and good practices for tailings management facilities*, 2008 (updated version 2014). New York, Geneva, UNECE, 2016. 34 p.
4. *Eighth Environment for Europe Ministerial Conference*. Batumi, Georgia, 8–10 June 2016. Available at: [https://unece.org/sites/default/files/2021-05/Sample\\_Ministerial\\_Statement\\_from\\_Batumi\\_HLM\\_in\\_2016.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-05/Sample_Ministerial_Statement_from_Batumi_HLM_in_2016.pdf) (accessed 15 May 2023).
5. Vijgen J., Nikolaieva I. *Improving the safety of industrial tailings management facilities based on the example of Ukrainian facilities*. Project No. (FKZ) 26206, Final report, 2016. 57 p. Available at: <https://www.preventionweb.net/publication/improving-safety-industrial-tailings-management-facilities-based-example-ukrainian> (accessed 15 May 2023).
6. Design of structures for the earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *EUROCODE 8*, 2004. 229p.
7. Flood hazard map for Europe, 500 year return period. *EC Joint Research Centre Data Catalogue*. Available at: [https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-floods-floodmapeu\\_rp500y-tif](https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-floods-floodmapeu_rp500y-tif) (accessed 15 May 2023).
8. Sahakyan K., Aleksanyan A. Use of checklists as a method for collecting information during student industrial practice. *Methods of teaching chemical and environmental disciplines. Proceedings of VIII International Scientific and Methodological Conference*. Brest, BSTU, 2015. pp. 284–286. (In Russ.)
9. Sahakyan K., Winkelmann-Oei G., Otto S. *Assistance in safety improvement of Tailings Management Facilities (TMF) in Armenia and Georgia*. Project No. (FKZ) 83392, Final report 2020. Germany, Federal Environmental Agency, 2020. 74 p.
10. *Methodology for improving TMF safety*. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety, 2018. 129 p. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop\\_\\_Nov\\_2019/Background/TMF\\_Methodology\\_en.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop__Nov_2019/Background/TMF_Methodology_en.pdf) (accessed 15 May 2023).
11. Sahakyan K.S. Visual inspection and safety evaluation results of the Dastakert tailing management facility (TMF) based on the methodology of TMF safety. *Proceedings of National Polytechnic University of Armenia: Chemical and Environmental Technologies*, 2020, no. 1, pp. 43–51.
12. Kovacs A., Lohunova O., Winkelmann-Oei G., Mádai F., Török Z. Capacity development to improve safety conditions of tailings management facilities in the Danube River Basin: Technical report. *German Environment Agency*, 2020. 113 p.
13. Sahakyan K.S. *Safety requirements and exemplary operation rules for TMFs in the territory of the Republic of Armenia: teaching methodical manual*. Yerevan, NUACA, 2022. 115 p.
14. *Road map for action to strengthen mine tailings safety within and beyond the United Nations Economic Commission for Europe region*. Geneva, United Nation, 2022. 21 p.
15. Detailed design: rehabilitation of Akhtala ore dressing plant. *Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan, CJSC, 2001. (In Armenian).
16. Detailed design: "Extension and reconstruction of the Nahatak TMF. *Mining and Metallurgical Institute*. Yerevan CJSC, 2009 (In Armenian).
17. *Detailed design: Shamlugh Copper-porphyry Mine*. Yerevan, "RAKE" LTD, 2012. (In Armenian).
18. *Storage of Akhtala ore dressing plant's tailings in the open mine area, design documents*. Yerevan, "Akunk-Firma" LLC, 2017. (In Armenian).
19. Checklist for contingency planning for accidents affecting transboundary waters. *UNECE*. New York and Geneva, 2016. 51 p. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.e\\_Checklist\\_for\\_contingency.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.e_Checklist_for_contingency.pdf) (accessed 15 May 2023).
20. *Global Industry Standard on Tailings Management*. Available at: <https://globaltailingsreview.org/> (accessed 15 May 2023).

## Information about the authors

**Kristine S. Sahakyan**, Cand. Sc., Assistant, National University of Architecture and Construction of Armenia, 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia [sks091279@gmail.com](mailto:sks091279@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4639-4837>

**Arestak A. Sarukhanyan**, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, National University of Architecture and Construction of Armenia, 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia [sks091279@gmail.com](mailto:sks091279@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4928-9960>

Received: 25.05.2023

Revised: 01.07.2023

Accepted: 10.01.2024

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Convention on the transboundary effects of industrial accidents - as amended on 15 December // UNECE. – 2017. – 116 p. URL: <https://unece.org/info/Environment-Policy/Industrial-accidents/pub/21645> (дата обращения: 15.05.2023).
2. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 // UN Office for Disaster Risk Reduction. – 2015. – 25 p. URL: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (дата обращения: 15.05.2023).
3. Safety guidelines and good practices for tailings management facilities, 2008 (updated version 2014). – New York, Geneva: UNECE, 2016. – 34 p.

4. Eighth Environment for Europe Ministerial Conference. – Batumi: UN, 2016. – 14 p. URL: [https://unece.org/sites/default/files/2021-05/Sample\\_Ministerial\\_Statement\\_from\\_Batumi\\_HLM\\_in\\_2016.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-05/Sample_Ministerial_Statement_from_Batumi_HLM_in_2016.pdf) (дата обращения: 15.05.2023).
5. Vijgen J., Nikolaieva I. Improving the safety of industrial tailings management facilities based on the example of Ukrainian facilities // Project No. (FKZ) 26206, Final report. – 2016. – 57 p. URL: <https://www.preventionweb.net/publication/improving-safety-industrial-tailings-management-facilities-based-example-ukrainian> (дата обращения: 15.05.2023).
6. Design of structures for the earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings // EUROCODE 8, 2004. – 229 p.
7. Flood hazard map for Europe, 500 year return period. EC Joint Research Centre Data Catalogue. URL: [https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-floods-floodmareu\\_gp500y-tif](https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-floods-floodmareu_gp500y-tif) (дата обращения: 15.05.2023).
8. Саакян К., Алексанян А. Применение контрольных списков в качестве метода для сбора информации во время производственной практики студентов // Методика преподавания химических и экологических дисциплин: сборник научных статей VIII Международной научно-методической конференции. – Брест: БрГТУ, 2015. – С. 284–286.
9. Sahakyan K., Winkelmann-Oei G., Otto S. Assistance in safety improvement of Tailings Management Facilities (TMF) in Armenia and Georgia; Project No. (FKZ) 83392; Final report 2020. – Germany: Federal Environmental Agency, 2020. – 74 p.
10. Methodology for improving TMF safety. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety, 2018. – 129 p. URL: [https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop\\_\\_Nov\\_2019/Backgroud/TMF\\_Methodology\\_en.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2019/TEIA/Workshop__Nov_2019/Backgroud/TMF_Methodology_en.pdf) (дата обращения: 15.05.2023).
11. Sahakyan K.S. Visual inspection and safety evaluation results of the Dastakert tailing management facility (TMF) based on the methodology of TMF safety // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia: Chemical and Environmental Technologies. – 2020. – № 1. – P. 43–51.
12. Kovacs A., Lohunova O., Winkelmann-Oei G., Márai F., Török Z. Capacity development to improve safety conditions of tailings management facilities in the Danube River Basin" // Technical report. – November 2020. – 113 p.
13. Sahakyan K.S. Safety requirements and exemplary operation rules for TMFs in the territory of the Republic of Armenia. – Yerevan: NUACA, 2022. – 115 p.
14. Road map for action to strengthen mine tailings safety within and beyond the United Nations Economic Commission for Europe region. – Geneva: United Nation, 2022. – 21 p.
15. Detailed design "Rehabilitation of Akhtala ore dressing plant". – Yerevan: Mining and Metallurgical Institute CJSC, 2001. (In Armenian).
16. Detailed design "Extension and reconstruction of the Nahatak TMF. – Yerevan: Mining and Metallurgical Institute CJSC, 2009. (In Armenian).
17. Shamlugh Copper-porphury Mine. Detailed design. – Yerevan: "RAKE" LTD, 2012. (In Armenian).
18. Storage of Akhtala ore dressing plant's tailings in the open mine area, design documents. – Yerevan: "Akunk-Firma" LLC, 2017. (In Armenian).
19. Checklist for contingency planning for accidents affecting transboundary waters. – New York; Geneva: UNECE, 2016. – 51 p.
20. Global Industry Standard on Tailings Management. URL: <https://globaltailingsreview.org/> (дата обращения: 15.05.2023).

#### **Информация об авторах**

**Кристине Суриковна Саакян**, кандидат технических наук, ассистент кафедры геоэкологии и жизнеобеспечения Национального университета архитектуры и строительства Армении, Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105. [sks091279@gmail.com](mailto:sks091279@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4639-4837>

**Арестак Арамаисович Саруханян**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных систем, гидротехники и гидроэнергетики Национального университета архитектуры и строительства Армении, Республика Армения, 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105. [asarukhanyan51@mail.ru](mailto:asarukhanyan51@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4928-9960>

Поступила в редакцию: 25.05.2023

Поступила после рецензирования: 01.07.2023

Принята к публикации: 10.01.2024

УДК 622.276.6  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4221  
Шифр специальности ВАК: 25.00.17

## Оценка влияния кислотных присадок на реологические свойства и технологическую эффективность смеси цвиттерионных и анионных поверхностно-активных веществ

А.М.А. Мохсен✉, В.В. Коновалов, П.В. Склюев

Самарский государственный технический университет, Россия, г. Самара

✉alhalmyali@mail.ru

**Аннотация. Актуальность.** Для придания необходимых технологических свойств кислотным композициям используют различные добавки (присадки) – ингибиторы коррозии, стабилизаторы железа, деэмульгаторы, противоосадочные агенты и т. д. Введение присадок в кислотную композицию на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ может оказывать значимое влияние на эффективность их последующего применения, поскольку процессы мицеллообразования и, как следствие, реология их растворов особенно чувствительны к наличию в системе дополнительных компонентов. Соответственно, установление влияния кислотных присадок на реологические свойства и технологическую эффективность кислотных составов с вязкоупругими поверхностно-активными веществами является актуальной задачей. **Цель:** установление влияния кислотных присадок/добавок на реологическое поведение кислотного состава на основе смеси кокамидопропилбетаина и сульфосукцината этоксилированных жирных спиртов. **Объект:** кислотный состав на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ (смесь анионного и цвиттерионного поверхностно-активного вещества) и пакет кислотных присадок – ингибитора коррозии, стабилизатора железа, деэмульгатора и противоосадочного агента. **Методы:** определение реологических свойств с использованием реометра MCR52 (Anton Paar GmbH) в интервале скорости сдвига от 1 до 100 с<sup>-1</sup> при температурах от 20 до 90 °С, стандартные тесты по подбору кислотных добавок. **Результаты.** Установлено влияние добавок (присадок) на реологические свойства кислотного реагента на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ (смесь анионного и цвиттерионного поверхностно-активного вещества). Полученные результаты подтвердили, что введение пакета кислотных присадок приводит к уменьшению вязкости состава частично нейтрализованного раствора, но расширяет диапазон проявления вязкоупругих свойств, что приведет к повышению эффективности разработанного состава при кислотной обработке. Также добавка кислотных присадок снижает исходную вязкость, что облегчает закачку состава в пласт, а в присутствии углеводородов образование вязкоупругого геля не наблюдается, что облегчает процесс освоения скважины после завершения обработки. Температурный тест показал, что присадки не оказывают влияния на температурный диапазон применения кислотных присадок.

**Ключевые слова:** поверхностно-активные вещества, кислотные составы, самоотклоняющийся кислотный состав, сульфосукцинат, кокамидопропилбетаин, реологические свойства

**Для цитирования:** Мохсен А.М.А., Коновалов В.В., Склюев П.В. Оценка влияния кислотных присадок на реологические свойства и технологическую эффективность смеси цвиттерионных и анионных поверхностно-активных веществ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4221

---

UDC 622.276.6  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4221

## Evaluation of the effect of acid additives on rheological properties and technological efficiency of zwitterionic and anionic surfactant mixtures

A.M.A. Mohsen✉, V.V. Konovalov, P.V. Sklyuev

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

✉alhalmyali@mail.ru

**Abstract. Relevance.** Various acid additives, such as corrosion inhibitors, iron stabilizers, demulsifiers, anti-precipitation agents, are usually used to provide necessary technological properties to acid compositions. Adding them into the acid composition based on viscoelastic surfactants can have a significant impact on the efficiency of their subsequent use, since micelle formation and, consequently, rheology of their solutions are particularly sensitive to the presence of additional components in the system. Accordingly, determination of the acid additives influence on rheological properties and technological efficiency of acid compositions with surfactants is a vital task. **Aim.** To evaluate the effect of acid additives on rheological behavior of viscoelastic surfactants-based acid compositions (mixture of cocamidopropyl betaine and ethoxylated fatty alcohol sulfosuccinate). **Object.** Acidic composition based on viscoelastic surfactants (a mixture of anionic and zwitterionic surfactants) and a package of acidic additives – corrosion inhibitor, iron stabilizer, demulsifier and antisludge agent. **Methods.** Investigation of rheological properties using an MCR52 rheometer (Anton Paar GmbH) in the shear rate range from 1 to 100 s<sup>-1</sup> at temperatures from 20 to 90°C, standard tests for selecting acid additives. **Results.** The authors have determined the effect of acid additives on rheological properties of the developed self-diverting acid solution based on the viscoelastic surfactant (a mixture of anionic and zwitterionic surfactants). The obtained results confirmed that adding the acid additives into solutions leads to a decrease in partially neutralized solution viscosity. However, it expands the range of manifestation of viscoelastic properties. This will increase the efficiency of the developed composition during acid treatment. Also, the addition of acid additives reduces the initial viscosity, which facilitates acid injection into formation. A viscoelastic gel is not formed with hydrocarbons, which indicates that the treatment is effective in cleaning up the area after acidizing. The temperature test showed that the additives do not affect the temperature range of acid solution application.

**Keywords:** surfactants, acid compositions, self-diverting acid solution, sulfosuccinate, cocamidopropyl betaine, rheological properties

**For citation:** Mohsen A.M.A., Konovalov V.V., Sklyuev P.V. Evaluation of the effect of acid additives on rheological properties and technological efficiency of zwitterionic and anionic surfactant mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4221

### Введение

Кислотная обработка (КО) карбонатных коллекторов является основным химическим методом интенсификации притока нефти к добывающим скважинам [1]. В настоящее время повышение эффективности КО остаётся одной из актуальных задач, особенно при применении этой технологии на поздней стадии разработки месторождений [2]. Основная причина низкой эффективности КО – неравномерный охват пласта воздействием, что приводит к преимущественной обработке высокопроницаемых водонасыщенных зон и повышению обводненности скважинной продукции [3, 4]. С целью повышения технологической эффективности КО применяются модифицированные кислотные составы (КС), которые способны перераспределять поступающую кислоту в низкопроницаемые нефтенасыщенные зоны. Как правило, основой таких систем являются пены,

полимерные гели и вязкоупругие поверхностно-активные вещества (ВУ ПАВ) [5–7].

Опыт применения ВУ ПАВ в качестве основы КС показал перспективность их применения, что привело к появлению достаточно большого количества исследований, направленных на поиск, всестороннее тестирование и их промышленную апробацию [8–10]. Механизм действия данных КС представлен на рис. 1 и основан на их способности перераспределять кислоту в низкопроницаемые зоны. Исходный раствор имеет низкую вязкость, в процессе закачки в призабойную зону пласта он сначала проникает в участки с высокой проницаемостью (рис. 1, *с*). При контакте кислоты с породой кислота нейтрализуется, образуются продукты реакции и повышается pH, в результате раствор повышает вязкость (образование удлинённых цилиндрических мицелл, см. рис. 14а и 14б) (рис. 1, *а, б*).

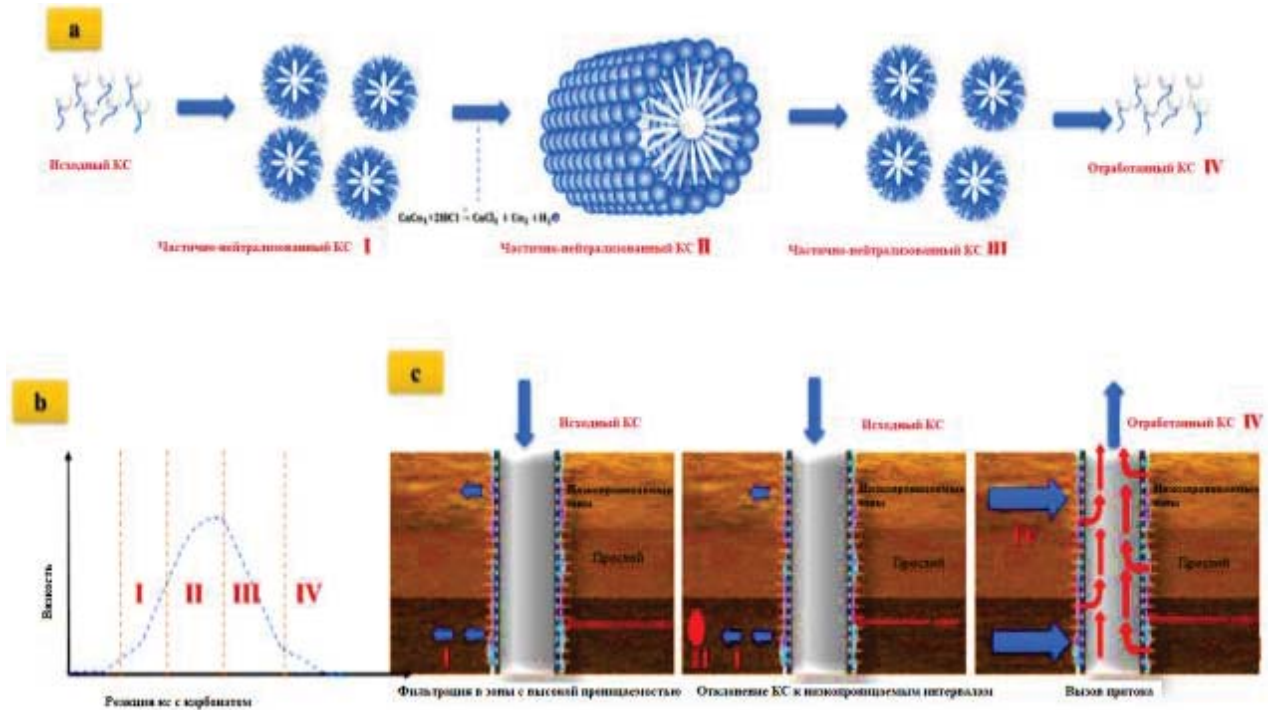


Рис. 1. Механизм действия КС на основе ВУ ПАВ [11]

Fig. 1. Work mechanism of viscoelastic surfactants (VES)-based self-diverting acid (SDA) solution [11]

По мере роста локальной вязкости состав отклоняет идущий следом кислотный раствор к другим зонам пласта. Процесс отклонения является непрерывным при проведении КО [11]. При полной нейтрализации КС или при его контакте с углеводородами композиция полностью разрушается, что приводит к повышению качества обработки нефтенасыщенных пропластков и облегчает освоение скважины. Разрушение геля происходит по причине образования сферических мицелл в присутствии углеводородов, что приводит к резкому снижению вязкости.

Современные модифицированные кислотные композиции помимо ПАВ содержат целый комплекс присадок (ингибиторы коррозии, стабилизаторы железа, деэмульгаторы, противошламовые агенты и некоторые другие), которые обеспечивают повышение эффективности действия КС за счёт снижения коррозионной агрессивности, коагуляции ПЗП, образования стойких эмульсий и т. д. [5, 12]. Но введение в систему данных компонентов может оказать значительное влияние на реологические свойства КС на основе ВУ ПАВ и, соответственно, на их технологическую эффективность.

Ранее нами были проведены исследования по разработке КС на основе смеси кокамидопропилбетаина и сульфосукцината этоксилированных жирных спиртов, которые показали перспективность их использования для разработки кислотных составов, обладающих эффектом «самоотклонения» [13, 14].

Цель настоящей работы – оценка влияния кислотных присадок/добавок на реологическое поведение кислотного состава на основе смеси кокамидопропилбетаина и сульфосукцината этоксилированных жирных спиртов.

#### Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовалась базовая основа, водный раствор соляной кислоты и ПАВ, к которой добавляли присадки. Все материалы и химические добавки, использованные в исследовании, представлены в табл. 1.

Подбор кислотного состава выполняли для одного из месторождений Урало-Поволжья. Плотность нефти – 0,86 г/см<sup>3</sup>, вязкость – 55 мПа·с. Содержание серы – 0,66 %; парафина – 5,5 %. Плотность воды – 1,12 г/см<sup>3</sup>; минерализация – 170 г/л, пластовая температура – 60 °С.

Оптимальное содержание в КС кислотных добавок/присадок определяли на основании стандартных подходов, связанных с оценкой коррозионной агрессивности, стабильности КС в присутствии трёхвалентного железа, совместимостью КС с нефтью и пластовой водой.

**Коррозионный тест.** Тест по определению коррозионной агрессивности КС проводили в соответствии с ГОСТ 9.905. Скорость коррозии определяли по изменению массы образцов из углеродистой стали гравиметрическим методом. Дозировку ингибитора коррозии (ИК) варьировали от 0,1 до 1 мас. %.



Результаты исследования показали, что оптимальное содержание ИК, при котором скорость коррозии стали при 25 и 60 °С не превышает нормируемых значений 0,2 г/м<sup>2</sup>×ч, составляет 0,8 мас. %.

*Стабильность КС при содержании соединений железа.* В процессе разработки КС важно обеспечить стабильность по отношению к Fe<sup>3+</sup> [15, 16]. Стабилизирующую способность оценивали по следующей методике: смешивали КС, содержащий стабилизатор железа (СЖ) в концентрации от 0,1 до 1 мас. %, и пластовую воду в равных объёмах и выдерживали при пластовой температуре. Далее состав визуально оценивали и фильтровали через сито с ячейкой 100 меш. Результаты исследования показали, что оптимальное содержание СЖ составляет 0,8 мас. %. При данном содержании не наблюдалось помутнение и образование осадка.

*Тест на совместимость КС с пластовой водой.* Совместимость КС с пластовой водой оценивали по следующей методике: смешивали равные объёмы пластовой воды и КС, полученную смесь перемешивали и помещали в герметично закрытую посуду, нагревали до пластовой температуры и выдерживали 30 минут. По истечении времени выдержки фиксировали изменение внешнего вида смеси (изменение цвета, опалесценция, помутнение, образование взвеси, выпадение осадка, объём выпавшего осадка). Состав считали совместимым с пластовой водой, если смесь оставалась прозрачной. Дозировку противоосадочного реагента изменяли от 0,05 до 0,5 мас. %. Результаты теста показали полную совместимость КС с пластовой водой, для дальнейших исследований выбрали дозировку 0,1 мас. %.

*Тест на совместимость КС с пластовой водой и нефтью.* Совместимость КС с нефтью определяли по следующей методике: смешивали КС с нефтью в равных объёмах. Разделение водной и нефтяной фаз оценивали методом статического отстоя. Время выдержки эмульсии при пластовой температуре составляло 30 минут. По истечении 30 минут оценивалось разделение водной и нефтяной фаз (степень разделения кислоты и нефти, поверхность контакта, налипание на стенки сосуда, наличие на сите эмульсии, осадка, сгустков АСПО), затем смесь фильтровали через сито с ячейкой 100 меш. Результаты теста показали полную совместимость КС с нефтью, для дальнейших исследований принята концентрация добавки деэмульгатора 0,1 мас. %.

Итоговый состав реагента с учётом подбора кислотных присадок представлен в табл. 1.

Исследование влияния присадок на реологические свойства КС выполняли следующим образом: в КС добавляли кислотные присадки, после чего КС нейтрализовали до остаточной концентрации

соляной кислоты от 0 до 6 % и измеряли вязкость. Для моделирования взаимодействия КС с карбонатной породой использовали химически чистый карбонат кальция.

**Таблица 1.** Состав КС на основе ВУ ПАВ

**Table 1.** Components of the VES-based acid composition

Компонент Compounds	Обозначение Symbol	Концентрация в КС, мас. % Concentration, wt %
Базовая основа/Basic component		
Кокаmidопропилбетаин (КАПБ) Cocamidopropyl betaine (CAPB)	КАПБ CAPB	11,0
Сульфосукцинат (СС) Sulfosuccinate	СС	
Соляная кислота/Hydrochloric acid	HCl	18,0
Электролит/Electrolyte	CaCl <sub>2</sub>	3,0
Кислотные добавки/присадки/Acid additives		
Ингибитор коррозии (ИК) на основе имидазолинов Corrosion inhibitor (CI) based on nitrogen-containing heterocycle, (imidazolines)	ИК/CI	0,8
Деэмульгатор (Д) на основе неионогенных ПАВ Demulsifier (D) based on non-ionic surfactants and ion-exchange resins	Д/Д	0,1
Противоосадочный реагент (ПР) на основе алкилсукцинатов Anti-sludging agent (ASA) based on alkyl succinates	ПР/ASA	0,1
Стабилизатор железа (СЖ) на основе карбоксиметилцеллюлозы Iron stabilizer (ICA) based on carboxymethylcellulose	СЖ/ICA	0,8

Вязкоупругие и реологические свойства КС определяли с использованием реометра MCR52 (Anton Paar GmbH, Австрия). Система измерения «плита–плита», величина зазора 1 мм. Реологические испытания проводились при ламинарном установившемся течении при скорости сдвига от 1 до 100 с<sup>-1</sup> и температурах от 20 до 90 °С.

## Результаты и обсуждение

Исследования по оценке изменения реологических свойств КС при реакции с карбонатной породой проводились по следующей методике: в приготовленный КС добавляли карбонат кальция (модель карбонатной породы) до остаточного содержания кислоты от 0 до 6 мас. %. Концентрация кислоты в исходном КС составляла 18 мас. %, общая концентрация ПАВ 11 мас. %. Изучение изменения реологических свойств КС при взаимодействии с углеводородами проводилось в присутствии керосина (10 % по объёму).

Результаты изменения реологических свойств КС в присутствии/отсутствии кислотных присадок при различной остаточной концентрации соляной

кислоты при ее частичной нейтрализации представлены в табл. 2 и на рис. 2.

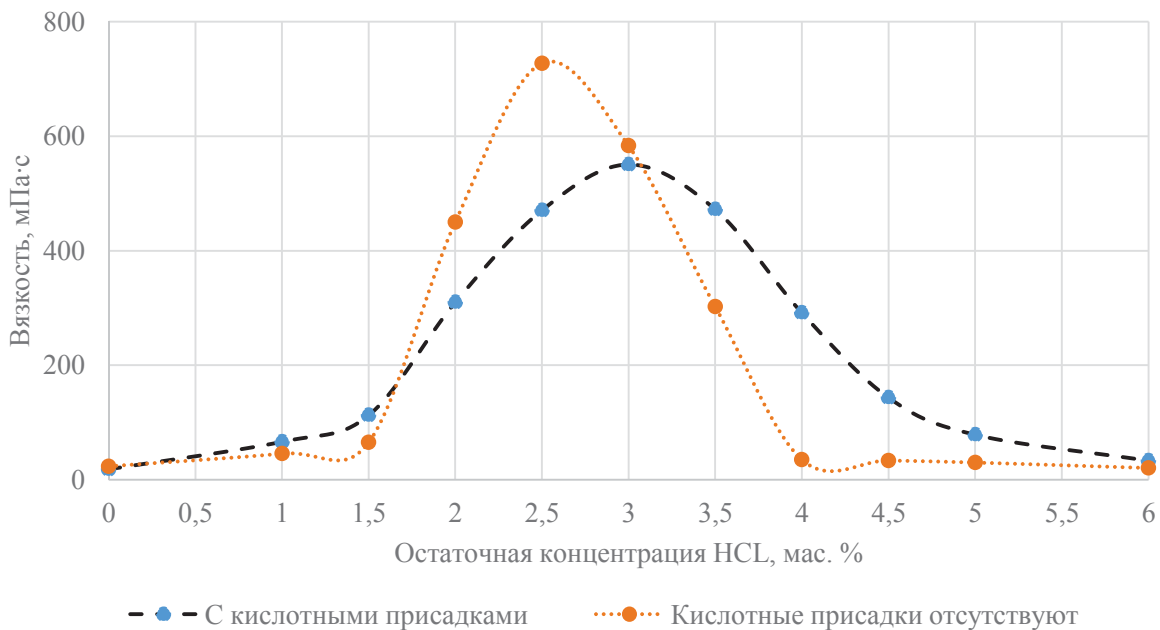
**Таблица 2.** Сравнительный анализ влияния КП на вязкость состава

**Table 2.** Comparative analysis of acid additives effect on composition viscosity

Остаточная концентрация кислоты, мас. % Residual acid concentration, wt %	Вязкость, мПа·с, при скорости сдвига 100с <sup>-1</sup> Viscosity, mPa s, at shear rate 100 s <sup>-1</sup>			
	Кислотные присадки отсутствуют Without acid additives		С кислотными присадками With acid additives	
	В отсутствии углеводородов In non-hydrocarbon medium	В присутствии углеводородов In hydrocarbon medium	В отсутствии углеводородов In non-hydrocarbon medium	В присутствии углеводородов In hydrocarbon medium
0	23,4	7,3	18,2	6,09
1,0	45,6	14,57	66,3	11,5
1,5	65,2	11,19	112,5	6,6
2,0	250	8,31	309,8	7,06
2,5	<b>727,4</b>	5,05	470,5	3,82
3,0	583,3	9,36	<b>550,6</b>	4,37
3,5	302,4	10,45	472,2	10,51
4,0	35,1	12,11	291,6	13,47
4,5	33,52	9,08	143,5	4,02
5,0	30,0	8,45	78,6	4,96
6,0	20,5	13,24	33,2	5,2
Исходная вязкость Initial viscosity	6,2		4,3	

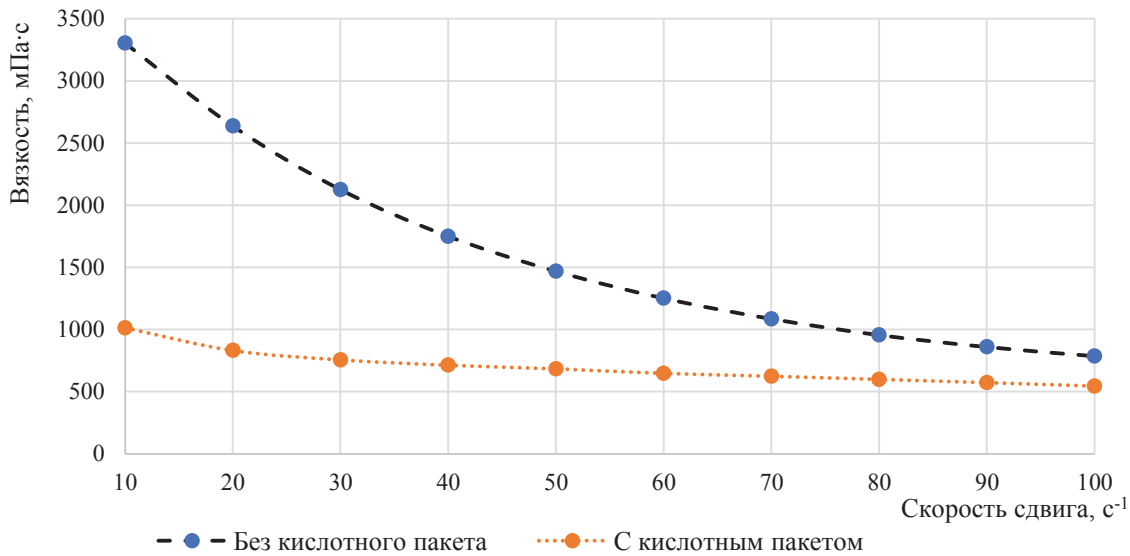
Исходная вязкость КС составляет 4,3 мПа·с (с пакетом кислотных добавок) и 6,2 мПа·с (без присадок). По мере истощения соляной кислоты за счет ее частичной нейтрализации (моделирование взаимодействия КС с карбонатным коллектором) наблюдается рост вязкости системы (табл. 2, рис. 2), которая достигает максимума, а затем снижается. Сопоставление реологических свойств показывает, что введение присадок в КС приводит к уменьшению вязкости исходного кислотного состава (~30 %), полностью (~17 %) и частично нейтрализованных растворов (~24,3 % при максимальной вязкости). На рис. 3 представлены результаты изменения вязкости от скорости сдвига. Полученные данные свидетельствуют о том, что по мере роста скорости сдвига разница в динамической вязкости кислотных составов снижается, но при низких значениях скорости сдвига (10 с<sup>-1</sup>) вязкость КС без добавок существенно выше (более чем в три раза). Таким образом, эффективность КС в присутствии присадок ухудшается. Согласно работам [17, 18], снижение вязкости КС связано с межмолекулярными взаимодействиями ПАВ, входящих в КС, и компонентами кислотных присадок.

Необходимо отметить, что введение присадок в КС приводит к смещению пика вязкости. Для КС с присадками максимальное значение вязкости регистрировалось при остаточном содержании соляной кислоты 2,5 %, а при добавлении присадок – 3,0 %. Присутствие добавок в КС приводит к расширению диапазона проявления вязкоупругих характеристик (табл. 2, рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость динамической вязкости кислотных составов с/без КП от остаточной концентрации HCl при скорости сдвига 100 с<sup>-1</sup> и температуре 20 °С

**Fig. 2.** Dependence of dynamic viscosity of acidic compositions with/without acid additives on HCl residual concentration at 20°C and a shear rate of 100 s<sup>-1</sup>

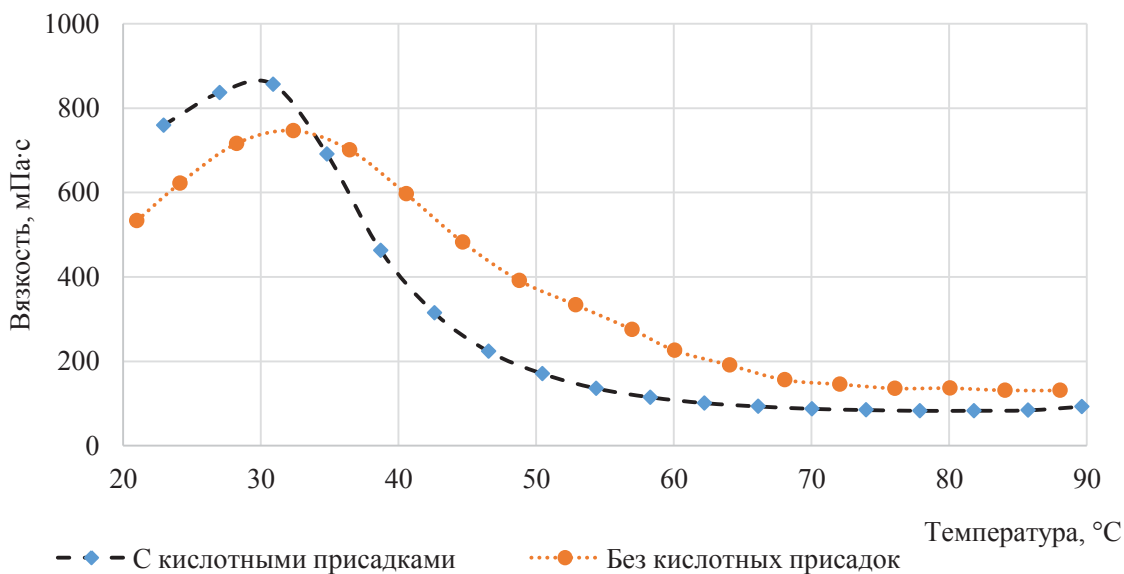


**Рис. 3.** Влияние кислотных добавок на вязкость композиции в зависимости от скорости сдвига при комнатной температуре при остаточном содержании 3 мас. %

**Fig. 3.** Effect of acid additives on composition viscosity depending on the shear rate at room temperature

Важным фактором является вязкость КС в присутствии углеводородов: чем ниже данное значение, тем лучше происходит освоение скважины для удаления продуктов реакции из пласта. Проведенные исследования показали, что в присутствии углеводородов образование геля не наблюдается, динамическая вязкость изменяется от 5,5 до 13,8 мПа·с, но в среднем вязкость КС с присадками ниже (~30 %). Таким образом, указанные факторы свидетельствуют о положительном влиянии присадок на технологические свойства КС.

Следующий тест был направлен на оценку влияния добавок в КС на изменение реологических свойств при варьировании температуры (рис. 4). С этой целью выполняли определение вязкости при изменении температуры от 10 до 90 °С и скорости сдвига 100  $s^{-1}$ . В диапазоне температур 10–40 °С происходит повышение вязкости системы, это связано с изменением формы мицелл [14], дальнейшее увеличение температуры снижает вязкость системы. Результаты показывают, что максимум вязкости для КС в отсутствии присадок наблюдается при 30 °С, добавление присадок приводит к незначительному смещению пика вязкости.



**Рис. 4.** Влияние температуры на вязкость композиции, содержащей кислотные присадки, при скорости сдвига 100  $s^{-1}$

**Fig. 4.** Temperature effect on viscosity of a composition containing acid additives at a shear rate of 100  $s^{-1}$

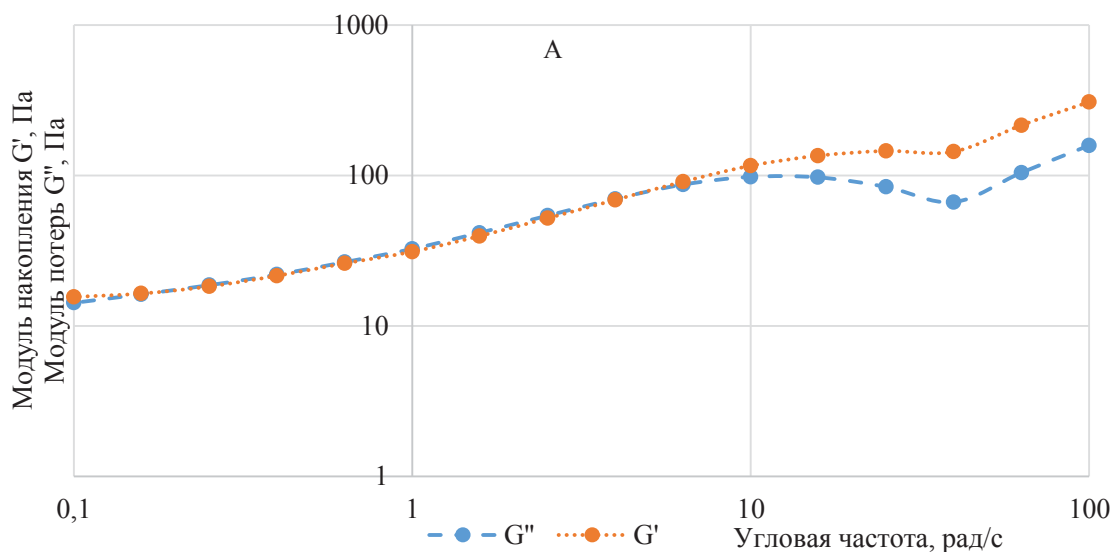


Рис. 5. Свип-анализ частотных характеристик ( $G''$  и  $G'$ )  
Fig. 5. Frequency sweep analysis ( $G''$  and  $G'$ )

Снижение вязкости КС в присутствии кислотных присадок может привести и к изменению вязкоупругих свойств системы. На рис. 5 представлены результаты теста оценки изменения вязкоупругих свойств КС, которые свидетельствуют о сохранении вязкоупругих свойств КС. Отмечается, что модуль накопления меньше модуля потерь при низких угловых частотах, хотя при увеличении частоты происходит противоположное изменение. Тест демонстрирует, что КС на основе ВУ ПАВ ведёт себя как типичный эластичный материал. Пересечение модулей происходит при низкой угловой частоте (0,158 рад/с), что свидетельствует о большем времени релаксации ( $\tau R=1/\omega c$ ). Согласно [19, 20], время релаксации ( $\tau R$ ) иллюстрирует время разрыва и ползучести мицеллы, таким образом, оно соответствует длине мицеллы.

Результаты определения радиусов мицелл ПАВ в водных растворах подтвердили, что при введении КП радиус сферических мицелл в среднем составляет 10,2 нм, а при отсутствии КП – 13,6 нм (на 25 % ниже).

### Выводы

Введение пакета присадок может существенно изменить реологические и технологические свойства КС на основе ВУ ПАВ. Следовательно, контроль за изменением свойств КС является обязательным условием разработки эффективных кислотных составов. На основании проведённых исследований сформулированы следующие выводы:

- добавка КП приводит к резкому снижению вязкости состава (на 24,3 %) и снижает исходную вязкость (примерно на 30 %), что облегчает его закачку в пласт. Вязкость КС без добавок при низких скоростях сдвига в три раза больше, но при повышении скорости сдвига наблюдается снижение различий в динамической вязкости;
- установлено расширение области проявления вязкоупругих свойств, что может привести к повышению эффективности кислотного состава, а также смещению пика вязкости (максимальная вязкость для КС без добавок наблюдается при остаточной концентрации HCl 2,5 мас. %, а для КС с добавками – при 3 мас. %);
- в присутствии углеводородов не наблюдается образования вязкого геля, и вязкость КС не превышает 13,8 мПа·с. В среднем вязкость кислотных составов с КП ниже примерно на 30 %, что облегчает процедуру освоения скважины и удаления продуктов реакции из пласта;
- температурный тест показал, что максимальная вязкость КС наблюдается в диапазоне температур 10–40 °С, при дальнейшем повышении температуры вязкость существенно ниже. Добавка присадок существенно не влияет на температурный диапазон применения КС;
- свип-анализ частотных характеристик подтверждает сохранение вязкоупругих свойств при введении КП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chacon O.G., Pournik M. Matrix acidizing in carbonate formations // Processes. – 2022. – Vol. 10. – № 1. – А. 174. – P. 1–18.
2. Garrouch A.A., Jennings A.R. A contemporary approach to carbonate matrix acidizing // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 158. – P. 129–143.

3. Gelled acid vs. self-diverting systems for carbonate matrix stimulation: an experimental and field study / A.E. Folomeev, I.A. Taipov, A.R. Khatmullin, F.K. Mukhametov, S.A. Vakhrushev, F.K. Mingalishev, V.F. Abrarov, A.V. Akimkin // SPE Russian Petroleum Technology Conference. Virtual. – 2021. – P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.2118/206647-MS>
4. Sahu Q.A., Arias R.E., Alali E.A. Dynamic diverter technology efficiency in acid fracturing applications // Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 2019. – P. 1–17.
5. Келланд М.А. Промысловая химия в нефтегазовой отрасли / Пер. с англ. под ред. Л.А. Магадовой. 2-е изд. – СПб: Центр образовательных программ «Профессия», 2015. – 608 с.
6. A novel acidizing technology in carbonate reservoir: in-situ formation of CO<sub>2</sub> foamed acid and its self-diversion / Yong-li Yan, Qi Xi, Christian-Chibuike Una, Bing-Cheng He, Chun-Sheng Wu, Long-Long Dou // Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects. – 2019. – Vol. 580. – P. 1–8.
7. A review of diverting agents for reservoir stimulation / L. Zhao, X. Chen, H. Zou, P. Liu, C. Liang, N. Zhang, N. Li, Z. Luo, J. Du // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 187. – P. 1–10.
8. New in-situ generated acid system for carbonate dissolution in sandstone and carbonate reservoirs / K. Sokhanvarian, T. Pummaraanthu, E. Arslan, H.A. Nasr-El-Din, N. Shimek, K.A. Smith // Proceedings of SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. – Montgomery, Texas, USA, 2017 April. – P. 614–633.
9. Study of a novel gemini viscoelastic surfactant with high performance in clean fracturing fluid application / W. Zhang, J. Mao, X. Yang, H. Zhang, Z. Zhang, B. Yang, Y. Zhang, J. Zhao // Polymers. – 2018. – Vol. 10. – P. 1–18.
10. Fogang L.T., Kamal M.S., Sultan A.S. Viscosity-reducing agents (breakers) for viscoelastic surfactant gels for well stimulation // Journal of Energy and Fuels. – 2022. – Vol. 34. – P. 1–15. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03410
11. Development of a stimuli-responsive gemini zwitterionic viscoelastic surfactant for self-diverting acid / W. Zhang, J. Mao, X. Yang, H. Zhang, B. Yang, Z. Zhang, J. Zhao // Journal of Surfactants and Detergents. – 2019. – Vol. 13. – P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1002/jsde.12267> (дата обращения 15.04.2023).
12. Lungwitz B., Fredd C., Brady M. Diversion and cleanup studies of viscoelastic surfactant-based self-diverting acid // SPEPO. – 2007. – 22 (1). – P. 121–127. SPE–86504-PA. DOI: 10.2118/86504
13. Реологические свойства мицеллярных растворов смеси кокамидопропилбетаина и сульфосукцинатов этоксилированных жирных спиртов / А.М.А. Мохсен, М.А. Хуссейн, В.В. Коновалов, П.В. Склюев // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 1. – С. 33–40.
14. Мохсен А.М.А., Коновалов В.В., Склюев П.В. Исследования влияния хлористого кальция на реологические свойства смеси соляно-кислотных растворов цвиттерийных и анионных поверхностно-активных веществ // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 4. – С. 18–22.
15. Li L., Nasr-El-Din H.A.A., Cawiezel K.E.E. Rheological properties of a new class of viscoelastic surfactant // SPE Prod & Oper. – 2010. – Vol. 25. – P. 355–366.
16. Impact of Fe (III) on the performance of VES-based acids / Yi. Shu, G. Wang, H.A. Nasr-El-Din, Z. Jian // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. – Noordwijk, The Netherlands, 2013. – Vol. 17. – P. 1–17.
17. Impact of acid additives on the rheological properties of a viscoelastic surfactant and their influence on field application / H.A. Nasr-El-Din, A.W.H. Al-Ghamdl, A.A. Al-Qahtani, M.M. Samuel // SPE Journal. – 2008. – Vol. 13. – P. 35–47.
18. Cetin S., Nasr-El-Din H.A. Rheological study of a novel sulfobetaine surfactant-based acid system // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Manama, Kingdom of Bahrain, 2017. – Vol. 15. – P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.2118/183652-MS> (дата обращения 15.04.2023).
19. Phase and rheological behavior of novel gemini-type surfactant systems / D.P. Acharya, H. Kunieda, Y. Shiba, K.I. Aratani // Journal of Physical Chemistry. – 2004. – Vol. 108. – P. 1790–1797.
20. Garcia B.F., Saraji S. A new insight into the dependence of relaxation time on frequency in viscoelastic surfactant solutions: from experimental to modeling study // Journal of Colloid and Interface Science. – 2018. – Vol. 517. – P. 265–277.

### Информация об авторах

**Али Мохаммед Абдулла Мохсен**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Самарского государственного технического университета, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. [alhamyali@mail.ru](mailto:alhamyali@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0002-6028-8611>

**Виктор Викторович Коновалов**, кандидат химических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Самарского государственного технического университета, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. [konovalov-samgtu@yandex.ru](mailto:konovalov-samgtu@yandex.ru)

**Прокофий Витальевич Склюев**, кандидат химических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Самарского государственного технического университета, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. [p.v.sklyuev@gmail.com](mailto:p.v.sklyuev@gmail.com)

Поступила в редакцию: 03.05.2023

Поступила после рецензирования: 03.07.2023

Принята к публикации: 10.01.2024

### REFERENCES

1. Chacon O.G., Pournik M. Matrix acidizing in carbonate formations. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 1–18.
2. Garrouch A.A., Jennings A.R. A contemporary approach to carbonate matrix acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 158, pp. 129–143.

3. Folomeev A.E., Taipov I.A., Khatmullin A.R., Mukhametov F.K., Vakhrushev S.A., Mingalishev F.K., Abrarov V.F., Akimkin A.V. Gelled acid vs. self-diverting systems for carbonate matrix stimulation: an experimental and field study. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Virtual, October 2021. pp. 1–26.
4. Sahu Q.A., Arias R.E., Alali E.A. Dynamic diverter technology efficiency in acid fracturing applications. *Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conferenc*. Abu Dhabi, UAE, November 2019. pp. 1–17.
5. Kelland M.A. *Production chemicals for the oil and gas industry*. Translated from English, ed. by L.A. Magadova. 2<sup>nd</sup> ed. St. Petersburg, Center of Educational Program "Profession" Publ., 2015. 608 p. (In Russ.)
6. Yong-li Yan, Qi Xi, Christian-Chibuike Una, Bing-Cheng He, Chun-Sheng Wu, Long-Long Dou. A novel acidizing technology in carbonate reservoir: in-situ formation of CO<sub>2</sub> foamed acid and its self-diversion. *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects*, 2019, vol. 580, pp. 1–8.
7. Zhao L., Chen X., Zou H., Liu P., Liang C., Zhang N., Li N., Luo Z., Du J. A review of diverting agents for reservoir stimulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 187, pp. 1–10.
8. Sokhanvarian K., Pummrapanthu T., Arslan E., Nasr-El-Din H.A., Shimek N., Smith K. A new in-situ generated acid system for carbonate dissolution in sandstone and carbonate reservoirs. *Proceedings of SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Montgomery, Texas, USA, 2017, April. pp. 614–633.
9. Zhang W., Mao J., Yang X., Zhang H., Zhang Z., Yang B., Zhang Y., Zhao J. Study of a novel gemini viscoelastic surfactant with high performance in clean fracturing fluid application. *Polymers*, 2018, vol. 10, pp. 1–18.
10. Fogang L.T., Kamal M.S., Sultan A.S. Viscosity-reducing agents (breakers) for viscoelastic surfactant gels for well stimulation. *Journal of Energy and Fuels*, 2022, vol. 34, pp. 1–15. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03410
11. Zhang W., Mao J., Yang X., Zhang H., Yang B., Zhang Z., Zhao J. Development of a stimuli-responsive gemini zwitterionic viscoelastic surfactant for self-diverting acid. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2019, vol. 13, pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1002/jsde.12267> (accessed 15 April 2023).
12. Lungwitz B., Fredd C., Brady M. Diversion and cleanup studies of viscoelastic surfactant-based self-diverting acid. *SPEPO*, 2007, 22 (1), pp. 121–127. SPE-86504-PA. DOI: 10.2118/86504
13. Mokhsen A.M., Khussein M.A., Konovalov V.V., Sklyuev P.V., Rheological properties of micellar solutions of a mixture of cocamidopropyl betaine and sulfosuccinates of ethoxylated fatty alcohols. *Oil and gas business*, 2019, no. 1, pp. 33–40. (In Russ.)
14. Mokhsen A.M.A., Konovalov V.V., Sklyuev P.V. Studies of the effect of calcium chloride on the rheological properties of a mixture of hydrochloric acid solutions of zwitterionic and anionic surfactants. *Oilfield business*, 2022, no. 4 (640), pp. 18–22. (In Russ.) DOI: 10.33285/0207-2351-2022-4(640)-18-22. EDN EOBRAV
15. Li L., Nasr-El-Din H.A.A., Cawiezel K.E.E. Rheological properties of a new class of viscoelastic surfactant. *SPEProd&Oper*, 2010, vol. 25, pp. 355–366.
16. Shu Yi., Wang G., Nasr-El-Din H.A., Jian Z. Impact of Fe (III) on the performance of VES-based acids. *SPE European Formation Damage Conference & Exhibition*. Noordwijk, The Netherlands, 2013, June. Vol. 17, pp. 1–17.
17. Nasr-El-Din H.A., Al-Ghamdl A.W.H., Al-Qahtani A.A., Samuel M.M. Impact of acid additives on the rheological properties of a viscoelastic surfactant and their influence on field application. *SPE Journal*, 2008, vol. 13, pp. 35–47.
18. Cetin S., Nasr-El-Din H.A. Rheological study of a novel sulfobetaine surfactant-based acid system. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Kingdom of Bahrain, 2017 March. Vol. 15, pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.2118/183652-MS> (accessed 15 April 2023)
19. Acharya D.P., Kunieda H., Shiba Y., Aratani K.I. Phase and rheological behavior of novel gemini-type surfactant systems. *Journal of Physical Chemistry*, 2004, vol. 108, pp. 1790–1797.
20. Garcia B.F., Saraji S. A new insight into the dependence of relaxation time on frequency in viscoelastic surfactant solutions: from experimental to modeling study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 517, pp. 265–277.

### Information about the authors

**Ali Mohammed Abdullah Mohsen**, Postgraduate Student, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russian Federation. alhalmyali@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6028-8611>

**Viktor V. Konovalov**, Cand. Sc., Associate Professor, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russian Federation. konovalov-samgtu@yandex.ru

**Prokofy V. Sklyuev**, Cand. Sc., Associate Professor, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russian Federation. p.v.sklyuev@gmail.com

Received: 03.05.2023

Revised: 03.07.2023

Accepted: 10.01.2024

УДК 622.24.051.64  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4230  
Шифр специальности ВАК: 1.6.10, 2.8.1

## Разработка системы управления режимом алмазного бурения по показателю сопротивления разрушению горной породы

В.В. Нескоромных, М.С. Попова✉, К.В. Лалетина, Д.В. Лысаков

*Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск*

✉alleniram83@mail.ru

**Аннотация. Актуальность.** Сопротивление породоразрушающим элементам в процессе разрушения горной породы во многом определяет эффективность результатов бурения. Сведения о коэффициенте сопротивления позволяют правильно и своевременно регулировать интенсивность воздействия бурового инструмента на забой скважины. Для контроля силового контакта резцов бурового инструмента с забоем скважины необходимо иметь методологический аппарат, позволяющий определять механизм разрушения породы с учетом сил сопротивления. Существующие методики выбора сочетаний параметров режима алмазного бурения по известному индексу  $RPI$  или по критерию энергоемкости процесса разрушения горной породы  $N/v_m$ , где  $N$  – забойная мощность на преодоление сопротивления при разрушении горной породы на забое скважины;  $v_m$  – механическая скорость бурения, имеют ряд недостатков, заключающихся, например, в возникновении износа инструмента или необходимости получения значения забойной мощности в режиме текущего времени, что затруднительно в рамках современных условий бурения. Поэтому исследование сопротивления горной породы разрушению алмазным резцом, основанное на применении метода полного факторного эксперимента с получением математических моделей факторов и их графической интерпретации в сочетании с системами управления процессами с помощью вычислительной техники в режиме текущего времени, является темой актуальной, раскрытие которой позволит определить направление повышения технико-экономических показателей бурения. **Целью** исследования является разработка методологического аппарата, позволяющего определять механизм разрушения породы с учетом сил сопротивления для обеспечения оптимального управления алмазным бурением. **Объекты:** механизм сопротивления горной породы разрушению алмазным резцом. **Методы:** анализа, аналитического исследования, полного факторного эксперимента. **Результаты.** Представлен аналитический анализ возможности регулирования режимов бурения с целью достижения наибольшего эффекта от бурения путем оценки коэффициента сопротивления как функции интенсивности разрушения или углубления за один оборот. На основании аналитических исследований и анализа возможностей управления бурением посредством автоматизированных систем в режиме текущего времени предлагается методика выбора параметров режима бурения по заданному оптимальному значению показателя сопротивления при бурении, предложен путь ее автоматической реализации.

**Ключевые слова:** Бурение, алмазный резец, полный факторный эксперимент, тангенциальное усилие, коэффициент сопротивления, сила резания, режимы бурения

**Для цитирования:** Разработка системы управления режимом алмазного бурения по показателю сопротивления разрушению горной породы / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, К.В. Лалетина, Д.В. Лысаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 78–87 DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4230

---

UDC 622.24.051.64  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4230

## Development of a system for controlling a diamond drilling mode in terms of rock fault resistance

V.V. Neskoromnykh, M.S. Popova✉, K.V. Laletina, D.V. Lysakov

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

✉alleniram83@mail.ru

**Abstract. Relevance.** Resistance to rock-cutting elements in rock destruction largely determines the effectiveness of drilling results. Information about the drag coefficient allows you to correctly and timely adjust the intensity of a drilling tool impact on the bottom of the well. To control the force contact of the drilling tool cutters with the bottom of the well, it is necessary to have a methodological apparatus that allows determining the rock destruction mechanism, taking into account the resistance forces. The existing methods for selecting combinations of diamond drilling mode parameters according to the known *RPI* index or according to the criterion of energy intensity of rock destruction  $N/v_m$ , where  $N$  is the bottomhole power to overcome the resistance during rock destruction at the bottom hole;  $v_m$  – mechanical drilling speed, have a number of disadvantages. They consist, for example, in occurrence of tool wear or the need to obtain a bottomhole power value in the current time mode, which is difficult under modern drilling conditions. Therefore, the study of rock resistance to destruction by a diamond cutter, based on application of the full factorial experiment method with obtaining mathematical models of factors and their graphical interpretation in combination with process control systems using computer technology in the current time mode, is a relevant topic. The disclosure of this topic will determine the direction of increasing technical and economic indicators of drilling. **Aim.** To develop a methodological apparatus that allows determining the mechanism of rock destruction taking into account the resistance forces to ensure optimal control of diamond drilling. **Objects.** Mechanism of rock resistance to destruction by a diamond cutter. **Methods.** Analysis, analytical research, full factorial experiment. **Results.** The paper presents an analytical analysis of the possibility of controlling drilling modes in order to achieve the greatest effect from drilling by estimating the drag coefficient as a function of the intensity of destruction or deepening per one revolution. Based on the analytical studies and the mode of drilling control by a computer in the real time mode, the authors have proposed a method for selecting the parameters of the drilling mode according to a given optimal value of the resistance index during drilling, and a way for its automatic implementation.

**Keywords:** drilling, diamond cutter, full factorial experiment, tangential force, drag coefficient, cutting force, drilling modes

**For citation:** Neskormnykh V.V., Popova M.S., Laletina K.V., Lysakov D.V. Development of a system for controlling a diamond drilling mode in terms of rock fault resistance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, p. 78–87. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4230

## Введение

Особенности геологического разреза, и главным образом его неоднородность, при проведении буровых работ провоцируют неоправданный износ бурового инструмента, что, как следствие, приводит к потере производительности, а также к повышенным затратам времени на сооружение скважин. Важным фактором, влияющим на результаты бурения, является сила сопротивления, возникающая со стороны забоя и действующая на буровой инструмент [1–25]. Так, например, сопротивление горной породы является причиной препятствия внедрению резцов породоразрушающего инструмента в забой скважины, что соответственно ограничивает глубину разрушения горной породы и скорость углубления.

Изменение сопротивления в процессе бурения скважины может быть вызвано как изменением свойств горной породы, например, при встрече нового пласта, так и изменением свойств среды, возникающей на забое скважины в процессе бурения [1–25]. При прочих равных условиях величина сопротивления определяется видом горной породы и процессами, протекающими на забое скважины. Таким образом, возможность фиксации показателя сопротивления со стороны забоя позволит получать данные о смене физико-механического состояния зоны, на которую оказывает воздействие режущая поверхность породоразрушающего инструмента.

В производственных условиях контроль и корректировка эксплуатации бурового инструмента доступны путем регулирования параметров режима бурения. Своевременный выбор оптимальных зна-

чений осевой нагрузки на инструмент, частоты его вращения и подачи промывочной жидкости с учетом текущего физико-механического состояния забоя способствует повышению эффективности разрушения горной породы и улучшению показателей работы породоразрушающего инструмента [1–25]. Это определяется тем, что воздействие инструмента на породу должно соответствовать свойствам горной породы, прежде всего ее твердости. Таким образом, направление повышения эффективности бурения должно основываться на анализе характера разрушения горной породы, который можно считать основополагающим в управлении работоспособностью бурового инструмента.

Наиболее востребованным в горной промышленности и перспективным для дальнейшей разработки является импрегнированный алмазный инструмент. Такой буровой инструмент может использоваться в широких пределах геологических условий. Импрегнированные коронки и долота хорошо зарекомендовали себя при бурении в породах, как средней твердости, так и твердых (от VI до XII категории по буримости). При этом современный импрегнированный инструмент обладает самым мелким из доступных резцом. Исследование работы режущих элементов импрегнированного инструмента прямыми методами затруднительно в силу малых геометрических параметров изучаемой плоскости взаимодействия резца с горной породой. Исследование механизма разрушения мелким алмазным резцом требует новых системных подходов, учитывающих взаимное влияние всех процес-



сов и явлений, сопутствующих бурению. Решение поставленной задачи возможно путем реализации аналитического исследования, основанного на обработке экспериментальных данных.

Учитывая вышесказанное, разработка системы управления параметрами режима алмазного бурения по показателю сопротивления разрушения горной породы является темой актуальной и требующей тщательного научного обоснования.

### Методология исследования

Для точного и детального анализа процесса разрушения горных пород алмазным инструментом, обладающим мелкими режущими элементами, целесообразно применение метода полного факторного эксперимента (ПФЭ), позволяющего на основе практических данных осуществлять аналитический анализ. Путем выполнения всех этапов данной методики, изложенных в работах [1, 10, 24], реализуется математическая обработка основных параметров бурения, полученных в результате эксперимента или в ходе производственных испытаний. Такой подход к научному исследованию позволяет вывести математические модели, отражающие характер изменения основных показателей бурения, таких как механическая скорость, энергоёмкость разрушения горной породы и углубления за оборот, а также строить необходимые графики для наглядного анализа получаемых зависимостей.

Для полной реализации методики осуществляется ряд последовательных действий. На первом этапе составляется план эксперимента с обязательным указанием влияющих на процесс бурения факторов (осевая нагрузка, частота вращения, вид, количество и состав очистного агента), определяются уровни варьирования указанными факторами и очередность проведения опытов при различных уровнях – количественном значении факторов.

Далее производится обработка результатов эксперимента и строятся графики, отражающие интерпретацию полученных на первом этапе математических моделей механической скорости бурения импрегнированным буровым инструментом, энергоёмкости разрушения горной породы при бурении и углубления за один оборот инструмента на забое, а также их зависимость от осевой нагрузки  $P_{oc}$  и частоты вращения  $\omega$ .

На рис. 1 представлен пример графической зависимости механической скорости ( $v_m$ ) от параметров режима бурения, полученной в результате обработки экспериментальных данных методом ПФЭ. На полученной графической интерпретации математической модели механической скорости бурения параметры частоты вращения  $\omega$  и осевой нагрузки  $P_{oc}$  представлены в закодированном виде, т. е. предельные значения максимальных и мини-

мальных факторов даны в виде кодовых значений, соответственно, +1 и –1.

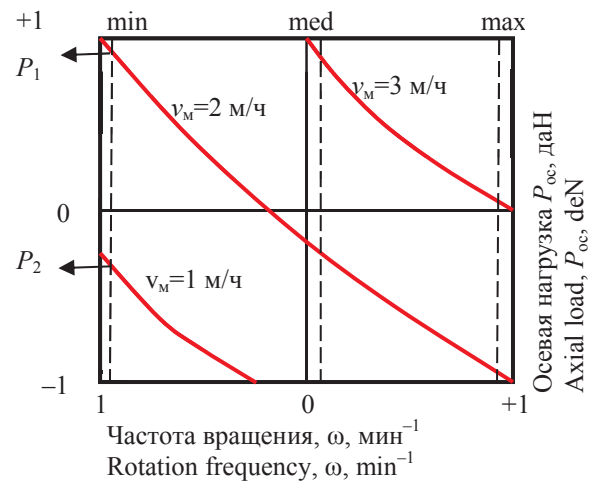


Рис. 1. Графическая интерпретация математических моделей на отклик  $v_m$

Fig. 1. Graphical interpretation of mathematical models for the response  $v_m$

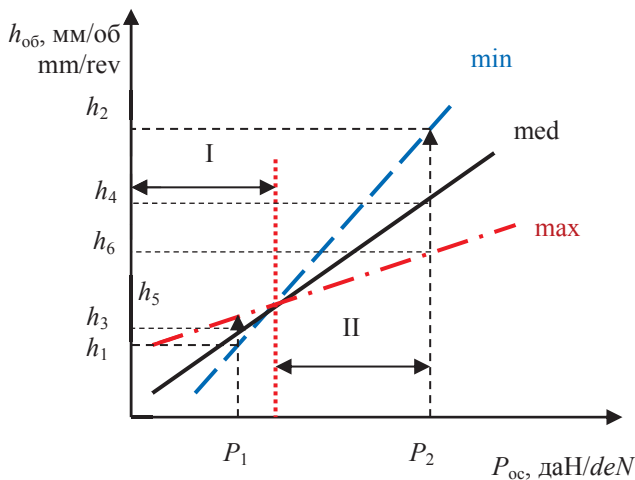
Более подробно проанализировать механизм разрушения породы в процессе бурения скважины можно путем построения зависимости углубления за один оборот бурового инструмента от осевой нагрузки  $P_{oc}$  при различных частотах вращения. В качестве показателей частоты вращения принимаются значения, введенные на этапе экспериментального бурения как максимальное, минимальное (т. е. предельные для эксперимента) и среднее. Эти величины выбираются на графике, вид которого показан на рис. 1, и, соответственно, обозначаются как min, med, max. Следующим шагом является определение по данному графику показателей осевой нагрузки  $P_{oc}$ , соответствующих трем выбранным значениям частоты вращения и механической скорости бурения  $v_m$ .

Исходя из полученных данных, производится расчет величины углубления за оборот ( $h_{об}$ ). По результатам расчета показателя углубления за оборот ( $h_{об}$ ) строится график зависимости углубления за оборот от осевой нагрузки  $h_{об}=f(P_{oc})$  (рис. 2).

Анализ полученных описанным способом графиков позволяет определить основные характеристики процесса разрушения пород в процессе бурения.

Например, изучение графика зависимости углубления за один оборот вращения от осевой нагрузки и частоты вращения инструмента, представленного на рис. 2, показало, что линии, отражающие характер углубления, располагаются не одинаково по обе стороны относительно точки их пересечения. Таким образом, можно обозначить на

графике две четко выделяющиеся зоны (I и II). И сделать вывод о том, что механизм разрушения горной породы реализуется в пределах этих зон неодинаково.



**Рис. 2.** Графическая зависимость углубления за один оборот от осевой нагрузки и частоты вращения инструмента  
**Fig. 2.** Dependence of deepening per revolution of tool rotation on the axial load and the speed of the tool

Для определения механизма разрушения в выделенных зонах в каждой из них проведены вертикальные линии, соответствующие значениям осевой нагрузки. Пересечения этих вертикальных линий позволяют получить значения углублений при минимальном ( $h_1, h_2$ ), среднем ( $h_3, h_4$ ) и максимальном ( $h_5, h_6$ ) значениях частоты вращения. Анализ зависимости углубления за оборот от осевой нагрузки при различных показателях частоты вращения показал, что зона I соответствует механизму усталостно-поверхностного разрушения, а зона II — объемному механизму разрушения горной породы.

В то же время представленная обработка данных может выглядеть иным образом, например, как графическая интерпретация, показанная на рис. 3.

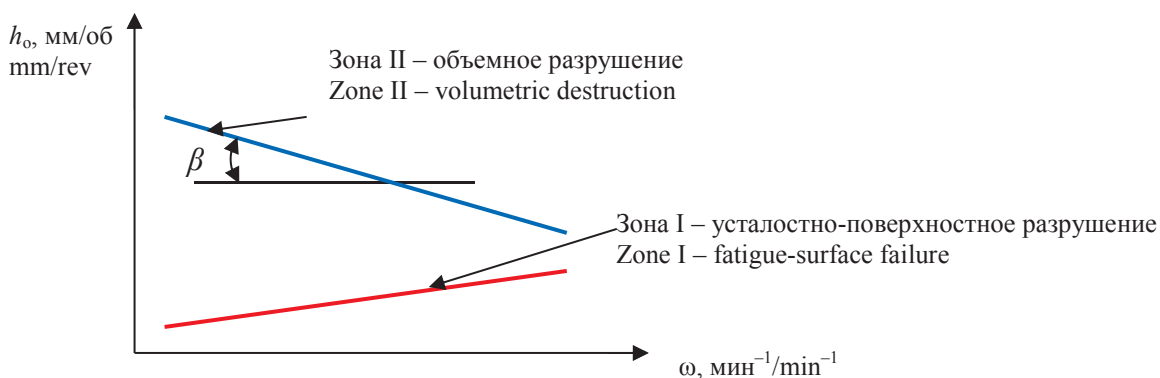
По графикам на рис. 3 видно, что каждый из представленных механизмов разрушения горной породы при бурении скважины характеризуется соответствующей зависимостью углубления за один оборот от осевого усилия и частоты вращения бурового инструмента.

Случай, когда углубление за один оборот снижается по мере роста частоты вращения, указывает на объемное разрушение горной породы, что полностью соответствует наклону линии зоны II (рис. 3).

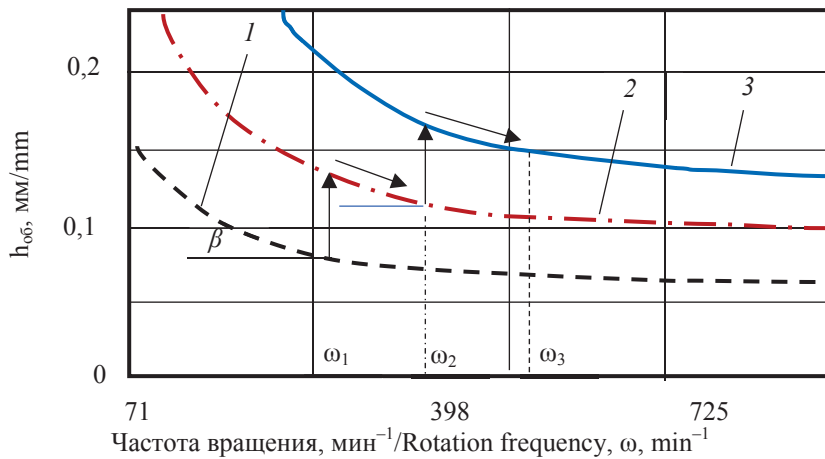
Когда величина осевой нагрузки оказывается недостаточной для достижения разрушающего порога напряжения, реализация объемного вида разрушения горной породы становится невозможной. Если при этом увеличение частоты вращения приводит к росту углубления за один оборот, можно сделать вывод об усталостно-поверхностном разрушении горной породы. А линия такого характера может представлять собой указатель на неэффективный режим разрушения.

Таким образом, предварительный анализ показывает, что характер зависимостей углубления за один оборот от частоты вращения способен точно указывать на режим разрушения породы на забое и соответственно объективно учитываться при обосновании параметров режима бурения.

В случае объемного вида разрушения горной породы повышение частоты вращения бурового инструмента ведёт к снижению углубления за один оборот, что указывает на явный рост сил сопротивления со стороны забоя при повышении линейных скоростей резания-скалывания горной породы (рис. 4). Такое явление присуще для бурения однослойными алмазными коронками, обладающими крупными резцами, и импрегнированным буровым инструментом, армированным мелким режущим элементом.



**Рис. 3.** Графические зависимости углубления за один оборот бурового инструмента на забое от частоты вращения  
**Fig. 3.** Graphic dependences of deepening per one revolution of a drilling tool at the bottomhole on rotational speed



**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость углубления за один оборот алмазной коронки от частоты вращения при различных значениях осевого усилия, даН: 1 – 400; 2 – 800; 3 – 1200

**Fig. 4.** Experimental dependence of deepening per one revolution of a diamond crown on rotational speed at various values of axial force, daN: 1 – 400; 2 – 800; 3 – 1200

Графики на рис. 4 построены относительно такого фактора, как частота вращения, при трех значениях осевого усилия – 400, 800 и 1200 даН.

Типичным для графиков зависимостей углубления за оборот от частоты вращения при заданных значениях осевого усилия на инструмент является резкое снижение углубления на начальном этапе повышения частоты вращения и выравнивание зависимости при более значительных частотах вращения.

При этом характерным является угол наклона линии углубления ( $\beta$ ). Отсюда возникает важное предположение, что угол  $\beta$  является возможной характеристикой уровня сопротивления забоя, т. е. степени сил сопротивления горной породы и призабойной среды. Данное утверждение дает возможность анализа изменения в процессе бурения сил сопротивления забоя путем определения величины угла наклона  $\beta$  (рис. 3, 4). В данном случае  $\text{tg } \beta$  является величиной, способной косвенно оценивать величину коэффициента сопротивления  $\mu_k$ , который характеризует комплексный показатель сопротивления при разрушении горной породы тем или иным буровым инструментом.

Рассмотрим теоретическое обоснование сделанного выше утверждения, которое можно использовать для анализа эффективности процесса разрушения при бурении. Схема анализа приведена на рис. 5.

Ранее была определена зависимость для расчета тангенциального усилия ( $F_T$ ), равного сумме усилия резания и силы трения ( $F_p + F_{тр}$ ). В результате преобразования с учетом числа работающих на разрушение алмазных резцов  $n_p$  [18, 24] получена формула (1):

$$F_T = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 n_p}{2\text{tg}\gamma_{ск}} \sigma_{ск} + P_{ос} f. \quad (1)$$

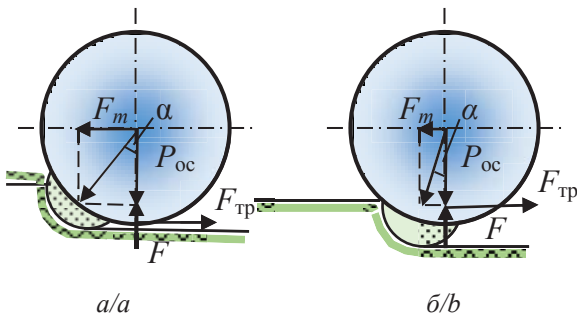
Анализ формулы (1) указывает на то, что тангенциальное усилие зависит от множества факторов, основными из которых являются: глубина внедрения резцов в породу ( $h$ ), прочностные характеристики горной породы ( $\sigma_{ск}$ ,  $\gamma_{ск}$ ), число работающих на разрушение резцов и силы трения резцов о породу ( $f$ ). При этом интересна взаимосвязь тангенциального усилия и осевой нагрузки. При росте осевой нагрузки происходит повышение тангенциального усилия, что обуславливается прежде всего повышением силы трения  $F_{тр}$ , а также величины глубины внедрения резцов в породу (рис. 5, а).

С увеличением частоты вращения бурового инструмента тангенциальное усилие может оставаться без изменения или несколько снижаться за счет уменьшения глубины внедрения резцов в породу, вследствие роста сопротивления породы разрушению перед передней гранью резца (рис. 5, б).

Коэффициент сопротивления  $\mu_k$  с учетом формулы (1) можно представить в виде (2) [18, 24]:

$$\mu_k = \mu_b + f = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 n_p}{2\text{tg}\gamma_{ск} P_{ос}} \sigma_{ск} + f. \quad (2)$$

Коэффициент сопротивления  $\mu_k$  является функцией интенсивности разрушения, которая характеризуется углублением за один оборот. При углублении равном нулю, когда разрушения практически не происходит, а режущие элементы перемещаются по поверхности забоя, не внедряясь в породу, коэффициент сопротивления снижается до минимума и становится равным коэффициенту трения  $f$ .



**Рис. 5.** Схемы взаимодействия с породой алмазных резцов при: а) высоком; б) малом сопротивлении породы

**Fig. 5.** Schemes of diamond cutters interaction with a rock at: a) high; b) low rock resistance

Наблюдается связь коэффициента сопротивления  $\mu_k$  с углублением на один оборот  $h_{об}$  бурового инструмента на забое. Углубление за один оборот  $h_{об}$  определяется из зависимости (3):

$$h_{об} = \frac{v_m}{\omega} = \frac{N\omega h}{\omega} = Nh, \quad (3)$$

где  $N$  – число алмазных резцов в средней линии резания;  $h$  – глубина внедрения алмазного резца в породу, м;  $\omega$  – частота вращения бурового инструмента,  $\text{мин}^{-1}$ .

Из вышеприведенной формулы следует, что  $h = \frac{h_{об}}{N}$ .

С учетом того, что общее число алмазных резцов на торце равно произведению числа алмазов в линии резания  $N$  на число линий резания  $z_a$ , получим формулу для расчета коэффициента сопротивления:

$$\mu_k = Nz_a \sqrt{\frac{h_{об}}{Nd}}. \quad (4)$$

На рис. 6 показана схема расчета числа резцов  $N$  на средней линии резания (рис. 6, а) и число линий резания вдоль ширины торца матрицы  $A$  (рис. 6, б).

Число линий резания на торце коронки  $z_a$  можно определить из соотношения  $A/(0,8-0,9)d$ , с учетом того, что линия резания должна полностью заполнять поверхность забоя скважины с некоторым взаимным перекрытием (рис. 6, б).

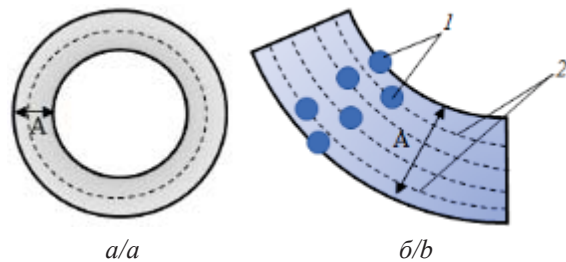
Из формулы (4) можно получить зависимость углубления за один оборот от коэффициента сопротивления:

$$h_{об} = \frac{\mu_k^2 d}{z_a n_p}, \quad (5)$$

где  $n_p$  – число резцов в линии резания, активно работающих на разрушение горной породы.

Учитывая зависимость (5), в которой установлена связь коэффициента сопротивления  $\mu_k$  с величиной углубления за один оборот  $h_{об}$ , можно утвер-

ждать, что характер линии углубления в зависимости от частоты вращения может характеризовать величину коэффициента сопротивления при разрушении породы алмазным инструментом. По сути, если принимать формулу (5) как аналитически выверенную, величина углубления за один оборот является эквивалентом и достаточно точно конвертируется в квадрат коэффициента сопротивления с учетом относительно постоянной величины, связанной с конструкцией вооружения коронки и режимом разрушения породы, а именно, с числом  $n_p$ .



**Рис. 6.** Схема для расчета числа линий резания на торце коронки: а) вся рабочая часть коронки; б) сектор коронки; 1 – алмазный резец; 2 – линия резания

**Fig. 6.** Scheme for calculating the number of cutting lines at the end of a crown: a) the entire working part of a crown; b) crown sector; 1 – diamond cutter; 2 – cutting line

Коэффициент трения характеризует взаимодействие коронки (резца) с породой при отсутствии разрушения и по известным данным [10, 24] находится в пределах 0,02–0,13.

Коэффициент сопротивления  $\mu_k$ , согласно данным различных источников информации и опытных работ, изменяется в пределах 0,02–0,6 и наиболее часто при бурении алмазным инструментом соответствует интервалу величин 0,22–0,31 [10, 18, 24].

При этом малые значения  $\mu_k=0,02-0,15$  соответствуют условиям заполирования алмазов, а высокие значения  $\mu_k=0,4-0,6$  – режиму интенсивного термомеханического разрушения резцов и матриц алмазного инструмента.

Таким образом, условия эффективного разрушения горных пород алмазным инструментом ограничиваются диапазоном значений коэффициента сопротивления  $\mu_k=0,15-0,4$ , а «золотая середина» может равняться 0,1–0,3.

Условия заполирования алмазного резца наступает при следующих значениях параметра:

$\sqrt{\frac{h}{d}} = 0,02 - 0,15$ , т. е. глубине внедрения резца в породу  $h=0,0004-0,0225d$  [24].

Интенсивный износ алмазного кристалла будет в случае, если  $h=0,16-0,36d$  [24].

Коэффициент сопротивления  $\mu_k$  пропорционален величине углубления инструмента в породу за оборот и механической скорости бурения. Например, данные, приведенные в работе [24], свидетельствуют о наличии пропорциональной зависимости, которая выражается частной эмпирической формулой

$$\mu_k = 0,135 + 0,0285 v_m.$$

С увеличением частоты вращения коэффициент сопротивления  $\mu_k$  снижается, а с повышением осевой нагрузки возрастает.

Как следует из вышеприведенной зависимости (5), на коэффициент сопротивления  $\mu_k$ , а значит, и на энергоёмкость разрушения породы влияет размер алмазных резцов – диаметр  $d$ .

С увеличением диаметра коронок и толщины матричных колец затраты мощности на разрушение породы и коэффициент сопротивления возрастают из-за роста числа алмазных резцов на торце инструмента: с увеличением диаметра коронок пропорционально диаметру, с увеличением толщины матрицы пропорционально приросту площади торца, если сохраняется удельная контактная нагрузка на породу.

При расчете забойной мощности используется выражение (6), также учитывающее коэффициент сопротивления

$$N = \frac{\mu_k P_{oc} R \omega}{97,5}, \quad (6)$$

где  $\mu_k$  – коэффициент сопротивления;  $P_{oc}$  – осевая нагрузка на буровой инструмент;  $R$  – радиус торца бурового инструмента;  $\omega$  – частота вращения бурового инструмента.

Крутящий момент на работающем буровом инструменте может определяться по классической зависимости (7):

$$M_{кр} = F_p R = \frac{N}{\omega} = \frac{\mu_k P_{oc} R}{97,5}, \quad (7)$$

где  $F_p$  – тангенциальное усилие резания-скалывания горной породы резцами бурового инструмента.

Из данной зависимости следует, что  $F_p = \mu_k P_{oc}$ , а  $\mu_k = \frac{F_p}{P_{oc}}$ .

При этом, если рассмотреть схему работы бурового элемента, например, алмазного резца (рис. 5), становится очевидным, что соотношение  $\frac{F_p}{P_{oc}}$  – это ничто иное как тангенс угла  $\alpha$ , угла между действующим осевым усилием  $P_{oc}$  и результирующей силой  $R$  резания-скалывания-раздавливания горной породы, по направлению которой формируется ядро сжатия горной породы.

Таким образом, коэффициент сопротивления резания-скалывания-раздавливания горной породы определяется как (8):

$$\mu_k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_p}{P_{oc}}, \text{ а угол } \alpha = \operatorname{arctg} \frac{F_p}{P_{oc}}. \quad (8)$$

Связь между углублением за один оборот и коэффициентом сопротивления получена в виде формулы (9):

$$h_{об} = \frac{\mu_k^2 d}{z_a n_p}. \quad (9)$$

В данной формуле все параметры, кроме коэффициента сопротивления  $\mu_k$  и, вероятно,  $n_p$ , – величины постоянные, а значит, можно выстроить прямую связь таких параметров как углубление за один оборот и коэффициент сопротивления как (10)

$$h_{об} = K \cdot \mu^2. \quad (10)$$

Для анализа сил сопротивления при проведении экспериментальных работ по буримости горных пород различными типами буровых инструментов, учитывая данные, приведенные в виде графиков на рис. 4, вполне обоснованно связать значения углов  $\beta$  и  $\alpha$ , поскольку при повышении сопротивления резанию-скалыванию (рост усилия  $F_p$ ) эти углы увеличиваются, например, при повышении частоты вращения бурового инструмента, а при повышении осевой нагрузки, несмотря на то, что растёт глубина внедрения резца в породу, снижаются. Таким образом, углы  $\beta$  и  $\alpha$  имеют одну природу, а значит, измеренный на графиках рис. 4 угол  $\beta$  может оцениваться как угол, тангенс которого эквивалентен коэффициенту сопротивления резания-скалывания-раздавливания горной породы резцом.

Процесс поиска оптимальных значений параметров режима бурения показан на схеме рис. 4.

На схеме показано, что если установлен определенный уровень коэффициента сопротивления, который является оптимальным по условиям обработки бурового инструмента в данном комплексе горных пород, то можно последовательно по мере повышении частоты вращения переходить на новый уровень осевого усилия при достижении рубежного значения коэффициента сопротивления. В результате будет уставлено оптимальное сочетание частоты вращения и осевого усилия. Например, при бурении при осевом усилии 400 даН предел коэффициента сопротивления достигнут при частоте вращения  $\omega_1$ , после этого следует переход на более высокую частоту вращения и происходит повышение частоты вращения до значения  $\omega_2$  и далее до частоты вращения  $\omega_3$  при осевой нагрузке 1200 даН. Этот процесс может происходить непрерывно с определенными заданными диапазонами до достижения максимального значения режимных параметров.

При понижении частоты вращения, например, вызванного условиями бурения, понижение осевой нагрузки происходит в обратной последовательности.

Ключевым моментом методики является выбор оптимальной величины коэффициента сопротивления, на который следует ориентироваться при поиске наиболее выгодного сочетания параметров режима бурения. Этот вопрос лучше всего решать путем использования базы данных по алмазному бурению в соответствующем комплексе горных пород с выявлением оптимальных значений коэффициента сопротивления, равного тангенсу угла  $\beta$  (рис. 4). Для верной объективной оценки при определении угла  $\beta$  следует использовать единый масштаб построения графиков углубления за один оборот от частоты вращения при различных значениях осевого усилия.

Практическое применение полученных закономерностей и предлагаемой методики может быть реализовано в случае диагностики режима разрушения горной породы при управлении процессом бурения с применением интерактивных систем, например, забойных телеметрических систем, или управления процессом бурения с применением систем компьютерного сопровождения APS [10]. В этом случае требуется определенный комплекс программного обеспечения для управления параметрами режима бурения по оптимальной величине коэффициента сопротивления, определяемого как тангенс угла  $\beta$  (рис. 4), в заданных единых параметрах масштабирования.

#### Выводы

1. Анализ эффективности разрушения горной породы на забое скважины может быть выполнен на основе построения моделей механической скорости бурения и их обработки с целью полу-

чения зависимостей углубления за один оборот инструмента на забое скважины  $h_{об}$  от частоты вращения при заданных значениях осевого усилия. Геометрия данных зависимостей, а именно, тангенс угла наклона кривой  $\beta$ , позволяет соотносить углубление за один оборот со значением коэффициента сопротивления разрушению  $\mu_k$  при бурении равного  $h_{об}=K \mu_k^2$ , где  $K$  – постоянная величина, определяемая через параметры конструкции торца буровой коронки.

2. Поиск оптимальных значений параметров режима бурения и их сочетаний в режиме текущего времени может осуществляться при использовании базы данных и соответствующих компьютерных программ, ориентированных на максимально высокие показатели бурения – ресурс инструмента и механическую скорость бурения. Данный поиск оптимальных значений предполагает постоянное построение кривых типа  $h_{об}=f(\omega)$ , с непрерывным контролем и поиском оптимального значения величины  $\mu_k=\text{tg } \beta$ . При достижении предельной величины  $\mu_k$ , соответствующей оптимальным условиям бурения при существующей частоте вращения и заданной осевой нагрузке, для улучшения условий следует переход на более высокую осевую нагрузку с последующим повышением частоты вращения (при снижении частоты вращения происходит обратный процесс). Такой процесс поиска оптимальных условий, который ориентируется на максимально возможную для данных условий бурения частоту вращения и оптимальную величину  $\text{tg } \beta$ , позволяет без измерения забойной мощности, что невозможно в существующих условиях алмазного разведочного бурения, решать задачу оптимального управления параметрами режима бурения максимально эффективно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН – 2011. – № 1 (38). – С. 151–157.
2. Алгоритм управления системой алмазного бурения / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, З.Г. Зотов, Б. Лиу // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 81–89. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3562.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – Vol. 35 (3). – P. 141–160.
6. Коротков А.В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения // Известия сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2011. – Т. 2 (39). – С. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – Vol. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 145–164.
9. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: ТПУ, 2013. – 166 с.

10. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
11. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссеу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 48 (3). – P. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 96–97. – P. 109–119.
14. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // *Measurement*. – 2018. – Vol. 121. – P. 344–354.
15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – Vol. 45. – P. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
17. Евсеев В.Д., Мавлюгов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // *Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России*. – 2000. – Т. 1. – С. 463–465.
18. Нескоромных В.В., Попова М.С., Лиу Баочанг. Исследование сопротивления породы при бурении мелкорезцовым алмазным инструментом // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 167–177.
19. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2019. – Vol. 113. – P. 11–23.
20. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10 (6). – P. 476–479.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – July 2020. – Vol. 190. – № 107120.
22. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // *Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference*. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2013. – Vol. 37 (13). – P. 1913–1929.
24. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
25. Контроль ресурса PDC-пластин бурового долота / А.А. Третьяк, Е.В. Сидорова, Ю.Ф. Литкевич, С.И. Лубянова, А.А. Бурцев, А.В. Мохов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 28–35.

### Информация об авторах

**Вячеслав Васильевич Нескоромных**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. sovair@bk.ru <http://orcid.org/0000-0001-8922-0779>

**Марина Сергеевна Попова**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. alleniram83@mail.ru <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

**Ксения Владимировна Лалетина**, студент кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. lkv2@mail.ru

**Дмитрий Викторович Лысаков**, аспирант кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. lysackovd@yandex.ru

Поступила в редакцию: 10.05.2023

Поступила после рецензирования: 13.06.2023

Принята к публикации: 17.01.2024

### REFERENCES

1. Neskoromnih V.V., Pushmin P.S. Technique of optimal parameters of the mode and conditions of drilling wells. *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2011, vol. 1 (38), pp. 151–157. (In Russ.)
2. Neskoromnih V.V., Popova M.S., Zotov Z.G., Liu Baochang. Algorithm of diamond drilling system control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 81–89. (In Russ.)

3. Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskiy A.I., Soloviev N.V. Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49. (In Russ.)
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
6. Korotkov A.V. A modern look at the main tasks of optimization of diamond drilling. *Izvestiya sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 2 (39), pp. 205–209. (In Russ.)
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
9. Borisov K.I. *Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting–chipping when drilling with PDC bits. Monograph.* Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p. (In Russ.)
10. Neskromnykh V.V. *Optimization in geological survey production.* Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2013. 246 p. (In Russ.)
11. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.)
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
14. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
17. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Ways to increase the efficiency of rock destruction. *Proceedings of regional conference of geologist in Siberia, far East and North-East of Russia*, 2000, vol. I, pp. 463–465. (In Russ.)
18. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Liu B. Study of rock resistance when drilling with a small-cutting diamond tool. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 167–177. (In Russ.)
19. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
20. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
24. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Liu B. *Destruction of rocks when drilling wells with a diamond drilling tool: monograph.* Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2020. 268 p. (In Russ.)
25. Tretyak A.A., Sidorova E.V., Litkevich Yu.F., Lubyanova S.I., Burtsev A.A., Mokhov A.V. Life control of PDC inserts in a drill bit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 28–35.

#### Information about the authors

**Vyacheslav V. Neskromnykh**, Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Investigation, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation. [sovair@bk.ru](mailto:sovair@bk.ru)

**Marina S. Popova**, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation. [alleniram83@mail.ru](mailto:alleniram83@mail.ru)

**Ksenia V. Laletina**, Student, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. [lkv2@mail.ru](mailto:lkv2@mail.ru)

**Dmitriy V. Lysakov**, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation. [lysackovd@yandex.ru](mailto:lysackovd@yandex.ru)

Received: 10.05.2023

Revised: 13.06.2023

Accepted: 17.01.2024



УДК 556.3.08

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

Шифр специальности ВАК: 1.6.21., 1.6.6., 2.3.3

## Сравнительная оценка случайной составляющей погрешности автоматических скважинных уровнемеров на основе обработки измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод

Т.Ю. Заведий<sup>1</sup>, Н.Р. Адонин<sup>2</sup>, О.Н. Кокорев<sup>3✉</sup>, А.А. Щипков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Сибирский химический комбинат», Россия, г. Северск

<sup>2</sup> Северский технологический университет Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, г. Северск

<sup>3</sup> Филиал «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, г. Северск

✉ Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

**Аннотация. Актуальность.** Внедрение автономных цифровых уровнемеров позволяет существенно расширить спектр задач, решаемых в различных областях геологии и экологии: с повышением частоты измерений становится возможным успешное применение методов математической обработки данных для снятия искажений уровня различной природы. Расширение сфер применения скважинных уровнемеров делает актуальным вопрос выбора того или иного типа прибора для обеспечения требуемой точности измерения. **Цель:** рассмотреть методику сравнительной оценки случайной составляющей погрешности автоматических уровнемеров, основанную на обработке измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод. **Методы:** компенсация влияния изменений атмосферного давления на уровень подземных вод на основе опытного определения барометрического коэффициента скважины; расчет земноприливных колебаний уровня по упрощенной модели; корреляционный и частотный анализ расчетных и экспериментальных данных. **Результаты.** Путем сопоставления измеренных значений уровня с расчетными значениями земноприливных колебаний уровня подземных вод выполнена сравнительная оценка точности нескольких цифровых уровнемеров, установленных в одной скважине. Путем снятия искажений от вариаций атмосферного давления и последующей фильтрации скользящим средним из показаний уровнемеров выделен сигнал земноприливных колебаний уровня подземных вод. Из корреляционного и амплитудно-частотного анализа расчетных и экспериментальных данных определены показатели, по которым можно проводить сравнительную оценку случайной составляющей погрешности испытуемых уровнемеров. **Выводы.** Предложенная методика позволяет по результатам сравнительных натурных испытаний выбрать автономные цифровые уровнемеры с минимальной случайной составляющей погрешности. Наиболее перспективным способом снятия искажающего влияния земноприливных колебаний уровня подземных вод является режекторная фильтрация сигнала уровня с использованием двух частот заграждения.

**Ключевые слова:** автономный цифровой уровнемер, земные приливы, земноприливные колебания уровня подземных вод, приливной потенциал, астрономический расчет приливного потенциала, приливная деформация пород, погрешность измерения уровня, корреляционный анализ, амплитудно-частотный анализ

**Благодарности:** Авторы благодарят главного геолога Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» Андрея Александровича Зубкова, специалистов службы по ремонту и обслуживанию контрольно-измерительных приборов и автоматики цеха эксплуатации филиала «Северский» Федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» Дмитрия Николаевича Кузнецова и Павла Александровича Каткова за помощь в организации опыта, а также Дениса Геннадьевича Калинова (ООО «ПОЛИНОМ») и Евгения Андреевича Шелемова (ООО «Водный горизонт») за предоставление цифровых уровнемеров.

**Для цитирования:** Сравнительная оценка случайной составляющей погрешности автоматических скважинных уровнемеров на основе обработки измерений земноприливных колебаний уровня подземных вод / Т.Ю. Заведий, Н.Р. Адонин, О.Н. Кокорев, А.А. Щипков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 88–104. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

UDC 556.3.08

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

## Comparative estimation of a random error component of automatic well level gauges based on processing measurements of earth-tidal level of groundwater

T.Yu. Zavedy<sup>1</sup>, N.R. Adonin<sup>2</sup>, O.N. Kokorev<sup>3</sup>✉, A.A. Shchipkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Siberian Group of Chemical Enterprises", Seversk, Russian Federation

<sup>2</sup>Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", Seversk, Russian Federation

<sup>3</sup>"Seversky" branch of the "National operator for radioactive waste management", Seversk, Russian Federation

✉Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

**Abstract. Relevance.** Introduction of autonomous digital level gauges allows significantly expanding the range of tasks solved in various fields of geology and ecology, by increasing the frequency of measurements and applying mathematical processing methods to avoid distortions of different nature. The expansion of the field of application of downhole level meters makes it a topical issue to choose a particular type of device to ensure the required measurement accuracy. **Aim.** To consider the approaches to comparative estimation of random error of several types of automatic level gauges based on their recording of earth-tidal variations of groundwater level. **Methods.** Methods of compensating the influence of variations in atmospheric pressure on groundwater levels; methods of calculating tidal level variations; methods of correlation and frequency analysis of the calculated and experimental data. **Results.** The authors have carried out a comparative assessment of the accuracy in readings of several digital level gauges, installed in one well, by comparing the measured values of earth-tidal variations of the groundwater level with the calculated ones. Based on the experimental data, tidal variations of the groundwater level were obtained by eliminating distortions from variations in atmospheric pressure and then filtering with the moving mean. From correlation and amplitude-frequency analysis of the calculated and experimental data, indicators were determined for making a comparative assessment of a random component of the error of the tested level gauges. **Conclusions.** The approach suggested allows choosing independent digital level gauges with a minimum random error component using the totality of calculated parameters. The most promising way to eliminate the distorting effects of tidal variation of groundwater level is the method based on the cutter frequency filtering of the level signal measured by the level gauge.

**Keywords:** autonomous digital level gauge, earth tides, earth-tidal variations of groundwater level, tidal potential, astronomical calculation of tidal potential, tidal deformation of rocks, level measurement error, correlation analysis, amplitude-frequency analysis

**Acknowledgements:** The authors are grateful to Andrey A. Zubkov the Chief Geologist of Joint Stock Company "Siberian Group of Chemical Enterprises", Dmitry N. Kuznetsov and Pavel A. Katkov specialists of the Repair and Maintenance of Instrumentation and Automation Service at the Operation Workshop of the Branch "Seversky" of the Federal State Unitary Enterprise «National Operator for Radioactive Waste Management» for their support in arranging the experience, as well as Denis G. Kalinov (POLINOM LLC) and Evgeny A. Shelemov (Vodny Horizon LLC) for the digital level measuring equipment.

**For citation:** Zavedy T.Yu., Adonin N.R., Kokorev O.N., Shchipkov A.A. Comparative estimation of a random error component of automatic well level gauges based on processing measurements of earth-tidal level of groundwater. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 88–104. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4341

### Введение

За последние десятилетия точность измерений уровня подземных вод автоматическими уровнемерами значительно повысилась. Это существенно расширяет спектр прикладных задач в гидрогеологии [1, 2], сейсмологии [2, 3] и геоэкологии [4, 5], которые можно решать, применяя автоматические скважинные уровнемеры.

Для автоматического измерения уровня в глубоководных скважинах наиболее подходящими являются гидростатические датчики [6–8]. Паспортное

значение основной приведенной погрешности у современных скважинных уровнемеров данного типа может составлять порядка 0,10–0,25 %. Так, при диапазоне измерения уровня от 0 до 10 м абсолютная погрешность будет равна 1,0–2,5 см, приближаясь к погрешности измерений переносными рулеточными уровнемерами электроконтактного типа, которые часто используются в качестве эталонного измерителя при проверке точности измерений уровня подземных вод. При определении величины полной приведенной погрешности учи-

тывают следующие основные составляющие: не-точность градуировочной характеристики, гистерезис, дрейф нуля, инерционность преобразователя, температурную ошибку. Однако при решении ряда задач, как, например, прецизионный мониторинг уровня подземных вод в напорных буферных горизонтах на полигонах захоронения промстоков [8–10], практический интерес представляют, прежде всего, относительные изменения уровня в скважинах за небольшие промежутки времени (до 10 ч). В этом случае основное влияние на результаты измерений оказывает случайная составляющая погрешности. Основными причинами случайной составляющей погрешности выступают гистерезис и дрейф различной природы. Опыт реальных измерений уровня подземных вод показывает, что случайная составляющая относительной погрешности многих моделей современных уровнемеров может составлять 0,02 % от верхнего предела измерений [8, 9, 11]. Учитывая, что паспортные данные многих уровнемеров не содержат сведений о случайной составляющей погрешности, а оценка ее опытным путем затруднительна ввиду отсутствия опорного средства измерения с более высокой точностью, выбор типа уровнемера с наименьшей случайной погрешностью для решения вышеуказанных задач является комплексной проблемой. При возможности опытных испытаний различных типов уровнемеров сравнительную оценку их случайной погрешности предлагается выполнить путем сопоставления результатов фактических измерений уровня подземных вод с колебаниями уровня подземных вод в скважине, которые можно рассчитать заранее. Такими базовыми колебаниями могут являться земноприливные колебания уровня подземных вод, обусловленные объемными деформациями горных массивов и водонасыщенных пластовых систем от приливного воздействия Луны и Солнца. Разными исследователями установлено, что земноприливные колебания уровня подземных вод являются вторым значимым фактором, влияющим на показания уровнемера, после искажений, вызванных вариациями атмосферного давления [8, 9, 12, 13]. Для расчета земноприливных колебаний не требуется выполнения непрерывных измерений каких-либо дополнительных величин (как, например, атмосферного давления): достаточно лишь задать местное время, широту, долготу места наблюдений и вычислить положение в пространстве основных небесных тел: Луны и Солнца, практически полностью определяющих интенсивность приливных явлений на Земле.

Цель работы – рассмотреть подходы к сравнительной оценке случайной составляющей погрешности нескольких автоматических уровнемеров на основе регистрации ими земноприливных вариаций

уровня подземных вод в неглубоко залегающих (~200 м) песчано-глинистых напорных водоносных горизонтах зоны замедленного водообмена в условиях ненарушенного гидрогеодинамического режима.

### Условия измерений

Данная статья описывает подходы к сравнительной оценке случайной погрешности различных автоматических уровнемеров на примере результатов измерений, проведенных на пункте глубинного захоронения (ПГЗ) жидких радиоактивных отходов (ЖРО) филиала «Северский» ФГУП «НО РАО» (г. Северск, Томская область). Измерения проводились с использованием четырех различных моделей гидростатических уровнемеров избыточного или абсолютного давления, устанавливаемых в наблюдательную скважину Т-21 (стоит отметить, что предлагаемая методика не зависит от типа чувствительного элемента, используемого в преобразователях давления, однако для прецизионного измерения уровня широкое применение находят пьезорезистивные сенсоры). Скважина Т-21 вскрывает 108-миллиметровым фильтром IV (буферный) горизонт в интервале глубин 190–218 м, который сложен несцементированными проницаемыми песчано-глинистыми породами терригенного происхождения [10]. В гидрогеологическом плане это верхняя часть зоны замедленного водообмена. По данным откачек, гидропроводимость буферного горизонта определена в диапазоне значений  $100\text{--}200\text{ м}^2/\text{сут.}$ , коэффициент пьезопроводности –  $\sim 3 \cdot 10^5\text{ м}^2/\text{сут.}$  Впервые на ПГЗ ЖРО «Северский» прецизионные измерения уровня в буферном горизонте были проведены в 2002 г. [11]. Горизонт надежно изолирован мощным (~30–50 м) водоупорным слоем от залегающих ниже песчаных пластов, в которые осуществляется нагнетание отходов, поэтому в IV горизонте имеет место естественный ненарушенный гидродинамический режим с годовым полуразмахом сезонных колебаний около 30–50 мм. Полуразмах земноприливных колебаний уровня в этом горизонте составляет 2–3 мм. Характеристики уровнемеров различных производителей и различной конструктивной реализации, устанавливаемых в скважину Т-21, приведены в табл. 1; всем уровнемерам даны условные наименования по типу «Уровеньмер №...». Периодичность выполнения замеров для всех испытуемых уровнемеров равнялась 1 ч.

По своей технической реализации датчик Уровнемера № 1 снабжен капиллярной трубкой, выводимой наружу из скважины для физической компенсации влияния атмосферного давления. Таким образом, результатом подобных измерений является сумма гидростатического давления водного столба над датчиком и давления воздуха от зеркала воды в скважине до ее оголовка (места вывода капиллярной трубки).

**Таблица 1.** Характеристики испытываемых уровнемеров

**Table 1.** Characteristics of the level gauges being tested

Уровнемер Level gauge	Принцип измерения Principle of measurement	Диапазон измерения водного столба, м Water column measurement range, m	Приведенная погрешность, % Reduced error, %	Паспортное разрешение, мм Passport permit, mm
№ 1	$P_{гидр.}$	0–10	0,1	—
№ 2	$P_{гидр.} + P_{атм.}$	0–2	0,25	—
№ 3	$P_{гидр.} + P_{атм.}$	0–5	0,1	1–2
№ 4	$P_{гидр.}$	0–10	0,25	1

Примечание:  $P_{гидр.}$  – гидростатическое давление столба жидкости над датчиком;  $P_{атм.}$  – атмосферное давление.

Note:  $P_{гидр.}$  – hydrostatic pressure of a liquid column above a sensor;  $P_{атм.}$  – atmospheric pressure.

Последним в задачах, где значение имеют лишь относительные изменения уровня, можно пренебречь, поскольку вариации нескомпенсированного давления атмосферного воздуха крайне малы ввиду практически постоянного микроклимата внутри скважины и относительно небольшой глубины до уровня подземных вод (~10–20 м). Здесь стоит отметить, что, несмотря на фактическое устранение влияния атмосферного давления на результаты измерений у датчиков подобного типа, сам уровень подземных вод в скважине сильно зависит от вариаций атмосферного давления из-за сложного взаимодействия в системе «атмосфера – упругий пласт – скважина» [9–11]. Для датчиков с компенсационной трубочкой корреляционная картина «давление–уровень» имеет обратный характер: при повышении давления от среднего измеренный уровень подземных вод падает, и наоборот.

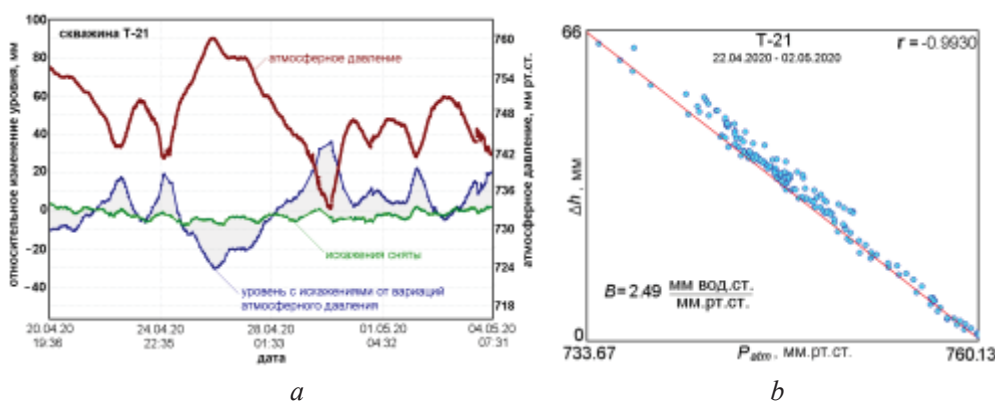
Датчики Уровнемеров № 2 и № 3 измеряют абсолютное давление: результатом измерения для них является сумма гидростатического давления

водного столба над датчиком (уже искаженного влиянием атмосферного давления на весь массив пород) и абсолютного давления атмосферы над зеркалом воды в скважине. Для датчиков абсолютного давления корреляция «давление–уровень» имеет прямой характер.

В Уровнемере № 4 реализована программная компенсация атмосферного давления, которая производится на уровне вторичного преобразователя самого уровнемера благодаря встроенному датчику атмосферного давления.

### Искажения от вариаций атмосферного давления

Снятие искажений от вариаций атмосферного давления выполнялось по линейно-корреляционной модели через опытное определение коэффициента  $B$ , называемого барометрической эффективностью скважины [8, 9]. Для определения выбирался короткий промежуток времени в году, за который атмосферное давление успевало измениться на несколько десятков мм рт. ст. Также в этот период должны отсутствовать осадки, а естественный ход уровней должен минимально искажать корреляционную картину «давление–уровень». Обычно для этой задачи наиболее удобными являются дни весенней межени (конец апреля – начало мая), когда уровни подземных вод горизонтов зоны замедленного водообмена минимальны в году и около недели их естественный сезонный ход практически отсутствует (годовой минимум). На рис. 1 показан пример определения барометрической эффективности скважины как коэффициента линейной корреляционной связи «давление–уровень» с последующим удалением искажений, обусловленных вариациями атмосферного давления, на примере Уровнемера № 1, установленного в скважину Т-21 в 2020 г.



**Рис. 1.** Удаление искажающего влияния вариаций атмосферного давления из замеров уровня подземных вод на примере показаний Уровнемера № 1 в скважине Т-21 на конец апреля 2020 г.: а) графики атмосферного давления и уровня до и после снятия искажений; б) обратная корреляция «давление–уровень»

**Fig. 1.** Removal of the distorting effect of atmospheric pressure variations from groundwater level measurements on the example of Level Meter No. 1 readings in T-21 well at the end of April 2020: a) atmospheric pressure graphs and levels before and after distortion removal; b) inverse correlation «pressure–level»

Полученная барометрическая эффективность  $B$  скважины Т-21 оказалась равной 2,49 мм вод.ст./мм рт.ст. (1,87 мм/гПа), корреляция обратная. Это значение применено для снятия искажений от вариаций атмосферного давления из показаний Уровнемеров № 1 и № 4. Исходя из известной в физике линейной связи между атмосферным давлением и эквивалентным ему гидростатическим давлением ( $\Delta P = \rho g \Delta h$ ), для Уровнемеров № 2 и № 3 с датчиками абсолютного давления результирующей

коэффициент для снятия вариаций атмосферного давления в скважине Т-21 будет равен 10,41 мм вод.ст./мм рт.ст. (7,81 мм/гПа), корреляция прямая.

Испытания проводились с 01.07.2021 по 11.03.2022. В этот период испытуемые уровнемеры устанавливались в скважине Т-21 на различное по продолжительности время. В статье представлены результаты по трем периодам измерений, выполненным в разное время года (периоды №№ 1–3 на рис. 2).

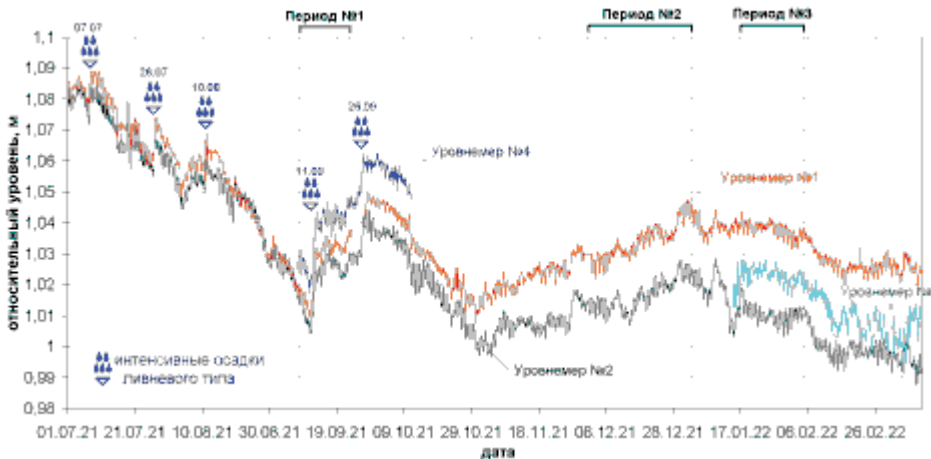


Рис. 2. Графики уровня подземных вод со снятыми атмосферными искажениями, полученные с использованием испытуемых уровнемеров в период 2021–2022 гг.

Fig. 2. Graphs of the groundwater level with the removed atmospheric distortions obtained using the level gauges under test for 2021–2022

Помимо данных, полученных за период 2021–2022 гг., далее в этой статье в качестве примеров будут также приводиться результаты обработки измерений более раннего периода, полученные с использованием Уровнемера № 1 в другой скважине IV горизонта.

### Земноприливные вариации уровня подземных вод

После снятия искажений из замеров уровня подземных вод, обусловленных вариациями атмосферного давления (полный размах колебаний 40–60 мм), на графиках сразу становятся заметны характерные земноприливные вариации уровня (полный размах колебаний 2–3 мм), имеющие выраженную суточно-полусуточную периодичность [9, 12].

Расчет приливных явлений от Луны и Солнца требует астрономических знаний, причем как в области сферической астрономии (расчет угловых положений светил на небесной сфере), так и в области небесной механики (движение по замкнутым орбитам, расстояния до притягивающих тел). Для определения положений Луны и Солнца с астрономической точностью необходимы специальные громоздкие выражения и большое число астрономических констант. Однако для задач гидрогеоло-

гии в подобной точности нет нужды, особенно если речь идет о простом сравнении измеренных земноприливных вариаций уровня с теоретически рассчитанными. В рамках данной статьи представлены максимально упрощенные выражения, требующие наименьшего числа констант. Подобные зависимости можно будет использовать на практике в виде обычных формул в электронных таблицах или в прикладных программах по обработке результатов замеров уровня, получаемых с автоматических цифровых уровнемеров.

Общепринятая модель рассматривает приливной потенциал  $W$  от гравитационного воздействия любого из небесных тел, Солнца или Луны, в наиболее простом приближении сферической симметрии тяготеющих масс [13, 14]:

$$W = \frac{1}{2} \frac{GMa^2}{R^3} (3 \cos^2 \Theta - 1), \quad (1)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная:  $\approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ ;  $M$  – масса притягивающего тела, кг;  $a$  – средний радиус Земли, м;  $R$  – расстояние между центрами масс Земли и притягивающего тела, м;  $\Theta$  – зенитный угол положения притягивающего тела (отклонение от зенита), рад.

Из (1) можно получить отношение средних приливных потенциалов, вызываемых Солнцем и Луной на поверхности Земли:

$$k_{SM} = \frac{R_M^3 M_S}{R_S^3 M_M}, \quad (2)$$

где  $R_M$  – среднее расстояние до Луны:  $3,84 \cdot 10^5$  км;  $R_S$  – среднее расстояние до Солнца:  $1,49 \cdot 10^8$  км;  $M_M$  – масса Луны:  $7,35 \cdot 10^{22}$  кг;  $M_S$  – масса Солнца:  $1,99 \cdot 10^{30}$  кг.

Все исходные значения для расчета в (2) взяты из [13]. Отношение  $k_{SM}$  равно 0,4634. Другими словами, приливное воздействие от Луны на поверхности Земли в среднем в 2,1577 раза больше, чем от Солнца.

Зенитный угол  $\Theta$  любого светила в экваториальной системе небесных координат в любой момент звездного времени  $s$  запишется по формуле из сферической астрономии [14] в следующем виде:

$$\cos \Theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – географическая широта пункта наблюдения на Земле, рад;  $\delta$  – склонение светила в экваториальной системе небесных координат, рад;  $H$  – часовой угол светила, рад;

После тригонометрических преобразований (3) с учетом (1) приливной потенциал  $W$  запишется в виде, изложенном еще Лапласом, – в форме суперпозиции трех гармоник [15] (в скобках сверху вниз: секториальной, тессеральной и зональной):

$$W = \frac{3}{4} \frac{GMa^2}{R^3} \left( \begin{aligned} &\cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta \cdot \cos 2H + \\ &+ \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta \cdot \cos H + \\ &+ 3(\sin^2 \varphi - 1/3)(\sin^2 \delta - 1/3) \end{aligned} \right). \quad (4)$$

Результирующий суммарный приливной потенциал будет равен суперпозиции для Солнца (индекс «S») и для Луны (индекс «M»):

$$W_{SM} = W_S + W_M, \quad (5)$$

где  $W_S, W_M$  вычисляются согласно (4).

Помимо изменения угловых координат на небесной сфере во времени необходимо учитывать изменение расстояний до притягивающего тела. Изменение расстояния обусловлено эксцентриситетом как орбиты Луны, вращающейся вокруг Земли, так и орбиты Земли, вращающейся вокруг Солнца. Учитывая небольшое значение эксцентриситетов ( $\varepsilon \ll 1$ ) у рассматриваемых в статье небесных тел, изменение расстояния  $R(t)$  можно задать модуляционным множителем. Из основ небесной механики известно, что изменение расстояния до небесного тела, движущегося по эллиптической орбите, равно [15–20]:

$$R(t) = \bar{R} \cdot [1 - \varepsilon \cdot \cos(\omega(t - t_{\Pi}))], \quad (6)$$

где  $\bar{R}$  – среднее расстояние по орбите до центра масс небесного тела, м;  $\omega$  – угловая частота обращения небесного тела по своей орбите, сут.<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – эксцентриситет орбиты;  $t$  – момент времени, сут.;  $t_{\Pi}$  – начальный момент времени прохождения ближайшей точки к притягивающему телу (перигелий для Земли и перигей для Луны), сут.

Тогда выражение (6), обратное кубу расстояния (1), с учетом малого значения эксцентриситета  $\varepsilon \ll 1$  запишется в следующем виде:

$$\frac{1}{R^3(t)} \approx \frac{1}{\bar{R}^3} \cdot [1 + 3 \cdot \varepsilon \cdot \cos(\omega(t - t_{\Pi}))] = \frac{1}{\bar{R}^3} \cdot \rho(t), \quad (7)$$

где  $\rho(t)$  – модулирующий множитель, используемый для учета изменения расстояния до притягивающего центра.

С учетом (1), (2), (7) выражение (5) можно преобразовать к удобному виду:

$$W_{SM} = \frac{1}{2} \frac{GM_M a^2}{R_M^3} \left[ \begin{aligned} &\rho_M(t) (3 \cos^2 \Theta_M - 1) + \\ &+ k_{SM} \rho_S(t) (3 \cos^2 \Theta_S - 1) \end{aligned} \right].$$

Исходя из закономерностей механики пласта, с пренебрежением эффектами инерционности в простейшем приближении приливная реакция уровня в скважине  $\Delta h_{ET}$  может быть принята пропорционально равной [13, 15] суммарному приливному потенциалу  $W_{SM}$  от Луны и Солнца. Фактические наблюдения [13–17] прямо подтверждают высокое сходство графиков приливного отклика уровня подземных вод и вариаций приливного потенциала. Следует определиться с соответствием знаков потенциала и реакции уровней: когда приливной потенциал положителен, земная кора расширяется, а уровни подземных вод падают, и наоборот. Т. е. изменения приливного потенциала и реакция уровня подземных вод всегда противоположны по своему знаку. Выражение, связывающее реакцию уровня  $\Delta h_{ET}$  на земноприливное возмущение с положением Луны и Солнца на небесной сфере, без учета инерционности системы «пласт–скважина» запишется в следующем виде:

$$\Delta h_{ET}(t) = -\frac{2}{3} A_{ET} \left[ \begin{aligned} &\rho_M(t) (3 \cos^2 \Theta_M - 1) + \\ &+ k_{SM} \rho_S(t) (3 \cos^2 \Theta_S - 1) \end{aligned} \right].$$

Сокращенно это можно записать в виде безразмерной функции земного прилива  $f_{ET}(t)$ , состоящей из суммы двух безразмерных функций  $f_M(t)$  (лунная составляющая) и  $f_S(t)$  (солнечная составляющая), взятой с противоположным знаком и умноженной на характеристическую амплитуду  $A_{ET}$ :

$$\Delta h_{ET}(t) = A_{ET} f_{ET}(t) = -A_{ET} [f_M(t) + k_{SM} f_S(t)], \quad (8)$$

где  $\Delta h_{ET}$  – земноприливное возмущение (вариация) уровня подземных вод, мм;  $A_{ET}$  – характеристическая амплитуда земноприливных колебаний уровня, индивидуальная для скважины, мм.

Часовой угол  $H$  светила, равномерно перемещающегося относительно небесного экватора (3), как функцию времени развернуто можно записать в следующем виде:

$$H(t) = s(t) - \alpha(t) = \Omega(t - t^0(\lambda)),$$

где  $s(t)$  – момент звездного времени, рад.;  $\alpha(t)$  – прямое восхождение светила в экваториальной системе небесных координат на момент времени  $t$ , рад.;  $\lambda$  – географическая долгота местности, рад.;  $t$  – местное поясное время на географической долготе  $\lambda$ , сут.;  $\Omega$  – угловая частота периодичности наступления верхних кульминаций светила: для Луны – средние лунные сутки, для Солнца – средние солнечные сутки, сут.<sup>-1</sup>;  $t^0(\lambda)$  – средний начальный момент наступления верхней кульминации светила, задаваемый для пункта наблюдений на географической долготе  $\lambda$ , сут.

Тогда составляющая безразмерной функции земного прилива для светила с учетом (4), (7) представит в виде:

$$f(t) = \rho(t) \left[ \begin{aligned} &\cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta(t) \cdot \cos(2H(t) - \psi(t)) + \\ &+ \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta(t) \cdot \cos(H(t) - \psi(t)) + \\ &+ 3(\sin^2 \varphi - 1/3)(\sin^2 \delta(t) - 1/3) \end{aligned} \right], \quad (9)$$

где  $\delta(t)$  – склонение светила в момент времени  $t$ ;  $\rho(t)$  – модулирующий множитель, учитывающий изменение расстояния до притягивающего центра светила;  $\psi(t)$  – угловая поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций светила из-за неравномерности скорости его углового движения относительно небесного экватора, рад.

Теперь рассмотрим расчет склонения, а также поправок за счет изменения расстояний и неравномерности углового движения светила – отдельно для Луны (индекс «М») и для Солнца (индекс «S»), с целью их подстановки в (9). Вспомогательные зависимости и параметры взяты из литературы по соответствующей астрономической тематике [13, 14, 18–20].

Склонение Луны (в градусах) в экваториальной системе небесных координат для момента времени  $t$ :

$$\delta_M(t) \cong \delta_e \cdot \sin(\omega_M^{\text{trop}}(t - t_M^{\text{trop}})) + 5,14^\circ \cdot \cos(\omega_M^{\text{drac}}(t - t_M^{\text{drac}})),$$

где  $\delta_e$  – наклон эклиптики к плоскости земного экватора, равен  $23,44^\circ$ ;  $\omega_M^{\text{trop}}$  – угловая частота тропического лунного месяца, сут.<sup>-1</sup>;  $t_M^{\text{trop}}$  – средний момент времени пересечения Луной небесного экватора из южного в северное небесное полушарие, сут.;  $\omega_M^{\text{drac}}$  – угловая частота драконического лунного месяца, сут.<sup>-1</sup>;  $t_M^{\text{drac}}$  – средний момент времени прохождения Луной восходящего лунного узла, сут.

Угловая поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций Луны:

$$\psi_M(t) = 2\bar{\varepsilon}_M \cdot \sin(\omega_M^{\text{anom}}(t - t_M^{\text{anom}})) - \left( \sin^2 \frac{\delta_M^{\text{max}}(t)}{2} + \sin^4 \frac{\delta_M^{\text{max}}(t)}{2} \right) \cdot \sin(\omega_M^{\text{trop}}(t - t_M^{\text{trop}})),$$

где  $\bar{\varepsilon}_M$  – средний эксцентриситет орбиты Луны:  $\cong 0,055545$  [13, 14, 18–22];  $\omega_M^{\text{anom}}$  – угловая частота аномалистического лунного месяца, сут.<sup>-1</sup>;  $t_M^{\text{anom}}$  – средний момент времени прохождения перигея Луной, сут.;  $\delta_M^{\text{max}}(t)$  – изменение максимального склонения Луны с периодом 18,61 лет (в градусах):

$$\delta_M^{\text{max}}(t) \cong 23,44^\circ + 5,14^\circ \cdot \cos(\omega_M^{\text{nod}}(t - t_M^{\text{nod}})),$$

где  $\omega_M^{\text{nod}}$  – угловая частота полного обращения лунных узлов с периодом 18,61 лет, сут.<sup>-1</sup>;  $t_M^{\text{nod}}$  – начальный момент времени, когда Луна в течение месяца достигала максимального склонения в  $\pm 28,58^\circ$ , сут.

При предельно упрощенном вычислении моментов прохождения Луной перигея только через средний момент  $t_M^{\text{anom}}$  и угловую частоту  $\omega_M^{\text{anom}}$  ошибка в определении истинного перигея может достигать  $\pm 1,75$  сут., что составляет  $\pm 6\%$  от продолжительности аномалистического лунного месяца, но для оценочных расчетов этого достаточно. Если необходимо более точное определение моментов прохождения Луной перигея, потребуется введение дополнительной поправки для момента времени  $t_M^{\text{anom}}$ , которая будет выражаться как функция от времени  $\Delta t_M^{\text{anom}}(t)$ .

Модуляция из-за изменения расстояния от Земли до Луны выражается с учетом (7):

$$\rho_M(t) = 1 + 3 \cdot \varepsilon_M(t) \cdot \cos(\omega_M^{\text{anom}}(t - t_M^{\text{anom}})),$$

где  $\varepsilon_M(t)$  – эксцентриситет орбиты Луны.

Наиболее сложным астрономическим фактором, необходимым для расчета расстояния до Луны и вариаций приливного потенциала, является до-

вольно быстрое изменение вытянутости (эксцентриситета) лунной орбиты во времени. Причина изменений кроется в сложном воздействии на орбитальное движение Луны не только Земли, но и Солнца. В отличие от небольших изменений расстояния до Луны в апогее, сильные биения перигейного расстояния способны существенно изменять приливное воздействие. Расстояние в перигее меняется от 356 до 370 тыс. км при среднем значении перигейного расстояния в 362 тыс. км. Этот разброс в относительных единицах составляет  $\pm 1,9\%$ . Апогейное расстояние меняется существенно слабее: от 404 до 407 тыс. км, составляя в среднем 405,5 тыс. км (разброс в относительных единицах  $\pm 0,37\%$ ). Влияние этого процесса на климат и земные геосферы изучается разными авторами [18–23]. Основной задачей является получение зависимости изменения эксцентриситета лунной орбиты, удобной для практических расчетов, без привлечения сложных формул, единиц измерения и системы специальных обозначений, принятых в общей астрономии. Удобная для практического применения формула изменения эксцентриситета орбиты Луны во времени на основании анализа графиков из [19–25] записывается в виде:

$$\varepsilon_M(t) \cong \bar{\varepsilon}_M + 0,014 \cdot \cos(\omega_M^{\varepsilon 1}(t - t_0^{\varepsilon}) + \phi_1) + 0,0142 \cdot \cos(\omega_M^{\varepsilon 2}(t - t_0^{\varepsilon}) + \phi_2),$$

где  $\omega_M^{\varepsilon 1}$  – угловая частота эвекции (отклонения) в долготе Луны (31,81 сут.), сут.<sup>-1</sup>;  $\omega_M^{\varepsilon 2}$  – угловая частота биений аномалистического и синодического полумесяцев (205,89 сут.), или период биений перигейного расстояния, сут.<sup>-1</sup>;  $t_0^{\varepsilon}$  – начальный момент времени для расчета (18.11.2000), сут.;  $\phi_1 = 2,148$  рад;  $\phi_2 = 10,565$  рад.

Склонение Солнца (в градусах) в экваториальной системе небесных координат запишется в виде:

$$\delta_S(t) = \delta_S^{\max} \cdot \sin(\omega_S^{\text{trop}}(t - t_S^{\text{trop}}));$$

- поправка за неравномерность наступления верхних кульминаций Солнца:

$$\psi_S(t) = 2\bar{\varepsilon}_S \cdot \sin(\omega_S^{\text{anom}}(t - t_S^{\text{anom}})) - \left( \sin^2 \frac{\delta_S^{\max}}{2} + \sin^4 \frac{\delta_S^{\max}}{2} \right) \cdot \sin(\omega_S^{\text{trop}}(t - t_S^{\text{trop}}));$$

- модуляция от изменения расстояния до Солнца:

$$\rho_S(t) = 1 + 3 \cdot \varepsilon_S \cdot \cos(\omega_S^{\text{anom}}(t - t_S^{\text{anom}})),$$

где  $\delta_S^{\max}$  – среднее максимальное склонение Солнца на данную эпоху:  $\cong 23,44^\circ$ , или наклон эклипти-

ки к плоскости земного экватора;  $\omega_S^{\text{trop}}$  – угловая частота тропического солнечного года, сут.<sup>-1</sup>;  $t_S^{\text{trop}}$  – момент времени прохождения Солнцем точки весеннего равноденствия на небесной сфере (21 марта любого года), сут.;  $\bar{\varepsilon}_S$  – средний эксцентриситет орбиты Земли на данную эпоху:  $\cong 0,0167$ .  $\omega_S^{\text{anom}}$  – угловая частота аномалистического солнечного года, сут.<sup>-1</sup>;  $t_S^{\text{anom}}$  – момент времени прохождения Землей перигелия (3 января любого года), сут.

### Выделение земноприливных вариаций из замеров уровня

Чтобы сравнить расчетные значения земноприливных вариаций с фактическими, необходимо выделить последние из зарегистрированных значений уровня подземных вод. Достаточно эффективным и простым решением здесь служит применение дискретного фильтра на основе скользящего среднего. Простой фильтрацией можно выделять высокочастотные земноприливные вариации в виде остаточной разности:

$$\Delta h_{ET}^*(t_i) = h^1(t_i) - \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^{j=N} h^1(t_{i+j}),$$

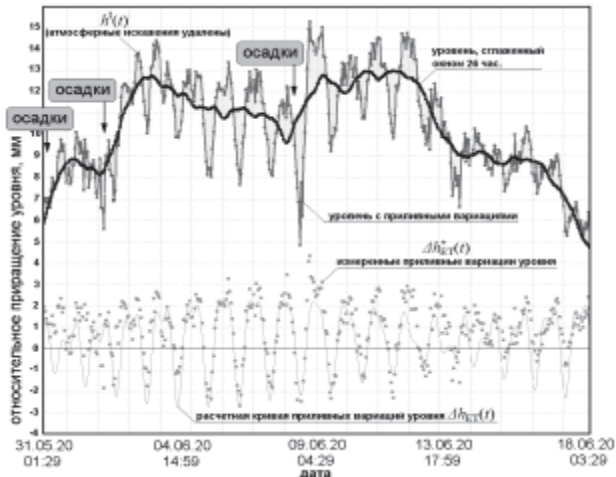
$$t_i = i \cdot T, \quad (10)$$

где  $\Delta h_{ET}^*(t)$  – значения земноприливных вариаций уровня подземных вод, выделенные из измерений, мм;  $h^1(t)$  – замеры уровня с компенсированным влиянием искажений атмосферного давления, мм;  $T$  – период регистрации показаний уровня подземных вод, ч;  $N$  – половина ширины усредняющего окна, значений.

С учетом известных частот колебаний большинства типов приливных волн в окрестности периодов 12 и 24 ч, приведенных в [26–35], размер временного окна сглаживания для выделения приливных вариаций  $(2N+1) \cdot T$  должен быть равным 26–27 ч. Это позволит подавить влияние всех основных высокочастотных земноприливных волн (суточных и полусуточных), период которых менее или равен заданной ширине скользящего окна осреднения [35].

Пример результатов выделения земноприливных вариаций  $\Delta h_{ET}^*(t)$  изображен на рис. 3. Замеры уровня выполнены Уровнемером № 1 в период летнего максимального подъема уровня подземных вод в первой половине июня 2020 г. на ПГЗ ЖРО «Северский». Измерения уровня проводились в период с 31.05.2020 по 18.06.2020 в одной из скважин IV горизонта (буферного), вскрытого в интервале глубин 164–234 м, в условиях ненарушенного гидродинамического режима.





**Рис. 3.** Пример выделения земноприливных вариаций уровня подземных вод при помощи численной фильтрации скользящим средним и сравнения с расчетными значениями

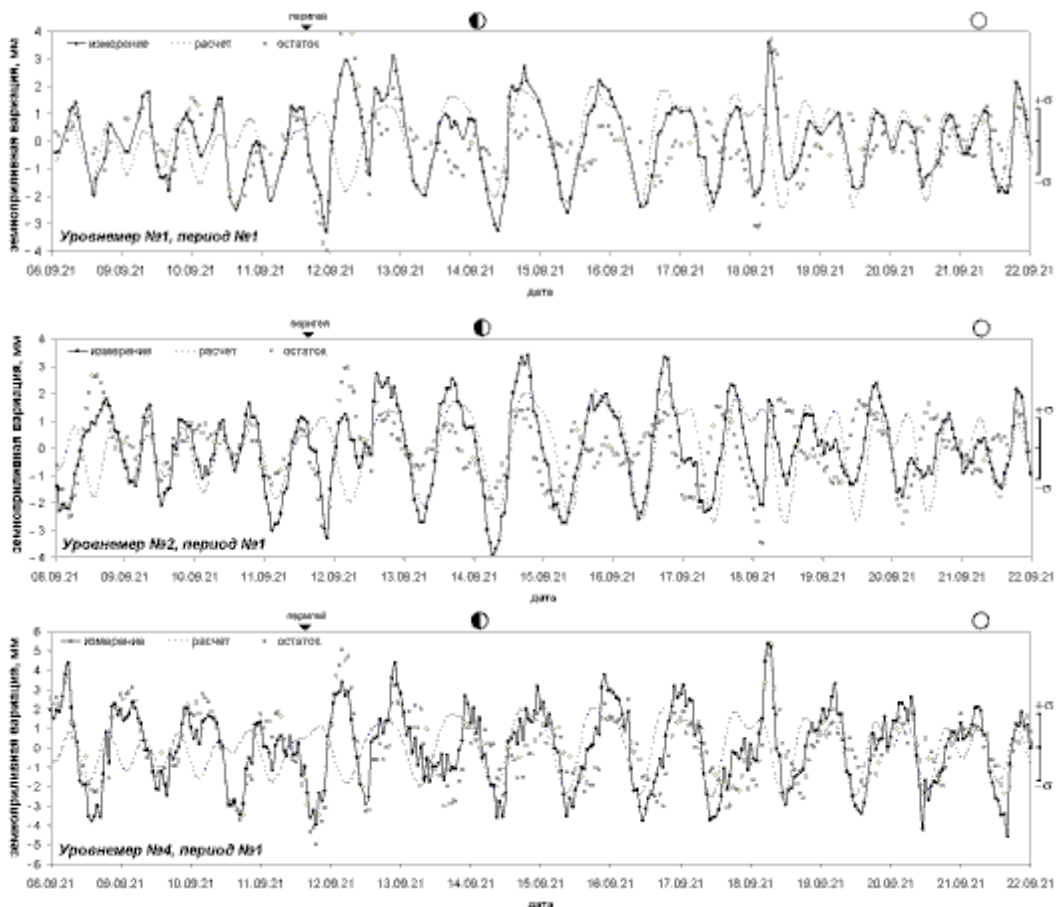
**Fig. 3.** Example of separation of earth-tidal variation of groundwater level through numerical filtration by moving mean and comparison with the calculated values

### Результаты работы

Всего по результатам измерений в скважине Т-21 за 2021–2022 гг. выбраны три принципиально различных периода, в которые можно выполнить сравнение показаний уровнемеров (рис. 2):

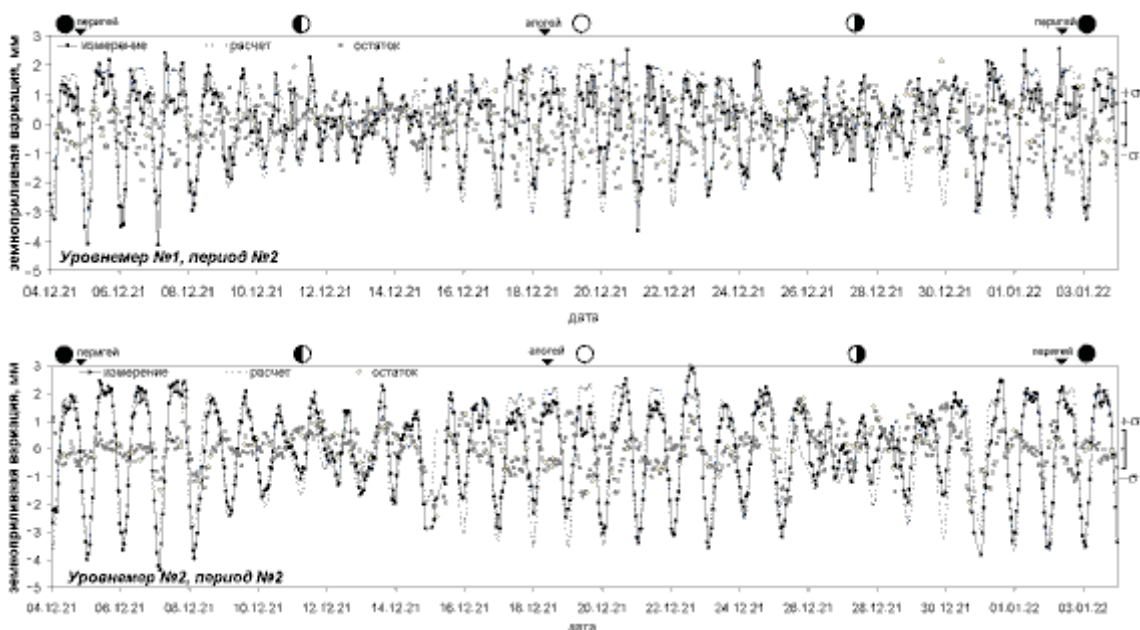
- 1) период № 1: 08.09.2021–22.09.2021 в окрестности осеннего равноденствия для сравнения Уровнемеров № 1, № 2, № 4;
- 2) период № 2: 04.12.2021–03.01.2022 в окрестности зимнего солнцестояния для сравнения Уровнемеров № 1 и № 2. (Благодаря удачному стечению астрономических условий: двум новолуниям вблизи перигея, зимнему солнцестоянию и перигелию, это вообще наилучшее время для регистрации наиболее сильных земноприливных вариаций уровня подземных вод за последние несколько лет);
- 3) период № 3: 17.01.2022–02.02.2022 для сравнения Уровнемеров № 1, № 2, № 3.

На рис. 4–6 представлены графики с выделенными земноприливными вариациями уровня подземных вод, полученные с уровнемеров в различные периоды измерений.



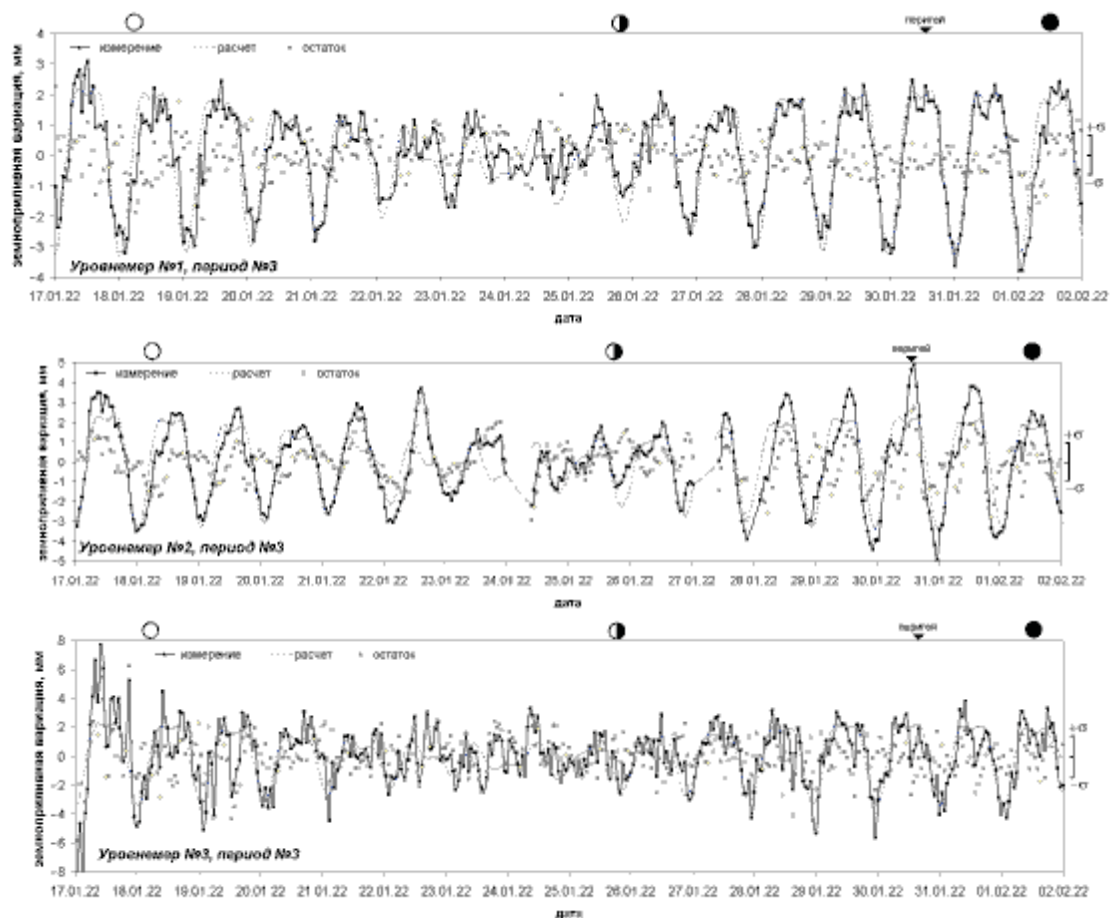
**Рис. 4.** Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, 4, с расчетными значениями за период № 1 (08.09.2021–22.09.2021)

**Fig. 4.** Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1, 2 and 4, with the calculated values for period no. 1 (08.09.2021–22.09.2021)



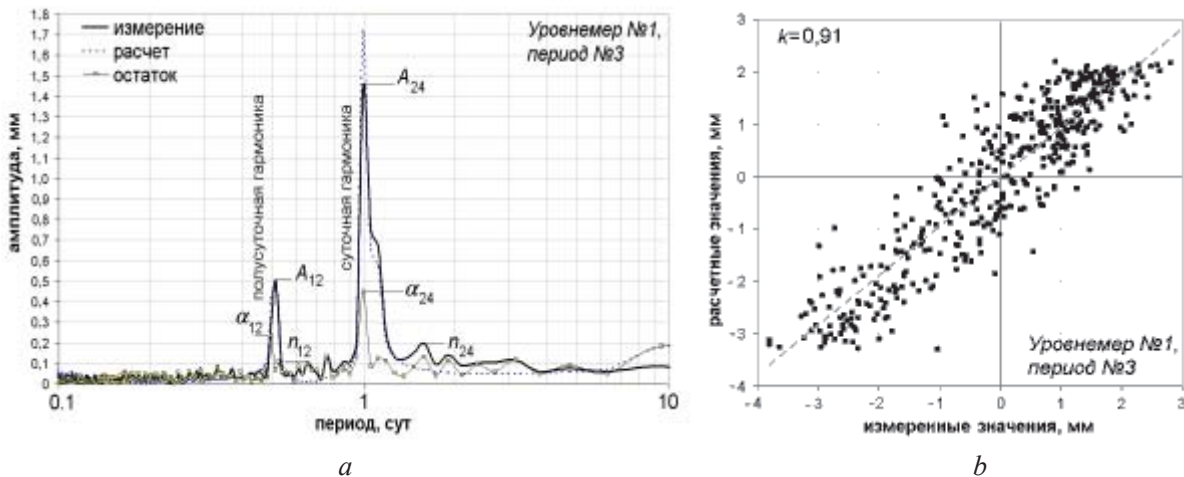
**Рис. 5.** Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, с расчетными значениями за период № 2 (04.12.2021–03.01.2022)

**Fig. 5.** Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1 and 2 with the calculated values for period no. 2 (04.12.2021–03.01.2022)



**Рис. 6.** Сравнение земноприливных вариаций уровня подземных вод в скважине Т-21, выделенных из показаний Уровнемеров №№ 1, 2, 3, с расчетными значениями за период № 3 (17.01.2022–02.02.2022)

**Fig. 6.** Comparison of earth-tidal variations of groundwater level in T-21 well, extracted from readings of level gauges no. 1, 2 and 3 with the calculated values for period no. 3 (17.01.2022–02.02.2022)



**Рис. 7.** Результаты частотного и корреляционного анализа земноприливных вариаций уровня подземных вод, выделенных из показаний Уровнемера № 1 в период № 3: а) амплитудно-частотные характеристики эмпирических, расчетных значений и их разности; б) корреляция между эмпирическими и расчетными значениями

**Fig. 7.** Results of the frequency and correlation analysis of earth-tidal variations of the groundwater level, extracted from the readings of level gauge no. 1 for period no. 3: a) amplitude-frequency characteristics of empirical and calculated values and their difference; b) correlation between empirical and calculated values

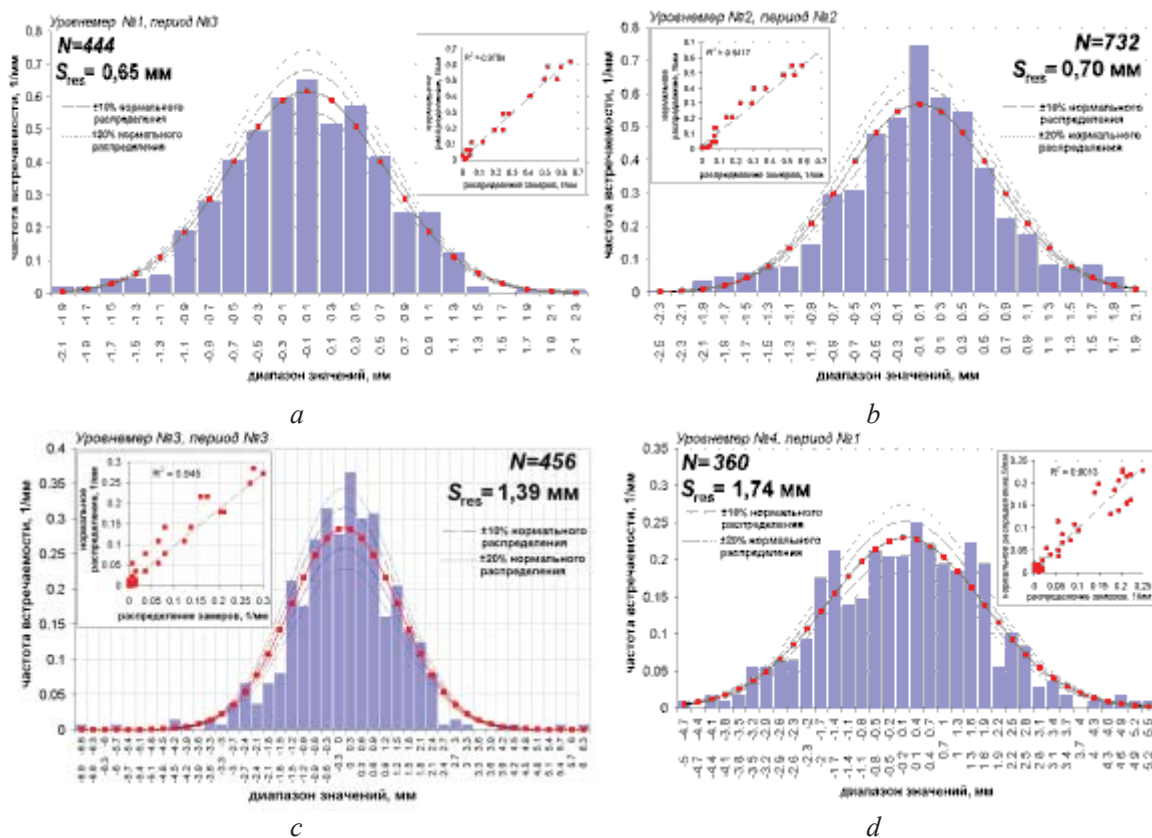
В рамках сравнительной оценки случайной составляющей погрешности для каждого из уровнемеров подбирались или вычислялись следующие величины:

- $A_{ET}$  – характеристическая амплитуда расчетных земноприливных вариаций уровня (множитель при функции  $f_{ET}(t)$ ), обеспечивающая наилучшую линейную корреляцию расчетных значений с полученными эмпирически с использованием (10), мм;
- $S_{res}$  – стандартное отклонение разности между земноприливными вариациями уровня, рассчитанными по (8) и (10):  $\Delta h_{ET}^*(t) - \Delta h_{ET}(t)$ , мм (гистограмма распределения значений  $\Delta h_{ET}^*(t) - \Delta h_{ET}(t)$  по всем четырём датчикам в разные периоды наблюдений приведены на рис. 8);
- $k$  – коэффициент линейной корреляции между земноприливными вариациями уровня, рассчитанными по (8) и (10);
- $A_{12}$  – амплитуда полусуточной гармоники в спектре  $\Delta h_{ET}^*(t)$ , мм (рис. 7, а);
- $A_{24}$  – амплитуда суточной гармоники в спектре  $\Delta h_{ET}^*(t)$ , мм (рис. 7, а);
- $n_{12}$  – амплитуда наибольшей гармоники  $\Delta h_{ET}^*(t)$  неприливной природы (фоновой) в окрестности периода 12 ч, мм (рис. 7, а);
- $n_{24}$  – амплитуда наибольшей гармоники  $\Delta h_{ET}^*(t)$  неприливной природы (фоновой) в окрестности периода 24 ч, мм (рис. 7, а);
- $\alpha_{12}$  – амплитуда полусуточной гармоники в спектре отклонений  $\Delta h_{ET}^*(t) - \Delta h_{ET}(t)$ , мм (рис. 7, а);
- $\alpha_{24}$  – амплитуда суточной гармоники в спектре отклонений  $\Delta h_{ET}^*(t) - \Delta h_{ET}(t)$ , мм (рис. 7, а).

*Примечание:* под суточной и полусуточной гармониками понимаются гармоники с периодом в окрестности 24 и 12 ч соответственно, имеющие наибольшую амплитуду в спектре.

Помимо самих значений амплитуд земноприливных гармоник, интерес также представляют их соотношения. Введем следующие относительные величины:

- $c_{12} = A_{12}/n_{12}$  – отношение амплитуды полусуточной гармоники  $A_{12}$  к амплитуде  $n_{12}$  ближайшей наибольшей гармоники неприливной природы в окрестности периода 12 ч;
- $c_{24} = A_{24}/n_{24}$  – отношение амплитуды суточной гармоники  $A_{24}$  к амплитуде  $n_{24}$  ближайшей наибольшей гармоники неприливной природы в окрестности периода 24 ч;
- $r_{12} = A_{12}/\alpha_{12}$  – отношение амплитуды полусуточной гармоники  $A_{12}$  к амплитуде  $\alpha_{12}$  в спектре остаточных отклонений (условно – коэффициент подавления полусуточной гармоники расчетным способом);
- $r_{24} = A_{24}/\alpha_{24}$  – отношение амплитуды суточной гармоники  $A_{24}$  к амплитуде  $\alpha_{24}$  в спектре остаточных отклонений (условно – коэффициент подавления суточной гармоники расчетным способом);
- $A_{12}/A_{24}$  – отношение амплитуды полусуточной гармоники к суточной для эмпирических значений (полусуточная амплитуда всегда меньше суточной).
- Результаты статистического и амплитудно-частотного анализа сравнения по всем испытанным уровнемерам сведены в табл. 2.



**Рис. 8.** Гистограммы распределения по величине остаточной разности земноприливных вариаций уровня, рассчитанных по (8) и (10), для уровнемеров и сравнение ее с нормальным распределением: а) Уровнемер № 1; б) Уровнемер № 2; в) Уровнемер № 3; г) Уровнемер № 4

**Fig. 8.** Histograms of distribution by the residual difference of earth-tidal level variations calculated by (8) and (10), for level gauges and comparison with normal distribution: a) level gauge no. 1; b) level gauge no. 2; c) level gauge no. 3; d) level gauge no. 4

В табл. 2 сведены результаты испытаний уровнемеров, включающие статистические характеристики и частотные показатели. К первым относятся коэффициент линейной корреляции  $k$  и величина стандартного отклонения остаточных разностей  $s_{\text{tes}}$ , которая может считаться количественной мерой случайной составляющей погрешности испытанных уровнемеров. Но следует отметить, что в нее включены не только случайная составляющая погрешности уровнемера, но еще и не до конца скомпенсированные отклонения между рассчитанными и измеренными земноприливными вариациями, влияние осадков, а также, вероятно, собственные колебания исследуемой пластовой системы, индуцированные земными приливами. К частотным показателям относятся: коэффициенты подавления земноприливных гармоник расчетным способом  $r_{12}$ ,  $r_{24}$  (чем они больше, тем лучше в показаниях уровнемера отражаются расчетные земноприливные колебания уровня), отношение амплитуд наибольших зарегистрированных полусуточной и суточной гармоник ( $A_{12}/A_{24}$ ) и отношения  $c_{12}$ ,  $c_{24}$ , характеризующие выраженность амплитуд земноприливных гармоник

относительно окрестного фонового шума в отфильтрованном сигнале уровнемера.

На основании изложенного в табл. 2 можно сделать предварительные выводы относительно испытанных уровнемеров. Наилучшими по своим статистическим и амплитудно-частотным характеристикам относительно регистрации земноприливных вариаций уровня подземных вод являются Уровнемеры № 1 и № 2: они имеют наименьшее стандартное отклонение от расчетных значений (0,65–0,70 мм) и максимальную корреляцию с расчетными значениями (0,85–0,91). Наилучшая степень подавления земноприливных гармоник расчетным способом (почти в 6 раз) отмечена у Уровнемера № 2. Для Уровнемера № 1 отношение амплитуды полусуточной гармоники  $A_{12}$  к суточной  $A_{24}$  существенно больше (до 72 %), чем у Уровнемера № 2 (31–44 %). Гораздо слабее проявили себя Уровнемеры № 3 и № 4, причем последний – хуже всех, но с поправкой, что период его испытаний сильно искажался осадками, а из-за ослабленных приливов это вообще было наихудшее время в году (дни равноденствия) для измерений земноприливных вариаций уровня подземных вод в умеренных широтах.

**Таблица 2.** Результаты статистического и амплитудно-частотного анализа земноприливных вариаций уровня в скважине Т-21, выделенных из показаний уровнемеров за период 2021–2022 гг.

**Table 2.** Results of statistical and amplitude-frequency analysis of earth-tidal level variations in well T-21, extracted from the readings of level gauges for 2021–2022

№ п/п	Период измерений Period of measurements	Уровнемер Level gauge	Число точек измерения уровня Number of level measuring points (N)	$S_{res}$ , мм/мм	Кэф. лин. корреляции Linear correlation coefficient k	Отношение Ratio				$A_{гр}$ , мм/мм	Амплитуды/Amplitudes of						$\frac{A_{12}}{A_{24}}$ %
						$r=A/\alpha$		$c=A/n$			приливных гармоник tidal harmonics	гармоник локального фона local background harmonics		остаточных разностей residual differences			
						$r_{12}$	$r_{24}$	$c_{12}$	$c_{24}$			мм/мм					
											$A_{12}$	$A_{24}$	$n_{12}$	$n_{24}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{24}$	
1	№ 1	№ 1	247	1,21	0,524	1,6	1,3	1,4	2,0	2,6	0,49	0,68	0,36	0,34	0,31	0,53	72
2	сент. 2021	№ 2	360	1,15	0,641	2,7	1,4	2,5	4,5	2,8	0,56	1,27	0,22	0,28	0,21	0,87	44
3	Sept. 2021	№ 4	360	1,74	0,454	3,2	1,0	1,7	4,3	2,7	0,61	1,90	0,36	0,44	0,19	1,82	32
4	№ 2	№ 1	723	0,75	0,856	3,1	2,4	6,3	6,9	2,4	0,75	1,10	0,12	0,16	0,24	0,45	68
5	дек. 2021 Dec. 2021	№ 2	732	0,70	0,906	5,6	5,9	6,7	12,8	2,7	0,60	1,66	0,09	0,13	0,11	0,29	36
6	№ 3	№ 1	444	0,67	0,910	2,1	3,3	8,5	7,3	2,6	0,51	1,46	0,06	0,20	0,24	0,44	35
7	январь 2022	№ 2	432	0,97	0,861	1,4	4,0	4,1	7,1	2,7	0,65	2,07	0,16	0,29	0,47	0,51	31
8	Jan. 2021	№ 3	456	1,39	0,731	1,5	4,5	4,3	5,5	2,7	0,95	1,48	0,22	0,27	0,63	0,32	64

В спектре остаточной разности между измеренными и расчетными земноприливными колебаниями уровня проявление ослабленных приливных гармоник было не лучше 17 % от исходных амплитуд, в среднем составляя (без серии заведомо «плохих» замеров сентября 2021 г.) 47 % для полусуточных и 27 % для суточных гармоник. Вероятно, это свидетельствует о сложности приливных явлений в земной коре и о нелинейности связи «приливной потенциал – уровень» для пластовой системы на участке выполнения описанных в статье измерений. Пример нелинейной связи приливной деформации и уровня подземных вод в водоносных горизонтах описан в [30, 35].

При планировании будущих наблюдений следует учитывать астрономические условия, влияющие на интенсивность земноприливных вариаций на протяжении нескольких лет.

### Выводы

1. Все испытанные уровнемеры по отношению к земноприливному вариациям, зарегистрированным в скважине, имеют разброс измеренных значений (на уровне  $\pm 3\sigma$ ), изменяющийся от  $\pm 2,01$  до  $\pm 5,22$  мм.
2. Для всех испытанных уровнемеров характерна фактическая чувствительность  $\sim 0,5$  мм, позволяющая достоверно выделять земноприливные вариации с максимальной амплитудой колебаний  $\pm 3$  мм.
3. У всех испытанных уровнемеров в частотном спектре выделенных земноприливных вариаций достоверно проявлены пики полусуточной и су-

точной гармоник колебаний. При дискретизации измерений с периодом не менее 1 ч зарегистрированная амплитуда полусуточных гармоник для разных уровнемеров в разные периоды года составила не менее 1/3 и не более 3/4 от амплитуды суточных гармоник.

4. В некоторые периоды измерений (период № 1) для уровнемеров наблюдалась низкая корреляция измеренных и рассчитанных земноприливных вариаций. Данный период соответствовал дням вблизи равноденствия, когда приливные явления в умеренных широтах максимально ослаблены по причинам астрономического характера. Вероятнее всего, дополнительной причиной недостаточного совпадения результатов измерений и расчета является сложная нелинейно-автоколебательная связь между регулярным приливым воздействием и объемной деформацией водонасыщенных пластовых систем.
5. Простое вычитание расчетных земноприливных вариаций не полностью удаляет их из фактических замеров уровня.
6. С учетом обобщения результатов выполненной работы наилучшим способом снятия земноприливных вариаций уровня из фактических замеров уровня, по всей видимости, должно быть не только расчетное их удаление, но и дополнительное подавление заграждающим дискретным фильтром, настроенным на области полусуточных и суточных гармоник с периодами:  $0,5 \pm 0,05$  и  $1,0 \pm 0,15$  сут., соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка деформационных свойств системы «пласт-скважина» на основе анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине / Г.Н. Копылова, Э.М. Горбунова, С.В. Болдина, Д.В. Павлов // *Физика Земли*. – 2009. – № 10. – С. 69–78.
2. Модернизация оборудования на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона и результаты / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина, В.А. Кобзев, Г.М. Коркина // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы*. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2022. – С. 50.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // *Науки о земле и недропользование*. – 2021. – Т. 44. – № 2 (75). – С. 141–150.
4. Телеизмерительная информационная система геоэкологического мониторинга состояния недр и подземных сооружений пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, В.Н. Самарцев, А.А. Щипков, М.Д. Носков, Е.Г. Язиков // *Разведка и охрана недр*. – 2023. – Т. 4. – С. 16–22.
5. Оценка влияния нагнетания жидких радиоактивных отходов на изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород / С.Ю. Малышков, О.Н. Кокорев, В.Ф. Гордеев, Т.Ю. Заведий, В.И. Поливач, А.И. Маневич // *Разведка и охрана недр*. – 2023. – Т. 4. – С. 43–48.
6. A high-accuracy phasor estimation algorithm for PMU calibration and its hardware implementation / S. Xu, H. Liu, T. Bi, K.E. Martin // *Nano Energy*. IEEE Transactions on Smart Grid. – 09 January 2020. – Vol. 11. – P. 3372–3383.
7. Vetterli B. Digital kompensierte Drucktransmitter zeigen die Grenzen des Machbaren URL: [download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7fde/2008-04.pdf](https://download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7fde/2008-04.pdf) (дата обращения 28.05.2023).
8. Автоматизированная система гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / О.Н. Кокорев, Н.Р. Адонин, М.Д. Носков, Т.Ю. Заведий, А.А. Щипков // *Изв. вузов. Физика*. – 2021. – Т. 64. – № 2-2. – С. 46–51.
9. Kopylova G.N., Boldina S.V. Preseismic groundwater ion content variations: observational data in flowing wells of the Kamchatka Peninsula and conceptual model // *Minerals*. – 2021. – Т. 11. – № 7 (731). DOI: [doi.org/10.3390/min11070731](https://doi.org/10.3390/min11070731)
10. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов / А.И. Рыбальченко, М.К. Пименов, П.П. Костин и др. – М.: ИздАТ, 1994. – 256 с.
11. Experimental study of injection-interval hydraulic isolation from overlying formation at the disposal site of the Siberian chemical complex, using high-accuracy hydraulic head measurements / A.A. Zubkov, V.A. Sukhorukov, A.I. Zykov, E.A. Redkin, V.M. Shestakov, S.P. Pozdniakov, V.A. Bakshevskaya, V.M. Kurochkin // *Developments in water science*. Vol. 52. Under-ground injection science and technology, edited by Chin-Fu Tsang and John A. – Berkeley: Elsevier, 2005. – С. 151–155.
12. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor / Jiang He, Peng Xiao, Wei Lu, Jiangwei Shi, Ling Zhang, Yun Liang, Caofeng Pan, Shiao-Wei Kuo, Tao Chen // *Nano Energy*. – May 2019. – Vol. 59. – P. 422–433.
13. Мельхиор П. Земные приливы / пер. с англ. С.Н. Барсенкова, Ю.С. Доброхотова, Б.П. Перцева / под ред. Н.Н. Парийского. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 482 с.
14. Влияние гравитационного прилива Солнца и Луны на динамику параметров атмосферы, ионосферы и океана / Д.С. Хабитуев, Б.Г. Шпынев, А.В. Татарников, Е.С. Щеглова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 321–339.
15. Аллен К.У. Астрофизические величины / пер. с англ. Х.Ф. Халиуллина / перераб. и доп. изд-е под ред. Д.Я. Мартынова. – М.: Мир, 1977. – 279 с.
16. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии, изд. 4-е. – М.: Наука, 1977. – 544 с.
17. Гумен А.М. Оценка упругой емкости горных пород на основе анализа земноприливных вариаций уровня жидкости в пьезометрических скважинах // *Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого*. – 2000. – № 3. – С. 37–41.
18. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» / А.Л. Багмет, М.И. Багмет, В.Л. Барабанов, А.О. Гриневский, И.Г. Киссин, В.А. Малугин, Т.А. Рукавишников, И.В. Савин // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. – 1989. – № 11. – С. 84–95.
19. Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Ч. 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод / А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов, Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко, И.С. Свинцов, П.И. Пигулевский, В.К. Свистун, С.В. Щербина // *Физика Земли*. – 2015. – № 1. – С. 73–82.
20. Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets / J.L. Simon, P. Bretagnion, J. Chapront, M. Chapront-Touzé, G. Francou, J. Laskar // *Astronomy and Astrophysics*. – 1994. – Vol. 282. – P. 663–683.
21. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and earthquakes // *Lecture Notes in Earth System Sciences*. – Switzerland: Springer Cham, 2021. – 387 p.
22. Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: a quantitative appraisal / G.C. Rau, V.E.A. Post, M.A. Shanafield, T. Krekeler, E.W. Banks, Ph. Blum. – Germany: Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2019. – P. 3603–3629.
23. Machine learning-based anomaly detection of groundwater microdynamics: case study of Chengdu, China / Haoxin Shi, Jian Guo, Yuandong Deng, Zixuan Qin // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Article number 14718. DOI: [10.1038/s41598-023-38447-5](https://doi.org/10.1038/s41598-023-38447-5).
24. Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review / Hai Tao, Mohammed Majeed Hameed, Haydar Abdulameer Marhoon, Mohammad Zounemat-Kermani et al. – Netherlands: Neurocomputing, 2022. – P. 271–308.
25. Varouchakis E.A., Guardiola-Albert C., Karatzas G.P. Spatiotemporal geostatistical analysis of groundwater level in aquifer systems of complex hydrogeology // *American Geophysical Union: Water Resources Research*. – 2022. – Vol. 58. – Iss. 3. DOI: [doi.org/10.1029/2021WR029988](https://doi.org/10.1029/2021WR029988)

26. The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations / Shouchuan Zhang, Zheming Shi, Guangcai Wang, Zuochen Zhang, Huaming Guo // *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)*. – 2023. – Vol. 27. – Iss. 2. – P. 401–415.
27. Toll N.J., Rasmussen T.C. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels // *Ground Water*. – January-February 2007. – Vol. 45. – № 1. – P. 101–105.
28. Groundwater levels forecasting using machine learning models: a case study of the groundwater region 10 at Karst Belt, South Africa / B.A. Aderemi, Th.O. Olwal, J.M. Ndambuki, S.S. Rwanga // *Systems and Soft Computing*. – 2023. – Vol. 5. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200049> (дата обращения 28.05.2023).
29. Физика и астрономия Луны / под ред. З. Копала / пер. с англ. под ред. Г.А. Лейкина. – М.: Мир, 1973. – 318 с.
30. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. – 2012. – № 2. – С. 14–26.
31. Сидоренков Н.С., Петров В.Н. Перигейно-сизигийные приливы в атмосфере // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2020. – № 2 (376). – С. 126–140.
32. Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменений погоды и климата // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2015. – Т. 14. – № 3. – С. 5–26.
33. NASA. Eclipse. URL: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/moonorbit.html> (дата обращения 28.05.2023).
34. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: справочник. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
35. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации атмосферного давления / В.В. Адушкин, А.А. Спивак, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов // *Динамические процессы в геосферах*. – 2016. – № 8. – С. 100–109.

### Информация об авторах

**Тарас Юрьевич Заведий**, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-технолог отдела экологического контроля АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1. TYZavedy@rosatom.ru

**Никита Русланович Адонин**, аспирант кафедры электроники и автоматики физических установок, инженер научно-исследовательского сектора Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. d273ANR@edu.ssti.ru

**Олег Николаевич Кокорев**, главный специалист-гидрогеолог филиала «Северский», Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, Россия, 636035, г. Северск, пр. Коммунистический, 8. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

**Александр Андреевич Щипков**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и автоматики физических установок Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65. aashchipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Поступила в редакцию: 30.06.2023

Поступила после рецензирования: 31.10.2023

Принята к публикации: 20.12.2023

### REFERENCES

1. Kopylova G.N., Gorbunova E.M., Boldina S.V., Pavlov D.V. Assessment of deformation properties of the “formation-well” system based on the analysis of barometric and tidal responses of the water level in the well. *Earth Physics*, 2009, no. 10, pp. 69–78. (In Russ.)
2. Kopylova G.N., Boldina S.V., Kobzev V.A., Korkina G.M. Modernization of equipment at wells of the Petropavlovsk-Kamchatka test site and results. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. *Abstracts of the XVI International Seismological School*. Obninsk, Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 2022. P. 50. (In Russ.)
3. Kopylova G.N., Boldina S.V. Hydrogeological precursors of earthquakes and volcanic activations according to observation data in wells of the Kamchatka Peninsula. *Geosciences and subsoil use*, 2021, vol. 44, no. 2 (75), pp. 141–150. (In Russ.)
4. Kokorev O.N., Adonin N.R., Samartsev V.N., Shchipkov A.A., Noskov M.D., Yazikov E.G. Telemetry information system for geoeological monitoring of the state of the subsoil and underground structures of deep disposal sites for liquid radioactive waste. *Exploration and protection of subsoil*, 2023, vol. 4, pp. 16–22. (In Russ.)
5. Malyshkov S.Yu., Kokorev O.N., Gordeev V.F., Zavediy T.Yu., Polivach V.I., Manevich A.I. Assessment of the influence of injection of liquid radioactive waste on changes in the stress-strain state of a rock mass. *Exploration and protection of subs*, 2023, vol. 4, pp. 43–48. (In Russ.)
6. Xu S., Liu H., Bi T., Martin K.E. A high-accuracy phasor estimation algorithm for PMU calibration and its hardware implementation. *Nano Energy. IEEE Transactions on Smart Grid*, 09 January 2020, vol. 11, pp. 3372–3383.
7. Vetterli B. *Digitally compensated pressure transmitters show the limits of what is possible*. (In Germ.) Available at: [download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7f/de/2008-04.pdf](https://download.keller-druck.com/api/download/2HQkUzY8SAYKUv6SrMod7f/de/2008-04.pdf) (accessed 28 May 2023).

8. Kokorev O.N., Adonin N.R., Noskov M.D., Zavediy T.Y., Shchipkov A.A. Automated hydrodynamic monitoring system to ensure environmental safety of a deep disposal site for liquid radioactive waste. *Izv. Universities. Physics*, 2021, vol. 64, no. 2–2, pp. 46–51. (In Russ.)
9. Kopylova G.N., Boldina S.V. Preseismic groundwater ion content variations: observational data in flowing wells of the Kamchatka Peninsula and conceptual model. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 7 (731). DOI: doi.org/10.3390/min11070731
10. Rybalchenko A.I., Pimenov M.K., Kostin P.P. *Deep burial of liquid radioactive waste*. Moscow, Izdat Publ., 1994. 256 p. (In Russ.)
11. Zubkov A.A., Sukhorukov V.A., Zykov A.I., Redkin E.A., Shestakov V.M., Pozdniakov S.P., Bakvskaya V.A. and Kurochkin V.M. Experimental study of injection-interval hydraulic isolation from overlying formation at the disposal site of the Siberian chemical complex, using high-accuracy hydraulic head measurements. *Developments in water science*. Vol. 52. Under-ground injection science and technology. Ed. by Chin-Fu Tsang, J.A. Apps. Berkeley, Elsevier, 2005. pp. 151–155.
12. Jiang He, Peng Xiao, Wei Lu, Jiangwei Shi, Ling Zhang, Yun Liang, Caofeng Pan, Shiao-Wei Kuo, Tao Chen. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor. *Nano Energy*, May 2019, vol. 59, pp. 422–433.
13. Melchior P. *Earth tides*. Translated from English by S.N. Barsenkova, Y.S. Dobrokhotova, B.P. Pertseva. Ed. by N.N. Pariyskiy. Moscow, Mir Publ., 1968. 482 p. (In Russ.)
14. Habituev D.S., Shpynev B.G., Tatarnikov A.V., Shcheglova E.S. Influence of gravitational tide of the Sun and the Moon on the dynamics of parameters of the atmosphere, ionosphere and ocean. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2017, vol. 14, no. 5, pp. 321–339. (In Russ.)
15. Allen K.U. *Astrophysical quantities*. Translated from English by K.F. Khaliullin. Ed. by D.Y. Martynov. Moscow, Mir Publ., 1977. 279 p. (In Russ.)
16. Bakulin P.I., Kononovich E.V., Moroz V.I. *General astronomy course*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 544 p. (In Russ.)
17. Gumen A.M. Evaluation of the rocks elastic capacity based on the analysis of earth-tidal level variations in piezometric wells. *P.O. Sukhoi GGTU Vestnik*, 2000, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
18. Bagmet A.L., Bagmet M.I., Barabanov V.L., Grinevsky A.O., Kissin I.G., Malugin V.A., Rukavishnikova T.A., Savin I.V. Study of earth-tide fluctuations in the level of underground water at the Obninsk well. *Izv. AS USSR. Ser. Physics of the Earth*, 1989, no. 11, pp. 84–95. (In Russ.)
19. Besedina A.N., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V., Svintsov I.S., Pigulevsky P.I., Svistun V.K., Shcherbina S.V. Response of fluid-saturated collectors to the lunar-solar tides. P. 1. Background parameters of the tidal component in ground displacement and groundwater level. *Earth physics*, 2015, no. 1, pp. 73–82. (In Russ.)
20. Simon J.L., Bretagnion P., Chapront J., Chapront-Touzé M., Francou G., Laskar J. Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, vol. 282, pp. 663–683.
21. Wang Ch.-Y., Manga M. Water and earthquakes. *Lecture Notes in Earth System Sciences*. Switzerland, Springer Cham, 2021. 387 p.
22. Rau G.C., Post V.E.A., Shanfield M.A., Krekeler T., Banks E.W., Blum Ph. *Error in hydraulic head and gradient time-series measurements: a quantitative appraisal*. Germany, Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2019. pp. 3603–3629.
23. Haoxin Shi, Jian Guo, Yuandong Deng, Zixuan Qin. Machine learning-based anomaly detection of groundwater microdynamics: case study of Chengdu, China. *Scientific Reports*, 2023, vol 13, Article number 14718. DOI: 10.1038/s41598-023-38447-5.
24. Hai Tao, Mohammed Majeed Hameed, Haydar Abdulameer Marhoon, Mohammad Zounemat-Kermani. *Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review*. Netherlands, Neurocomputing, 2022. pp. 271–308.
25. Varouchakis E.A., Guardiola-Albert C., Karatzas G.P. Spatiotemporal geostatistical analysis of groundwater level in aquifer systems of complex hydrogeology. *American Geophysical Union: Water Resources Research*, 2022, vol. 58, Iss. 3. DOI: doi.org/10.1029/2021WR029988.
26. Shouchuan Zhang, Zheming Shi, Guangcai Wang, Zuochen Zhang, Huaming Guo. *The origin of hydrological responses following earthquakes in a confined aquifer: insight from water level, flow rate, and temperature observations*. Germany, Hydrology and Earth System Sciences (HESS), 2023. Vol. 27, Iss. 2, pp. 401–415.
27. Toll N.J., Rasmussen T.C. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels. *Ground Water*, January–February 2007, vol. 45, no. 1, pp. 101–105.
28. Aderemi B.A., Olwal Th.O., Ndambuki J.M., Rwanga S.S. Groundwater levels forecasting using machine learning models: a case study of the groundwater region 10 at Karst Belt, South Africa. *Systems and Soft Computing*, 2023, vol. 5. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200049> (accessed 28 May 2023).
29. *Physics and astronomy of the Moon*. Ed. by Z. Kopala. Translated from English by G.A. Leikin. Moscow, Mir Publ., 1973. 318 p.
30. Adushkin V.V., Spivak A.A., Kharlamov V.A. Influence of lunar-solar tide on the variation of geophysical fields on the Earth's crust-atmosphere boundary. *Earth's physics*, 2012, no. 2, pp. 14–26. (In Russ.)
31. Sidorenkov N.S., Petrov V.N. Perigean-syzygic tides in the atmosphere. *Hydrometeorological studies and projections*, 2020, no. 2 (376), pp. 126–140. (In Russ.)
32. Sidorenkov N.S. Celestial mechanical causes of weather and climate changes. *Geophysical processes and biosphere*, 2015, vol. 14, no 3, pp. 5–26. (In Russ.)
33. *NASA. Eclipse*. Available at: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhelp/moonorbit.html> (accessed 28 May 2023).
34. Goldenberg L.M., Matiushkin B.D., Polyak M.N. *Digital signal processing: directory*. Moscow, Radio and Communication Publ., 1985. 312 p. (In Russ.)
35. Adushkin V.V., Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Kharlamov V.A. Influence of the lunar-solar tide on variations of atmospheric pressure. *Dynamic processes in geospheres*, 2016, no. 8, pp. 100–109. (In Russ.)



### Information about the authors

**Taras Yu. Zavedy**, Cand. Sc., Engineer-Technologist, JSC “Siberian Group of Chemical Enterprises”, 1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russian Federation. TYZavedy@rosatom.ru

**Nikita R. Adonin**, Postgraduate Student, Research Engineer, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University “MEPhI”, 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. d273ANR@edu.ssti.ru

**Oleg N. Kokorev**, Chief Specialist-hydrogeologist, “Seversky” branch of the “National operator for radioactive waste management”, 8, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636035, Russian Federation. Kokorev.podzemgazprom@yandex.ru

**Alexander A. Shchipkov**, Cand. Sc., Associate Professor, Seversk Technological Institute of the National Research Nuclear University “MEPhI”, 65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russian Federation. aashchipkov@mephi.ru; <https://orcid.org/0009-0006-4633-9175>

Received: 30.06.2023

Revised: 31.10.2023

Accepted: 20.12.2023

УДК 504.433  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4294  
Шифр специальности ВАК: 1.6.6, 1.6.21

## Геолого-гидрогеологическое строение шешминского терригенного комплекса Бельского поднятия

М.И. Ярков<sup>1✉</sup>, Л.О. Лейбович<sup>1</sup>, П.А. Красильников<sup>2</sup>, Г.М. Батракова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО НИПППД «НЕДРА», Россия, г. Пермь

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, г. Пермь

✉ maxforj@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность* работы определяется необходимостью организации производственно-технического водоснабжения для нефтяного месторождения в северо-восточной части Пермского края. Особые требования недропользования и охраны окружающей среды обусловлены наличием зоны санитарной охраны водозабора в северной части месторождения. Исследование геологического строения и условий залегания подземных вод шешминского водоносного комплекса позволит оценить ресурсы подземных вод территории и решить вопрос организации водоснабжения нефтяного месторождения. *Цель:* изучение геологического строения, условий залегания подземных вод шешминского водоносного комплекса. *Объекты:* горные породы шешминской свиты, а также подземные воды шешминского терригенного комплекса. *Методы:* изучение фондовых и архивных документов о геологическом строении и гидрогеологических условиях района работ, проведение маршрутного гидрогеологического обследования территории, бурение поисковых и оценочных скважин на подземные воды, проведение опытно-фильтрационных работ в паводковый и межженный период из поисковых и оценочных скважин. *Результаты.* Определена мощность шешминской свиты в пределах района работ, тектонически приуроченного к Бельскому поднятию, осложненному Дуринским прогибом. Мощность шешминской свиты составила от 100–150 до 300 и более м. Определен литологический состав пород. Получены данные об условиях залегания подземных вод шешминского водоносного комплекса. Установлено, что в пределах Дуринского прогиба подземные воды залегают как система отдельных обособленных водоносных прослоев и блоков. Были выделены наиболее водообильные зоны. В толще слабопроницаемой шешминской свиты были обнаружены два водоносных пласта, которые приурочены к песчаникам мелкозернистым и крупнозернистым. Водоносные пласты не имеют гидравлической связи и отделены друг от друга 40 м толщей водоупорных аргиллитов. Подземные воды залегают в виде пластов с граничными условиями II рода, ориентированного субширотно, с запада на восток. Полученные данные могут в дальнейшем быть использованы для решения вопросов водоснабжения в пределах исследуемой области, рационального использования этих вод.

**Ключевые слова:** шешминская свита, граничные условия II рода, Бельское поднятие, Дуринский прогиб, Соликамский городской округ, Пермский край

**Для цитирования:** Геолого-гидрогеологическое строение шешминского терригенного комплекса Бельского поднятия / М.И. Ярков, Л.О. Лейбович, П.А. Красильников, Г.М. Батракова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 105–119. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4294

---

UDC 504.433  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4294

## Geological and hydrogeological structure of the Sheshma terrigenous complex of the Belsky uplift

M.I. Yarkov<sup>1✉</sup>, L.O. Leibovich<sup>1</sup>, P.A. Krasilnikov<sup>2</sup>, G.M. Batrakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC NIPPPPD "NEDRA", Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

✉ maxforj@yandex.ru

**Abstract. Relevance.** The importance of industrial and technical water supply to an oil field in the north-east of Perm region. The requirements to subsoil use and environment protection demand a sanitary restriction zone of the water supply source in the northern part of the field. The current study of a geological structure and groundwater conditions and circulation of Sheshma aquifer complex will assess its resources and elaborate on organization of water supply to the oil field. **Aim.** To study geological structure and groundwater conditions of Sheshma aquifer complex. **Objects.** Formations rocks and groundwater conditions of Sheshma terrigenous complex. **Methods.** Studying the archival records, conducting a hydro-geological survey of the territory, drilling groundwater exploration wells, conducting pilot-filtration works on groundwater exploration wells in the flooding and low-water period. **Results.** The authors have discovered Sheshma formation thickness, which ranges from 100–150 to 300 m, and lithological composition of rocks and groundwater conditions of Sheshma aquifer complex. It was established that groundwater is deposited as a system of separate isolated water-bearing interlayers and blocks within the Durinsky trough. The most water-bearing zones were identified. Two aquifers of fine-grained and coarse-grained sandstones were detected in low-permeability thickness of Sheshma formation. The aquifers are not hydraulically connected and are separated from each other by a 40 m thick layer of water-resistant mudstones. Groundwater is deposited as strata with Neumann's boundary conditions, orientated sublatitudinally, from west to east. The obtained data can be further used to solve the issues of water supply within the area under study and the rational use of these waters.

**Keywords:** Sheshma formation, Neumann's boundary condition, Belsky uplift, Durinsky trough, Solikamsk urban district, Perm region

**For citation:** Yarkov M.I., Leibovich L.O., Krasilnikov P.A., Batrakova G.M. Geological and hydrogeological structure of the Sheshma terrigenous complex of the Belsky uplift. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 105–119. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4294

## Введение

Вопросы управления ресурсами подземных вод и их рационального использования являются приоритетными для ряда территорий нефтедобычи в Российской Федерации и за ее пределами. Проблемные вопросы поиска и организации источников технического и питьевого водоснабжения рассмотрены [1–7] и многих др.

На территории Соликамского городского округа в Пермском крае одним из видов недропользования является нефтедобыча. Район исследования ограничен участком недр, предоставленным в пользование для разведки и добычи углеводородного сырья. В северной части района работ расположена зона санитарной охраны третьего пояса водозабора «Усолка» [8], что накладывает особые требования к недропользованию и охране окружающей среды. В пределах района исследования, из-за указанных выше особенностей, шешминская свита является единственным возможным источником для организации водоснабжения объектов нефтедобычи. В связи с этим было необходимо получить данные о составе, строении, мощности шешминских отложений и их водообильности. Необходимо отметить, что опубликованных и фондовых данных о водообильности шешминского водоносного комплекса в пределах района работ недостаточно, потому что все основные гидрогеологические изыскания для целей водоснабжения населения и промышленных объектов не только по району работ, но и в целом по территории Березниковско-Соликамского промышленного узла, были направлены на изучение подземных вод верхнесоликамского горизонта. В пределах Верхнекамья только два водозабора разрабатывают подземные воды шешминского во-

доносного комплекса: производственно-технический водозабор (эксплуатирует совместно шешминский и верхнесоликамский горизонты), расположенный в 34 км юго-западнее от участка исследований, и хозяйственно-питьевой водозабор, расположенный в 22 км от участка.

Целью работы являлось изучение геологического строения и условий залегания подземных вод шешминского водоносного комплекса для обеспечения производственно-технологического водоснабжения объектов нефтедобычи.

Объектами исследования являлись горные породы шешминской свиты, а также подземные воды шешминского терригенного комплекса.

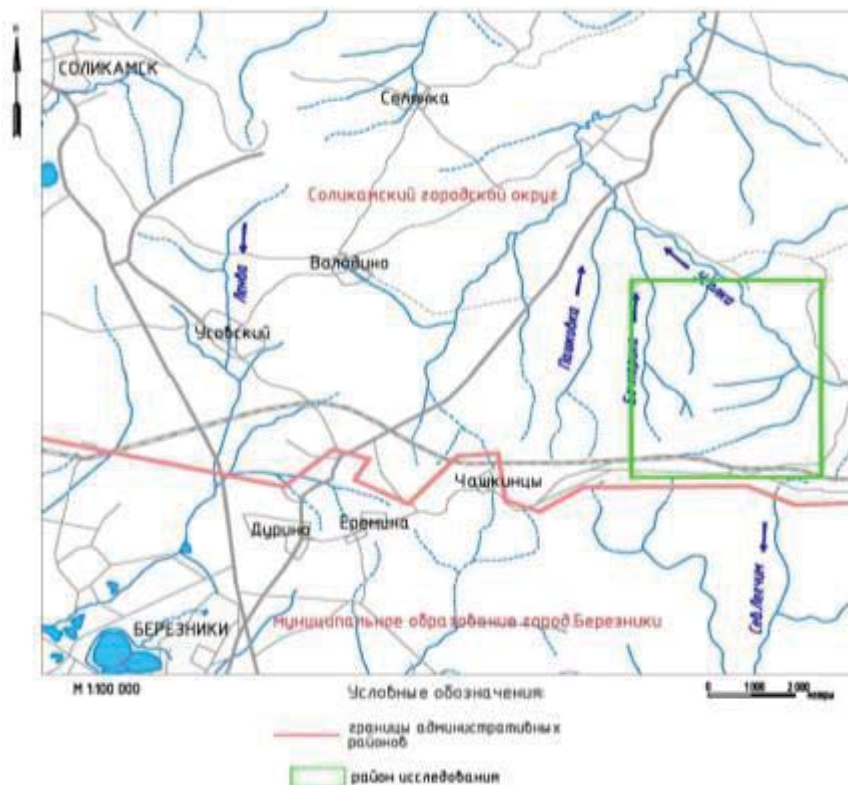
Основными задачами исследования являлись:

- изучение условий залегания, мощности, литологического состава шешминских отложений;
- выделение водообильных участков и водоносных интервалов;
- определение границ природной гидрогеологической модели.

## Общие сведения о районе работ

Район исследования расположен в северной части Пермского края на территории Соликамского городского округа (рис. 1).

В геоморфологическом плане район относится к восточной окраине Восточно-Европейской равнины и по особенностям рельефа представляет собой равнину, сформированную воздействием денудационных, эрозионных и аккумулятивных процессов. Плоские, слабоволнистые водораздельные равнины постепенно повышаются с запада на восток. Они довольно интенсивно расчленены долинами малых рек, ручьев и оврагов.



**Рис. 1.** Обзорная карта-схема района исследования  
**Fig. 1.** Location map of the study area

Абсолютные отметки рельефа варьируют в пределах 160–257 м. Склоны долин малых рек и водораздельные площади покрыты чехлом элювиально-делювиальных отложений, задернованы и залесены.

Речная сеть района является составной частью бассейна р. Камы. В северо-восточной части района основным водотоком является р. Усолка с притоками рр. Бочкариха, Бол. и Мал. Аленки. Южнее района работ располагается бассейн р. Зырянки с притоками рр. Извер и Легчим.

В тектоническом отношении район работ приурочен к Бельскому поднятию, расположенному в центральной части Соликамской депрессии Предуральского краевого прогиба. В пределах описываемой площади строение осадочного чехла осложнено Дуринским прогибом, который является весьма своеобразной структурой широтного простирания (около 35 км). Для нее характерна большая мощность шешминской свиты (более 500 м), врезанной непосредственно в соленосные отложения березниковской свиты нижней перми, крутые, обращенные к оси структуры, наклоны толщ. Шешминская свита представлена полевошпатовыми песчаниками с карбонатным или глинисто-карбонатным цементом, алевролитами, красновато-бурыми глинами; реже, главным образом в нижней части разреза, встречаются известняки и мергели.

### Методика исследования и фактический материал

На первом этапе исследования были проанализированы и обобщены материалы ранее проведенных работ на изучаемой территории. Большая часть геологических исследований за последний период связана с основными полезными ископаемыми (нефть, калийные соли и т. д.), а также с инженерно-геологическими изысканиями для строительства объектов промышленности гг. Березники и Соликамск. В результате были получены предварительные данные о геолого-гидрогеологических условиях района работ.

В дальнейшем проводились полевые маршрутные гидрогеологические обследования изучаемой площади с целью гидрогеологического картирования участка работ и прилегающей территории в масштабе 1:25000, на участках детализации – 1:10000. Маршруты проводились с описанием элементов рельефа, склоновых процессов, блоковых сдвижений, контакта шешминских и верхнесоликамских пород, водопроявлений (родников, мочажин и т. д.). При обследовании использовались топопланшеты и предварительно дешифрованные космоснимки масштаба 1:25000. Объем пеших маршрутов составил 21 км.

Для уточнения геологического разреза были пробурены гидрогеологические скважины: две по-

исковых (№ 14087/1, 14087/2) глубиной по 100 м, одна оценочная (№ 14087/3) глубиной 110 м, одна поисково-оценочная (№ 16002/1) глубиной 140 м и одна поисково-оценочная (№ 16002/2) глубиной 55 м.

Расположение поисковых скважин № 14087/1 и 14087/2 определялось требованием водопотребителя разместить их на расстоянии не более 0,5 км от объектов нефтепромысла. Помимо этого, учитывались наиболее водообильные участки, определенные по результатам маршрутного гидрогеологического обследования. Скважина № 14087/1 была пробурена непосредственно на нефтепромысле, скважина № 14087/2 расположена в 600 м севернее скважины № 14087/1, в верховье долины р. Безымянный ручей. Глубина исследований определялась результатами бурения и опробования наблюдательных скважин на нефтепромысле и составила 100 м.

Скважина № 14087/3 глубиной 110 м была пробурена в верховье р. Безымянный ручей, в 13,5 м юго-восточнее скважины № 14087/2, бурение и откачка из которой определили перспективность выбранного участка.

По данным бурения скважин и откачки в скважинах № 14087/2 и 14087/3 предусматривалось бурение на перспективном участке водообильной зоны двух ярусных гидрогеологических скважин (№ 16002/1 и № 16002/2) глубиной 140 и 55 м соответственно. Необходимость бурения двух отдельных скважин обусловлена опытом и результатами ранее проведенных поисково-оценочных работ, а именно: наличием двух различных гидродинамических интервалов в разрезе шешминского комплекса – 0–70 и 70–110 м. Бурение скважин проводилось в нижнем течении р. Безымянный ручей на расстоянии 3 м друг от друга, на участке предполагаемой водообильной зоны, в 0,45 км выше родника № 1. Столь близкое расположение скважин обусловлено необходимостью оценить степень гидравлической связи различных гидродинамических интервалов.

Для качественной оценки условий залегания подземных вод шешминских отложений проведены опытно-фильтрационные работы, включающие в себя пробные и опытные одиночные откачки центробежными погружными насосами в меженный и паводковый период в соответствии с ГОСТ 23278-2014 [9]. Откачки были проведены с постоянными дебитами в условиях неустановившейся фильтрации, т. е. при непрерывном снижении уровня подземных вод, и заключались в измерении дебита и динамического уровня. Продолжительность пробных откачек из скважин составила: № 14087/1 – 1,6 сут., № 14087/2 – 3,1 сут. (интервал 35–70 м), 3,75 сут. (интервал 75–100 м), № 16002/2 – 3 сут. Продолжительность опытных откачек из скважин

составила: № 14087/3 – 7,1 сут., № 16002/1 – 2 откачки по 7 сут. (март, июнь). При проведении опытных откачек в скважине № 14087/3 скважина № 14087/2 использовалась в качестве наблюдательной. При проведении опытно-фильтрационных работ в скважине № 16002/1 скважина № 16002/2 использовалась в качестве наблюдательной. По окончании откачек в скважинах были проведены наблюдения за восстановлением уровня продолжительностью до 3 суток. Представленный фактический материал является частью большого комплекса поисково-оценочных работ, выполненных для организации производственно-технологического водоснабжения [10].

### **Результаты исследования и обсуждение** **Анализ фондовых и архивных материалов**

Для настоящего исследования интерес представляют фондовые и архивные материалы, которые имеют наибольшее значение для понимания особенностей гидрогеологических условий исследуемой территории.

Первой и наиболее полной сводкой о гидрогеологическом строении изучаемого района была съемка масштаба 1:200000 листа О-40-IV [11]. Дано детальное описание гидростратиграфических подразделений, выделены водообильные зоны, установлена мощность зоны пресных (кондиционных) вод, количественно оценены естественные ресурсы подземных вод, т. е. созданы предпосылки для выбора участков постановки поисково-разведочных работ на подземные воды для целей водоснабжения.

Особо следует указать на значение региональных гидрогеологических работ по территории Пермского края, Камско-Вятского артезианского бассейна, направленных на изучение ресурсного потенциала водоносных горизонтов и комплексов, оценки обеспеченности населения ресурсами подземных вод того или иного района. В статье [12] отмечается особое значение подземных вод в водоснабжении населения и объектов промышленности Пермской области.

Последней сводкой по геологическому картированию района исследования следует считать геологическую карту масштаба 1:50000 Верхнекамской площади [13]. В результате создан комплект карт, позволяющих прогнозировать геологическую обстановку надсоляной толщи в условиях эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС). В работах [14, 15] приводятся данные о природе, динамике, строении Дуринского прогиба. Доказано, что соляной структурный подъярус оказывает влияние на строение надсолевой толщи, а неотектоника последней определяется галогенезисом и субэрозией солей.

Эти материалы (в частности, разрывные нарушения, обусловленные соляной тектоникой) имеют практическое значение для прогнозирования опасных зон, осложняющих работу горнорудных предприятий. К тому же они могут быть использованы для целей гидрогеологии (водообильные зоны). Так, на исследуемой территории были выявлены проявления неотектонических процессов в виде так называемых линеаментов, которые интерпретируются как «ослабленные зоны» повышенной трещиноватости горного массива, дробления пород и разрывов со смещением. В районе работ эти зоны приурочены к долине р. Усолки и ряда ее мелких притоков и рассматриваются как наиболее перспективные участки для постановки поисково-оценочных работ (рис. 2).

В ряде работ отмечена роль линеаментов, разломов, трещиноватости и блокового строения в формировании подземных вод, их условий залегания, питания и разгрузки [16–20].

Основная информация последних лет по гидрогеологическим условиям залегания подземных вод по описываемому участку работ получена при переоценке запасов Усольского месторождения подземных вод. В работе [21] обоснована возможность разработки нефтяных месторождений и эксплуатации Усольского месторождения питьевых подземных вод. Результаты ранее проведенных работ указывают на весьма сложные гидрогеологические условия залегания и фильтрации подземных вод шешминского комплекса в пределах Дуринского

прогиба как систему отдельных обособленных водоносных прослоев и блоков.

### Маршрутное гидрогеологическое обследование территории

Маршрутные обследования проводились с целью изучения гидрогеологических и геоморфологических условий исследуемого района. Кроме этого, в процессе обследования фиксировалось состояние хозяйственного освоения территории, наличие лесных массивов, сельхозугодий, наземных нефтепромысловых объектов, подземных коммуникаций, решались вопросы возможности проезда буровой техники, тяжелого транспорта без нанесения ущерба экологической обстановке.

Были описаны объекты нефтедобычи, которые расположены в центральной части исследуемой области. Все строящиеся и проектируемые объекты приурочены к бассейну р. Усолки. В пределах нефтяного месторождения берут начало суходолы, переходящие в долины левых притоков р. Усолки: с юга – р. Бол. Аленка, с востока – р. Мал. Аленка, с севера – безымянный ручей, с северо-запада – руч. Полуденный Лог, с запада – р. Бочкариха.

Основное внимание при обследовании территории уделялось геоморфологии долин рек и ручьев, водности водотоков и выявлению естественных выходов подземных вод. Такими водотоками являются рр. Большая и Малая Аленка и безымянный северный приток р. Усолки (далее р. Безымянный ручей), р. Полуденный лог, р. Бочкариха.

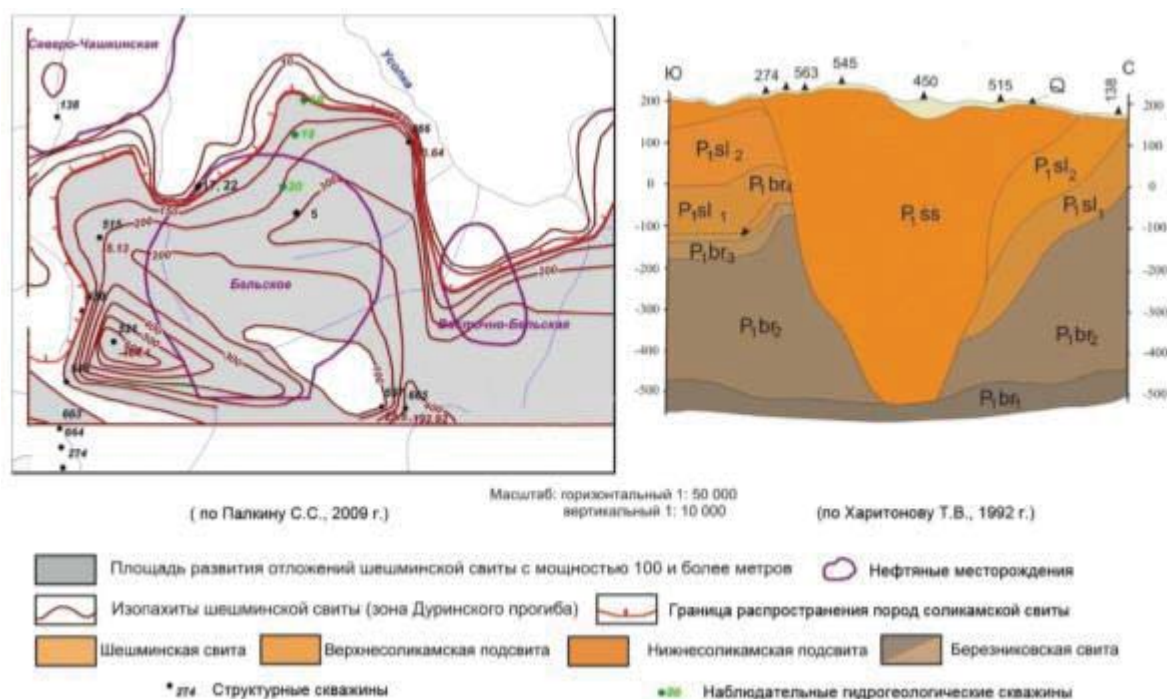


Рис. 2. Схематический план и разрез Дуринского прогиба в районе работ  
 Fig. 2. Schematic plan and section of the Durinsky trough in the study area

Геоморфологически блоковое строение массива проявляется в параллельности речных долин (верховья р. Бол. Аленки, Мал. Аленки с притоком, Безымянный ручей). При маршрутном обследовании при слабой гидрогеологической обнаженности на блоковый характер строения массива косвенно указывают сухие лога с ассиметричным сечением, участки концентрированной разгрузки подземных вод. Таким участком концентрированной разгрузки подземных вод является участок в долине р. Безымянный ручей на пересечении основной долины и левого сухого лога.

На левом склоне долины р. Безымянный ручей, приблизительно в 8 м от русла и с превышением  $\approx 1,5$  м от уреза реки, расположен нисходящий родник № 1 с дебитом от 0,7 л/с (март, межень) до 3,5 л/с (май, паводок).

Выход родника задернован, визуально отмечаются не менее трех выходов, в русле мелкий щебень и галька песчаников и алевролитов, в основании четко фиксируются серые, зеленовато-серые коренные аргиллитоподобные глины (P<sub>1ss</sub>). Родник включен в систему режимных наблюдений, в связи с чем каптирован трубой  $\approx 3$  м ниже выхода и привязан GPS-станцией с определением абсолютной отметки 155,9 м (рис. 3).

В процессе обследования долины р. Полуденный Лог на левом коренном склоне долины выявлены три родника (№ 2, № 3 и № 4). Родники расположены на протяжении около 200 м по долине, на разных гипсометрических уровнях от уреза воды: от 0,1 м (№ 2) до 4 м (№ 3 и № 4). Дебиты родников: № 2 – 0,1 л/сек, № 3 – 0,4 л/сек, № 4 – 0,25 л/сек. По всей вероятности, выявленная разгрузка подземных вод и режимный родник № 1 дренируют единый блок гор-

ного массива в шешминских отложениях. Также можно предположить наличие здесь водообильной зоны, связанной с благоприятными условиями питания и разгрузки подземных вод.

При обследовании долины р. Бочкарихи был обнаружен родник № 5. Родник № 5 нисходящий, расположен в 5 м от русла и на высоте до 2,5 м выше уреза воды, в основании чашеобразного понижения, дебит 0,25–0,3 л/сек. Выход сильно задернован, в русле родника – дресва красно-коричневого аргиллита и серого алевролита. Результаты обследования подтвердили вывод о блоковом геологическом строении изучаемой территории. Двусторонняя разгрузка подземных вод в долинах рр. Безымянный ручей и Полуденный Лог указывает на наличие здесь водообильной зоны, т. е. перспективного участка для бурения поисково-оценочных скважин.

По данным, полученным в результате анализа материалов и маршрутного гидрогеологического исследования, составлена предварительная схематическая гидрогеологическая карта района работ, на которую нанесены поисковые и оценочные скважины, намеченные к бурению, а также архивные скважины.

По данным маршрутных наблюдений предполагалось наличие гидравлической связи между грунтовыми водами и нижележащими водоносными горизонтами. При проведении опытно-фильтрационных работ в скважинах № 16002/1 и № 16002/2 измерялся дебит родника № 1. Изменения дебита зафиксировано не было, что позволяет сделать вывод об отсутствии гидравлической связи между грунтовыми водами и нижележащими водоносными интервалами.



a/a



b/b

**Рис. 3.** Родник № 1: а) каптаж родника; б) естественный выход  
**Fig. 3.** Well spring no. 1: a) capping a well spring; b) natural spring

### Бурение скважин и опытно-фильтрационные работы

Большая часть скважин пробурена в зоне повышенной водообильности, определенной по результатам маршрутного гидрогеологического обследования. Скважина № 14087 /1 была пробурена в непосредственной близости к объектам нефтедобычи, в связи с требованием недропользователя. В скважине № 14087/1 до глубины 100 м вскрыт исключительно глинистый разрез шешминских отложений с весьма слабыми водопровявлениями в процессе проходки.

Скважина № 14087/2 (поисковая) глубиной 100 м пробурена на склоне лога, в верховьях долины р. Безымянный ручей. По результатам бурения и откачки поисковой скважины № 14087/2 в 13,5 м юго-восточнее пробурена дополнительная оценочная скважина № 14087/3 глубиной 110 м.

В нижнем течении р. Безымянный ручей на расстоянии 0,45 км от родника № 1 были пробурены скважины № 16002/1 глубиной 140 м и № 16002/2 глубиной 55 м. Столь близкое расположение скважин обусловлено необходимостью оценить степень гидравлической связи различных гидродинамических интервалов – 35–55 и 90–140 м.

Результаты бурения скважин показаны на геолого-технических разрезах (рис. 4). В связи с тем, что разрезы скважин № 14087/2 и № 14087/3, а также скважин № 16002/1 и № 16002/2 идентичны, показаны наиболее глубокие из них – № 14087/3 и № 16002/1.

В скважинах проведены пробные и опытные откачки с постоянными дебитами в условиях неустановившейся фильтрации, т. е. при непрерывном снижении уровня подземных вод. На рис. 5–10 приведены логарифмические графики пробных и опытных откачек из гидрогеологических скважин.

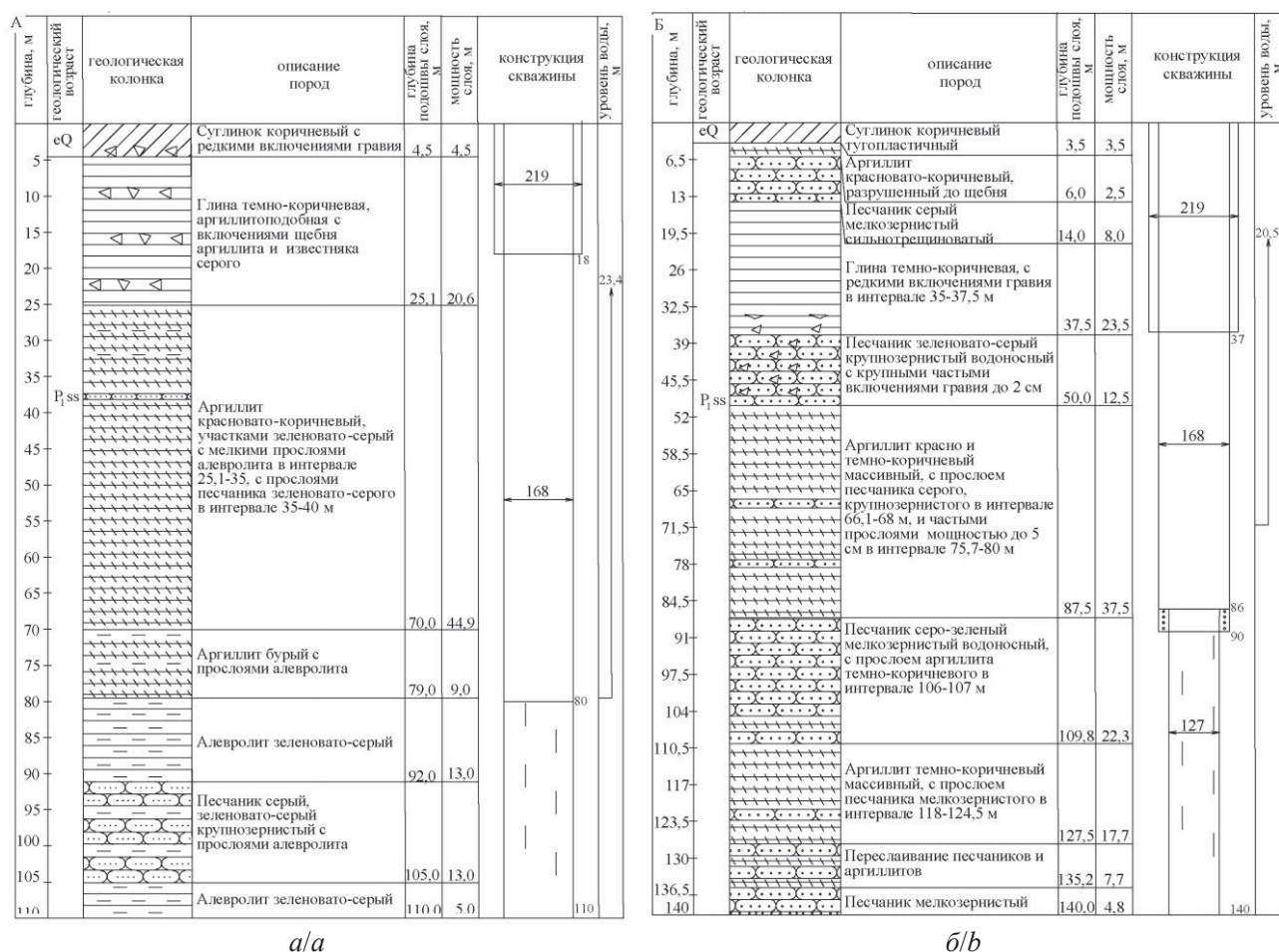


Рис. 4. Геолого-технические разрезы скважин: а) скважина № 14087/3; б) скважина № 16002/1  
 Fig. 4. Geological and technical well sections: a) well no. 14087/3; b) well no. 16002/1



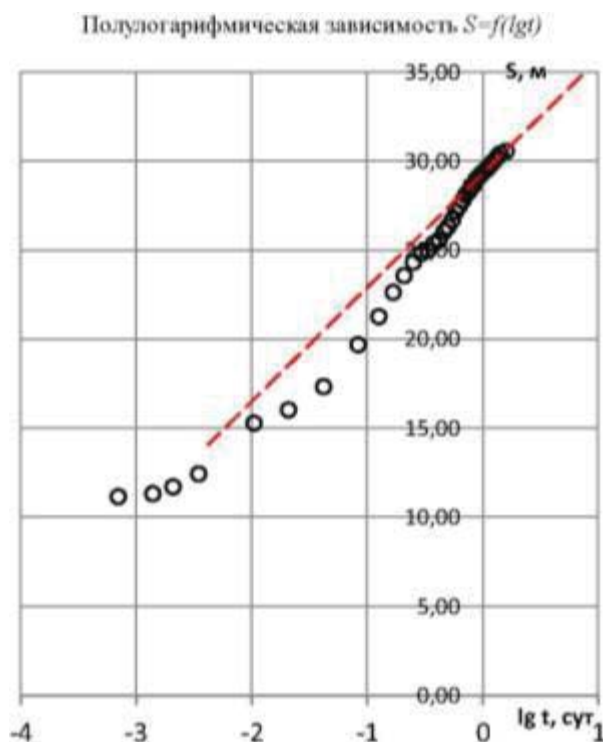


Рис. 5. Логарифмический график откачки из скважины № 14087/1

Fig. 5. Logarithmic graph of pumping from well no. 14087/1

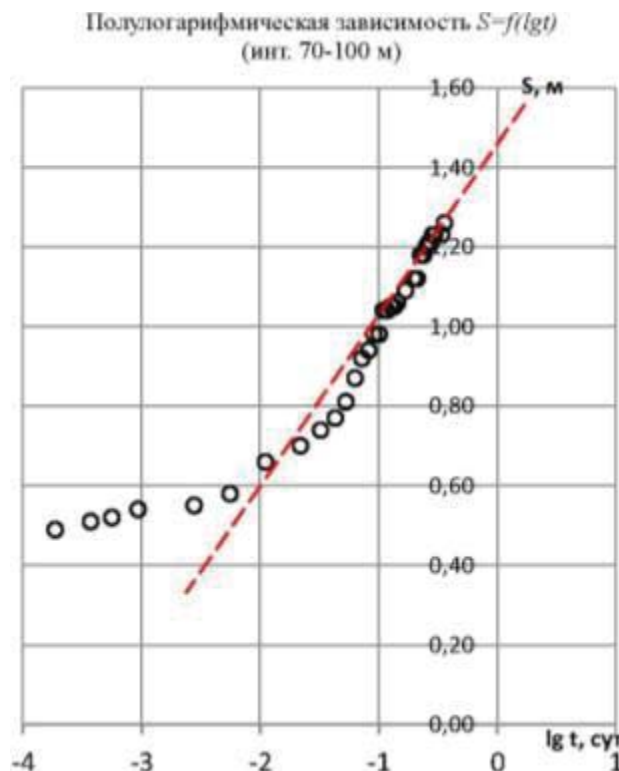


Рис. 7. Логарифмический график откачки из скважины № 14087/2 (интервал 70–100 м)

Fig. 7. Logarithmic graph of pumping from well no. 14087/2 (interval of 70–100 m)

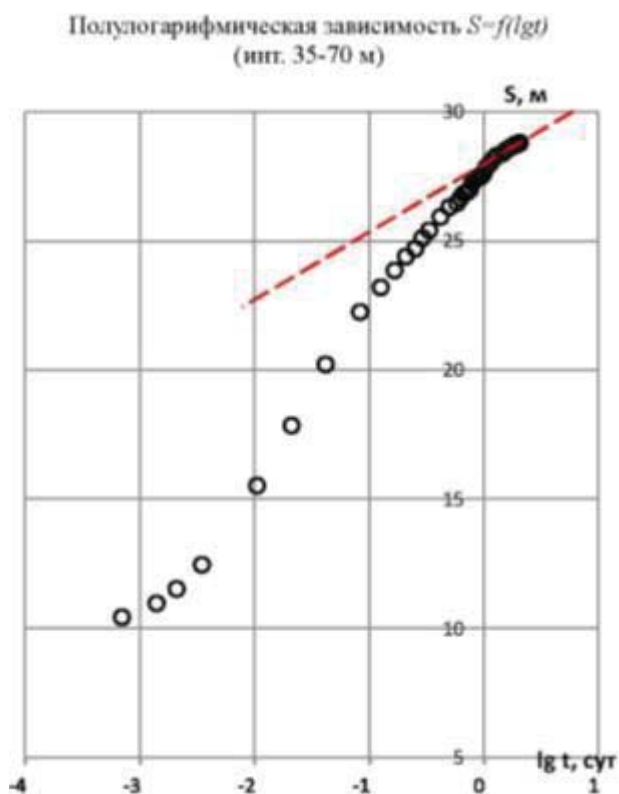
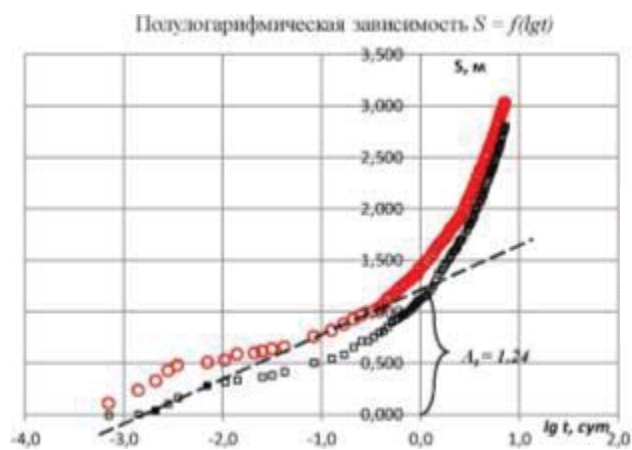


Рис. 6. Логарифмический график откачки из скважины № 14087/2 (интервал 35–70 м)

Fig. 6. Logarithmic graph of pumping from well no. 14087/2 (interval of 35–70 m)



○ Скв. № 14087/3 (возмущающая)

□ Скв. № 14087/2 (наблюдательная)

Рис. 8. Логарифмический график откачки из скважины № 14087/3

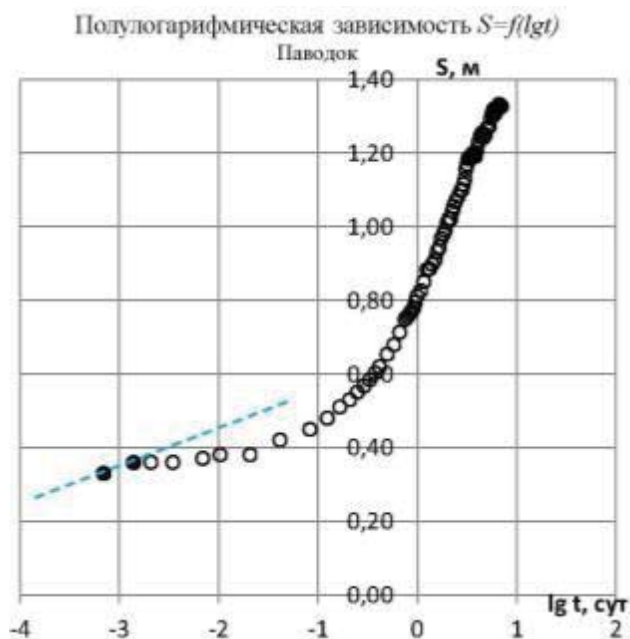
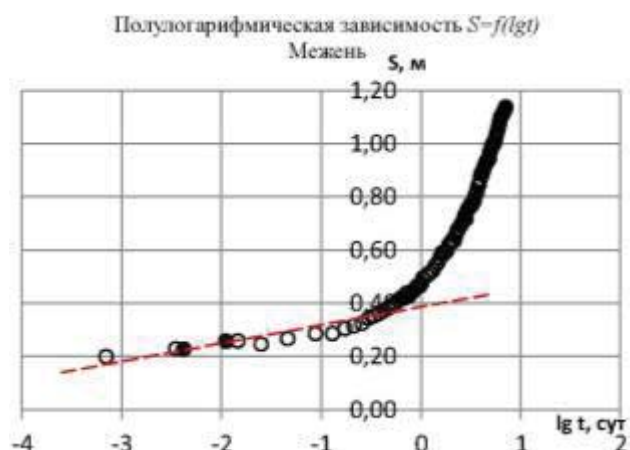
Fig. 8. Logarithmic graph of pumping from well no. 14087/3

Основные результаты откачек скважин представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные результаты откачек скважин

**Table 1.** Main results of well pumping

№ скважины Well no.	Интервал опробования Sampling interval	Глубина появ- ления воды Depth of water appearance	Статиче- ский уро- вень Static level	Понижения Decreases	Статический уровень, а.о. Static level, a.h.	Дебит, л/с Flow rate, l/s	Удельный дебит, л/с Specific flow rate, l/s
14087/1	35,0–100,0	34,8	7,99	30,6	199 м	0,36	0,012
14087/2	35,0–70,0	25,1	9,88	28,8	197,9 м	0,7	0,024
14087/2	70,0–100,0	79,0	20,99	1,92	186,8 м	3,16	1,646
14087/3	80,0–110,0	79,0	22,41	3,03	185,58 м	4,05	1,337
16002/1 (межень/low water)	90,0–140,0	76	20,5	1,14	159,0 м	4,5	3,9
16002/1 (паводок/high water)	90,0–140,0	76	18,9	1,33	160,6 м	5,4	4,1
16002/2	35,0–55,0	37,5	21,1	0,82	158,4 м	5,0	6,1

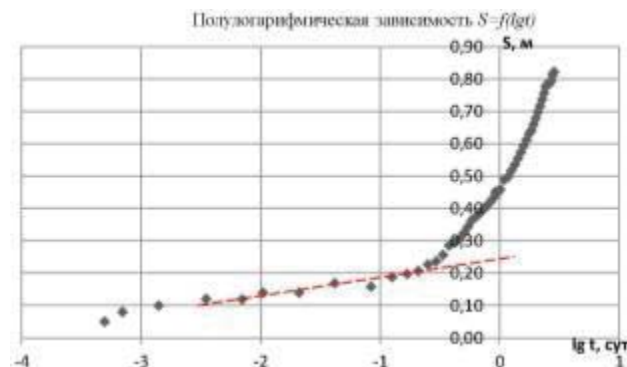


**Рис. 9.** Логарифмический график откачки из скважины № 16002/1

**Fig. 9.** Logarithmic graph of pumping from well no. 16002/1

Для характеристики гидрогеологических условий изучаемого участка наиболее представитель-

ными являются графики опытных откачек из скважин № 14087/3 и № 16002/1 продолжительностью 7 суток и более. Однако снижение уровня от времени на протяжении всех откачек носило нелинейный характер и не подчинялось полулогарифмической зависимости снижения уровня от времени. Такая конфигурация графиков позволяет судить о наличии границ II рода [22]. Кроме этого, граничные условия II рода водоносного комплекса подтверждаются данными бурения нефтяных и солеразведочных скважин, а также поисковых и оценочных водозаборных скважин Усольского месторождения питьевых вод.



**Рис. 10.** Логарифмический график откачки из скважины № 16002/2

**Fig. 10.** Logarithmic graph of pumping from well no. 16002/2

При проведении откачки из скважины № 16002/1 (интервал 90–140 м) скважина № 16002/2 (интервал 35–55 м) использовалась в качестве наблюдательной. Скважины располагались на расстоянии 3 м друг от друга. По итогам опытно-фильтрационных работ был сделан вывод об отсутствии гидравлической связи между данными водоносными пластами, т. к. откачка из скважины № 16002/1 никаким образом не повлияла на уровень в наблюдательной скважине.

Как было отмечено ранее, откачки проведены в условиях неустановившейся фильтрации, что объясняется структурными особенностями залегания водоносного горизонта – наличие граничных условий II рода. В то же время основные методы обработки данных откачек скважин базируются на установившейся фильтрации. В отдельных случаях, при пуске откачек, когда влияние границ полособразного пласта еще не прослеживается, использование таких методов вполне допустимо, но с учетом определенных погрешностей. Следует отметить, что в условиях неустановившегося движения (постоянного снижения уровня при откачке) определение параметров по графикам временного прослеживания возможно лишь по начальному периоду откачки, когда влиянием границ полособразного пласта еще можно пренебречь.

Наиболее корректные результаты получаются при обработке данных графоаналитическим методом (методом Джейкоба). При обработке данных одиночных откачек и восстановления уровня используется метод временного прослеживания.

Основными гидродинамическими параметрами, определяемыми по данным одиночных откачек (восстановления уровня), являются коэффициент водопроводимости ( $km$ ), коэффициент фильтрации ( $k$ ), коэффициент пьезопроводности ( $a$ ).

Метод временного прослеживания снижения и восстановления уровня основан на логарифмической аппроксимации уравнения Тейса (1):

$$S = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2}, \quad (1)$$

где  $S$  – понижение уровня при откачке (м);  $Q$  – дебит скважины, полученный при откачке ( $\text{м}^3/\text{сут}$ );  $km$  – водопроводимость ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );  $a$  – коэффициент пьезопроводности ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );  $t$  – продолжительность откачки (сут.);  $r$  – радиус скважины (м).

Приведенная формула записывается в виде уравнения прямой в полулогарифмической зависимости  $S=f(\lg t)$  (2):

$$S = A_t + C_t \lg t. \quad (2)$$

Метод заключается в определении углового коэффициента  $C_t$  (3)

$$C_t = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (3)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – понижение уровня при откачке (м) на соответствующий момент времени  $t_1$  и  $t_2$  (сут).

Водопроводимость пласта определяется по формуле (4):

$$km = \frac{0,183Q}{C_t}. \quad (4)$$

При обработке результатов восстановления уровня подземных вод методом Джейкоба целесообразно учитывать продолжительность предшествующей откачки ( $T$ ) и в графических построениях использовать значение повышения уровня ( $S^*$ ); зависимость при этом принимает вид (5):

$$S^* = f(\lg t / T + t). \quad (5)$$

Кроме водопроводимости метод временного прослеживания позволяет определять коэффициент пьезопроводности по формуле (6) для откачки из скважины № 14087/3 (интервал 80–110 м):

$$\lg a = 2 \lg r - 0,35 + \frac{A_t}{C_t}, \quad (6)$$

где  $a$  – коэффициент пьезопроводности ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );  $r$  – расстояние от возмущающей до наблюдательной скважины (13,6 м);  $A_t$  – начальная ордината временного графика прослеживания (рис. 8  $A_t=1,24$ );  $C_t$  – угловой коэффициент временного графика прослеживания ( $C_t=0,478$ ).

$$\begin{aligned} \lg a &= 2 \times \lg 13,6 - 0,35 + \frac{1,24}{0,478} = \\ &= 2,267 - 0,35 + 2,594 = 4,51. \end{aligned}$$

Отсюда  $a=32450$ , или  $\approx 3,25 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Результаты расчеты гидродинамических параметров представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета гидродинамических параметров

**Table 2.** Results of calculation of hydrodynamic parameters

№ скважины Well no.	Дебит, л/с Flow rate, l/s	Мощность водоносного пласта, м Aquifer thickness, m	Коэффициент водопроводимости, $\text{м}^2/\text{сут}$ . Transmissibility coefficient, $\text{m}^2/\text{day}$	Коэффициент фильтрации, $\text{м}/\text{сут}$ . Filtration coefficient, $\text{m}/\text{day}$
14087/1	0,36	65	0,8	0,01
14087/2 (35–70 м)	0,7	35	2,6	0,07
14087/2 (70–100 м)	3,16	30	146	4,9
14087/3	4,05	30	134	4,5
16002/1 (межень/low water)	4,5	50	1029	20,6
16002/1 (паводок/high water)	5,4	50	858	17,6
16002/2	5,0	20	1333	66,7

Водопроницаемость верхнего интервала шешминских отложений глинисто-аргиллитовой почвы изменяется от 0,8 м<sup>2</sup>/сут. в скважине № 14087/1 до 2,6 м<sup>2</sup>/сут. в скважине № 14087/2 (интервал 35–70 м), а коэффициенты фильтрации изменяются от 0,01 до 0,07 м/сут.

Водопроницаемость пласта песчаников, вскрытых скважинами № 14087/2 (70–100 м) и № 14087/3, меняется от 134 до 146 м<sup>2</sup>/сут., а коэффициенты фильтрации изменяются от 4,5 до 4,9 м/сут.

Водопроницаемость пласта песчаников, вскрытых скважиной № 16002/2, составила 1333 м<sup>2</sup>/сут., а коэффициент фильтрации – 66,7 м/сут.

Водопроницаемость пласта песчаников, вскрытых скважиной № 16002/1, изменялась от 858 до 1029 м<sup>2</sup>/сут., а коэффициенты фильтрации изменяются от 17,6 до 20,6 м/сут.

Анализируя данные бурения поисковых и оценочных скважин, фондовых и архивных материалов, результат опытно-фильтрационных работ, можно сделать вывод, что в пределах района исследования имеется два продуктивных водоносных пласта, приуроченных к одному водоносному комплексу и гидравлически изолированных друг от друга 40 м толщей водоупорных пород. В плане водоносный комплекс имеет граничные условия

II рода. В результате полученных данных была построена схематическая гидрогеологическая карта и гидрогеологические разрезы исследуемой территории (рис. 11, 12).

В результате проведения всего комплекса работ были получены данные о геолого-гидрогеологическом строении района работ, приуроченного к Бельскому поднятию, осложненному Дуринским прогибом. В пределах района работ развиты отложения четвертичного и пермского возраста.

Четвертичные элювиально-делювиальные отложения залегают повсеместно и представлены покровным слоем суглинков мощностью 3,5 м. Отложения слабопроницаемы, в них сезонно и локально распространены грунтовые воды типа «верховодки».

Пермские породы представлены терригенной толщей шешминской свиты. В структуре Дуринского прогиба шешминские породы являются основными заполняющими его отложениями, которые в основании залегают непосредственно на осадках соленосной толщи (березниковской свиты нижней перми), на бортах контактируют с породами соликамской свиты. Мощность шешминской свиты в пределах района исследования изменяется от 100–150 до 300 и более метров. Углы наклона на крыльях составляют от 10–15° до 60°.

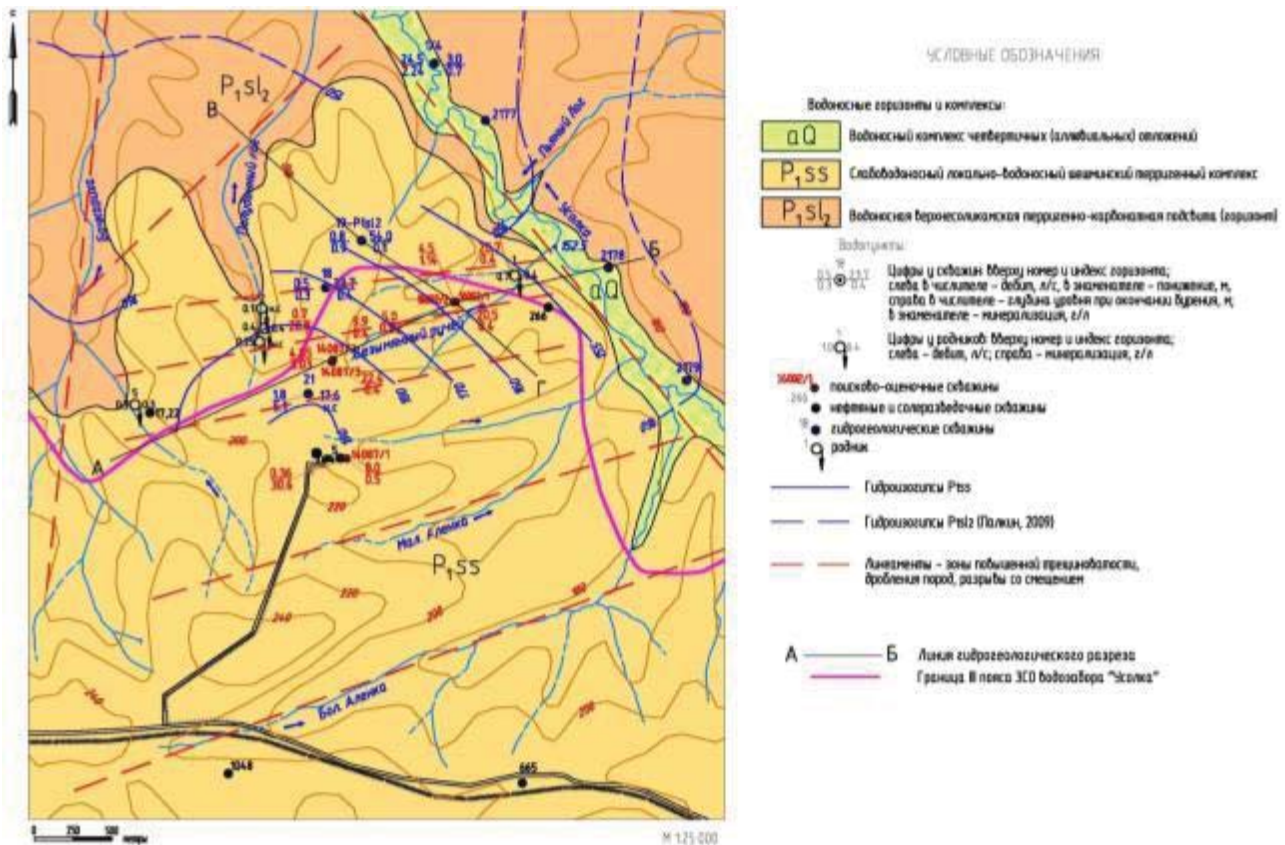


Рис. 11. Схематическая гидрогеологическая карта исследуемой области  
 Fig. 11. Schematic hydrogeological map of the study area

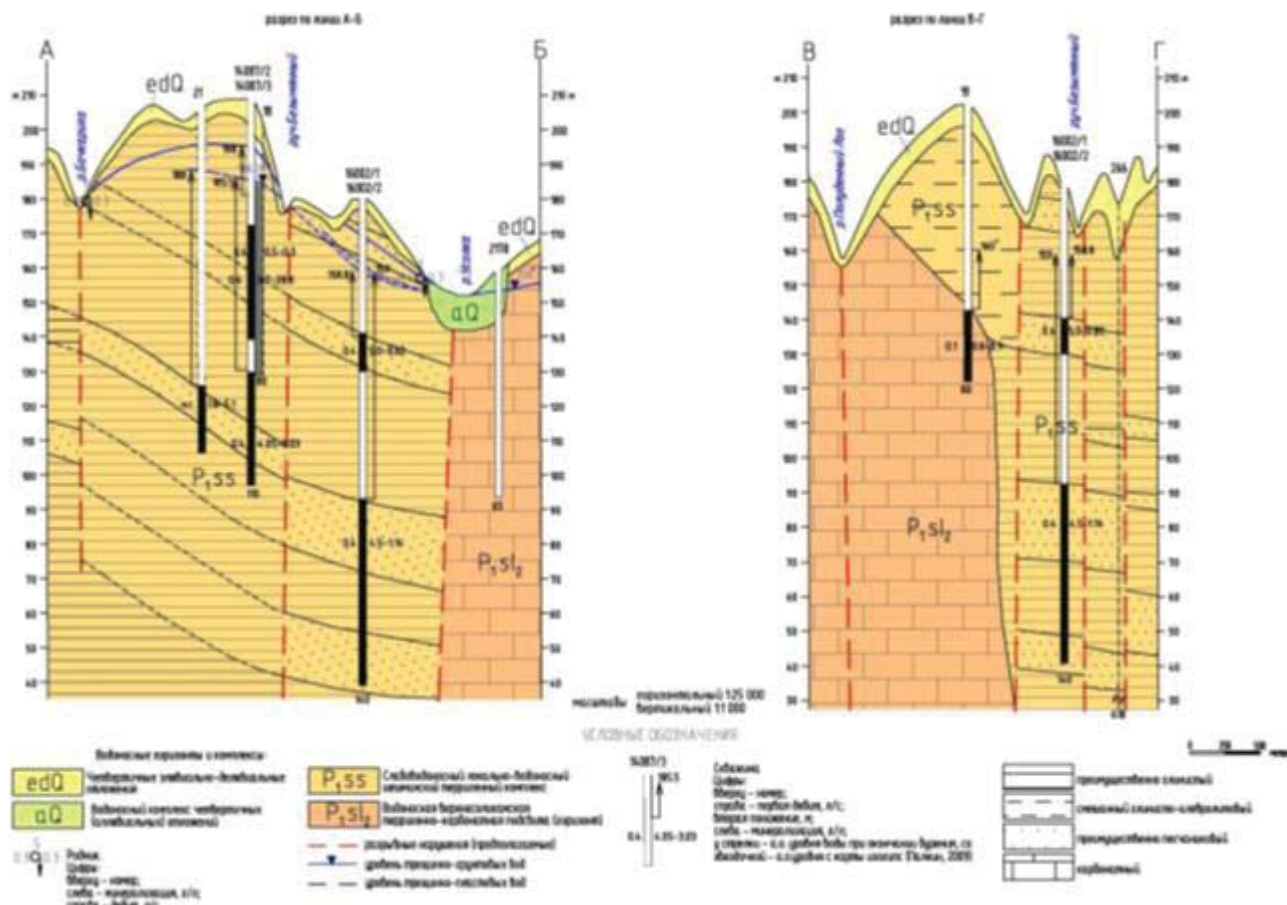


Рис. 12. Гидрогеологические разрезы  
 Fig. 12. Hydrogeological cross section

По данным поисково-оценочных скважин шешминские породы в верхней части представлены выветрелыми аргиллитами и песчаниками и пестроцветными аргиллитоподобными глинами. К слою выветрелых песчаников приурочены трещинно-грунтовые подземные воды, которые разгружаются посредством родников в основании склонов эрозионных врезов долин. Мощность верхней части свиты до 35 м.

Ниже слоя глин залегают пачка крупнозернистых песчаников мощностью 12,5–13 м. К ней приурочены слабо напорные подземные воды, выявленные при бурении и откачке из скважины № 14087/3. Подземные воды залегают в виде пласта, ориентированного в субширотном направлении. По падению пород пласт ограничен каскадом разрывных нарушений по склону Дуринского прогиба. Вдоль южной границы пласта контакт проходит по водоупорным глинам и аргиллитам.

Ниже по разрезу залегают подземные воды, приуроченные к пачкам мелкозернистых песчаников. Эти подземные воды вскрыты скважиной № 16002/1 на глубине 87,5–140 м, наибольшая мощность верхней пачки песчаников 22,3 м. Этот водо-

носный пласт отделен от пласта, вскрытого скважиной № 14087/3, почти 40-метровой толщиной водоупорных аргиллитов. Подземные воды залегают в виде пластов с граничными условиями II рода, ориентированного субширотно, с запада на восток. По длине пласт ограничен областью распространения шешминских отложений между долинами р. Усолка и р. Бочкариха и не превышает 2,7 км.

### Заключение

С целью организации производственно-технологического водоснабжения объектов нефтедобычи на разрабатываемом участке недр в Соликамском городском округе в Пермском крае выполнен комплекс работ по изучению геологического строения, условий залегания и фильтрации подземных вод шешминского водоносного комплекса. Результаты исследований позволили определить мощность шешминской свиты в пределах района работ, тектонически приуроченного к Бельскому поднятию, осложненному Дуринским прогибом. Мощность шешминской свиты составила от 100–150 до 300 м и более. Определен литологический состав пород, получены данные об условиях

залеганиях подземных вод шешминского водоносного комплекса. Установлено, что в пределах Дуринского прогиба подземные воды залегают как система отдельных обособленных водоносных прослоев и блоков. Были выделены наиболее водообильные зоны. В толще слабопроницаемой шешминской свиты были обнаружены два водоносных пласта, которые приурочены к песчаникам мелкозернистым и крупнозернистым. Водоносные пла-

сты не имеют гидравлической связи и отделены друг от друга 40 м толщей водоупорных аргиллитов. Подземные воды залегают в виде пластов с граничными условиями II рода, ориентированного субширотно, с запада на восток. Результаты исследования могут быть использованы для решения вопросов водоснабжения в пределах исследуемой области и управления ресурсами подземных вод территории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge / P. Dillon, P. Stuyfzand, T. Grischek, M. Lluria, R.D.G. Pyne, R.C. Jain, J. Bear, J. Schwarz, W. Wang, E. Fernandez, C. Stefan, M. Pettenati, J. van der Gun, C. Sprenger, G. Massmann, B.R. Scanlon, J. Xanke, P. Jokela, Y. Zheng, R. Rossetto, M. Shamruk, P. Pavelic, E. Murray, A. Ross, J.P. Bonilla Valverde, A. Palma Nava, N. Ansems, K. Posavec, K. Ha, R. Martin, M. Sapiano // *Hydrogeology Journal*. – 2019. – Vol. 27. – P. 1–30. DOI: 10.1007/s10040-018-1841-z
2. Abdullayeva M.Y., Alizadeh Sh.N. Ways of rational use of water resources in the oil industry // *World Science*. – 2022. – Vol. 5. – № 77. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30092022/7868 URL: <https://rsglobal.pl/index.php/ws/article/view/2385> (дата обращения 08.06.2023).
3. Mays L.W. Groundwater resources sustainability: past, present, and future // *Water Resource Manage.* – 2013. – Vol. 27. – P. 4409–4424. DOI: 10.1007/s11269-013-0436-7
4. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations / P. Doell, H. Hoffmann-Dobrev, F.T. Portmann, S. Siebert, A. Eicker, M. Rodell, G. Strassberg, B.R. Scanlon // *Journal of Geodynamics*. – 2012. – Vol. 59–60. – P. 143–156. DOI: 10.1016/j.jog.2011.05.001
5. Monteiro P.B., Da Silva Pereira Cabral J. J. Groundwater management in the state of Piauí (Brazil) on the climate change context // *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*. – 2023. – Vol. 58. – № 1. – P. 45–58. DOI: 10.5327/Z2176-94781485
6. Ahmed M., Aqnouy M., Stitou El Messari J. Sustainability of Morocco's groundwater resources in response to natural and anthropogenic forces // *Journal of Hydrology*. – 2021. – Vol. 603. – Part A. – 126866. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126866
7. Gorelick S.M., Zheng C. Global change and the groundwater management challenge // *Water Resources Research*. – 2015. – Vol. 51. – № 5. – P. 3031–3051. DOI: 10.1002/2014wr016825.
8. Проект зон санитарной охраны водозабора «Усолка». – Пермь: ООО НИПППД Недр, 2010. – 132 с.
9. ГОСТ 23278-2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. – М.: Стандартинформ, 2015. – 35 с.
10. Васильев А.П. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на подземные воды для производственно-технического водоснабжения объектов II очереди Бельского нефтяного месторождения (с подсчетом запасов подземных вод на 01.07.2016 г.). – Пермь: ООО НИПППД «Недра», 2016. – 196 с.
11. Мошковский В.И., Катаев А.М., Заякин С.В. Гидрогеологическая карта СССР масштаб 1:200000, лист 0-40-IV (отчет Пермской гидрогеологической партии по результатам гидрогеологической съемки за период 1966–1968 гг.). – Пермь: ПГТП, 1968. – 627 с.
12. Аликин Э.А. Оценка использования ресурсного потенциала оцененных подземных вод Пермского края // *Современные проблемы науки и образования*. – 2007. – № 1. – С. 25–29.
13. Харитонов Т.В., Оборин В.В., Беляев В.П. Отчет о геологическом доизучении масштаба 1:50000 Верхнекамской площади с общими поисками в Соликамском, Усольском и Березниковском районах Пермской области, выполненном в 1988–1992 г. – Пермь: ПГГСП «Геокарта», 1992. – 945 с.
14. Трапезников Д.Е. Палеогеографические и палеотектонические обстановки соликамской впадины в уфимское время: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Пермь, 2019. – 20 с.
15. Филатов В.В., Болотнова Л.А. Природа и динамика Дуринского прогиба // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2016. – № 4. – С. 111–119.
16. Moore J.P., Walsh J.J. Quantitative analysis of Cenozoic faults and fractures and their impact on groundwater flow in the bedrock aquifers of Ireland // *Hydrogeology Journal*. – 2021. – Vol. 29. – P. 2613–2632. DOI: 10.1007/s10040-021-02395-z
17. Fault zones in limestones: impact on karstogenesis and groundwater flow (Lez aquifer, southern France) / V. Clauzon, S. Mayolle, V. Leonardi et al. // *Hydrogeology Journal*. – 2020. – Vol. 28. – P. 2387–2408. DOI: 10.1007/s10040-020-02189-9
18. A new concept for hard rock aquifers survey and management: individual blocks approach / K.T. Yao, O. Fouche, M-S. Oga, G. Ferriere, D. Baka // *American Journal of Scientific and Industrial Research*. – 2012. – Vol. 3. – № 4. – P. 208–220. DOI: 10.5251/ajsir.2012.3.4.208.220
19. Mabee S.B., Hardcastle K.C., Wise D.U. A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies // *Ground Water*. – 1994. – Vol. 32. – № 6. – P. 884–894.
20. Magowe M., Carr J.R. Relationship between lineaments and ground water occurrence in western Botswana // *Ground Water*. – 1999. – Vol. 37. – № 2. – P. 282–286.
21. Обоснование возможности совместной эксплуатации Усольского месторождения питьевых подземных вод и нефтяных месторождений, расположенных на его границах / Б.В. Боровский, П.В. Закутин, С.С. Палкин, С.В. Палкин // *Разведка и охрана недр*. – 2010. – № 10. – С. 17–23.
22. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. – М.: Изд-во «Недра», 1979. – 326 с.

### Информация об авторах

**Максим Игоревич Ярк**ов, гидрогеолог 1 категории, ООО НИПППД «НЕДРА», Россия, 614064, г. Пермь, ул. Льва Шатрова, 13а. maxforj@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-7403-1959>.

**Лариса Олеговна Лейбович**, кандидат технических наук, директор департамента экологии, ООО НИПППД «НЕДРА», Россия, 614064, г. Пермь, ул. Льва Шатрова, 13а. Leibovich@nedra.perm.ru

**Павел Анатольевич Красильников**, кандидат географических наук, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры инженерной геологии и охраны недр, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. geolnauka@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0602-6143>.

**Галина Михайловна Батракова**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29. GMbatrakova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4549-517X>.

Поступила в редакцию: 15.06.2023

Поступила после рецензирования: 27.10.2023

Принята к публикации: 17.01.2024

### REFERENCES

1. Dillon P., Stuyfzand P., Grischek T., Lluria M., Pyne R.D.G., Jain R.C., Bear J., Schwarz J., Wang W., Fernandez E., Stefan C., Pettenati M., van der Gun J., Sprenger C., Massmann G., Scanlon B.R., Xanke J., Jokela P., Zheng Y., Rossetto R., Shamrukh M., Pavelic P., Murray E., Ross A., Bonilla Valverde J.P., Palma Nava A., Ansems N., Posavec K., Ha K., Martin R., Sapiano M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 2019, vol. 27, pp. 1–30. DOI: 10.1007/s10040-018-1841-z
2. Abdullayeva M.Y., Alizadeh Sh.N. Ways of rational use of water resources in the oil industry. *World Science*, 2022, vol. 5, no. 77. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30092022/7868 Available at: <https://rsglobal.pl/index.php/ws/article/view/2385> (accessed 8 June 2023).
3. Mays L.W. Groundwater resources sustainability: past, present, and future. *Water Resource Manage.*, 2013, vol. 27, pp. 4409–4424. DOI: 10.1007/s11269-013-0436-7
4. Doell P., Hoffmann-Dobrev H., Portmann F.T., Siebert S., Eicker A., Rodell M., Strassberg G., Scanlon B.R. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 2012, vol. 59–60, pp. 143–156. DOI: 10.1016/j.jog.2011.05.001
5. Monteiro P.B., Da Silva Pereira Cabral J.J. Groundwater management in the state of Piauí (Brazil) on the climate change context. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, 2023, vol. 58, no. 1, pp. 45–58. DOI: 10.5327/Z2176-94781485
6. Ahmed M., Aqnouy M., Stitou El Messari J. Sustainability of Morocco's groundwater resources in response to natural and anthropogenic forces. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 603, part A, 126866. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126866
7. Gorelick S.M., Zheng C. Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 3031–3051. DOI: 10.1002/2014wr016825.
8. *Project of sanitary protection zones of water intake "Usolka"*. Perm, LLC NIPPPD Nedra, 2010. 132 p. (In Russ.)
9. *State Standart 23278-2014. Soils. Methods of field permeability tests*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 35 p. (In Russ.)
10. Vasilev A.P. *Report on the results of prospecting and assessment work for groundwater for industrial and technical water supply of the II stage facilities of the Belskoe oil field (with the calculation of groundwater reserves as of 01.07.2016)*. Perm, LLC NIPPPD «Nedra», 2016. 196 p. (In Russ.)
11. Moshkovskiy V.I., Kataev A.M., Zayakin S.V. *Hydrogeological map of the USSR at a scale of 1:200000, sheet 0-40-IV (report of the Perm hydrogeological party based on the results of the hydrogeological survey for the period 1966–1968)*. Perm, PGGP Publ., 1968. 627 p. (In Russ.)
12. Alikin E.A. Use estimation of soft ground water storage potential of Perm area. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2007, no. 1, pp. 25–29. (In Russ.)
13. Kharitonov T.V., Oborin V.V., Belyaev V.P. *Report on the geological exploration on scale 1:50,000 of the Verkhnekamskaya area with general searches in the Solikamsk, Usolsk and Berezniki districts of the Perm region, carried out in 1988–1992*. Perm, PGGSP «Geokarta» Publ., 1992. 945 p.
14. Trapeznikov D.E. *Paleogeographic and paleotectonic settings of the Solikamsk depression in the Ufimian time*. Cand. Diss. Abstract. Perm, 2019. 20 p. (In Russ.)
15. Filatov V.V., Bolotnova L.A. Nature and dynamics of Durinsky foredeep. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 4, pp. 111–119. (In Russ.)
16. Moore J.P., Walsh J.J. Quantitative analysis of Cenozoic faults and fractures and their impact on groundwater flow in the bedrock aquifers of Ireland. *Hydrogeology Journal*, 2021, vol. 29, pp. 2613–2632. DOI: 10.1007/s10040-021-02395-z
17. Clauzon V., Mayolle S., Leonardi V. Fault zones in limestones: impact on karstogenesis and groundwater flow (Lez aquifer, southern France). *Hydrogeology Journal*, 2020, vol. 28, pp. 2387–2408. DOI: 10.1007/s10040-020-02189-9
18. Yao K.T., Fouche O., Oga M-S., Ferriere G., Baka D. A new concept for hard rock aquifers survey and management: individual blocks approach. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 208–220. DOI: 10.5251/ajsir.2012.3.4.208.220
19. Mabee S.B., Hardcastle K.C., Wise D.U. A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured-bedrock aquifer studies. *Ground Water*, 1994, vol. 32, no. 6, pp 884–894.

20. Magowe M., Carr J.R. Relationship between lineaments and ground water occurrence in western Botswana. *Ground Water*, 1999, vol. 37, no. 2, pp. 282–286.
21. Borevskiy B.V., Zakutin V.P., Palkin S.S., Palkin S.V. Justification of the possibility of joint exploitation of the Usolskoe drinking groundwater deposit and the oil fields located on its borders. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 10, pp. 17–23. (In Russ.)
22. Borevskiy B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. *Methodology for determining the parameters of aquifers by pumping data*. Moscow, Nedra Publ., 1979. 326 p. (In Russ.)

#### **Information about the authors**

**Maxim I. Yarkov**, 1 Category Hydrogeologist, LLC NIPPPPD "NEDRA", 13a, Lev Shatrov street, Perm, 614064, Russian Federation. maxforj@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-7403-1959>.

**Larisa O. Leibovich**, Cand. Sc., Director of the Department of Ecology, LLC NIPPPPD "NEDRA", 13a, Lev Shatrov street, Perm, 614064, Russian Federation. Leibovich@nedra.perm.ru

**Pavel A. Krasilnikov**, Cand. Sc, Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Perm State National Research University, 15, Bukirev street, Perm, 614068, Russian Federation. geolnauka@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0602-6143>.

**Galina M. Batrakova**, Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russian Federation. Gmbatrakova@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4549-517X>.

Received: 15.06.2023

Revised: 27.10.2023

Accepted: 17.01.2024



УДК 556.161:556.166

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

Шифр специальности ВАК: 1.6.16, 1.6.21

## Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы)

В.П. Галахов<sup>1</sup>, С.Ю. Самойлова<sup>1</sup>, О.В. Ловцкая<sup>1✉</sup>, Е.В. Мардасова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, г. Барнаул

<sup>2</sup> Алтайский государственный университет. Россия, г. Барнаул

✉ lov@iwep.ru

**Аннотация.** *Актуальность* работы обусловлена необходимостью обеспечения недостающей информацией о стокоформирующих факторах при прогнозировании половодья в малоизученных и неизученных водосборах. Для этой цели в практике гидрологических расчетов и прогнозов может использоваться метод гидрологической аналогии. **Цель:** исследование возможности применения метода гидрологической аналогии для расчетов объема весеннего половодья горной реки. Анализ выполнен на примере бассейнов реки Тубы и ее притоков (Амыл, Казыр и Кизир), а также соседних бассейнов (р. Абакан и р. Сыда). **Методы:** комплексный географо-гидрометеорологический анализ, корреляционный и регрессионный анализ, метод гидрологической аналогии. **Результаты.** Выполнены расчеты сумм зимних осадков в бассейне р. Амыл при помощи традиционно используемых в гидрологии высотных зависимостей, а также экспертная оценка среднемноголетних осадков в бассейне р. Тубы с использованием данных о современном оледенении. Построена стохастическая прогнозная модель объема стока половодья на р. Амыл в створе с. Качулька на основе связи с осадками за предшествующий зимний период и период половодья. Проанализировано влияние жидких осадков во время половодья на качество прогноза. Выполнен сравнительный анализ других притоков р. Тубы (Казыр, Кизир), а также соседних бассейнов (р. Абакан, р. Сыда) с точки зрения использования их в качестве бассейнов-аналогов. Проанализирована возможность использования бассейна р. Амыл как аналога для прогноза слоя стока половодья на р. Тубе в створе пос. Бугуртак. **Выводы.** Корреляционный анализ объема половодья р. Тубы, ее основных притоков и соседних рек показал, что в качестве аналога предпочтительно использовать бассейны со схожими условиями формирования осадков (ориентация склона относительно направления преобладающих влагонесущих воздушных масс) и близкой средней высотой водосбора. Использование бассейна р. Амыл как аналога р. Тубы целесообразно для среднесрочного прогноза объема талого стока (без учета жидких осадков в период половодья).

**Ключевые слова:** бассейн реки Амыл, бассейн реки Тубы, бассейн реки Абакан, объем весеннего половодья, бассейн-аналог, метод гидрологической аналогии

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

**Для цитирования:** Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы) / В.П. Галахов, С.Ю. Самойлова, О.В. Ловцкая, Е.В. Мардасова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 120–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

---

UDC 556.161:556.166

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

## Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study)

V.P. Galakhov<sup>1</sup>, S.Yu. Samoilo<sup>1</sup>, O.V. Lovtskaya<sup>1</sup>✉, E.V. Mardasova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

<sup>2</sup> Altai State University, Barnaul, Russian Federation

✉lov@iwep.ru

**Abstract. Relevance.** The necessity in provision of insufficient data on streamflow formation factors when predicting floods in the poorly explored and unstudied basins. For this purpose, in hydrological calculations and forecasts the method of hydrological analogy is applicable. **Aim.** To study probable application of the hydrological analogy method in calculations of spring flood volumes of a mountain river. The analysis was carried out by the example of the basins of the Tuba river and its tributaries (rivers Amyl, Kazyr and Kizir), as well as neighboring catchments (rivers Abakan and Syda). **Methods.** Integrated geographical-hydrometeorological analysis, correlation and regression analysis, and the hydrological analogy method. **Results.** We calculated total winter precipitation in the Amyl basin by means of (traditionally used in hydrology) elevation dependences, estimated average annual precipitation in the Tuba basin using modern glaciation data, and built a stochastic predictive model of flood runoff volume on the Amyl river (settl. Kachulka) based on the relationship between precipitation for the previous winter and flood periods. The influence of liquid (flood) precipitation on the forecast quality was analyzed. A comparative analysis of other Tuba tributaries (Kazyr, Kizir), including neighboring basins (rivers Abakan and Syda), in terms of their application as basins-analogies was performed. For instance, a feasible use of the Amyl basin as an analogy for forecasting flood runoff depth of the Tuba river (vill. Bugurtak) was analyzed. **Conclusions.** The correlation analysis of flood volumes of the Tuba, its main tributaries and neighboring rivers suggests that as an analogy the application of basins with similar conditions for precipitation formation (slope orientation relative to the direction of the prevailing moisture-bearing air masses) and average catchment elevation is currently favored. The Amyl basin use as the Tuba analogy is expedient for a medium-term forecast of melt runoff volumes (excluding liquid (flood) precipitation).

**Keywords:** Amyl river basin, Tuba river basin, Abakan river basin, spring flood volume, basin-analogy, hydrological analogy method

**Acknowledgements:** The research was carried out within the State assignment Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (project «Study of the mechanisms of natural and anthropogenic changes of quantity and quality of water resources in Siberia using hydrological models and information technologies»).

**For citation:** Galakhov V.P., Samoilo S.Yu., Lovtskaya O.V., Mardasova E.V. Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 120–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

### Введение

В условиях недостатка гидрометеорологической информации одним из традиционных методов для расчетов параметров стока является метод гидрологической аналогии [1–3]. Метод бассейнов-аналогов разработан, в первую очередь, для продления гидрологических рядов с целью определения расчетных характеристик стока и построения кривых обеспеченности при отсутствии и недостаточности данных наблюдений [1]. Вместе с тем на практике этот метод используется для установления объема, динамики и других параметров речного стока на основе связи между стоком и осадками [4], в том числе в целях разработки и калибровки моделей стока, а также для гидрологических

прогнозов различной заблаговременности в малоизученных и неизученных водосборах [5–10]. Одним из способов для оценки и прогноза речного стока является перенос оптимизированных параметров гидрологической модели в близлежащий водосбор, не охваченный гидрометеорологическими наблюдениями. Этот процесс называется регионализацией («regionalization»). Для переноса параметров стока в неизученный бассейн наиболее широко используются методы регрессии, пространственной близости, физическое сходство [10–12]. При этом пространственная близость и физическое сходство (однородность физико-географический условий) показали удовлетворительные результаты в условиях от засушливого до теплого умеренного

климата (например, в Австралии), а также в холодных и снежных регионах (например, в Канаде); методы на основе регрессии были предпочтительны в регионах с теплым умеренным климатом (например, в большинстве европейских стран) [12].

В отечественной практике гидрологических расчетов и прогнозов реализация метода бассейнов-аналогов (регионализация) осуществляется с использованием регрессионного анализа. Расчеты и прогнозы параметров стока в неизученном бассейне требуют подробной гидрометеорологической информации в бассейне-аналоге. Кроме того, при выборе бассейна-аналога следует учитывать ряд физических факторов, таких как географическая близость, экспозиция и гипсометрия склонов, однородность климатических условий, однотипность почвогрунтов и гидрогеологических условий, близкая степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов, отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток. Подробный перечень требований к бассейну-аналогу для инженерно-гидрологических расчетов приведен в СП 33-101-2003 [13]. Тем не менее бассейны-аналоги не могут быть полностью идентичными, и экстраполяция оценок речного стока на разные водосборы, очевидно, будет неточной [10, 14]. Поэтому исследование ключевых параметров для выбора бассейнов-аналогов и опыт применения метода гидрологической аналогии могут быть перспективными для разработки методов оценки и прогнозов стока в районах с недостаточной гидрометеорологической изученностью.

В представленной работе в качестве объекта исследований выступает водосбор реки Тубы (створ пос. Бугуртак), в качестве основного бассейна-аналога – один из её притоков – река Амыл (створ в с. Качулька), который наиболее полно обеспечен метеорологическими наблюдениями. Прогноз объема весеннего половодья производился по стохастическим моделям, основанным на эмпирических воднобалансовых зависимостях весеннего стока от запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния и последующих осадков [2]. Зимние осадки оценивались при помощи используемого в гидрологических исследованиях метода, основанного на зависимости суммы осадков на метеорологических станциях от их абсолютной высоты [2, 15, 16]. Соотношение связи между стоком и осадками в исследуемом бассейне и его аналогах оценивалось методами корреляционного и регрессионного анализа.

#### Объект исследования

Река Туба – правый приток I порядка р. Енисей, впадает в Красноярское водохранилище (рис. 1). Длина реки составляет 119 км (от истока р. Казыр

507 км), площадь бассейна – 36900 км<sup>2</sup>, среднемноголетний расход воды 762,0 м<sup>3</sup>/с. Река формируется примерно равнозначными по водности притоками: Амыл и Казыр с притоком Кизир. Реки Казыр и Кизир берут начало с южного макросклона Восточного Саяна, где абсолютные высоты бассейнов в приводораздельной части достигают немногим менее 3000 м. Исток реки Амыл располагается на северном макросклоне Куртушибинского хребта (горная система Западный Саян), абсолютные высоты которого в основном не превышают 1500–2000 м. Основные гидрологические характеристики реки Тубы и ее притоков представлены в табл. 1.

Следует отметить слабую гидрометеорологическую изученность бассейна р. Тубы. Подавляющее большинство метеорологических станций и постов расположено в долинах рек, что не позволяет оценить увлажнение на склонах и в приводораздельных частях бассейна, где формируется основной объем стока.

**Таблица 1.** Основные характеристики р. Тубы и ее притоков [17, 18]

**Table 1.** Main characteristics of the Tuba River and its tributaries [17, 18]

Река River	Площадь бассейна, км <sup>2</sup> Catchment area, km <sup>2</sup>	Длина реки, км River length, km	Средняя высота бассейна, м Average catchment elevation, m	Средний многолетний расход воды в замыкающем створе, м <sup>3</sup> /с Average long-term water discharge in the outlet, m <sup>3</sup> /s	Максимальный расход воды, м <sup>3</sup> /с Maximum water discharge, m <sup>3</sup> /s	Доля стока половодья, % годового Share of flood runoff, % annual
Амыл Amyl	9500	257	797	214	2900	62
Казыр Kazyg	20900	388	1050	308	2990	65
Кизир Kizir	9170	300	965	246	2600	68
Туба Tuba	36900	119	903	762	10500	65

Особенностью бассейнов рек Казыр и Кизир является наличие в верховьях небольшого дисперсного оледенения [19]. Ледники верховьев Казыра и Кизира (приводимые в Каталоге ледников) имеют площади от 1,2 до 0,1 км<sup>2</sup>, в среднем – 0,2–0,3 км<sup>2</sup>, расположены на высоте от 2 до 2,9 тыс. м. Существование оледенения на такой абсолютной высоте говорит об очень большом увлажнении верховий рек Казыр и Кизир. При этом сами ледники, в силу их малости, значительного влияния на сток рек оказывать не должны.

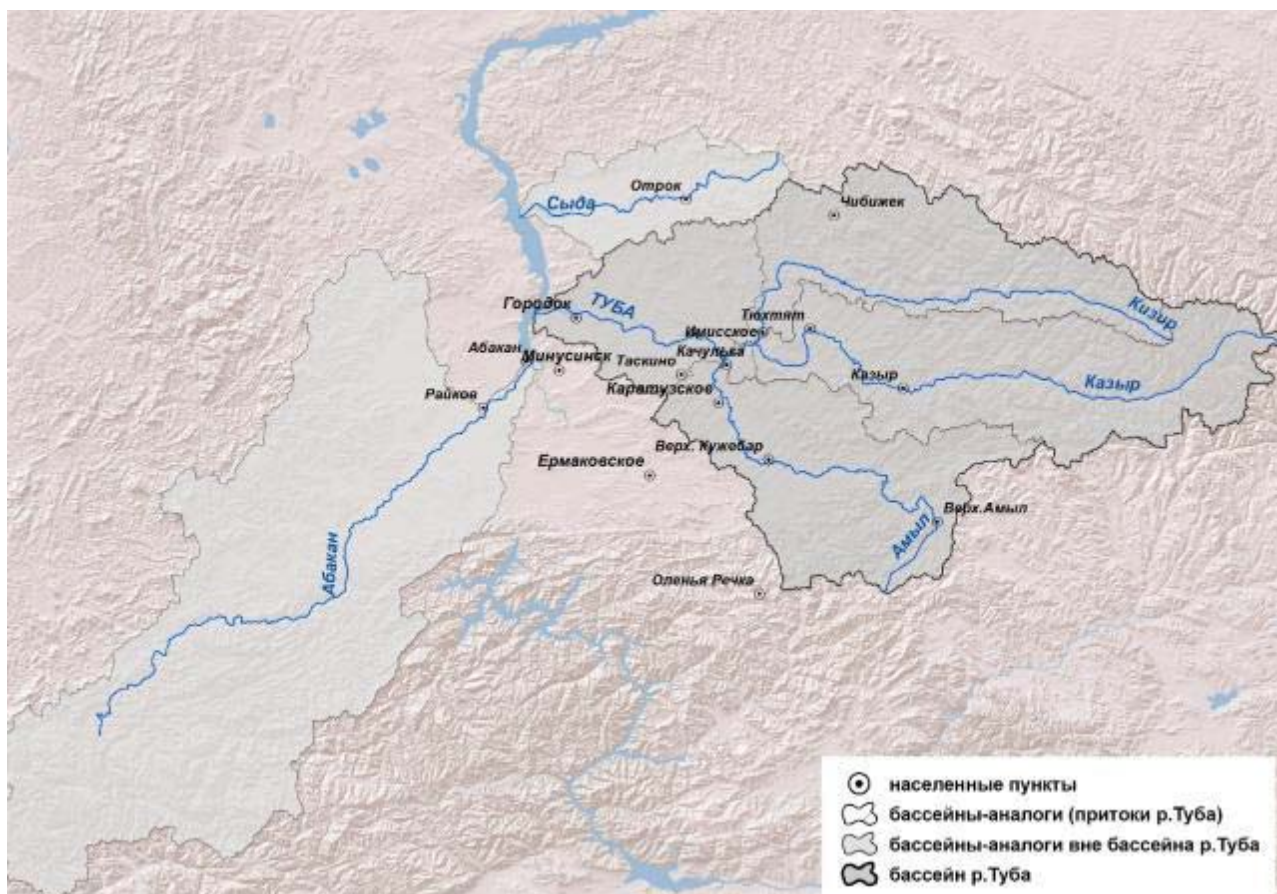


Рис. 1. Схема района исследований (бассейны р. Тубы и рек-аналогов)

Fig. 1. Scheme of the study area (catchments of the Tuba River and analog rivers)

По мнению М.В. Тронова [20], ледники являются индикаторами атмосферного увлажнения территории. На основе этой гипотезы ранее нами была разработана методика расчета средних многолетних осадков в бассейнах с современными оледенением и построены карты средних многолетних осадков для ряда бассейнов рек Алтая и Монголии [21]. Считаем целесообразным привести в данной работе экспертную оценку среднемноголетних твердых осадков в высокогорной части бассейна р. Тубы с использованием разработанной методики.

По формуле Ходакова–Кренке [22] оценивается абляция-аккумуляция на границе питания ледников:

$$A = 1,33(t_{\text{лет}} + 9,66)^{2,85},$$

где  $A$  – абляция-аккумуляция на границе питания ледников, мм;  $t_{\text{лет}}$  – средняя многолетняя температура воздуха за летний период на границе питания.

Полученная величина  $A$  характеризует снегонакопление на границе питания, состоящее из твердых осадков, лавинного и метелевого переноса. Для того чтобы исключить лавинный и метелевый перенос, вводятся коэффициенты концентрации, показывающие отношение аккумулированного снега

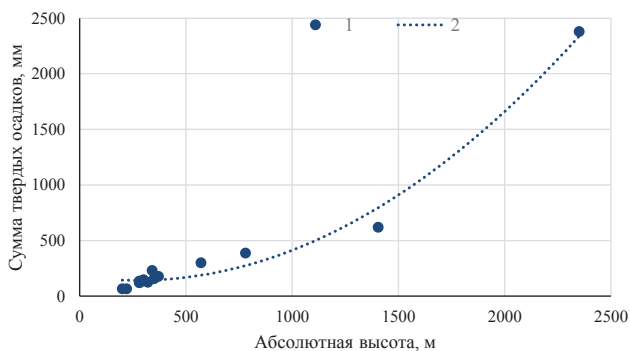
на леднике к фоновым снегозапасам. Коэффициенты концентрации рассчитаны на основе данных снегомерных съемок в высокогорьях Алтая для ледников различных размеров и морфологических типов [21].

По оценкам А.Н. Кренке [22], в западной части Саян абляция-аккумуляция на высоте границы питания ледников составляет  $400 \text{ г/см}^2$  или  $4000 \text{ мм}$ . Эта величина характеризует не отдельно взятый ледник, а регион в целом, поэтому мы использовали ее для расчета осадков на высоте границы питания.

Средний размер ледников в восточной части хребта Крыжина, являющегося водоразделом рек Казыр и Кизир, составляет  $0,25\text{--}0,27 \text{ км}^2$ . Близкий размер имеет ледник Стажер в бассейне Актру ( $0,24 \text{ км}^2$ ). Для экспертной оценки примем, что коэффициент концентрации ледника Стажер характеризует коэффициенты концентрации ледников хребта Крыжина. В соответствии с нашими расчетами [21. С. 15, табл. 10] он равен 1,68. Таким образом, сумма твердых осадков на высоте границы питания для рассматриваемой группы ледников составит около  $2380 \text{ мм}$  (необходимо отметить, что на высоте  $2350 \text{ м}$  и выше практически все осадки выпадают в твердом виде) [19]. Ранее М.Г. Гро-

свальд (ответственный редактор Каталога ледников) на основе данных о стоке определил сумму осадков в этом районе в 1800–1850 мм. Согласно нашим расчетам, величина годовых средних многолетних осадков на высоте границы питания ледников существенно больше приведенной М.Г. Гросвальдом [19].

По результатам выполненных расчетов и данных наблюдений на метеостанциях построена зависимость суммы твердых осадков от высоты для бассейна р. Тубы (рис. 2).



**Рис. 2.** График зависимости средней многолетней суммы твердых осадков от абсолютной высоты осадкомерного поста (бассейн р. Тубы). 1 – средняя многолетняя сумма осадков; 2 – линия тренда  $y = 0,0005x^2 - 0,273x + 178,89; R^2 = 0,983$ , где  $x$  – абсолютная высота, м;  $y$  – среднемноголетняя сумма осадков за ноябрь–март, мм

**Fig. 2.** Curve of relationship between average long-term total solid precipitation and absolute height of gauge Tuba. 1 – average long-term precipitation; 2 – trend line  $y = 0,0005x^2 - 0,273x + 178,89; R^2 = 0,983$ , where  $x$  is the absolute height, m;  $y$  is the average annual precipitation (November–March), mm

Полученная зависимость может быть использована для экспертной оценки среднемноголетних сумм зимних осадков в бассейне р. Тубы. Высокий коэффициент детерминации ( $R^2=0,98$ ) свидетельствует о наличии в бассейне выраженной зависимости количества осадков от абсолютной высоты. Таким образом, применение используемых в гидрологических расчетах высотных зависимостей для оценки осадков в бассейне р. Тубы целесообразно (в отличие от некоторых бассейнов, например, р. Чарыш и ряда других притоков Верхней Оби, где высотные зависимости не работают [23]).

Река Амыл является одной из наиболее изученных в бассейне р. Енисей [24–26].

Выбор ее бассейна в качестве аналога обусловлен тем, что в непосредственной близости от него на высоте 1404 м имеется метеостанция Оленья речка, таким образом, данными об осадках обеспечена почти вся амплитуда высот.

Список метеорологических станций и постов и суммы среднемноголетних осадков за ноябрь–март представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Абсолютная высота и сумма средних многолетних осадков за ноябрь–март в бассейне р. Амыл и нижней части бассейна р. Тубы [26]

**Table 2.** Absolute height and amount of average long-term precipitation for November–March in the Amyl basin and a low part of the Tuba basin [26]

Осадкомерный пост Gauge	H, м/m	Сумма осадков (XI–III) Total precipitation (XI–III)
Каратузское/Karatuzskoe	320	125
Верхний Кужебар Verkhny Kuzhebar	340	231
Верхний Амыл/Verkhny Amyl	780	388
Оленья Речка/Olenya Rechka	1404	473
Таскино/Taskino	280	120
Курагино/Kuragino	284	124
Чибижек/Chibizhek	570	299
Ермаковское/Ermakovskoe	300	147
Минусинск/Minusinsk	200	65
Бугуртак/Bugurtak	280	134
Имисское/Imisskoe	350	158
Городок/Gorodok	220	65
Тюхтят/Tyukhtyak	370	177

Площадь бассейна реки Амыл в створе с Качулька (Качульские Выселки) – 9850 км<sup>2</sup>, что составляет примерно одну треть водосборного бассейна реки Тубы в створе пос. Бугуртак (31800 км<sup>2</sup>). Абсолютные высоты бассейна р. Амыл в основном не превышают 1,5–2,0 км (максимальная высота – 2200 м, вершина без названия на водоразделе Амыла и Казыра). Большая часть водосборного бассейна залесена. На водораздельных участках выше 1,5 км имеются выходы скальных пород. В нижнем течении долина реки заболочена. Большая часть бассейна сосредоточена в высотном интервале от 250 до 1500 м, в том числе 38,5 % от общей площади находится на высоте от 250 до 500 м, 36,5 % – от 500 до 1000 м, 21,4 % – от 1000 до 1500 м [26].

Расстояние от гидрологического поста в с. Качулька до впадения в реку Тубу – 11 км [27]. Гидрологический пост в с. Качулька открыт в 1933 г., «...расположен в 14 км ниже впадения р. Копь. Прилегающая к речной долине местность крупнохолмистая, сложена скальными породами, местами выходящими на поверхность. Долина реки пойманная, шириной 3,0–3,5 км, поросла смешанным лесом и кустарником. Склоны крутые, залесенные. Пойма двухсторонняя: правобережная – шириной 240–250 м, в створе поста не затопливается; левобережная – шириной 870–860 м, начинает затопливаться при уровне 850 см. Русло слабоизвилистое, песчано-галечное, слабо деформирующееся. Берега суглинистые, размываемые, высотой 4–5 м, левый

берег порос кустарником, правый – луговыми травами. В 400 м ниже поста расположен остров Уджейский, в 160 м выше – песчано-илистая коса» [28. С. 32].

### Исходные данные

Для расчетов твердых и жидких осадков использовались метеорологические данные станций и постов (табл. 2): месячные суммы осадков с октября предшествующего года по июнь (включительно) рассчитываемого. Кроме этого, по метеостанции Верхний Кужебар (расположенной примерно в центре исследуемого бассейна) использовались суточные характеристики: температура воздуха и осадки. Значения слоя стока половодья на гидропостах р. Амыл – с. Качулька и р. Туба – пос. Бугуртак за период с 1966 по 1980 гг. определены по справочникам [17, 18, 27]. Определение сроков и расчет слоя стока половодья за периоды с 1981 по 1986 и с 2008 по 2017 гг. выполнены авторами по комплексным графикам с суточным разрешением с использованием гидрографа с марта по июль и графика хода среднесуточных температур и осадков по метеостанции Верхний Кужебар или метеостанции Каратузское. За период с 2008 по 2017 гг. использовались данные по гидрологическому посту р. Туба – с. Курагино.

### Результаты и обсуждение

#### Расчет зимних осадков с использованием высотных зависимостей

В гидрологических исследованиях величина снегозапасов в горном бассейне рассчитывается, как правило, при помощи высотных зависимостей вида  $\sum X = f(H)$  (зависимость суммы осадков на метеостанции от ее абсолютной высоты) [2, 29]. На рис. 2 приведена такая зависимость для р. Тубы, построенная с использованием ледников для оценки увлажнения в высокогорной части бассейна.

На рис. 3 для бассейна реки Амыл приведена зависимость среднемноголетних сумм зимних осадков на метеорологических станциях и постах от их абсолютной высоты (табл. 2).

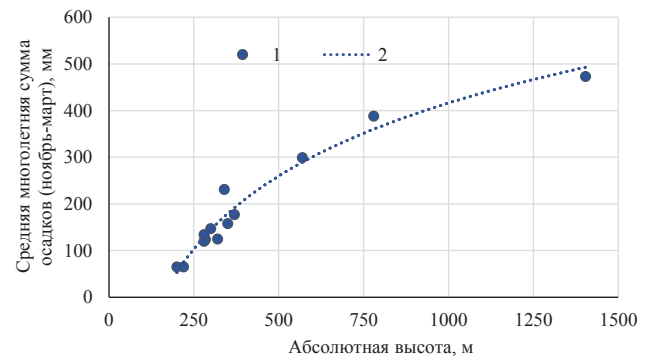
Аналогичным образом определялись зависимости ежегодных сумм осадков за зимний период. Расчеты проводились для следующих зим: с 1965–1966 по 1985–1986 гг. и с 2007–2008 по 2016–2017 гг. С использованием полученных зависимостей были вычислены средние по бассейну суммы зимних осадков (табл. 3).

Для построения прогнозной стохастической модели проанализирована корреляционная связь рассчитанных сумм зимних осадков и слоя стока половодья в створе р. Амыл – с. Качулька (рис. 4).

На объем стока половодья, помимо снегозапасов, в значительной степени влияют жидкие осадки [2], поэтому для расчета стока половодья

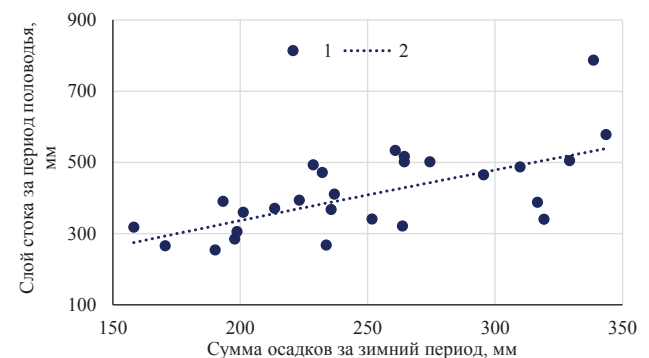
необходимо учитывать как минимум осадки апреля и мая (рис. 5).

Анализ корреляционной зависимости показал, что включение в анализ осадков апреля и мая дает существенное улучшение связи ( $R^2$  увеличился с 0,46 до 0,67). Причем если разделить половодье по продолжительности, это увеличение ещё более значительно (табл. 4, рис. 5).



**Рис. 3.** График зависимости средней многолетней суммы осадков за ноябрь-март от абсолютной высоты осадкомерного поста (бассейн р. Амыл). 1 – средняя многолетняя сумма осадков; 2 – линия тренда  $y = 225,7 \ln(x) - 1142,9$ ;  $R^2 = 0,962$ , где  $x$  – абсолютная высота, м;  $y$  – среднемноголетняя сумма осадков (ноябрь-март), мм

**Fig. 3.** Curve of relationship between average long-term total solid precipitation and absolute height of the Amyl basin. 1 – average long-term precipitation; 2 – trend line  $y = 225,7 \ln(x) - 1142,9$ ;  $R^2 = 0,962$ , where  $x$  is the absolute height, m;  $y$  is the average annual precipitation (November-March), mm



**Рис. 4.** График связи слоя стока половодья в створе р. Амыл-с. Качулька и суммы осадков за холодный период. 1 – слой стока; 2 – линия тренда  $y = 3,362x^{0,869}$ ;  $R^2 = 0,461$ , где  $x$  – сумма осадков за зимний период, мм;  $y$  – слой стока за половодье, мм

**Fig. 4.** Curve of relationship between flood runoff depth at the Amyl-Kachulka site and total precipitation for the cold period. 1 – runoff depth; 2 – trend line  $y = 3,362x^{0,869}$ ;  $R^2 = 0,461$ ;  $R^2 = 0,461$ , where  $x$  is the total winter precipitation, mm;  $y$  is the flood runoff depth, mm

**Таблица 3.** Суммы осадков за ноябрь–март в бассейне реки Амыл

**Table 3.** Total precipitation for November–March in the Amyl basin

Годы Year	Число метеостанций и осадко- мерных постов, используемых для построения зависимости $\sum X = f(H)$ Number of weather stations and gauges used to plot $\sum X = f(H)$	$\sum X$ , мм mm	R <sup>2</sup>
1965–1966	11	338,6	0,94
1966–1967	11	223,2	0,75
1967–1968	нет данных об осадках за январь–март precipitation data for January and March are absent		
1968–1969	13	264,4	0,83
1969–1970	14	264,4	0,77
1970–1971	13	190,1	0,82
1971–1972	12	213,5	0,92
1972–1973	11	260,8	0,87
1973–1974	12	233,7	0,85
1974–1975	12	183,5	0,80
1975–1976	15	198,7	0,87
1976–1977	15	236,9	0,82
1977–1978	нет данных об осадках за ноябрь–декабрь precipitation data for November and December are absent		
1978–1979	нет данных об осадках за ноябрь–декабрь precipitation data for November and December are absent		
1979–1980	14	343,6	0,83
1980–1981	14	251,7	0,92
1981–1982	14	193,2	0,92
1982–1983	13	232,2	0,81
1983–1984	14	201,2	0,84
1984–1985	13	228,6	0,82
1985–1986	12	158,2	0,87
2007–2008	7	197,8	0,94
2008–2009	7	329,2	0,87
2009–2010	6	295,5	0,79
2010–2011	7	263,7	
2011–2012	6	170,5	0,70
2012–2013	7	309,8	0,89
2013–2014	6	235,7	0,97
2014–2015	6	316,7	0,84
2015–2016	6	274,4	0,92
2016–2017	6	319,2	0,98
2017–2018	6	242,6	0,76

Примечание: В 1979 г. зима началась в нижнем течении с 20.11, в верховьях с 11.11.

Note: In 1979, winter started downstream and upstream on 20.11 and 11.11, respectively.

#### Анализ связи стока половодья реки Тубы и бассейнов-аналогов

С учетом полученных данных по бассейну-аналогу (р. Амыл) выполнен анализ связи стока половодья р. Амыл и р. Тубы в районе гидропоста пос. Бугуртак (рис. 6). Анализ совмещенных гидрографов за 1981–1986 гг. показал, что колебания расходов рек Амыл и Туба синхронны. На рис. 6 представлены совмещенные гидрографы за 1981 г. Связь слоя стока половодья бассейна-аналога (р. Амыл) и основной реки (р. Туба) характеризуется коэффициентом детерминации  $R^2=0,8$ . На рис. 7 представлена зависимость слоя стока половодья для рек Амыл (бассейн-аналог) и Туба за периоды с 1966 по 1986 и

с 2008 по 2017 гг. Слой стока весеннего половодья в бассейне р. Тубы для гидропоста пос. Бугуртак за 1966–1980 гг. выбран из справочников [17, 18], 1981–1986 – рассчитан авторами. За период с 2008 по 2017 гг. слой стока определялся по расходам на гидрологическом посту р. Туба–с. Курагино.

Таким образом, р. Амыл может являться бассейном-аналогом для бассейна р. Тубы.

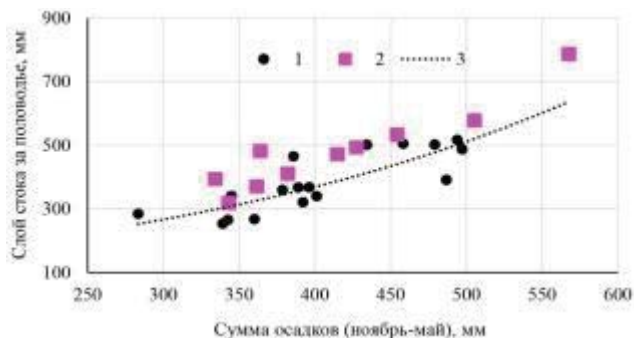
**Таблица 4.** Сумма зимних (ноябрь–март) и весенних (апрель–май) осадков и слой стока весеннего половодья р. Амыл (данные за 1966–1980 гг. [17, 18], 1981–1986 и 2008–2017 гг. – рассчитаны авторами)

**Table 4.** Total winter (November–March) and spring (April–May) precipitation; runoff depth of Amyl spring flood (data for 1966–1980 [17, 18], data for 1981–1986 and 2008–2018 were calculated by the authors)

Год Year	$\sum X(XI-III)$	$\sum X(IV-V)$	$\sum X(XI-V)$	Слой стока за период половодья, мм Runoff depth for the flood period, mm	Дата оконча- ния половодья Flood-end date
1966	338,6	229,1	567,7	787	15.07
1967	223,2	111	334,2	394	11.07
1968				280	22.06
1969	264,4	214,8	479,2	502	29.06
1970	264,4	229,6	494	517	
1971	190,1	149,2	339,2	254	19.07
1972	213,5	148,2	361,7	371	2.07
1973	260,8	193,3	454,1	534	2.07
1974	233,7	126,4	360,1	268	11.06
1975	183,5	180,5	364	482	12.07
1976	198,7	136	334,7	306	30.06
1977	236,9	145,3	382,2	411	7.07
1978				492	5.07
1979				415	29.06
1980	343,6	161,7	505,3	578	12.07
1981	251,7	93,3	345	341	24.06
1982	193,2	193,6	386,8	391	24.06
1983	232,2	182,6	414,8	472	22.07
1984	201,2	177,5	378,7	360	27.06
1985	228,6	188,7	417,3	493	16.07
1986	158,2	184,9	343,1	318	5.07
2008	197,8	85,6	283,4	284,7	18.06
2009	329,2	129,1	458,3	505	24.06
2010	295,5	90,4	385,9	465,4	29.06
2011	263,7	128,4	392,1	321,2	21.06
2012	170,5	172,1	342,6	265,9	16.06
2013	309,8	187,4	497,2	487,4	6.07
2014	235,7	153,3	389	367,8	29.06
2015	316,7	79,6	396,3	368	29.06
2016	274,4	159,8	434,2	501,8	13.07
2017	319,2	82	401,2	340,2	20.06
2018	242,6	176,6	419,2	431,4	18.07
2013	309,8	187,4	497,2	487,4	6.07
2014	235,7	153,3	389	367,8	29.06
2015	316,7	79,6	396,3	368	29.06
2016	274,4	159,8	434,2	501,8	13.07
2017	319,2	82	401,2	340,2	20.06
2018	242,6	176,6	419,2	431,4	18.07

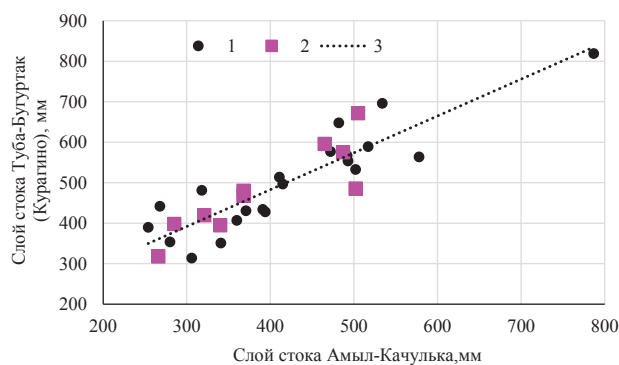
Примечание: пустые ячейки таблицы указывают на отсутствие первичной информации.

Note: empty lines indicate the absence of source information.



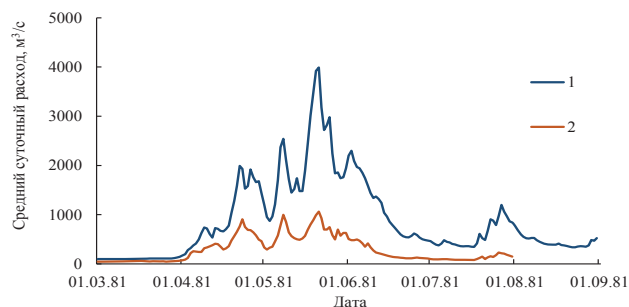
**Рис. 5.** График зависимости слоя стока половодья в створе р. Амыл–с. Качулька от суммы осадков за ноябрь–май (1966–1986; 2008–2017 гг.). 1 – годы с продолжением половодья в июне; 2 – в июле; 3 – линия тренда  $y = 100,53e^{0,0033x}$ ;  $R^2 = 0,673$ , где  $x$  – сумма осадков (ноябрь–май), мм;  $y$  – слой стока за половодье, мм

**Fig. 5.** Curve of relationship between flood runoff depth at the Amyl–Kachulka site on total precipitation for November–May (1966–1986; 2008–2017). 1 – years of high water proceeding in June; 2 – in July; 3 – trend line  $y = 100,53e^{0,0033x}$ ;  $R^2 = 0,673$ , where  $x$  is the total precipitation (November–May), mm;  $y$  is the flood runoff depth, mm



**Рис. 7.** График связи слоев стока за половодье бассейна-аналога р. Амыл и р. Тубы (1 – данные 1966–1986 гг., 2 – данные 2008–2017 гг., 3 – линия тренда  $y = 0,91x + 118,75$ ;  $R^2 = 0,797$ , где  $x$  – слой стока р. Амыл–с. Качулька, мм;  $y$  – слой стока р. Туба–пос. Бугуртак (Курагино), мм

**Fig. 7.** Curve of relationship between flood runoff depth of the Amyl basin-analogy and Tuba River (1 – data for 1966–1986, 2 – 2008–2017, 3 – trend line  $y = 0,91x + 118,75$ ;  $R^2 = 0,797$ , where  $x$  is the runoff depth (mm) at the site Amyl–Kachulka;  $y$  is the runoff depth (mm) at the site Tuba r.–Bugurtak vill. (Kuragino)



**Рис. 6.** Совмещенные гидрографы гидропостов р. Туба–пос. Бугуртак и р. Амыл–с. Качулька за 1981 г. Период половодья с 20.04 по 4.07 (1 – гидрограф гидропоста р. Тубы–пос. Бугуртак; 2 – гидрограф гидропоста р. Амыл–с. Качулька)

**Fig. 6.** Combined hydrographs of gauging station Tuba–Bugurtak and Amyl–Kachulka for 1981. High water period lasted from 20.04 to 04.07 (1 – hydrograph of gauging station Tuba–Bugurtak; 2 – hydrograph of gauging station Amyl–Kachulka)

Для оценки влияния физико-географических факторов водосборов бассейнов-аналогов на качество стохастической прогнозной модели проанализирована связь слоя стока половодья р. Тубы в створе Бугуртак с еще несколькими реками-аналогами, в числе которых основные притоки р. Туба – Амыл, Казыр и Кизир, а также соседние бассейны – Абакан и Сыда (табл. 5). Выбор потенциальных бассейнов-аналогов осуществлялся в соответствии с критериями, приведенными в п. 4.10 СП 33-101-2003 [13].

Помимо географической близости, однородности условий формирования стока и климатических условий, требуется учет следующих показателей: заболоченность, залесенность, озерность, средняя высота водосбора, гипсометрия и экспозиция склонов. Кроме того, при расчете максимального стока дополнительно должны соблюдаться следующие требования (п. 7.26 [13]):

$$L/A^{0,56} = L_a/A_a^{0,56},$$

$$JA^{0,50} = J_a A_a^{0,50},$$

где  $L$  – длина реки, км;  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>,  $J$  – уклон водной поверхности, ‰;  $L_a$ ,  $A_a$ ,  $J_a$  – то же для бассейна-аналога.

Перечисленные характеристики для р. Тубы в створе Бугуртак и ее рек-аналогов, а также коэффициенты детерминации зависимости слоев стока половодья приведены в табл. 5.

Наиболее высокий коэффициент детерминации слоя стока половодья – 0,903 у р. Тубы с р. Казыр в створе пос. Казыр (Пономарево). Данный бассейн по ряду параметров (степень залесенности, соотношение уклона и длины реки с площадью бассейна) наилучшим образом подходит в качестве аналога. При этом средняя высота бассейна р. Казыр существенно выше (более чем на 300 м), чем у исследуемого. Очевидно, решающее значение имеет соотношение тех частей водосборов, на которых формируется большая часть стока.



**Таблица 5.** Характеристики бассейнов рек-аналогов и коэффициенты детерминации зависимостей слоя стока половодья р. Тубы в створе Бугуртак и рек-аналогов

**Table 5.** Characteristics of rivers from basins-analogies and determination coefficients of dependences of flood runoff depth of the Tuba (at Bugurtak) and rivers-analogues

Река-пост River-Gauge	Период наблюдений Observation period	Площадь водосбора (A), км <sup>2</sup> Catchment area, km <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м Average altitude catchment area, m	Длина реки (L), км River length (L), km	Средний уклон реки (J) Average slope (J), ‰	$L/A^{0.56}$	$JA^{0.50}$	Заболоченность Swampiness, %	Залесенность Forest cover, %	Озерность Lake percentage, %	Коэффициент связи с р. Туба-Бугуртак Coupling coefficient with Tuba – Bugurtak ( $R^2$ )
Туба-Бугуртак (с 2007 Курагино) Tuba-Bugurtak (Kuragino from 2007)	1966–1986, 2008–2017	31800 32900	976	390	4,7	1,17	838,13	<1	58	<1	
Амыл-Качулька Amyl-Kachulka	1966–1986, 2008–2017	9850	797	246	4,5	1,43	446,61	2	94	0	0,8
Амыл-Верхний Кужебар Amyl-Verkhny Kuzhebar	1966–1986, 2008–2017	5270	958	172	6,1	1,42	442,83	<1	89	<1	0,874
Амыл-Верхний Амыл Amyl-Verkhny Amyl	1966–1980, 1982–1986	537	1121	47	14,7	1,39	340,65	0	87	0	0,687
Абакан-Райков Abakan-Raikov	1966–1986, 2008–2017	31300	1062	475	4,2	1,44	743,06	<1	55	<1	0,437
Кизир-Имисское Kizir-Imisskoe	1966–1986, 2008–2017	9080	965	292	5,4	1,77	514,56	<1	84	<1	0,890
Казыр-Казыр Kazyr-Kazyr	1966–1969, 1976–1986, 2008–2017	9160	1304	247	6,5	1,49	622,10	0	55	<1	0,903
Сыда-Отрок Syda-Otrok	1966–1970, 1976–1986, 2008–2017	1480	660	81	6,7	1,36	257,75	<1	85	0	0,360

Высокие коэффициенты детерминации у бассейнов-аналогов р. Кизир – с. Имисское и р. Амыл – с. Верхний Кужебар, имеющих наиболее близкие к исследуемому средние высоты бассейна.

Слабая связь характерна для бассейнов рек Абакан и Сыда (коэффициенты детерминации  $R^2$  0,44 и 0,36 соответственно).

В первом случае, очевидно, это связано с тем, что бассейн р. Абакан приурочен преимущественно к подветренному склону Абаканского хребта, а бассейн р. Тубы – к наветренным склонам Саян. Во втором случае – слишком большая разница площадей (в 20 раз) и средних высот бассейнов. В действовавших ранее СНиП 2.01.14-83 [30] в перечне требований к бассейну-аналогу значилась разница в площадях водосборов – не более чем в 10 раз, а средняя высота бассейнов горных рек не должны была различаться более чем на 300 м. Очевидно, бассейн р. Сыды перечисленным требованиям не соответствует.

#### Прогноз слоя стока половодья р. Тубы с использованием бассейна-аналога

Для прогноза слоя стока реки Тубы с помощью бассейна аналога выполним проверку полученной зависимости в 2008–2018 гг. (рис. 5).

Как правило, на практике реализовать обоснованный среднесрочный прогноз возможно только для «гарантированного» стока, сформированного таянием зимних осадков, поскольку спрогнозировать жидкие осадки периода половодья с большой заблаговременностью не представляется возможным.

При помощи полученных ранее зависимостей (рис. 5, 7) рассчитан гарантированный сток половодья сначала в бассейне-аналоге (р. Амыл – с. Качулька), а затем – в створе р. Туба-пос. Бугуртак (Курагино). Результаты представлены в табл. 6. Разница между прогнозным и наблюдаемым слоем стока половодья на р. Тубе оказалась существенной – от 14 до 282 мм. Очевидно, на это в значительной мере должны были повлиять жидкие осадки апреля–мая. Анализ сумм осадков за апрель–май в бассейне-аналоге Амыл–Качулька показал, что они сильно изменяются от года к году (табл. 4).

Влияние жидких осадков на сток в значительной степени зависит от того, к какой стадии половодья были приурочены дожди.

На примере лет, когда суммы осадков за апрель–май составили менее 100 мм (2008, 2010, 2015, 2017 гг.), рассмотрим, каким образом влияют на сток половодья суммы жидких осадков и их величины в отдельные месяцы.

**Таблица 6.** Рассчитанный и прогнозный слой стока половодья р. Тубы, определенный с помощью бассейна-аналога

**Table 6.** Flood runoff depth of the Tuba River calculated and predicted from a basin-analogy

Год Year	Слой стока, мм/Runoff depth, mm				
	Амыл-Качулька Amyl-Kachulka		Туба-Бугуртак (Курагино) Tuba-Bugurtak (Kuragino)		
	расчет calculated	фактиче- ский really	расчет calculated	фактиче- ский really	абсолютная ошибка absolute error
2008	284,7	193,1	398	294	104
2009	505,0	297,9	672	390	282
2010	465,4	266,6	596	361	235
2011	321,2	240,0	420	337	83
2012	265,9	176,5	318	279	39
2013	487,4	279,4	575	373	202
2014	367,8	218,8	480	318	162
2015	368,0	285,9	468	379	89
2016	501,8	248,6	486	345	141
2017	340,2	288,2	394	381	14
2018	412,6	223,9	558	322	236

Так, в 2008 и 2010 гг. суммы осадков за апрель–май примерно соизмеримы. Но в 2008 г. они соизмеримы и по величине внутри месяцев, в то время как в 2010 г. основная масса осадков выпала в апреле, т. е. на снежный покров и почву, находящуюся в процессе оттаивания и имеющую коэффициент стока существенно больший, чем в мае, когда таяние снежного покрова закончилось, начался период вегетации, увеличиваются потери влаги на испарение и транспирацию [31]. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении 2014 и 2016 гг. Суммы осадков примерно соизмеримы (150–160 мм), а разница в стоке значительна (в 2014 – 149, а в 2016 – 253 мм). В 2014 г. основная масса весенних осадков выпала в мае (табл. 4), а в 2016 г. распределение осадков примерно равномерное.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леви И.И. Инженерная гидрология. – М.: Высшая школа, 1968. – 236 с.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс Гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 420 с.
3. Swain J.B., Patra K.C. Impact of catchment classification on streamflow regionalization in ungauged catchments // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–14.
4. Betterle A., Schirmer M., Botter G. Flow dynamics at the continental scale: Streamflow correlation and hydrological similarity // Hydrological processes. – 2019. – Vol. 33. – № 4. – P. 627–646.
5. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П. Методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на реке Иртыш и результаты их испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2019. – № 46. – С. 71–78.
6. Joint spatial and temporal modeling for hydrological prediction / Q. Zhao, Y. Zhu, K. Shu, D. Wan, Y. Yu, X. Zhou, H. Liu // Ieee Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 78492–78503.
7. Tegegne G., Kim Y. O. Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity // Journal of hydrology. – 2018. – Vol. 564. – P. 452–466.
8. Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran / B. Choubin, K. Solaimani, F. Rezanezhad, M.H. Roshan, A. Malekian, S. Shamshirband // Catena. – 2019. – Vol. 182. – P. 104128.
9. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review / Y. Guo, Y. Zhang, L. Zhang, Z. Wang // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. – 2021. – Vol. 8. – № 1. – P. e1487.

#### Выводы

Сравнительный анализ рек-аналогов показал, что использование в качестве аналогов рек-притоков р. Тубы – р. Казыр, Кизир и Амыл – для характеристики слоя стока половодья дает коэффициенты детерминации близкие к 0,9. Как указывалось ранее, бассейн-аналог должен иметь факторы формирования половодья близкие к исследуемой реке. Это должно выражаться в условиях формирования осадков (например, наветренный склон или подветренный). Преимущество при расчетах должно отдаваться бассейну-аналогу со схожими физико-географическими условиями (заболоченность, залесенность водосбора и др.), средней высотой водосбора, близкой к исследуемому бассейну. Нецелесообразно использование в качестве аналога бассейна, находящегося в схожих физико-географических условиях, но существенно меньшего по площади (более чем в 10 раз) и с меньшими абсолютными высотами (более чем на 300 м). На практике для горных рек выбор бассейна-аналога ограничен наличием данных гидрометеорологических наблюдений на разных абсолютных высотах.

Анализ стока половодья р. Амыл показал, что для построения стохастической прогнозной модели стока, помимо зимних осадков, желательно учитывать влияние дождей на спаде половодья. К сожалению, на момент выпуска среднесрочного прогноза учесть величину и распределение жидких осадков не представляется возможным.

Для среднесрочного прогноза стока половодья р. Тубы в створе пос. Бугуртак возможно использование бассейна-аналога р. Амыл в створе – с. Качулька при расчете гарантированного слоя стока за половодье (под гарантированным слоем стока понимается слой стока от таяния снега без учета жидких осадков в период половодья).

10. Singh N.M., Devi T.T. Regionalization methods in ungauged catchments for flow prediction: review and its recent developments // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2022. – Vol. 15. – № 11. – P. 1019.
11. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review // *Hydrological processes*. – 1995. – Vol. 9. – № 3–4. – P. 251–290.
12. Razavi T., Coulibaly P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods // *Journal of hydrologic engineering*. – 2013. – Vol. 18. – № 8. – P. 958–975.
13. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
14. Beven K.J. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling // *Hydrology and earth system sciences*. – 2000. – Vol. 4. – № 2. – С. 203–213.
15. Sabau D. A., Şerban G., Tudose T. Correlation between precipitation and orography – key element of the Spatial Decision Support System for prevention and management of floods in the Firiza Basin (Northwest Romanian Carpathians) // *Forum Geogr.* – 2022. – Vol. 21. – № 1. – P. 5–17.
16. Meshyk A., Barushka M., Marozava V. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 18826–18836.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.
18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 302 с.
19. Ресурсы поверхностных вод. Каталог ледников СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. Ч. 3–5. Вып. 2. Ангара. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат. 1973. – 64 с.
20. Тронов М.В. Вопросы связи между климатом и оледенением. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1956. – 202 с.
21. Оценка среднего многолетнего увлажнения и поверхностного стока бессточного бассейна реки Ховд (Западная Монголия) / В.П. Галахов, О.В. Ловцкая, С.Ю. Самойлова, Ч. Аюрзана, Д. Отгонбаяр. – Барнаул: Изд-во «Азбука», 2013. – 109 с.
22. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.
23. Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Оценка количества зимних осадков в горных бассейнах и их влияние на сток во время половодья (на примере рек Чарыш и Ануй, Алтай) // *Криосфера Земли*. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 51–62. DOI: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605>.
24. Пространственная структура формирования стока на основе математического моделирования / Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина, С.А. Гаврилкина, В.А. Соловьев, Н.И. Амбурцева, Т.А. Виноградова // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 218–227.
25. Бураков Д.А., Гордеев И.Н. Оценка предвесенних снегозапасов в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ // *География и природные ресурсы*. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
26. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки / В.П. Галахов, О.В. Ловцкая, С.Ю. Самойлова, Е.В. Мардасова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 193–203.
27. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангары и Пясины). – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 464 с.
28. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1985 г. Т. 1. РСФСР. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангары) и Пясины. – Обнинск: ВНИГМИ-МЦД, 1987. – 414 с.
29. Learning about precipitation lapse rates from snow course data improves water balance modeling / F. Avanzi, G. Ercolani, S. Gabellani, E. Cremonese, P. Pogliotti, G. Filippa, S. Juglair // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2021. – Vol. 25. – № 4. – P. 2109–2131.
30. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
31. Галахов В.П. Условия формирования половодья малой горной реки (по исследованиям в бассейне реки Майма) // *Известия АО РГО*. – 2015. – № 3 (38). – С. 35–40.

### Информация об авторах

**Владимир Прокопьевич Галахов**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. [galahov@iwerp.ru](mailto:galahov@iwerp.ru)

**Светлана Юрьевна Самойлова**, кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>. [bastet05@list.ru](mailto:bastet05@list.ru)

**Ольга Вольфовна Ловцкая**, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. [lov@iwerp.ru](mailto:lov@iwerp.ru) <http://orcid.org/0000-0002-3942-1350>

**Елена Владимировна Мардасова**, старший преподаватель кафедры экономической географии и картографии, Институт географии Алтайского государственного университета, Россия, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61. [mardasova\\_ev@mail.ru](mailto:mardasova_ev@mail.ru)

Поступила в редакцию: 23.05.2023

Поступила после рецензирования: 06.06.2023

Принята к публикации: 17.01.2024

## REFERENCES

1. Levy I.I. *Engineering hydrology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 236 p. (In Russ.)
2. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Course of hydrological forecasts*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 420 p. (In Russ.)
3. Swain J.B., Patra K.C. Impact of catchment classification on streamflow regionalization in ungauged catchments. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 1–14.
4. Betterle A., Schirmer M., Botter G. Flow dynamics at the continental scale: Streamflow correlation and hydrological similarity. *Hydrological processes*, 2019, vol. 33, no 4, pp. 627–646.
5. Burakov D.A., Kosmakova V.F., Volkovskaya N.P. Methods for long-term forecasting of maximum water levels on R.Irtysh and their testing results. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2019, no 46, pp. 71–78. (In Russ.)
6. Zhao Q., Zhu Y., Shu K., Wan D., Yu Y., Zhou X., Liu H. Joint spatial and temporal modeling for hydrological prediction. *Ieee Access*, 2020, vol. 8, pp. 78492–78503.
7. Tegegne G., Kim Y.O. Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. *Journal of hydrology*, 2018, vol. 564, pp. 452–466.
8. Choubin B., Solaimani K., Rezaezhad F., Roshan M. H., Malekian A., Shamshirband S. Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran. *Catena*, 2019, vol. 182, pp. 104128.
9. Guo Y., Zhang Y., Zhang L., Wang Z. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2021, vol. 8, no 1, pp. e1487.
10. Singh N.M., Devi T.T. Regionalization methods in ungauged catchments for flow prediction: review and its recent developments. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, no. 11, pp. 1019.
11. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological processes*, 1995, vol. 9, no. 3–4, pp. 251–290.
12. Razavi T., Coulbaly P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. *Journal of hydrologic engineering*, 2013, vol. 18, no 8, pp. 958–975.
13. *Code of rules for design and construction. 33-101-2003. Determination of major design hydrological characteristics*. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. (In Russ.)
14. Beven K.J. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and earth system sciences*, 2000, vol. 4, no. 2, pp. 203–213.
15. Sabau D.A., Şerban G., Tudose T. Correlation between precipitation and orography – key element of the Spatial Decision Support System for prevention and management of floods in the Firiza Basin (Northwest Romanian Carpathians). *Forum Geografic*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 5–17.
16. Meshyk A., Barushka M., Marozava V. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 18826–18836.
17. *Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics (for 1963–1970 and the entire observation period). Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 288 p. (In Russ.)
18. *Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics (for 1971–1975 and the entire observation period). Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 302 p. (In Russ.)
19. *Surface water resources. Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei. P. 3–5. Iss. 2. Angara. P. 1*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 64 p. (In Russ.)
20. Tronov M.V. *Relationship between climate and glaciation*. Tomsk, TSU Publ. house, 1956. 202 p. (In Russ.)
21. Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Samoiloa S.Yu., Ayurzana Ch., Otgonbayar D. *Estimation of the average long-term moisture content and surface runoff of the drainless basin of the Khovd River (Western Mongolia)*. Barnaul, Azbuka Publ. house, 2013. 109 p. (In Russ.)
22. Krenke A.N. *Mass transfer in the glacial systems of the USSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 288 p. (In Russ.)
23. Galakhov V.P., Samoiloa S.Yu., Mardasova E.V. Assessment of the amount of winter precipitation in mountain basins and their influence on flood formation (Charysh and Anuy river basins). *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. 25, no 6, pp. 51–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605>.
24. Pryakhina G.V., Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Solovyev V.A., Amburtseva N.I., Vinogradova T.A. Mathematical modeling of runoff formation spatial structure. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no 2, pp. 218–227. (In Russ.)
25. Burakov D.A., Gordeev I.N. Assessment of pre-spring snow reserves in the basins of Krasnoyarsk and Sayano-Shushensk reservoirs. *Geography and natural resources*, 2013, no. 1, pp. 72–78. (In Russ.)
26. Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Samoiloa S.Yu., Mardasova E.V. Comparative analysis of methods for forecasting maximum levels and volumes of flood runoff of a mountain river. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 193–203. (In Russ.)
27. *State water cadastre. Long-term data of surface water regime and resources. Vol. 1. Iss. 12. Basins of the Yenisei (without the Angara basin) and Pyasina*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 463 p. (In Russ.)
28. *State water cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters. 1985 Vol. 1. RSFSR. Iss. 12. The Yenisei basin (without the Angara basin) and Pyasina*. Obninsk, VNIGMI-MTsD Publ., 1987. 414 p. (In Russ.)
29. Avanzi F., Ercolani G., Gabellani S., Cremonese E., Pogliotti P., Filippa G., Juglair S. Learning about precipitation lapse rates from snow course data improves water balance modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, vol. 25, no 4, pp. 2109–2131.
30. *Standards of construction engineering. 2.01.14-83. Determination of design hydrological characteristics. Gosstroy of the USSR*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 36 p. (In Russ.)

31. Galakhov V.P. Conditions for formation of flood on small mountain river (the Maima river basin as a case study). *Bulletin of the Altay branch of the Russian geographical society*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.)

#### **Information about the authors**

**Vladimir P. Galakhov**, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. galahov@iwep.ru

**Svetlana Yu. Samoilo**va, Cand. Sc., Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. bastet@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

**Olga V. Lovtskaya**, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. lov@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3942-1350>

**Elena V. Mardasova**, Senior Lecturer, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russian Federation. mardasova\_ev@mail.ru

Received: 23.05.2023

Revised: 06.06.2023

Accepted: 17.01.2024

УДК 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434

Шифр специальности ВАК: 2.8.4

## Настройка модели пласта методом материального баланса в программном обеспечении MBAL. Настройка интегрированной модели в GAP

Р.Н. Коротков✉, Д.М. Овчаренко, В.И. Ерофеев

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

✉ klimatqwf@gmail.com

**Аннотация.** *Актуальность* исследования заключается в современном подходе к разработке нефтяных и газовых месторождений. Цифровизация и автоматизация процессов добычи углеводородного сырья позволяет не только сократить время реагирования на возможные отклонения от режимного уровня добычи, но и оперативно принимать решения по дальнейшей его нормализации. Использование современного программного обеспечения для создания модели пласта методом материального баланса позволяет рассчитывать текущие и прогнозные пластовые давления в зависимости от количества отобранного и закаченного флюида. При качественной адаптации интеграция модели пласта, скважин и системы сбора, в свою очередь, позволяет корректно подходить к выбору системы разработки месторождения, а также правильно оценивать его возможный потенциал. Прогнозные расчеты, выполненные на интегрированной модели, могут лечь в основу бюджетного планирования, а также в основу проведения геолого-технических мероприятий по скважинам, вводу новых скважин, модернизации оборудования и инфраструктуры. Более того, групповой оптимизационный расчет позволяет максимизировать получение дополнительной добычи нефти с учетом всех геологических и технических ограничений. **Цель:** формирование и анализ подхода к настройке модели пласта путем адаптации параметров методом материального баланса; формирование решения для адаптации интегрированной модели, сверка результатов с фактическими данными; проведение оптимизационного расчета и получение дополнительной добычи нефти. **Методы:** настройка и адаптация моделей пласта методом материального баланса; настройка и адаптация интегрированной модели месторождения/группы месторождений; расчет прогноза сроком на 30/90 дней; проведение оптимизационных расчетов. **Результаты.** Полученные результаты позволяют адаптировать компоненты интегрированной модели с точностью более 95 %, что позволяет симулировать режим работы месторождения. В результате анализа были выявлены критерии настройки, а также представлен минимальный необходимый набор параметров для качественной адаптации модели пласта и системы сбора. Также показана эффективность и точность инструмента посредством сравнения фактических данных о режимах работы с синтетическими. На основании проделанной работы можно сделать вывод о том, что использование интегрированной модели демонстрирует нам высокое сходжение с реальными данными, что позволяет выбрать оптимальный режим разработки месторождения. Кроме того, был проведен оптимизационный расчет для получения дополнительной добычи нефти с использованием предложенного решения, а также рассчитан прогноз по добыче нефти сроком на 90 дней, который в дальнейшем получил подтверждение при сравнении с фактическими данными.

**Ключевые слова:** Petroleum Experts, PETEX, MBAL, GAP, интегрированная модель, материальный баланс, адаптация модели, расчет прогноза по добыче, оптимизация.

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Физико-химические методы анализа» Томского политехнического университета.

**Для цитирования:** Коротков Р.Н., Овчаренко Д.М., Ерофеев В.И. Настройка модели пласта методом материального баланса в программном обеспечении petroleum experts MBAL. Настройка интегрированной модели в GAP // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 133–140. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434

---

UDC 622.276

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434

## Adjustment of a reservoir model by the material balance method in the MBAL program. Setting up the integrated model in GAP

R.N. Korotkov<sup>✉</sup>, D.M. Ovcharenko, V.I. Erofeev

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>✉</sup>klimatqwf@gmail.com

**Abstract. Relevance.** Modern approach to development of oil and gas fields. Digitalization and automation of hydrocarbon production allow not only reducing the response time to possible deviations from the operating level of production, but also quickly making decisions on its further normalization. The use of modern software to create a reservoir model applying the material balance method allows you to calculate current and predicted reservoir pressures depending on the amount of selected and injected fluid. With high-quality adaptation, the integration of the reservoir model, wells and collection system, in its turn, allows you to correctly approach the choice of a field development system, as well as correctly assess the possible potential of the field. Forecast calculations performed on an integrated model can form the basis for budget planning, as well as the basis for carrying out geological and technical activities on wells, commissioning new wells, and modernizing equipment and infrastructure. Moreover, group optimization calculation allows us to maximize additional oil production, taking into account all geological and technical constraints. **Aim.** Formation and analysis of an approach to setting up a reservoir model by adapting parameters using the material balance method; formation of a solution for adapting the integrated model, reconciliation of the results with actual data; carrying out an optimization calculation and obtaining additional oil production. **Methods.** Adjustment and adaptation of reservoir models using the material balance method; adjustment and adaptation of the integrated model of a field/group of fields; calculation of the forecast for a period of 30/90 days; optimization calculations. **Results.** The obtained results make it possible to adapt the components of the integrated model with an accuracy of more than 95%, which makes it possible to simulate the operating mode of the field. As a result of the analysis, tuning criteria were identified, and the minimum required set of parameters for a qualitative adaptation of the reservoir model and the collection system was presented. The effectiveness and accuracy of the tool are also proven by comparing actual data on operating modes with synthetic ones. Based on the work done, it can be concluded that the use of the integrated model shows us a high convergence with real data, which allows us to optimally approach the field development mode. Moreover, an optimization calculation was carried out to obtain additional oil production using the proposed solution, and a forecast for oil production for a period of 90 days was calculated, which was later confirmed when compared with actual data.

**Keywords:** Petroleum Experts, PETEX, MBAL, GAP, integrated model, model matching, production forecast calculation, optimization

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the TPU center «Physical and chemical methods of analysis».

**For citation:** Korotkov R.N., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Adjustment of a reservoir model by the material balance method in the petroleum experts MBAL program. Setting up the integrated model in GAP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 133–140. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4434

---

### Введение

Внедрение цифровых технологий и автоматизации в процессы добычи нефти и газа имеет ряд преимуществ: ускорение расчетов по групповой оптимизации скважин с учетом влияния инфраструктуры, снижение недоборов углеводородного сырья, повышение эффективности и качества принимаемых решений в случае отклонения от режимных параметров по скважинам. С применением современного программного обеспечения можно создавать модель пласта с помощью метода материального баланса. Это позволяет рассчитывать текущие и прогнозные пла-

стовые давления, учитывая количество отобранного и закаченного флюида [1]. При правильной адаптации и интеграции компонентов интегрированной модели (пласт, скважина, система сбора) можно существенно повысить рентабельность месторождений за счет перераспределения объемов закачки либо увеличения отборов по части фонда скважин. А прогнозные расчеты, выполненные на интегрированной модели, могут лечь в основу бюджетного планирования, и также в основу проведения геолого-технических мероприятий по скважинам, вводу новых скважин, модернизации оборудования и инфраструктуры [2].

## Методы

Адаптация моделей МВАЛ по выделенным участкам объектов разработки месторождения проводится на основе метода материального баланса в ПО МВАЛ.

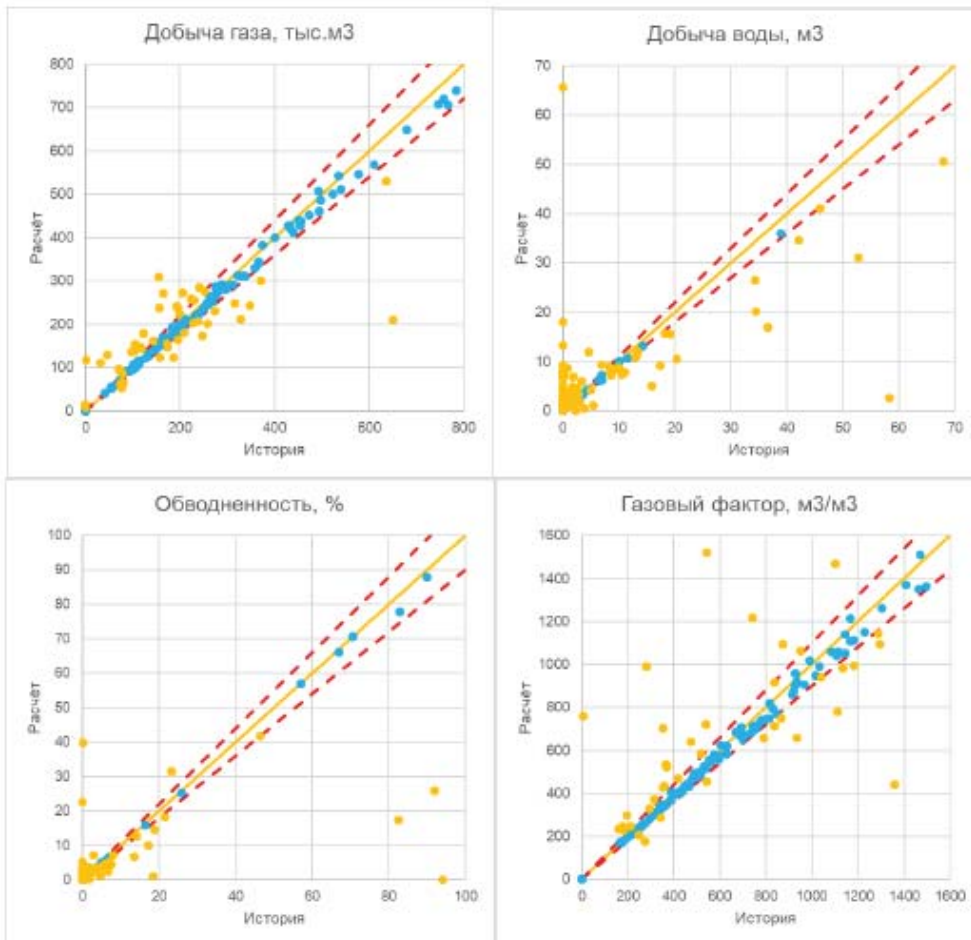
Адаптация проводится по следующему сценарию [3–5]:

1. Для объектов с системой поддержания пластового давления (ППД).
  - 1.1. В случае, если накопленный объем воды недостаточен для поддержания пластового давления, в модель включается водонапорный горизонт и его свойства подбираются с допущением, что эффективная закачка на последнюю дату истории составляет 100 %.
  - 1.2. Дальнейшая адаптация (с водонапорным горизонтом или без него) проводится путем выделения опорных точек на профиле пластового давления и подбора эффективной закачки.
2. Для объектов без ППД.
  - 2.1. Для объектов без нагнетания воды адаптация проводится либо путем подбора начальных запасов (если расчетное сниже-

ние пластового давления было выше замеренного), либо путем подбора параметров водонапорного горизонта.

Качество адаптации модели проверяется с помощью имитационного расчета пластового давления на основе накопленной добычи и (замеренной или адаптированной) закачки [6]. По результатам расчета оцениваются характеристики вытеснения рассматриваемого участка по газу и по воде, оценивается прогнозная способность модели пласта. Ретроспективный расчет выполняется без учета моделей скважин, что позволяет оценить только погрешность модели пласта [7]. На рис. 1 представлены результаты ретроспективного расчета за период одного предпрогнозного месяца.

На рис. 1 представлены кросс-плоты по сравнению фактической и расчетной добычи нефти и газа, а также обводненности и газового фактора по скважинам за один месяц. На графиках отражены скважины с расхождением расчёта от факта меньше 10 % (синие точки) и больше 10 % (оранжевые точки), указан десятипроцентный коридор.



**Рис. 1.** Кросс-плот сравнения добычи газа и воды по скважинам за месяц  
**Fig. 1.** Cross-plot comparing gas and water production by wells for a month



На последнем этапе адаптации модели подбираются кривые фазовой фильтрации отдельно для каждой добывающей скважины [8].

Для прогнозирования дальнейших отборов нефти, газа и воды необходимым действием является настройка фазовых проницаемостей по воде и газу по скважинам (fw, fg matching).

Необходимо, чтобы по каждой скважине линия проходила через наибольшее количество точек значений обводненности/газового фактора на соответствующие им даты, в целом воспроизводя тренд [9].

Чтобы проверить правильность настройки создаются прогнозные скважины. В «Production prediction» следует выбрать «production profile per well model», в «options» выбрать «use fractional flow model» и «store history well results», что позволит использовать модель потока и накопленную добычу по скважинам. Старт прогноза – начало добычи, конец прогноза – последний месяц работы скважины.

Далее запускаем расчет прогноза – Run prediction.

Во вкладке «well results» значения обводненности/газового фактора у исторической скважины должны примерно совпадать со значениями такой же прогнозной скважины, что отображается на графиках во вложении.

Настройка интегрированной модели заключается в последовательном выполнении ряда проверок качества интеграции моделей-компонентов [10]. Каждая следующая проверка задействует большее количество неопределённостей, что позволяет на каждом этапе устанавливать причины расхождений

между фактическими и расчётными параметрами, в случае их обнаружения, и упрощает процедуру донастройки моделей-компонентов. Производились следующие проверки:

- корректность передачи обводнённости из MBAL в GAP;
- «Model Validation»;
- расчёт «на срез»;
- прогнозный расчёт.

В интегрированной модели, состоящей только из скважин и трубопроводов, обводнённость напрямую из PROSPER в GAP. В этом случае нет необходимости выполнять проверку корректности передачи процента воды [11].

При подключении моделей пластов MBAL обводнённость в скважины в GAP передаётся на основе кривой обводнённости (зависимость доли добытой воды от водонасыщенности пласта; строится на основе истории работы скважин) (рис. 2).

Такие значения обводнённости могут отличаться от тех, на которые настраивались модели скважин в PROSPER. Поэтому было выполнено сравнение обводнённостей, приходящих из MBAL и заложенных в PROSPER [12]. В случае, если расхождение составляло более 5 %, выполнялась корректировка кривой обводнённости (изменение значений «End Point» или «Exponent» до тех пор, пока значение обводнённости не приблизится к факту в пределах 5 %). Выполненные корректировки значений необходимо отразить как в модели MBAL, так и в модели GAP.

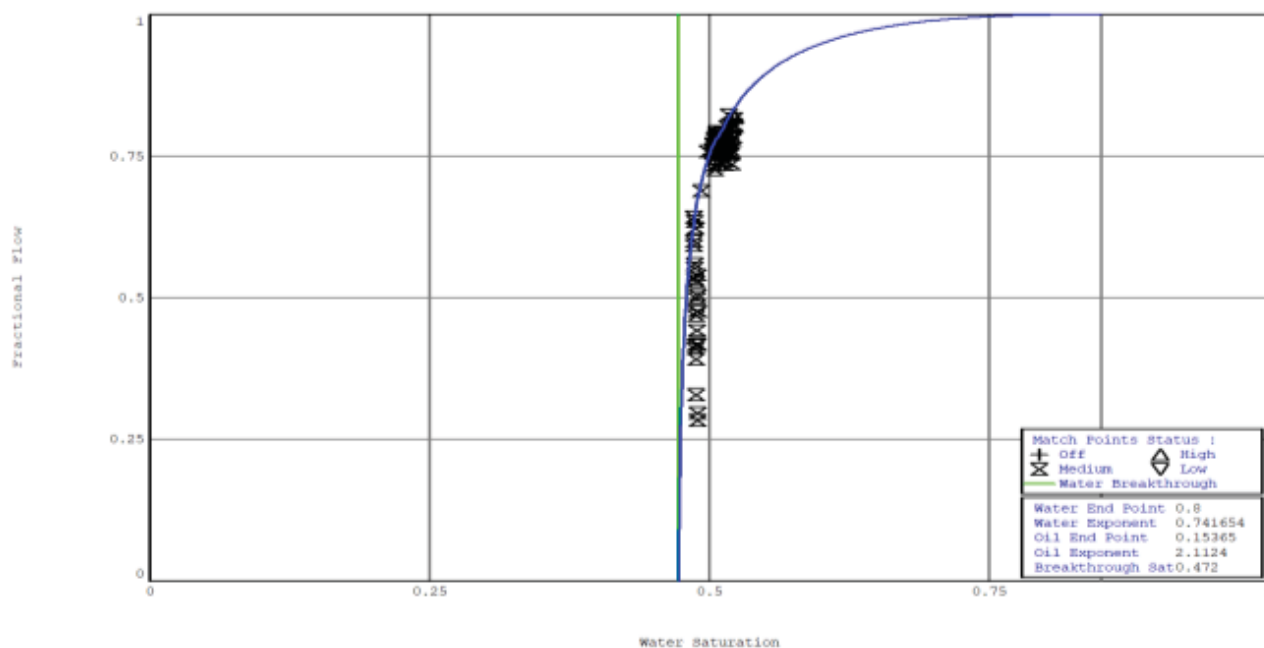


Рис. 2. Кривая обводнённости в MBAL

Fig. 2. Water cut curve in MBAL

В интегрированной модели в GAP для расчёта градиента давления по стволу скважин использовались таблицы VLP, представляющие собой таблицы зависимости забойного давления от дебита жидкости при различных параметрах. Использование таблиц вместо полноценного расчета модели скважин на каждом шаге расчета интегрированной модели позволяет увеличить скорость расчета и осуществить оптимизационные расчеты добычи [13].

Функционал «Model Validation», имеющийся в GAP, позволяет оценить корректность интеграции моделей пластов (индикаторные кривые IPR) с моделями скважин, представленными таблицами VLP. Для данной проверки было выполнено следующее:

- 1) открытие окна «Model Validation»;
- 2) занесение данных по буферным давлениям и дебитам жидкости. Для этого использовалась автоматическая загрузка данных из моделей скважин PROSPER (функция «Transfer latest Well Tests from associated PROSPER files»). Эта функция кроме буферных давлений и дебитов жидкости загружает пластовое давление, частоту установки электроцентробежного насоса, обводненность и газовый фактор (эти значения в процедуре «Model Validation» не использовались, т. к. впоследствии были заменены значениями из секций IPR и VLP моделей скважин в GAP);
- 3) занесение данных с вкладок IPR и VLP из моделей скважин в GAP. Для этого использовалась автоматическая загрузка данных (функция «Transfer Data FROM well VLP/IPR data»);
- 4) выполнение расчётов по каждой скважине (поиск пересечения между кривыми VLP и IPR) и сравнение результатов с фактическими данными;
- 5) анализ причин расхождений для тех скважин, где разница между расчётным и фактическим дебитами жидкости составила более  $1 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Причины могут быть следующие [14–16]:
  - несоответствие внесённых данных по режиму работы скважин тем данным, которые были использованы для настройки моделей скважин. В этом случае указывались корректные данные и процедура расчёта и сравнения повторялась [17];
  - ошибки при генерации кривых IPR или VLP. В этом случае проверялись корректность переноса данных из моделей MBAL и PROSPER в GAP, корректность данных для генерации кривых IPR и VLP, корректность параметра «IPR dP shift». Найденные неточности исправлялись, и процедура расчёта и сравнения повторялась.

Следующим этапом проверки был выполнен расчёт интегрированной модели «на срез». На этом этапе при расчёте добавляются модели системы

сбора и транспорта и системы ППД (система добычи и система нагнетания рассчитываются отдельно друг от друга) [18].

После выполнения расчёта был проанализирован лог расчёта на предмет ошибок и предупреждений.

Далее проводилось сравнение по дебитам жидкости и нефти суммарно и по скважинам, сравнение обводнённости, газового фактора и буферных давлений по каждой скважине [19]. Выгрузка результатов осуществлялась с помощью окна «Results».

После выполнения расчёта «на срез» и получения удовлетворительного результата по сходимости модель считается настроенной на дату актуализации [20].

### Результаты

Следующим этапом проверки выполнялся прогнозный расчёт. На этом этапе при расчёте задействуются модели MBAL, позволяющие спрогнозировать изменение пластового давления в зависимости от накопленной добычи и закачки.

На интегрированной модели был выполнен прогнозный расчёт с даты актуализации с шагом 1 день. В GAP было занесено расписание изменений параметров работы скважин и оборудования, в случае производственной ситуации данный программный комплекс позволяет задать расписание запуска/остановок скважин в требуемые дни, а также внести данные о ремонтах скважин в исследуемый период.

По итогам прогнозного расчета и последующей сверки с фактом получили расхождение в пределах 5 % по уровню добычи за исследуемый период (рис. 3).

Единственное отклонение (выделено красным на рис. 3), которое было выявлено при сравнении с фактическим уровнем добычи, связано с внештатным отказом одного из двигателей газокompресорной станции, что привело к остановке части фонда скважин для сохранения текущего процента утилизации попутного нефтяного газа на уровне бизнес-плана.

Также восходящий тренд от 09.02.2022 связан с выполнением оптимизационных мероприятий по скважинам, предложенным программным продуктом. В совокупности после реализации мероприятий был получен суммарный эффект в объеме 435 т нефти в сутки. Данный эффект был рассчитан с учетом ограничений по инфраструктуре, а также снижению дебитов по фонтанным скважинам ввиду роста линейных давлений по причине увеличения отборов. Более того, дальнейшее снижение по добыче, отраженное на рис. 3, обосновано естественным геологическим снижением, которое также рассчитывается автоматически.



**Рис. 3.** Сравнение добычи нефти посуточно (GAP/ФАКТ)  
**Fig. 3.** Daily oil production comparison (GAP/FACT)

### Выводы

С помощью полученных результатов можно адаптировать компоненты интегрированной модели с точностью более 95 %, что позволяет симулировать режим работы месторождения. В результате анализа были выявлены критерии настройки, а также представлен минимальный необходимый набор параметров для качественной адаптации моделей пласта и инфраструктуры. Также доказана эффективность и точность расчетов посредством сравнения фактических данных о режимах работы с синтетическими. На основании проделанной работы мож-

но сделать вывод о том, что интегрированная модель демонстрирует нам высокое сходжение с реальными данными, что позволяет выбрать наиболее оптимальный режим разработки месторождения. Кроме того, был проведен оптимизационный расчет в целях получения дополнительной добычи нефти с использованием предложенного решения (с суммарным эффектом в 435 т нефти в сутки), а также рассчитан прогноз по добыче нефти сроком на 90 дней, который в дальнейшем получил подтверждение при сравнении с фактическими данными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение интегрированного моделирования в нефтегазовой отрасли / Е.В. Филиппов, Г.Н. Чумаков, И.Н. Пономарева, Д.А. Мартюшев // Недропользование. – 2020. – Т. 20. – № 4. – С. 386–400.
2. Особенности разработки месторождений высоковязкой нефти в условиях низкого пластового давления / А.Н. Иванов, М.М. Велиев, Э.М. Велиев, Л.С. Кулешова, Е.А. Удалова // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 8. – С. 50–52.
3. Повышев К.И., Вершинин С.А., Берниковская О.С. Комплексная модель «Пласт–Скважина–Инфраструктура» и ее возможности // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2016. – № 2. – С. 48–53.
4. Интегрированное моделирование-инструмент повышения качества проектных решений для разработки нефтяных оторочек многопластовых нефтегазоконденсатных месторождений / Р.Т. Апасов, И.Л. Чамеев, А.И. Варавва, О.С. Верниковская, А.Р. Ильясов, В.И. Вирт // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 46–49.
5. Яночкин С.В., Рычков А.Ф. Интегрированное моделирование. Опыт реализации пилотных проектов // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – № 12. – С. 29–30.
6. Проблемы расчетов промысловых систем сбора и транспорта добываемой продукции месторождений высоковязкой нефти / М.М. Велиев, А.Н. Иванов, А.Г. Ахмадеев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 10. – С. 108–111.
7. Интегрированное моделирование как инструмент, повышающий эффективность разработки многопластового нефтегазоконденсатного месторождения / Е.В. Богданов, И.Л. Чамеев, Д.А. Решетников, И.В. Перевозкин, А.В. Ткачук, А.Н. Шорохов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 52–55.
8. Рычков А.Ф., Кадьков И.А. Построение интегрированных моделей месторождений с высокопродуктивными скважинами, в условиях малых значений депрессий на пласт на примере Памятно-Сасовского месторождения // Сб. статей VII Конференции молодых ученых и специалистов Головного офиса ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». – М., 2018. – С. 664–673.
9. Bandilla K.W., Guo B., Celia M.A. Applicability of vertically integrated models for carbon storage modeling in structured heterogeneous domains // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 114. – P. 3312–3321.
10. Towards the development of an integrated modelling framework underpinned by mineralogy / S. Ntlhabane, M. Becker, E. Charikinya, M. Voight, R. Schouwstra, D. Bradshaw // Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 116. – P. 123–131.

11. Создание и эксплуатация интегрированной модели, учитывающей особенности газоконденсатной залежи / В.Г. Зипир, А.Г. Менгалиев, А.Г. Рясный, М.Н. Курбатова, О.М. Рудая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 159–168.
12. Liu C., Li Y., Xu M. An integrated detection and location model for leakages in liquid pipelines // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 175. – P. 852–867.
13. An integrated model for asphaltene deposition in wellbores/pipelines above bubble pressures / Q. Guan, A. Goharzadeh, J. Chai, F.M. Vargas, S.L. Biswal, W.G. Chapman, M. Zhang, Y.F. Yap // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 169. – P. 353–373.
14. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems / B.C. Erdener, K.A. Pambour, R.B. Lavin, B. Dengiz // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – Vol. 61. – P. 410–420.
15. Integrated field operation and optimization / S.D. Rahmawati, C. Whitson, B. Foss, A. Kuntadi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 81. – P. 161–170.
16. Margaret A.W. Modelling and forecasting the supply of oil and gas: a survey of existing approaches // *Journal of Resources and Energy*. – 1992. – Vol. 14. – P. 287–309.
17. Aydin G. Production modeling in the oil and natural gas industry: an application of trend analysis // *Journal of Petroleum Science and Technology*. – 2014. – Vol. 32. – P. 555–564.
18. Оптимизация параметров неорганического агента управления профилем на основе силиката натрия для эффективного вытеснения нефти из коллекторов с высокой минерализацией / Нажису, В.И. Ерофеев, Сянго Лу, Чжунъюань Тянь, Лидонг Чжан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 59–68.
19. Технология бинарных смесей как современный комплексный метод увеличения нефтеотдачи для разработки трудноизвлекаемых запасов на месторождениях Западной Сибири / Р.Н. Коротков, А.А. Коновалов, Д.М. Овчаренко, В.И. Ерофеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 146–153.
20. Китов Е.С., Ерофеев В.И., Джалилова С.Н. Анализ технологий промышленной подготовки природного газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 10. – С. 31–38.

#### Информация об авторах

**Роман Николаевич Коротков**, аспирант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. klimatqwf@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0000-5118-9198>

**Диана Маратовна Овчаренко**, магистрант отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmo4@tpu.ru; <http://orcid.org/0009-0009-5799-2972>

**Владимир Иванович Ерофеев**, доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. erofeevvi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5153-887X>

Поступила в редакцию: 02.10.2023

Поступила после рецензирования: 18.10.2023

Принята к публикации: 17.01.2024

#### REFERENCES

1. Filippov E.V., Chumakov G.N., Ponomareva I.N., Martyushev D.A. Application of integrated modeling in the oil and gas industry. *Nedropolzovanie*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 386–400. (In Russ.)
2. Ivanov A.N., Veliev M.M., Veliev E.M., Kuleshova L.S., Udalovala E.A. Features of the development of high-viscosity oil fields under conditions of low reservoir pressure. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2021, no. 8, pp. 50–52. (In Russ.)
3. Povyshev K.I., Vershinin S.A., Bernikovskaya O.S. Integrated model "reservoir–well–infrastructure" and its capabilities. *PRONEFT. Professionalno o nefii*, 2016, no. 2, pp. 48–53. (In Russ.)
4. Apasov R.T., Chameev I.L., Varavva A.I., Vernikovskaya O.S., Ilyasov A.R., Virt V.I. Integrated modeling as a tool for improving the quality of design solutions for the development of oil rims of multilayer oil and gas condensate fields. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2018, no. 12, pp. 46–49. (In Russ.)
5. Yanochkin S.V., Rychkov A.F. Integrated modeling. Experience in implementing pilot projects. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2018, no. 12, pp. 29–30. (In Russ.)
6. Veliev M.M., Ivanov A.N., Akhmadeev A.G. Problems of calculations of field systems for collecting and transporting produced products from high-viscosity oil fields. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2021, no. 10, pp. 108–111. (In Russ.)
7. Bogdanov E.V., Chameev I.L., Reshetnikov D.A., Perevozkin I.V., Tkachuk A.V., Shorokhov A.N. Integrated modeling as a tool that increases the efficiency of the development of a multilayer oil and gas condensate field. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2019, no. 12, pp. 52–55. (In Russ.)
8. Rychkov A.F., Kadykov I.A. Building integrated models of fields with highly productive wells under conditions of low reservoir pressure drawdowns on the example of the Pamyatno-Sasovskoe field. *Proc. of the VII Conference of Young Scientists and Specialists of the Head Office of OOO LUKOIL-Engineering*. Moscow, 2018, pp. 664–673 (In Russ.).
9. Bandilla K.W., Guo B., Celia M.A. Applicability of vertically integrated models for carbon storage modeling in structured heterogeneous domains. *Energy Procedia*, 2017, no. 114, pp. 3312–3321.

10. Ntlhabane S., Becker M., Charikinya E., Voight M., Schouwstra R., Bradshaw D. Towards the development of an integrated modelling framework underpinned by mineralogy. *Minerals Engineering*, 2018, no. 116, pp. 123–131.
11. Zipir V.G., Mengaliev A.G., Ryasny A.G., Kurbatova M.N., Rudaya O.M. Creation and exploration of the integrated model, taking into account the features of the gas condensate deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 159–168. (In Russ.)
12. Liu C., Li Y., Xu M. An integrated detection and location model for leakages in liquid pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 175, pp. 852–867.
13. Guan Q., Goharzadeh A., Chai J., Vargas F.M., Biswal S.L., Chapman W.G., Zhang M., Yap Y.F. An integrated model for asphaltene deposition in wellbores/pipelines above bubble pressures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, no. 169, pp. 353–373.
14. Erdener B.C., Pambour K.A., Lavin R.B., Dengiz B. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, no. 61, pp. 410–420.
15. Rahmawati S.D., Whitson C., Foss B., Kuntadi A. Integrated field operation and optimization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, no. 81, pp. 161–170.
16. Margaret A.W. Modelling and forecasting the supply of oil and gas: a survey of existing approaches. *Journal of Resources and Energy*, 1992, vol. 14, pp. 287–309.
17. Aydin G. Production modeling in the oil and natural gas industry: an application of trend analysis. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 2014, no. 32, pp. 555–564.
18. Nazhisu, Erofeev V.I., Lu Syango, Tyan Chzhunyuanyuan, Chzhan Lidong. Optimization of the parameters of an inorganic sodium silicate profile control agent for efficient oil displacement from reservoirs with high salinity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 59–68. (In Russ.)
19. Korotkov R.N., Kononov D.M., Ovcharenko D.M., Erofeev V.I. Binary mixture technology as a modern complex method of increasing oil recovery for the development of hard-to-recover reserves in the fields of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 146–153. (In Russ.)
20. Kitov E.S., Erofeev V.I., Dzhaililova S.N. Analysis of technologies for field treatment of natural gas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 31–38. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Roman N. Korotkov**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. klimatqwf@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0000-5118-9198>

**Diana M. Ovcharenko**, Master Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmo4@tpu.ru; <http://orcid.org/0009-0009-5799-2972>

**Vladimir I. Erofeev**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. erofeevvi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-5153-887X>

Received: 02.10.2023

Revised: 18.10.2023

Accepted: 17.01.2024

УДК 553.2:549.283 (571.56)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462  
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

## Особенности определения металлоорганических соединений в углеродистых веществах черносланцевых отложений с применением ИК-спектроскопии диффузного отражения

В.П. Иванов, Т.В. Тимкин<sup>✉</sup>, Д.А. Болдина, М.Г. Пахтаева

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

<sup>✉</sup>timkin@tpu.ru

**Аннотация. Актуальность.** Проблема изучения металлоорганических соединений в углефицированных и углеродистых веществах является частью глобальной проблемы строения природных материалов из растительных остатков и проявления рудогенеза в органических осадочных отложениях. Данная проблема охватывает ряд вопросов, среди которых особо остро стоит вопрос форм нахождения тонкодисперсного золота в виде металлоорганических соединений в металлоносных углях и сланцах, и особенно это касается крупных золоторудных месторождений черносланцевых толщ. **Цель:** и изучить взаимосвязи седиментации органических образований и рудогенеза в черносланцевых отложениях на примере Вернинского месторождения (Патомское нагорье, Иркутская область). С помощью аппаратно-программного комплекса СКАУФВ совместно с методами ИСП-МС и ИНАА, позволяющими оценить степень концентрации Au в углеродистом веществе, обосновать возможность определения металлоорганических соединений золота, значимого в процессах седиментогенеза, литогенеза и эпигенеза. **Методы:** методы ИК-спектроскопии, инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). **Результаты.** Установлено, что аппаратно-программный комплекс СКАУФВ совместно с методами ИСП-МС и ИНАА позволяет более достоверно обозначить роль органического вещества в процессе проявления метасоматизма. В рудной зоне намечена температурная зональность и связанная с ней повышенная концентрация золота. Для определения металлоорганических соединений Au были выбраны структурно-генетические показатели (Pm, Ko, P<sub>Vt+L</sub>, Pl), отражающие степень влияния процессов седиментации, диагенеза, катагенеза и эпигенеза на концентрацию Au в углеродистом веществе. По этим показателям определяли уровень температурного воздействия на осадочные отложения процессов регионального метаморфизма и околорудного метасоматизма. В связи с этим в рудной зоне были установлены подзоны концентрации Au, обусловленные температурной зональностью в виде проявления локального метасоматизма, на который оказывал влияние белково-жировой состав растений – образователей углеродистого вещества.

**Ключевые слова:** металлоорганические соединения, углеродистое вещество, золото, черные сланцы, ИК-спектроскопия

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00013.

**Для цитирования:** Особенности определения металлоорганических соединений в углеродистых веществах черносланцевых отложений с применением ИК-спектроскопии диффузного отражения / В.П. Иванов, Т.В. Тимкин, Д.А. Болдина, М.Г. Пахтаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 141–156. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462

---

UDC 553.2:549.283 (571.56)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462

## Features of determining organometallic compounds in organic matters of black shale using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy

V.P. Ivanov, T.V. Timkin<sup>✉</sup>, D.A. Boldina, M.G. Pakhtaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>✉</sup>timkin@tpu.ru

**Abstract. Relevance.** The problem of studying organometallic compounds in carbonized and carbonaceous substances is a part of the global problem of the structure of natural materials from plant remains and manifestation of ore genesis in organic sedimentary deposits. This problem covers a number of issues. The most pressing one among them is the form of occurrence of finely dispersed gold in the form of organometallic compounds in metal-bearing coals and shales. This is especially true for large gold deposits of black shale strata. **Aim.** To study the relationship between sedimentation of organic formations and ore genesis in black shale deposits using the example of the Verninskoe deposit (Patom Highland, Irkutsk Region). Using the SKAUFV hardware and software complex together with ICP-MS and INAA methods, which allow one to assess the degree of Au concentration in organic matter, to substantiate the possibility of determining organometallic compounds of gold that are significant in the processes of sedimentogenesis, lithogenesis and epigenesis. **Methods.** IR spectroscopy, instrumental neutron activation analysis (INAA) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). **Results.** The authors have determined that the SKAUFV hardware and software complex, together with the ICP-MS and INAA methods, makes it possible to establish the role of organic matter in metasomatism and to identify temperature zonality and the associated gold concentration in the ore zone. To determine the organometallic compounds of Au, structural and genetic indicators (Pm, Ko, P<sub>Vt+L</sub>, P<sub>J</sub>) were selected. These indicators reflect the significance of sedimentation, diagenesis, catagenesis and epigenesis on Au concentration in organic matter. These indicators made it possible to assess the level of temperature impact on sedimentary deposits of regional metamorphism and near-ore metasomatism. In this regard, subzones of Au concentration were established in the ore zone, determined by temperature zoning in the form of a manifestation of local metasomatism. The latter was influenced by the protein-fat composition of plants that form organic matter.

**Keywords:** organometallic compounds, organic matter, gold, black shales, IR spectroscopy

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-27-00013.

**For citation:** Ivanov V.P., Timkin T.V., Boldina D.A., Pakhtaeva M.G. Features of determining organometallic compounds in organic matters of black shale using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 141–156. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462

### Введение

Черные сланцы – это мелкозернистые, тонкослоистые осадочные породы, обогащенные органическим углеродистым веществом, в которых неорганическая фракция может быть практически любого состава [1–4]. Черносланцевые отложения, представленные углеродистыми образованиями, имеют «сквозное» осадконакопление от раннего протерозоя до позднего мезозоя [5]. В них содержатся высокие концентрации металлов золота, платины, серебра, однако, например, чёрные сланцы баженовской свиты являются перспективным объектом для добычи углеводородов в категории «сланцевая нефть», оставаясь привлекательным объектом для изучения закономерностей их металлоносности [6–9]. Основная проблема в изучении черносланцевых толщ – это отсутствие комплексного изучения углеродистых

веществ (УВ) в них, которые могут содержать рассеянное органическое вещество (РОВ) до 5 % или более 5 %, например, в упомянутой баженовской свите (до 15 %). В свою очередь, само органическое вещество (ОВ) различается по мацеральному составу, т. к. формировалось в разных условиях седиментации и претерпело различные структурно-химические преобразования в ходе катагенеза [10].

При переработке золоторудных месторождений черносланцевых толщ основное внимание уделяется золоту, связанному с сульфидами, тогда как тонкодисперсное золото, связанное с углеродом, в настоящее время слабо изучается и не извлекается. Более того, образующиеся органоминеральные битуминозные отходы после извлечения золота становятся опасным фактором загрязнения окружающей среды [11].

Другим аспектом является отсутствие более чёткого понимания в таких вопросах, как: реконструкция седиментационных механизмов образования органического вещества и возникновения процессов рудообразования; определение форм золота и их нахождения в структуре ОВ; роль металлоорганических соединений, их связи с органическими соединениями, состоящими из комбинаций связей С, N, H, O. К этому можно добавить ограниченное применение методов на основе ИК-спектроскопии (ИКС) в изучении органических сланцев, однако этот метод используется в качестве экспресс-анализа для оценки качества углей на коксохимических производствах.

Под термином «металлоорганические соединения (МОС)» авторы понимают соединения, содержащие надмолекулярные связи металл–углерод в виде кластеров. Они относятся к междисциплинарной области изучения углефицированных и углеродистых веществ, позиционируемых на стыке неорганической и органической химии и молекулярной и супрамолекулярной химии. Поскольку надмолекулярные комплексы демонстрируют уникальные связи и структуры металлов с ОВ [12], детальное исследование МОС значительно продвигает понимание многообразия химических связей в виде кластеров.

Установление биогеохимического преобразования ОВ в виде металлоносности тонкодисперсного золота и других микроэлементов с помощью ИКС [13] становится менее затруднительным при исследовании УВ, как и изучение в углеродистых веществах МОС наряду со структурным строением ОВ. Этот подход является актуальным, т. к. вопрос образования тонкодисперсного золота до сих пор остаётся дискуссионным. Так, например, считается, что в результате хемосорбции золота и платины в УВ образуются металлоорганические комплексы за счёт кислородсодержащих (карбонильных и карбоксильных) соединений при активном участии углеводородов [14, 15]. При этом аргументация [16], что появление металлофуллеренов происходит за счёт окислительно-восстановительной среды золота с фуллеренами, весьма убедительна, как и металлогенические черты наиболее крупных проявлений антракосолита [17], которые прослеживаются в углеродистых веществах.

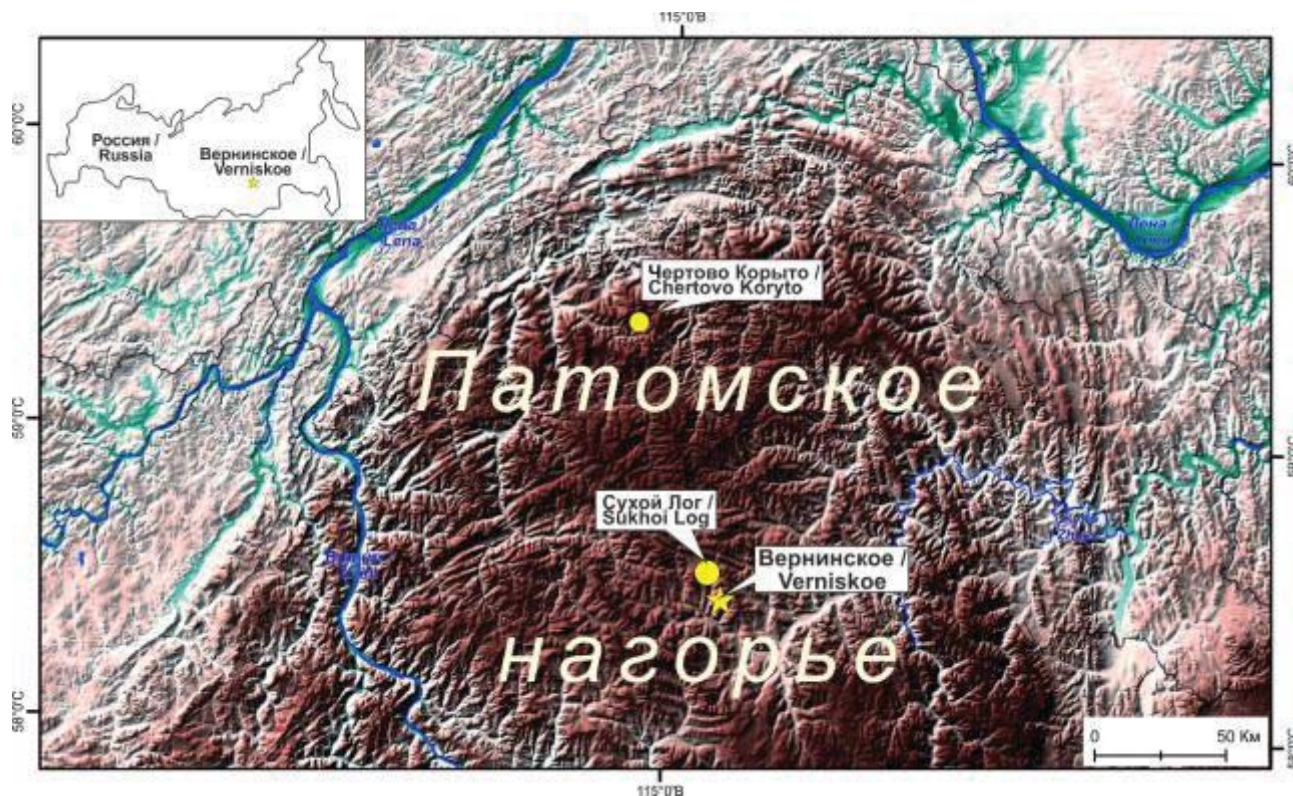
В целом, по мнению авторов, можно обеспечить контроль рудообразования золота по результатам изменения структуры органоминеральных вмещающих пород и руд черносланцевого типа и содержания Au на таких месторождениях, как Сухой Лог, Вернинское и Чёртово Корыто. В геологическом отношении структуры данных месторождений имеют сходство, поэтому в данной статье приводятся результаты исследования рудной зоны Вернинского месторождения.

Направление данной работы – это изучение проблемы взаимосвязи седиментации органических отложений и рудогенеза в черносланцевых отложениях на примере Вернинского месторождения. В ней особое внимание уделяется (1) возможностям применения авторского аппаратно-программного комплекса СКАУФВ, позволяющего определять количественно кластеры органической части структуры и МОС; (2) поиску взаимосвязей функциональных структурных единиц (ФСЕ) и МОС, представляющих в структуре УВ кластерные образования, типа клатраты – формы связи функциональных групп (С-N, С-С, С-H) с золотом.

### **Месторождения чёрных сланцев и роль золота в углеродистых веществах**

Орогенные месторождения золота, связанные с формированием метаморфических складчатых поясов, такие как Сухой Лог, Кумтор, Мурунтау, Калгурли, Колар и др., являются основными источниками запасов золота, которые в настоящее время добываются в России и в мире [18–24]. В то же время ведущая роль в мировой добыче золота принадлежит орогенным месторождениям, связанным с углеродисто-терригенными комплексами черных сланцев, из-за их широкого распространения и более высокого рудного потенциала [25]. Несмотря на долгую историю изучения таких месторождений, их происхождение по-прежнему остается предметом научных дискуссий [26–31]. Бодайбинский район, расположенный в Иркутской области России, является одной из крупнейших золотодобывающих провинций в мире. За более чем 200-летнюю историю поисковых работ здесь было добыто более 1500 т золота. В настоящее время его потенциальные ресурсы оцениваются примерно в 4000 т, а годовая добыча золота превышает 20 т [32]. Основные запасы коренного золота локализованы в докембрийских отложениях черносланцевой формации Байкало-Патомской складчатой зоны. Здесь обнаружено более десятка крупных (например, Вернинское месторождение с запасами около 400 т), средних (например, Чёртово Корыто с запасами около 100 т) и мелких (например, Ожерелье – 5 т) месторождений золота, в том числе гигантское месторождение Сухой Лог (около 2000 тонн золота и 1500 тонн серебра) (рис. 1) [33–36]. В данных месторождениях выделяются два типа оруденения, первый в виде прожилково-вкрапленных сульфидных штокверков, и второй – кварцево-жилный с самородным золотом. Оба типа руд часто пространственно связаны в месторождениях, поэтому им свойственны отдельные генетические признаки и характеристики, и некоторые из них рассматриваются в данной статье, несмотря на обширные геологические исследования, модели рудообразования для месторождений золота черносланцевого типа в Бодайбинском районе остаются спорными.





**Рис. 1.** Схема местоположения объектов изучения (месторождения: Вернинское, Сухой Лог, Чертово Корыто) в пределах Патомского нагорья

**Fig. 1.** Location diagram of study objects (deposits: Verninskoye, Sukhoi Log, Chertovo Koryto) within the Patom Highlands

В настоящее время существуют две основные гипотезы, включающие магматогенно-гидротермальное и метаморфогенно-гидротермальное рудообразование. Согласно магматогенно-гидротермальной гипотезе, золотое оруденение генетически связано с палеозойским гранитоидным магматизмом, послужившим источником гидротермальных флюидов и металлов [27, 37–41]. Метаморфогенно-гидротермальная гипотеза предполагает ведущую роль регионального метаморфизма на регрессивном его этапе, при котором образовывались рудообразующие растворы, а основные концентрации золота и связанных с ним компонентов накапливались в породном субстрате сланцев и осадочно-диагенетическом пирите [31, 42–45].

Существующие разногласия по поводу происхождения месторождений черносланцевого типа в значительной степени вызваны тем, что до сих пор остается нерешенным важный вопрос о взаимосвязи седиментации органических отложений и образования золотого оруденения (источнике золота).

С точки зрения роли ОВ в образовании месторождений золота в черносланцевых толщах можно отметить следующие особенности [46, 47]. Во-первых, типичной является геохимическая ситуация, когда в золотоносных черносланцевых породах не обнаруживается прямой связи золота с ОВ,

на одних и тех же месторождениях встречаются зоны, как обогащенные, так и обедненные ОВ по сравнению с зонами рудных концентраций. Во-вторых, в сульфидах содержание золота возрастает в зонах вторичных преобразований с одновременным снижением концентраций во вмещающих породах. В-третьих, определено, что при метаморфизме происходит вынос золота, находящегося в ассоциации с ОВ (химически связанного или сорбированного).

Также установлено, что в морской воде за счёт водорослей происходит накопление золота в высокой концентрации, в частности, аэробных грамположительных бактерий *Micrococcus luteus*, обладающих способностью связывать Au в средах [46]. При этом выделяют четыре стадии биохимического взаимодействия бактерий с золотом: 1) разрушение минералов золота и его вынос; 2) растворение золота, в ходе которого микроорганизмы поставляют органические лиганды, связывающие Au; 3) образование коллоидных растворов Au; 4) укрупнение и осаждение коллоидного Au. Последняя стадия приводит к образованию оболочек «биогенного» высокопробного Au на поверхности частичек золота.

Отмечается, что концентрирование Au и образование его месторождений должно происходить в условиях, когда перенос сменяется осаждением

вследствие разрушения носителей в зонах повышения температуры. А именно, при участии карбоновых, гуминовых и фульвокислот в структуре УВ формируются (200 °С) активные комплексообразователи. Это происходит за счет миграции золота в составе органоминеральных соединений гумусового и битумного происхождения при термической стабильности, которая не превышает 100–200 °С.

С помощью нейтронно-активационной автордиографии установлено, что в зонах проявления высокотемпературного преобразования химического состава пород и в зоне метасоматизма в рудоносных породах концентрация золота возрастает, достигая  $10^{-4}$ – $10^{-2}$  %. Вне зоны метасоматизма в породах среднее содержание Au низкое ( $10^{-5}$  %), в ОВ –  $3 \cdot 10^{-4}$  % [46].

Часто в породах ОВ вытесняется и образует жильные тела, в которых ОВ – это сильно изменённый графитизированный материал и в нём концентрация золота снижается до  $4 \cdot 10^{-6}$  % в сравнении с ОВ неизменённых пород. То есть исходное ОВ играло роль носителя Au, а метасоматизм сопровождался выносом золота из ОВ и его перераспределением в минеральную составляющую рудоносных пород. Таким образом, в условиях термической деструкции ОВ золото переходит в элементное состояние, приобретая способность к последующей миграции, но уже в составе минеральных фаз, и по В.И. Вернадскому [48], «транспортная» функция ОВ на этом завершается.

### Фактический материал и методы исследования

На Вернинском месторождении был выбран блок разработки рудной зоны (рис. 2, а), на котором по схеме были отобраны образцы (рис. 2, б). Интервал рудной зоны составляет 128 м, а интервал опробования – 168 м, поэтому по рудной зоне отобрано 18 образцов и два оконтуривающих образца с интервалом между точками отбора 1 м. Вне рудной зоны в интервале 20 м от южной и северной границ были отобраны ещё два образца на расстоянии 10 м (рис. 2, б).

Отбор аналитических навесок производился методом препарирования путём скалывания от образца углеродистого вещества с последующим его истиранием и просеиванием через сито для отделения класса <0,2 мм, требуемого для анализа ИК-спектроскопии диффузного отражения (в порошке). Далее из этой же аналитической пробы отделялась навеска с последующим её истиранием до крупности 0,074 мм для проведения количественного инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС).

ИК-спектроскопия проводилась в лаборатории исследования углей отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета, а ИНАА – в ядерно-геохимической лаборатории международного исследовательского научно-образовательного центра «Урановая геология» при Томском политехническом университете (Томск, Россия).

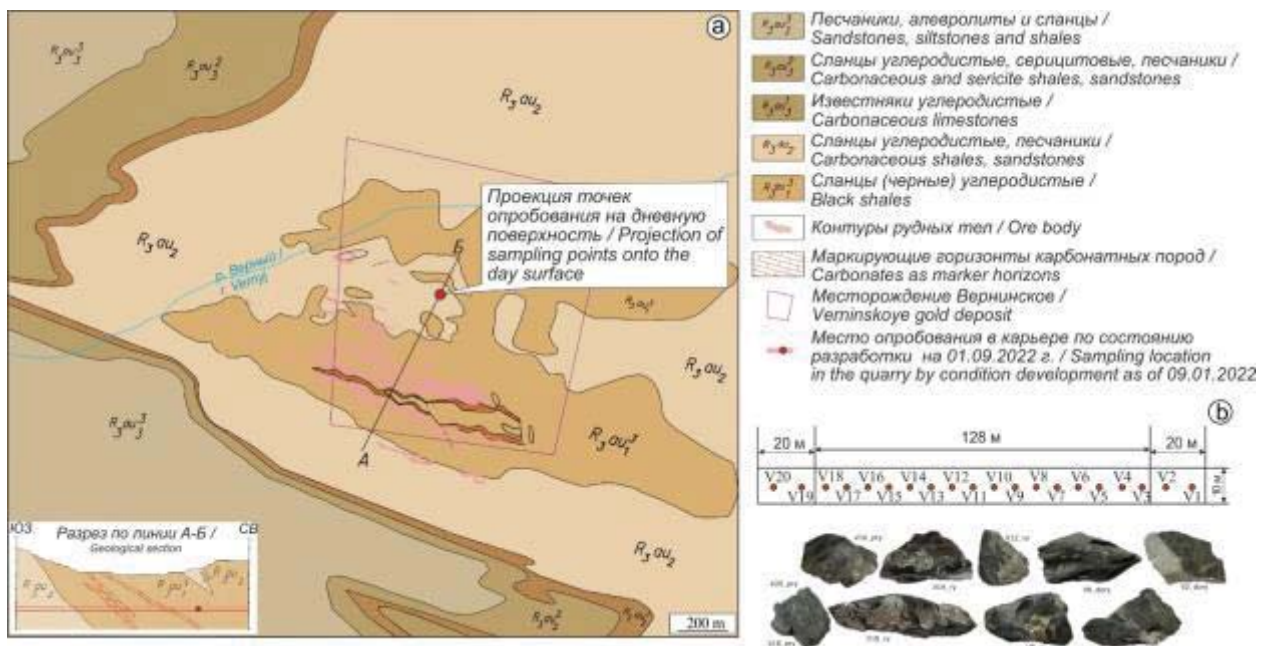


Рис. 2. а) геологическая карта и разрез Вернинского золоторудного месторождения; б) схема расположения точек отбора образцов по рудному блоку и их фотографии

Fig. 2. а) geological map and section of the Verninskoe gold deposit; б) diagram of the location of sampling points for the ore block and their photographs

Химические анализы проводились с использованием метода ИСП-МС в Аналитическом центре «Плазма», г. Томск. Содержание на 62 элемента в черных сланцах оценивали без предварительного озоления методом открытого кислотного разложения ( $\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF}$ ). Авторы отталкивались от утверждения, что корреляция между результатами ИСП-МС и ИНАА является удовлетворительной [49].

ИК-спектрометрические исследования золота, находящегося в углеродистом веществе в свободной (в виде зерна) и ультрадисперсной форме, проводились по спектру в диапазоне волновых чисел от 350 до 7500  $\text{cm}^{-1}$  с помощью спектрометра IRAffinity-1 с преобразователем Фурье (DRIFTS) производства Shimadzu Corp. (Япония).

Для получения спектральной визуализации используется порошок крупностью <0,2 мм, помещающийся в семь кювет, которые располагаются на металлическом держателе, а в целом спектральный анализ одного образца выполняется в параллельных измерениях, т. е. сканируется 14 аналитических навесок – это не менее 5000 сканирований. Такой подход позволяет получать спектры отражения, сопоставимые со спектрами пропускания инфракрасного луча.

Обработка ИК-спектра проводилась аппаратно-программным комплексом (АПК «СКАУФВ») [50, 51], позволяющим одновременно проводить четыре вида анализов. *Структурно-групповым анализом* (СГА) оценивать на атомарно-молекулярном уровне состав структурообразующих функциональных групп в виде валентных связей на полосе 7500  $\text{cm}^{-1}$  винилокси соединения ( $\text{OCHCH}_2$ ), на 4000  $\text{cm}^{-1}$  – оксетаны ( $>\text{C}=(\text{CH}_2)_2=\text{O}$ ), на полосах 3400 и 3300  $\text{cm}^{-1}$  –  $\text{INH}_2$  и  $\text{NH}$ -группы, на полосе 3040  $\text{cm}^{-1}$  –  $\text{CH}$ -ненасыщенные группы, на полосах 2920 и 2860  $\text{cm}^{-1}$  –  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  метиленовые и метильные группы, на полосе 2000  $\text{cm}^{-1}$  – кумулированные группы ( $\text{C}=\text{C}=\text{N}$ ,  $\text{C}=\text{N}=\text{S}$ ), на полосе 1690  $\text{cm}^{-1}$  – карбоксильные группы ( $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}$ ), на полосе 1600  $\text{cm}^{-1}$  – каркасные  $\text{C}-\text{C}$ -группы. В виде *деформационных связей* на полосах 1650 и 1550  $\text{cm}^{-1}$  – это амид I ( $\text{NC}=\text{O}$ ), свободные амиды с  $\text{H}$ -связью, лактамы с 6, 7 членными циклами, и амид II – это полипептиды, на полосах 1450 и 1375  $\text{cm}^{-1}$  – метиленовые и метильные группы, на полосе 1260  $\text{cm}^{-1}$  – эфирные группы ( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ). На полосах 1090  $\text{cm}^{-1}$  – простые спирты и сложные эфиры,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  – кремнийорганические соединения,  $\text{P}-\text{H}$  {пример, фосфины ( $\text{RO})_2\text{HP}=\text{O}$ }, а на 1030  $\text{cm}^{-1}$  – сложные спирты,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  и  $\text{R}-\text{SO}_2$  – кремний и сераорганические соединения. Все они в виде валентных и деформационных связей представляют неорганические соединения.

*Структурно-кластерным анализом* (СКА) определять по структурообразующим функциональным группам ФСЕ, которые в изометрии позиционируются клатратами [51]. Они состоят из плоскостных ( $\nu\text{OCO}$ ,  $\nu\text{NH}$ ,  $\nu\text{CH}$ ,  $\nu\text{CCN}$  и/или  $\nu\text{CNS}$ ,  $\nu\text{CC}$ ), межплоскостных ( $\delta\text{NH}$ ,  $\delta\text{CH}$ ,  $\delta\text{COC}$ ), а также комбинированных связей ( $\nu+\delta$  *inorg*), отражающих формы неметаллов – элементов органической части углеродистого вещества.

*Структурно-генетическим анализом* (СГП) определять параметры Пм, Пг,  $\text{P}_{\text{I}+\text{L}}$  к П<sub>г</sub>, П<sub>в</sub>, К<sub>о</sub> с использованием частот D4000, D3040, D2920, D2860, D2000, D1690, D1600, D1260  $\text{cm}^{-1}$  [52], отражающих влияние геологических факторов (седиментацию, диагенез, катагенез, эпигенез) на структуру УВ. Показатель метаморфизации (Пм) в виде отношения интенсивности диффузного отражения (ДО) на полосах 3040/0,1(2920+2860+1260) позволяет устанавливать степень воздействия температуры на органическую массу растительного осадка или сформированного углеродистого вещества. Показатель гелификации (Пг) характеризуется отношением показателя  $\text{P}_{\text{I}+\text{L}}$  к П<sub>г</sub> и оценивает степень преобразования растительных осадков в органический сланец. Показатель  $\text{P}_{\text{I}+\text{L}}$ , а это отношение интенсивно ДО на полосах 0,3\*2860+2920+D2860/D1260, оценивает наличие активной (углеводородной) органической части УВ, а показатель П<sub>г</sub> в виде отношения интенсивности на полосах (1600+3040)-/(2920+2860)/1260 – инертную (карбоновую) органическую часть УВ. Показатель восстановленности (Пв) отношением на полосах 3040+2860/2920+(4000-2000) отражает биогеохимическую обстановку преобразования растительных осадков в органический сланец, а показатель окисленности (К<sub>о</sub>) отношением полос 1690/1260+3040 позволяет определять накопление кислорода в виде карбоксильных групп в структуре, образовавшихся на стадии седиментации или в процессе вторичного изменения УВ.

*Структурно-кластерный анализ металлоорганических соединений* (СКАМОС) направлен на выявление и измерение степени концентрации МОС золота. Они хорошо диагностируются на ИК-спектре по справочным таблицам [53] на полосах 2163, 2130, 2053, 1088, 775, 700, 667, 652, 590, 586, 583, 571, 570, 561, 550, 545, 540, 526, 517, 474, 458, 444, 430, 413  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 3). Наиболее характерные полосы для диагностики золота представлены в табл. 1.

Установлено [53], что золото в структуре УВ может быть в форме кластеров  $[(\text{CH}_3)_2\text{Au}(\text{NCS})]_2$  или  $[(\text{CH}_3)_2\text{AuCl}]_2$ , т. е. в основном тиоциановая и галогенная формы золота, которая по энергии связи совпадает с метильной в виде мостиков, тогда форма золота азотная (табл. 1).

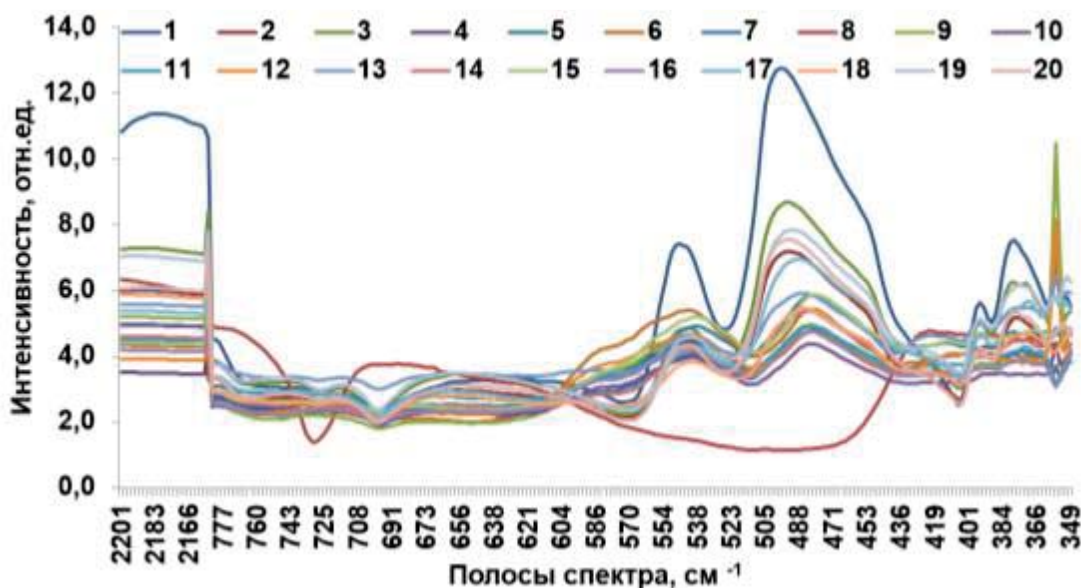


Рис. 3. Спектральная характеристика образцов №№ 1–20 в интервалах 2201–2166, 777–350 см<sup>-1</sup>  
 Fig. 3. Spectral characteristics of samples no. 1–20 in the intervals 2201–2166, 777–350 cm<sup>-1</sup>

Таблица 1. Характеристика металлоорганических соединений золота  
 Table 1. Characteristics of gold organometallic compounds

Форма координации Form of coordination	Название МОС и металл комплексов, формула Name of organometallic compounds and metal complexes, formula	Пример в изометрии Isometric example	Полосы ИК спектра, см <sup>-1</sup> IR spectrum bands, cm <sup>-1</sup>
Плоская квадратная – плоскостные связи Flat square – planar connections	Традиционные и изотиоцианатные Traditional and isothiocyanate [(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Au(NCS) <sub>2</sub> ]		2163 ν(CN) 775 ν(CS)
Плоскостная квадратная в цис- положении – межплоскостные связи Planar square in cis position – interplanar connections	Тиоцианатные и изотиоцианатные через N-мостики – ν(AuN) / Thiocyanate and isothiocyanate through N-bridge – ν(AuN)		444, 430 δ(CNS)
Плоская квадратная – плоскостные связи тетрамерной структуры Flat square – planar bonds of tetrameric structure	Мостиговые метильные -цис-[(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AuX <sub>2</sub> ] Bridging methyl -cis-[(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AuX <sub>2</sub> ]		571, 561 совпадают с 444, 430 571, 561 are the same as 444, 430
Плоская квадратная – плоскостные связи Flat square – planar connections	Метилгалогенидные – общая формула цис- Methyl halide – general formula cis- [(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AuX <sub>2</sub> ] [(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AuCl] <sub>2</sub>		571, 561, 550, 545
Цис и транс NCS или SCN – плос- костные и межплоскостные связи Cis and trans NCS or SCN – planar and interplanar connections	Псевдогалогенидные комплексы – K[Au(-SCN) <sub>4</sub> ] Pseudo-halide complexes – K[Au(-SCN) <sub>4</sub> ]		2130, 1088, 700, 458, 413

МОС золота в виде кластера [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Au(NCS)]<sub>2</sub> на спектре идентифицируется на полосе 2163 см<sup>-1</sup> в виде валентной связи νCN, на полосе 775 см<sup>-1</sup> – νCS, которые характеризуют связи в плоскости молекул, на полосах 444 и 430 см<sup>-1</sup> это межплоскостные связи соединений δNCS или δCH. МОС золота кластера [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>AuCl]<sub>2</sub> идентифицируются как валентные колебания связи ν(MC) на полосах 571,

561, 550, 545 см<sup>-1</sup>, т. е. отображаются связи фрагмента данного соединения в виде Au(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, если атом золота образует плоскую квадратную конфигурацию с двумя метильными группами цис-положения. Однако нередко возникают псевдогалогенидные комплексы K[Au(-SCN)<sub>4</sub>], часто на полосах 2130, 700 см<sup>-1</sup> (табл. 1).

**Результаты и обсуждения**

Рассматриваемые результаты исследования образцов, отобранных в рудной зоне на участке Вернинского месторождения, могут являться основой для нового подхода в изучении концентрации золота, форм его нахождения в углеродистом веществе. Для этого использовались методы ИСП-МС, ИНАА и АПК СКАУФВ на базе ИК спектрометра с преобразователем Фурье.

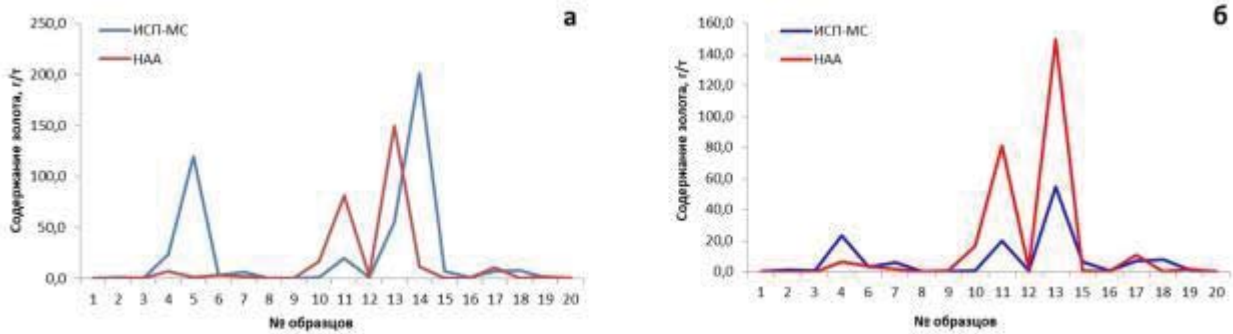
Увязку результатов и их интерпретацию, изложенные в данной статье, следует рассматривать как попытку авторов предложить новый взгляд на выделение рудных подзон, учитывая роль ОВ в эпигенетическом наложении в виде вторичного прогрева сланцевых отложений биогенного происхождения, тем самым шире понимать метасоматизм и его влияние на образование рудного золота.

**Таблица 2.** Результаты изменения концентрации Au в разрезе рудной зоны/блока (по данным ИСП-МС, ИНАА, СГА, СКА, СГП, СКАМОС и температурной зональности)

**Table 2.** Results of changes in Au concentration in the section of the ore zone/block (according to ICP-MS, INAA, SGA, SKA, SGP, SKAMOS data and temperature zoning)

№ образца Sample no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Содержание золота, г/т/Gold content, g/t																				
ИСП-МС	0,1	1,4	0,7	23,6	119,8	3,3	6,2	0,2	0,2	1,0	19,9	0,9	54,9	201,5	6,8	0,9	6,9	8,2	1,3	0,4
ИНАА	0,0	0,0	0,0	1,4	0,2	0,7	0,3	0,0	0,1	3,3	16,3	0,5	29,9	2,4	0,1	0,1	2,2	0,0	0,3	0,0
Структурно-групповой анализ (СГА)/Structural group analysis (SGA), %																				
D7500	2,4	7,9	7,0	15,7	10,4	8,3	4,7	6,9	11,7	5,9	12,0	10,9	19,6	11,8	9,9	10,3	9,2	5,6	6,2	8,2
D4000	0,5	5,7	4,8	11,9	6,9	6,8	0,9	2,0	9,6	2,4	7,5	6,9	14,9	10,7	8,6	8,4	8,4	4,1	4,4	7,1
D3400	3,6	1,1	1,2	0,1	0,5	0,0	0,5	3,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,1	0,2	0,6	0,7	1,0	0,8
D3300	2,8	2,8	2,4	4,2	5,0	4,5	7,8	2,8	5,1	7,7	6,1	6,3	3,4	4,5	4,5	5,2	3,0	4,8	2,3	1,8
D3040	0,6	1,1	0,9	2,0	2,0	1,8	3,3	1,7	2,1	3,1	2,6	2,4	1,5	1,7	2,0	2,4	1,1	2,3	1,0	0,6
D2920	0,3	1,4	1,7	1,5	0,9	0,1	1,2	6,6	0,3	0,6	0,7	0,2	1,4	0,7	1,1	0,9	0,5	1,9	2,0	0,9
D2860	0,4	1,5	2,0	1,6	1,0	0,0	1,2	6,1	0,2	0,6	0,7	0,2	1,6	0,8	1,1	0,7	0,6	2,0	2,3	1,0
D2000	20,8	19,0	19,4	19,9	16,6	14,3	12,1	0,9	17,8	11,5	17,3	15,0	21,9	20,1	17,9	17,7	18,6	16,0	17,2	19,7
D1690	4,5	7,4	7,9	9,4	9,4	6,0	11,4	15,2	7,1	9,3	8,8	7,1	6,2	8,2	10,2	9,1	6,4	10,4	8,8	6,4
D1650	3,8	5,7	6,5	8,5	6,3	3,6	5,7	17,0	3,7	3,4	4,3	2,8	3,6	4,8	8,4	6,4	4,7	7,4	7,4	5,3
D1600	9,2	10,6	11,1	6,8	11,0	7,7	14,4	8,7	9,0	12,1	10,7	8,7	7,1	10,7	8,9	10,6	9,8	12,6	11,6	10,0
D1550	3,6	0,8	0,1	0,1	0,1	4,3	0,1	0,0	1,6	0,2	0,2	1,4	0,1	-0,1	0,1	0,1	2,5	0,1	1,0	1,7
D1450	9,7	10,3	9,0	5,5	14,5	14,8	18,7	7,3	14,1	17,9	13,9	13,6	7,0	13,1	10,6	13,8	11,6	12,9	11,7	9,6
D1375	22,1	12,5	13,2	8,6	12,4	10,6	13,7	14,0	10,6	11,1	9,4	7,6	5,5	11,4	9,9	12,2	12,1	12,4	12,5	13,5
D1260	15,7	12,2	12,8	4,1	3,1	17,2	4,2	7,5	6,8	13,7	5,5	16,5	5,7	1,0	6,9	1,8	10,7	6,8	10,6	13,2
Структурно-кластерный анализ органической части (СКА)/Structural cluster analysis of organic part (SCA), %																				
vOCO	2,9	13,6	11,9	27,6	17,3	15,1	5,6	8,9	21,3	8,4	19,5	17,8	34,5	22,5	18,5	18,7	17,6	9,7	10,6	15,4
vNH	6,4	3,9	3,6	4,3	5,5	4,6	8,3	6,1	5,3	8,1	6,5	6,7	3,8	4,9	4,6	5,5	3,7	5,5	3,3	2,6
vCH	1,3	4,0	4,6	5,1	3,8	1,9	5,7	14,4	2,7	4,3	3,9	2,8	4,5	3,3	4,2	4,0	2,2	6,2	5,3	2,6
vCCN, vCNS	20,8	19,0	19,4	19,9	16,6	14,3	12,1	0,9	17,8	11,5	17,3	15,0	21,9	20,1	17,9	17,7	18,6	16,0	17,2	19,7
vCC	13,7	18,1	19,0	16,2	20,4	13,7	25,8	23,8	16,1	21,4	19,6	15,7	13,3	18,9	19,0	19,7	16,2	23,0	20,3	16,4
δNH	7,4	6,5	6,5	8,6	6,5	7,8	5,8	17,0	5,4	3,6	4,5	4,2	3,7	4,7	8,5	6,5	7,2	7,5	8,4	7,1
δCH	31,8	22,8	22,2	14,1	26,9	25,4	32,4	21,3	24,7	29,0	23,2	21,2	12,6	24,6	20,4	26,0	23,8	25,3	24,2	23,1
δCOC	15,7	12,2	12,8	4,1	3,1	17,2	4,2	7,5	6,8	13,7	5,5	16,5	5,7	1,0	6,9	1,8	10,7	6,8	10,6	13,2
Структурно-генетический анализ (СГП), отн. ед./Structural genetic analysis (SGP), rel. units																				
Пм	0,36	0,71	0,56	2,84	4,06	1,08	4,97	0,84	2,92	2,13	3,80	1,44	3,11	7,05	2,17	8,61	0,94	2,15	0,68	0,42
Пв	0,05	0,18	0,18	0,40	0,28	0,24	0,36	1,02	0,28	0,37	0,32	0,32	0,40	0,25	0,30	0,31	0,15	0,31	0,22	0,12
Пг	0,09	0,38	0,52	0,71	0,19	0,01	0,19	0,00	0,06	0,10	0,14	0,04	0,61	0,16	0,29	0,16	0,12	0,41	0,61	0,26
Ко	0,28	0,56	0,58	1,56	1,90	0,32	1,55	1,66	0,80	0,57	1,12	0,37	1,62	3,02	1,15	2,47	0,55	1,14	0,76	0,47
П <sub>VI-II</sub>	0,05	0,27	0,34	0,98	0,72	0,01	0,69	1,95	0,10	0,11	0,30	0,03	3,14	1,81	0,37	2,02	0,12	0,67	0,47	0,17
П <sub>I</sub>	0,58	0,73	0,65	1,39	3,80	0,55	3,74	0,00	1,56	1,05	2,23	0,65	5,97	11,10	1,25	14,49	0,93	1,62	0,78	0,66
Структурно-кластерный анализ металлоорганических соединений (СКАМОС) Structural cluster analysis of organometallic compounds (SCAOMC), %																				
2163	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
1088	0,04	0,04	0,04	0,00	0,03	0,01	0,07	0,10	0,05	0,06	0,05	0,00	0,04	0,05	0,01	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03
775	0,44	0,34	0,34	0,27	0,27	0,37	0,26	-0,53	0,30	0,23	0,22	0,28	0,19	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,32	0,36
700	0,72	0,74	0,68	0,68	0,66	0,73	0,74	0,46	0,78	0,74	0,68	0,70	0,56	0,72	0,67	0,73	0,70	0,72	0,65	0,74
667	0,54	0,35	0,35	0,33	0,30	0,46	0,29	-0,40	0,38	0,27	0,26	0,33	0,21	0,33	0,35	0,33	0,33	0,29	0,32	0,39
652	0,52	0,34	0,34	0,34	0,30	0,48	0,29	-0,38	0,39	0,27	0,26	0,33	0,21	0,33	0,36	0,33	0,33	0,29	0,31	0,37
571	0,63	0,50	0,54	0,13	0,20	0,09	0,20	-0,12	0,13	0,13	0,14	0,09	0,21	0,25	0,18	0,17	0,42	0,34	0,50	0,55
570	0,63	0,50	0,54	0,12	0,20	0,09	0,20	-0,12	0,13	0,13	0,14	0,08	0,20	0,24	0,18	0,16	0,42	0,34	0,50	0,55
561	0,46	0,42	0,45	0,08	0,15	0,04	0,16	-0,09	0,09	0,09	0,10	0,05	0,17	0,19	0,13	0,12	0,36	0,29	0,43	0,46
540	0,19	0,20	0,21	0,03	0,07	0,00	0,08	-0,04	0,04	0,04	0,05	0,01	0,09	0,10	0,05	0,06	0,19	0,15	0,20	0,21
526	0,35	0,28	0,30	0,08	0,11	0,07	0,13	0,02	0,10	0,09	0,10	0,06	0,14	0,14	0,09	0,11	0,24	0,20	0,28	0,30
430	0,40	0,28	0,28	0,12	0,14	0,16	0,14	-0,53	0,16	0,13	0,12	0,11	0,11	0,17	0,13	0,15	0,21	0,18	0,25	0,30
Степень проявления температуры в углеродистых веществах/Degree of temperature manifestation in carbonaceous substances, °C																				
Т	77	95	87	192	244	112	281	101	195	160	232	129	204	365	162	425	106	161	93	80

Примечание: цветовые обозначения приведены на рис. 5.  
 Note: color designations are shown in Fig. 5.



**Рис. 4.** Количество Au в УВ по данным ИСП-МС и ИНАА (увеличенные в 5 раз): а) с вихревыми значениями образцов №№ 5 и 14; б) без вихревых значений образцов №№ 5 и 14

**Fig. 4.** Au amount in organic matter by ICP-MS and INAA methods (increased by 5 times): а) with vortex values of samples no. 5 and 14; б) without vortex values of samples no. 5 and 14

В табл. 2 представлены результаты изменения концентрации Au методами ИСП-МС и ИНАА и показателей СГА, СКА, СГП, СКАМОС в углеродистом веществе в виде температурной зональности ( $T^{\circ}\text{C}$ ) в разрезе рудной зоны/рудного блока.

Все значения представленных видов анализов получены путём измерения, за исключением температуры прогрева рудной зоны/рудного блока, получение которой описано ниже. Сравнительный анализ содержания золота в образцах с удалением и без удаления органики методами ИСП-МС и ИНАА необходим для последующей интерпретации их с ИК спектрометрическими данными. Надо отметить, что методы ИСП-МС и ИНАА отражают единую тенденцию изменения Au в рудной зоне (рис. 4, а, б), тогда вихревые значения содержания Au, полученные методом ИСП-МС в образцах №№ 5 и 14 (рис. 4, а), следует относить к ошибке ( $r=0,17$ ). Тогда после исключения данных образцов корреляция становится на уровне  $r=0,90$  (рис. 4, б), а это как раз показывает, что эти методы отражают тенденцию концентрации золота в рудной зоне/рудном блоке по профилю отбора образцов.

Однако разный уровень значений золота в пробах, если применять одновременно два метода, указывает на то, что физическое различие этих методов необходимо учитывать. В частности, при определении золота в УВ. Например, важным аспектом, связанным с концентрацией золота, является характер проявления метасоматизма, который в виде взаимодействия горячих гидротермальных парогазовых растворов с органической частью углеродистых веществ чёрных сланцев приводил к их прогреву и изменению атомарно-молекулярной и надмолекулярной (кластерной) организации. По сути, это явление носит характер эпигенетического процесса, т. е. локальный метасоматизм имеет черты контактового метаморфизма [27] в виде углефикации ОВ.

С этой целью были использованы результаты исследований [51] по определению палеотемпературы. В этом исследовании приводятся два уравнения, одно – для определения показателя отражения витринита сингенетических каустобиолитов сапропелевого происхождения:

$$Ro=0,4862Pm+0,4776,$$

где  $Ro$  – показатель отражения витринита;  $Pm$  – показатель метаморфизации.

Другое уравнение – для оценки палеотемпературы через показатель  $Ro$ :

$$T^{\circ}\text{C}=112,02Ro^{0,8683}.$$

Преобразуя эти два уравнения методом подстановки, авторы получили формулу определения температурного воздействия на углеродистое вещество вследствие воздействия на них геологических процессов:

$$T^{\circ}\text{C}=112,02(0,4862Pm+0,4776)^{0,8683}.$$

Наличие температуры воздействия метасоматизма на УВ даёт лучшее восприятие для выделения в рудной зоне/рудном блоке разнотемпературных интервалов (табл. 2), которые, обусловлено, отражают химическую неоднородность УВ по групповому составу белков, жиров, углеводов (целлюлозы), реже лигнина, низших растений – образователей донных осадков, которые в последующем преобразуются в сапропелевый материал. Несомненно, это повлияло в процессе литификации сапропелевых веществ на характер полимеризации органической части УВ.

Подтверждается это корреляцией показателя  $P_{V+L}$  с содержанием Au методами ИСП-МС ( $r=0,42$ ) и ИНАА ( $r=0,54$ ), и видно (табл. 2), что она обусловлена возрастанием значений этого показателя в образцах №№ 4, 5, 7, 11, 13, 14, 16, 18 направленно с температурой прогрева. Изменчивость показателей  $Pm$  ( $r=0,53$ ),  $Co$  ( $r=0,70$ ),

$\Pi$ , ( $r=0,53$ ) дополняет особенности структурного преобразования ОВ под влияние метасоматизма и отражает разные стороны температуры прогрева УВ гидротермальными растворами. В свою очередь корреляционная связь концентрации Au методом ИСП-МС с показателем  $T^{\circ}\text{C}$  – на уровне 0,53, тогда как с методом ИНАА  $r=0,17$ .

Такая же корреляционная связь отмечается между содержанием Au (метод ИНАА) с кластерами  $\nu\text{OCO}$  ( $r=0,60$ ) и  $\delta\text{CH}$  ( $r=0,50$ ) и с кластером  $\delta\text{COC}$  ( $r=0,54$ ), при оценке золота методом ИСП-МС. Кластеры:  $\nu\text{OCO}$  – винилокси и оксетан соединения,  $\delta\text{CH}$  – метильные группы и  $\delta\text{COC}$  – простые эфиры, указывают на то, что золото связано с кислородом и метильными группами в плоскости атомов и молекул и в надмолекулярном пространстве в виде координационных соединений металла с органическими лигандами и кластерами МОС.

Обобщая наблюдения (табл. 2), было проведено их ранжирование по температуре возрастания, и выяснилось, что она обуславливается групповым составом растений-образователей УВ, а именно белковыми и жировыми соединениями, которые в структуре характеризуются количеством связей углерода с углеродом (C-C), азотом (C-N, C=N), водородом (C-H) и кислородом (C-O).

С температурой коррелируют связи углерода с азотом, водородом и кислородом в виде соединений: C-C ( $r=0,51$ ), C-N ( $r=0,49$ ), C=N ( $r=0,42$ ), C-H ( $r=0,50$ ), C-O ( $r=0,65$ ). Чтобы установить их местоположение в структуре УВ, был сделан расчёт каркасных связей углерода, а именно, отношение суммы атомов углерода с азотом, кислородом и водородом к количеству связей углерод–углерод. Также определено количество связей сопряжения ( $\pi$ -связи) через отношение суммы атомов углерода с азотом, кислородом и водородом к количеству связей C=C=N (кумулены).

Выяснилось, что влияние температуры обуславливает доминирование связей C-N в большей мере

в местах сопряжения кластеров C=C=N, меньше в углеродном каркасе (C-C), при этом отмечается концентрация связей C-O. Роль белков и жиров отражают азотные и водородные связи с углеродом, которые доминируют в структуре УВ. Через их отношения между собой показано, что в интервале 87–162  $^{\circ}\text{C}$ , из-за повышенного содержания азотных связей с углеродом, не происходит активного метасоматизма в части концентрации золота в УВ. Тогда как в интервале 192–366  $^{\circ}\text{C}$  разрыв этих связей обеспечивал проявление восстановительных каталитических реакций с участием углеводородов с концентрацией золота в разных состояниях.

В связи с этим были выделены подзоны с участием/неучастием органических соединений (рис. 5).

Третьей составляющей проведённого эксперимента было наблюдение изменчивости корреляционной связи перечисленных выше спектральных полос, предназначенных для идентификации МОС золота. Путём разделения образцов на высококонцентрированные ( $\text{Au}>1,0\%$ ) и низкоконцентрированные ( $\text{Au}<1,0\%$ ) УВ по содержанию золота были выделены полосы 2163, 1088, 775, 700, 667, 652, 571, 570, 561, 540, 526, 430  $\text{cm}^{-1}$ .

Методом ИНАА установлено, что с высоким содержанием золота коррелирует интенсивностью полос 775 ( $r=-0,75$ ), 700 ( $r=-0,84$ ), 667 ( $r=-0,69$ ), 652 ( $r=-0,67$ ), 430 ( $r=-0,54$ ). Методом ИСП-МС – с низким содержанием Au с полосами 2163 ( $r=-0,84$ ), 1088 ( $r=-0,56$ ), 700 ( $r=-0,72$ ), 652 ( $r=0,31$ ), и методом ИНАА – с полосами 571, 570, 561, 540, 526 ( $r=-0,30-0,35$ ). В целом полосы 2163, 1088, 775, 700, 430  $\text{cm}^{-1}$  обращают на себя внимание, особенно полоса 700  $\text{cm}^{-1}$ , у которой полосы 667 и 652 являются дуплетными, а значит, кластеры МОС данной формы однозначно идентифицируются на спектре. Поэтому, сопоставляя выявленные критерии оценки форм клатратов ОВ и МОС с показателями СГП, авторы обозначили следующие корреляционные связи между ними приведённые в табл. 3.

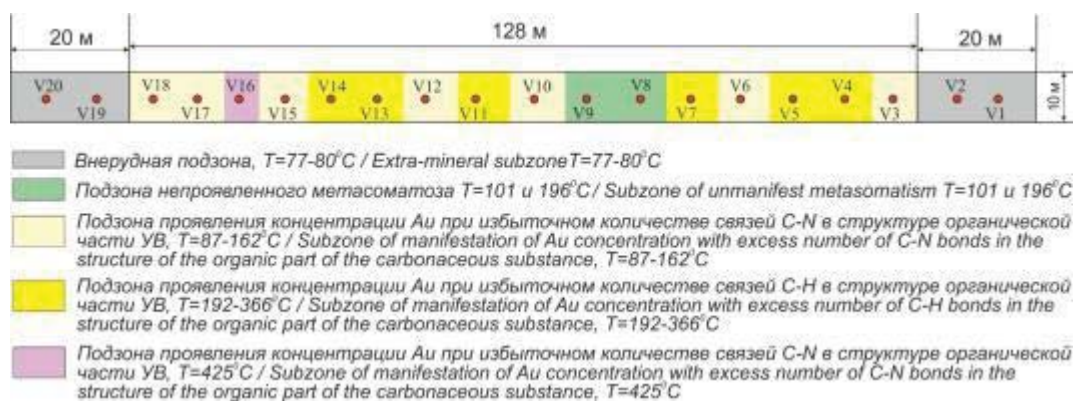


Рис. 5. Температурная зональность выявленных подзон в пределах рудной зоны/рудного блока Вернинского месторождения. Остальные условные обозначения – на рис. 2

Fig. 5. Temperature zoning of identified subzones within the ore block of the Verninskoe deposit. The rest symbols are in Fig. 2

Во-первых, плоская форма координации МОС Au в виде клатрата  $[(\text{CH}_3)_2\text{Au}(\text{NCS})_2]$  имеет связи с концевыми фрагментами ОВ в виде винилокси ( $\text{OCHCH}_2$ ) или оксетан ( $>\text{C}=(\text{CH}_2)_2=\text{O}$ ) соединений. Это кластерное сопряжение  $[(\text{CH}_3)_2\text{Au}(\text{NCS})]$  с  $\nu\text{OCO}$ , которое хорошо регистрируется на полосе  $2163\text{ см}^{-1}$  не зависимо от содержания золота в УВ. При высоких содержаниях могут образовываться связи  $\nu\text{OCO}$  с AuN, что фиксируется на полосе  $430\text{ см}^{-1}$ .

В местах нахождения межплоскостных связей в форме  $\delta\text{CH}$  (в основном метильные группы) могут возникать сопряжения с псевдогалогенидными комплексами в виде клатрата  $\text{K}[\text{Au}(-\text{SCN})_4]$ , который плоскостными и межплоскостными связями NCS или SCN групп образует мостики металла с ОВ. Такие формы регистрируются на полосах  $540$  и  $526\text{ см}^{-1}$ , при низких содержаниях золота их можно видеть на полосах  $1088$ ,  $667$ ,  $652$  (область полосы  $700\text{ см}^{-1}$ ), но это уже плоскостные связи метилгалогенидов в виде *цис*- $[(\text{CH}_3)_2\text{AuX}_2]$  или кластеров  $[(\text{CH}_3)_2\text{Au}(\text{NCS})]$  при наличии полосы  $775\text{ см}^{-1}$ .

В местах простых эфиров в виде межплоскостных связей  $\delta\text{COC}$  также могут возникать вышеупомянутые сопряжения, но их отличительной чертой является только надмолекулярное местоположение.

Во-вторых, показатели Пм, Ко,  $\text{P}_{\text{Vt+L}}$ ,  $\text{P}_L$ , отражающие процессы седиментогенеза, диагенеза, катагенеза и эпигенеза в разной степени проявления, обуславливают разные содержания золота в УВ. Это будет проявляться на ИК-спектре дуплет  $540$  и  $526\text{ см}^{-1}$ , который указывает на высокое содержание золота. Когда же появляется триплет  $571$ ,  $540$ ,  $526$  и полоса  $1088$ , то следует ожидать в основной массе УВ низкое содержание золота, которое находится в атомарно-молекулярной системе организации его структуры.

В целом обозначенная взаимосвязь показателей СГП с содержанием золота требует более детального изучения, которое позволит определять их как факторы геологических процессов, а именно, разделять с их помощью проявление регионального метаморфизма и локального метасоматизма (с позиции изменчивости УВ).

**Таблица 3.** Критерии оценки форм клатратов ОВ, МОС и структурно-генетических показателей

**Table 3.** Criteria for assessing forms of clathrates of organic matter, organometallic compounds and structural and genetic indicators

Полосы ( $\text{см}^{-1}$ ) для идентификации МОС золота Bands ( $\text{cm}^{-1}$ ) for identification of organometallic compounds of gold											Показатели СКА и СГП SKA and SGP indicators		
2163	1088	775	700	667	652	571	570	561	540	526	430		
Общая выборка (20 образцов)/Total sample (20 samples)													
-0,56	-0,54	-	-	-	-	-	-	-0,33	-0,63	-0,53	-	$\nu\text{OCO}$	
-	0,49	-	-	-	-	-	-	-	0,43	0,50	-	$\delta\text{CH}$	
-	-	-	-	-	-	-	0,36	0,42	0,42	-	-	$\delta\text{COC}$	
-0,50	-	-	-	-	-	-0,35	-0,49	-0,49	-0,51	-	-	Пм	
-	-	-	-	-	-	-	-0,42	-0,57	-0,61	-	-	Ко	
-	-	-	-	-	-	-	-	-0,39	-0,80	-0,39	-	$\text{P}_{\text{Vt+I}}$	
-0,34	-	-	-	-	-	-0,47	-0,55	-0,65	-0,84	-0,37	-	П	
Выборка из образцов №№ 2, 4–7, 10, 11, 13, 14, 17–19 ( $\text{Au}>1\text{ г/т}$ ) Selection from samples no. 2, 4–7, 10, 11, 13, 14, 17–19 ( $\text{Au}>1\text{ g/t}$ )													
-0,53	-0,54	-	-	-	-	-	-	-0,64	-0,67	-0,71	-0,70	$\nu\text{OCO}$	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,46	0,63	0,41	$\delta\text{CH}$	
-	-	0,46	-	-	-	-	-	0,58	0,52	-	0,47	$\delta\text{COC}$	
-0,57	-0,63	-0,45	-	-	-	0,51	-	-0,81	-0,62	-	-	Пм	
-0,45	-0,43	-0,50	-	-	-	0,49	-	-0,84	-0,65	-	-	Ко	
-	-	-0,63	-	-	-	-	-0,60	-0,93	-0,91	-0,96	-	$\text{P}_{\text{Vt+I}}$	
-	-	-	-	-	-	0,40	-	-0,95	-0,85	-0,83	-	П	
Выборка из образцов №№ 1, 3, 8, 9, 12, 15, 16, 20 ( $\text{Au}<1\text{ г/т}$ ) Selection from samples no. 1, 3, 8, 9, 12, 15, 16, 20 ( $\text{Au}<1\text{ g/t}$ )													
-0,74	-0,91	-0,85	0,81	0,76	-	-0,41	-0,55	-0,57	-1,00	-1,00	-	$\nu\text{OCO}$	
-	-0,83	0,44	-	0,97	-0,60	-	-	-	1,00	1,00	0,74	$\delta\text{CH}$	
-	0,87	-	-	-0,62	-	0,83	0,67	0,62	1,00	-1,00	-0,57	$\delta\text{COC}$	
-0,48	-0,96	0,41	0,81	0,98	-0,94	-0,96	-0,69	-0,82	-1,00	1,00	-	Пм	
-	0,97	-	-	0,62	м	-0,99	-0,63	-	-1,00	1,00	-	Ко	
-	0,87	-	-0,88	-	0,67	-0,99	-	-	-1,00	1,00	0,79	$\text{P}_{\text{Vt+I}}$	
-	-0,90	-	0,49	0,98	-0,79	-1,00	-0,64	-0,82	-1,00	1,00	0,45	П	
Кластеры С–О связей/Clusters of carbon–oxygen bonds							Кластеры С–Н связей/Carbon–hydrogen bond clusters						



## Заключение

Предлагаемый подход определения металлоорганических соединений, в частности соединений золота с функциональными группами органической части УВ, позволяет утверждать, что разное приготовление проб, а главное – разный физический эффект оценки состояния структуры исследуемого вещества открывают новые возможности изучения углеродистых веществ черносланцевых отложений.

Оценка концентрации Au в УВ методом ИСП-МС строится на электрохимическом анализе по концентрации ионов и электронов, методом ИНАА – на радиоактивном распаде ядер элемента, а методом СКАУФВ – на колебательных связях элементов. Столь разные объекты наблюдения дают основание сделать следующие выводы.

Методом ИСП-МС хорошо определяются формы золота в надмолекулярной части структуры УВ, т. е. формы Au с межплоскостными связями, методом ИНАА – в атомарно-молекулярной части, т. е. формы Au с плоскостными связями. С помощью этих методов установлены доминирующие органические кластеры  $\nu\text{OCO}$ ,  $\delta\text{CH}$ ,  $\delta\text{COC}$ , с которыми имеются сопряжения клатратов в виде  $[\text{Au}(-\text{SCN})_4]$  с плоскостными и межплоскостными связями NCS-или SCN-групп, и клатратами в виде *цис*- $[(\text{CH}_3)_2\text{AuX}_2]$  или  $[(\text{CH}_3)_2\text{Au}(\text{NCS})]$ , характеризующимися как металлоорганические соединения (МОС).

Другой особенностью определения МОС Au является выявление генетических факторов структурно-генетическими показателями (Пм, Ко,  $\text{P}_{\text{I+L}}$ , П<sub>г</sub>) значимости процессов седиментогенеза, диаге-

неза, катагенеза и эпигенеза при концентрации в УВ. В частности, дуплет полос МОС Au 540 и 526  $\text{cm}^{-1}$  указывает на высокое содержание золота, а триплет 571, 540, 526 и полоса 1088 будут указывать на то, что в основной массе УВ низкое содержание золота.

В целом через показатель Пм можно определить уровень температурного воздействия на осадочные отложения процессов регионального метаморфизма и околорудного метасоматизма – внедрение горячих гидротермальных растворов, обуславливающих вторичный прогрев по зонам трещиноватости пород в осадочные органоминеральные отложения чёрных сланцев.

Эпигенетическое наложение, проявленное вторичным прогревом по указанным выше зонам, в конечном итоге оставило след – это образование подзон в рудной зоне, в которых протекали термохимические процессы при взаимодействии углекислого газа с гидротермальными флюидами (парогазовыми и водными растворами). В результате этих реакций, обусловленных оптимальной температурой, миграция золота в системе «полимер-минерал» проходила разной степенью концентрации Au в формах МОС.

В связи с этим в рудной зоне были установлены подзоны концентрации Au, обусловленные температурной зональностью в виде проявления локального метасоматизма, на который оказывал влияние белково-жировой состав растений – образователей УВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huyck H.L.O. Proposed definition of “black shale” and “metalliferous black shale” for IGCP# 254 // Eighth IAGOD Symposium, Geological Survey of Canada. – Ottawa, 1990. – P. A183–A184.
2. Wignall P.B. Black shales. – USA: Oxford University Press, 1994. – 172 p.
3. Ketris M.P., Yudovich Y.E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – Vol. 78. – № 2. – P. 135–148.
4. Rogov M., Shchetova E., Zakharov V. Late Jurassic – earliest Cretaceous prolonged shelf dysoxic–anoxic event and its possible causes // Geological Magazine. – 2020. – Vol. 10. – № 157. – P. 1622–1642.
5. Рафаилович М.С. Крупнотоннажные месторождения золота и цветных металлов Казахстана // Руды и металлы. – 2011. – № 1. – С. 23–35.
6. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia // Economic Geology. – 1996. – Vol. 91. – P. 122–133.
7. Занин Ю.Н., Замирайлова А.Г., Эдер В.Г. Халькофильные элементы в черных сланцах баженовской свиты Западно-Сибирского морского бассейна // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 4. – С. 771–781.
8. Геохимические особенности пород баженовской и абалакской свит (Западная Сибирь) / А.Ю. Бычков, Г.А. Калмыков, И.А. Бугаев, Н.А. Балушкина, А.Г. Калмыков // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2016. – № 6. – С. 86–93.
9. Черные сланцы баженовской свиты / Л.П. Рихванов, Д.Г. Усольцев, М.В. Шалдыбин, Б.Р. Соктоев // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – 2019. – Т. 90. – № 6. – С. 32–39.
10. Волкова И.Б. Связь состава и метаморфизма органического вещества с металлоносностью черных сланцев // Руды и металлы. – 1993. – № 1–2. – С. 29–31.
11. Обзор техногенных и вторичных золотосодержащих отходов и способы извлечения из них золота / С.А. Федоров, А.М. Амдур, А.Н. Малышев, П.Ф. Каримова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 346–365.
12. Crabtree R.H. The organometallic chemistry of the transition metals. – New Haven: John Wiley & Sons, 2009. – 546 p.
13. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения / В.И. Силаев, И.В. Смолева, А.И. Антошкина, И.И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Материалы научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2012. – № 15. – С. 342–366.

14. Плюснина Л.П., Кузьмина Т.В., Лихойдов Г.Г. Влияние серы на хемосорбцию золота углеродистым веществом при 200–400 °С и  $P=1$  кбар // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 429. – № 6. – С. 806–808.
15. Кузьмина Т.В., Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г. Экспериментальное исследование взаимодействия платины с углеродистым веществом и серой при 200–400 °С и 1 кбар // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452. – № 6. – С. 653–657.
16. Марченко Л.Г. Наноминералогия золота, платины и углерода – инновационный критерий комплексной оценки и переоценки золоторудных месторождений «черносланцевого» типа // Золото и технологии. – 2018. – № 1 (39). – С. 114–125.
17. Опыт исследований природных углеродистых веществ и некоторых их синтетических аналогов методом рамановской спектроскопии / В.И. Силаев, В.П. Лютоев, В.А. Петровский, А.Ф. Хазов // Минералогический журнал. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 33–47.
18. Groves D.I. The crustal continuum model for late-Archaean lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia // Mineralium Deposita. – 1993. – Vol. 28. – P. 366–374.
19. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D. Groves, R. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S. Hagemann, F. Robert // Ore Geology Reviews. – 1998. – Vol. 13. – № 1–5. – P. 7–27.
20. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis // Ore Geology Reviews. – 2001. – Vol. 18. – № 1–2. – P. 1–75.
21. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terran / R.J. Goldfarb, T. Baker, B. Dubé, D. Groves, C.J.R. Hart, P. Gosselin // One Hundredth Anniversary Volume. – Denver: Society of Economic Geologists, 2005. – P. 407–450.
22. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia / R.J. Goldfarb, R.D. Taylor, G.S. Collins, N.A. Goryachev, O.F. Orlandini // Gondwana Research. – 2014. – Vol. 25. – № 1. – P. 48–102.
23. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. – 2015. – Vol. 233. – P. 2–26.
24.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia) / A.V. Chugaev, A.E. Budyak, Y.O. Larionova, I.V. Chernyshev, A.V. Travin, Y.I. Tarasova, B.I. Gareev, G.A. Batalin, I.V. Rassokhina, T.I. Oleinikova // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 144. – P. 1–20.
25. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // Economic Geology. – 2011. – Vol. 106. – P. 331–358.
26. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
27. Кучеренко И.В. Магматогенная концепция гидротермального рудообразования в черносланцевых толщах // Руды и металлы. – 1993. – № 3–6. – С. 17–24.
28. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) / И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Ю.Г. Сафонов, М.Р. Сароян, М.А. Юдовская, А.В. Еремина // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 6. – С. 550–559.
29. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? // Geoscience Frontiers. – 2016. – Vol. 7. – № 3. – С. 409–417.
30. Mineralogical and isotope-geochemical ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits / Y.I. Tarasova, A.E. Budyak, A.V. Chugaev, N.A. Goryachev, V.L. Tauson, S.Y. Skuzovatov, V.N. Reutsky, V.D. Abramova, B.I. Gareev, N.N. Bryukhanova, A.V. Parshin // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 119. – P. 1–24.
31. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? // Miner Deposita. – 2023. – Vol. 58. – P. 5–35.
32. Yakubchuk A. Russian gold mining: 1991 to 2021 and beyond // Ore Geology Reviews. – 2023. – Vol. 153. – P. 105287.
33. Золоторудные гиганты России и мира / М.М. Константинов, Е.М. Некрасов, А.А. Сидоров, С.Ф. Стружков / под ред. М.З. Зиннатуллина, Ю.В. Прусс. – М.: Научный мир, 2000. – 272 с.
34. Золоторудное месторождение Сухой Лог – переоценка и оценка прогноза рудного поля и района / И.Ф. Мигачев, И.А. Карленко, А.И. Иванов, А.А. Черемисин, Д.А. Куликов // Отечественная геология. – 2008. – № 2. – С. 55–67.
35. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V.Y. Prokofiev, N.N. Akinfiev // Geoscience Frontiers. – 2016. – № 3 (7). – С. 453–481.
36. Савчук Ю.С., Волков А.В. Крупные и суперкрупные орогенные золотые месторождения: геодинамика, структура, генетические следствия // Литосфера. – 2019. – Т. 19. – № 6. – С. 813–833.
37. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // Геология рудных месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15
38. Модель рудно-магматической системы золото-платинового месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) / Н.П. Лаверов, Э.Н. Лишневицкий, В.В. Дистлер, А.А. Чернов // Доклады Академии наук. – 2000. – Т. 375. – № 5. – С. 652–656.
39. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев, Ю.В. Щегольков, Э.И. Альшева, С.Е. Борисовский // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
40. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования аксессуарных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
41. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой лог (Ленский район). Ч. 3. Геохимия золота и серебра / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 33–40.
42. Буряк В.А., Михайлов Б.К., Цымбалюк Н.В. Генезис, закономерности размещения и перспективы золото- и платиноносности черносланцевых толщ // Руды и металлы. – 2002. – № 6. – С. 25–36.

43. Metallogeny of gold deposits of China / J. Shao, H. Defeng, K. Xiangmin, S. Naiwu // *Geology and Resources*. – 2004. – Vol. 13. – № 4. – P. 246–250.
44. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia / R.R. Large, V.V. Maslennikov, F. Robert, L.V. Danyushevsky, Z. Chang // *Economic Geology*. – 2007. – Vol. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
45. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia / S. Meffre, R.R. Large, R. Scott, J. Woodhead, Z. Chang, S.E. Gilbert, L.V. Danyushevsky, V. Maslennikov, J.M. Hergt // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2008. – Vol. 72. – № 9. – P. 2377–2391.
46. Кизильштейн Л.Я. Роль органического вещества в образовании месторождений золота (на примере черных сланцев) // *Российский химический журнал*. – 2000. – Т. XLIV. – № 3. – С. 108–114.
47. Distribution of trace elements between carbonaceous matter and sulfides in a sediment-hosted orogenic gold system / Y.-F. Wu, K. Evans, L.A. Fisher, M.-F. Zhou, S.-Y. Hu, D. Fougerouse, R.R. Large, J.-W. Li // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – Vol. 276. – P. 345–362.
48. Вернадский В.И. Проблемы биогеохимии. Труды Биогеохимической лаборатории. – М: изд. АН СССР, 1935. – Т. 16. – 320 с.
49. Аналитические подходы к количественному определению содержаний химических элементов в углях и углистых породах с использованием методов ИСП-МС и ИНАА / Н.В. Зарубина, М.Г. Блохин, Д.С. Остапенко, И.Ю. Чекрыжов, С.И. Арбузов, А.Ф. Судыко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 99–112.
50. Возможности инфракрасной спектроскопии диффузного отражения для изучения органических веществ каустобиолитов / В.П. Иванов, А.А. Дмитриенко, И.В. Рычкова, Е.Р. Исаева, Т.В. Тимкин, Д.А. Болдина, М.Г. Пахтаева // *Кокс и химия*. – 2023. – № 5. – С. 1–14.
51. Иванов В.П., Дмитриенко А.А. Определение типов связей кремния с функциональными группами в структурах органических веществ растительного происхождения с помощью метода диффузного отражения инфракрасной спектроскопии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 36–45.
52. Губин С.П. Химия кластеров. Основы классификации и строения. Изд. 2-е. / отв. ред. И.И. Моисеев. – М.: Ленанд, 2020. – 362 с.
53. Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, part B: applications in coordination, organometallic, and bioinorganic chemistry. – Hoboken: John Wiley & Sons. 2009. – 400 p.

#### Информация об авторах

**Владимир Петрович Иванов**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ivp2005@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

**Тимофей Васильевич Тимкин**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. timkin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8113-3555>

**Дарья Александровна Болдина**, студент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. daboldina@gmail.com

**Марина Геннадьевна Пахтаева**, студент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mgp3@tpu.ru

Поступила в редакцию: 06.11.2023

Поступила после рецензирования: 21.11.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

#### REFERENCES

1. Huyck H.L.O. Proposed definition of “black shale” and “metalliferous black shale” for IGCP# 254. *Eighth IAGOD Symposium, Geological Survey of Canada*. Ottawa, 1990. pp. A183–A184.
2. Wignall P.B. *Black shales*. USA, Oxford University Press, 1994. 172 p.
3. Ketris M.P., Yudovich Y.E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, no. 2, pp. 135–148.
4. Rogov M., Shchepetova E., Zakharov V. Late Jurassic – earliest Cretaceous prolonged shelf dysoxic–anoxic event and its possible causes. *Geological Magazine*, 2020, vol. 10, no. 157, pp. 1622–1642.
5. Rafailovich M.S. Large-tonnage deposits of gold and non-ferrous metals in Kazakhstan. *Ores and metals*, 2011, no. 1, pp. 23–35. (In Russ.)
6. Gavshin V.M., Zakharov V.A. Geochemistry of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia. *Economic Geology*, 1996. vol. 91. pp. 122–133.

7. Zanin Y., Zamirailova A.G., Eder V.G. Chalcophile elements in black shales of the Bazhenov formation, West Siberian sea basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 608–616.
8. Bychkov A.Y., Kalmykov G.A., Bugaev I.A., Balushkina N.A., Kalmykov A.G. Geochemical features of bazhenov and abalak formations (Western Siberia). *Moscow University Geology Bulletin*, 2016, no. 6, pp. 86–93. (In Russ.)
9. Rihvanov L.P., Usol'tsev D.G., Shaldybin M.V., Soktoev B.R. Black shales of the Bazhenov formation. *NEFTEGAZ.RU*, 2019, vol. 90, no. 6, pp. 32–39. (In Russ.)
10. Volkova I.B. Relationship between the composition and metamorphism of organic matter and the metal content of black shales. *Ores and Metals*, 1993, no. 1–2, pp. 29–31. (In Russ.)
11. Fedorov S.A., Amdur A.M., Malyshev A.N., Karimova P.F. Review of technogenic and secondary gold-containing waste and methods for extracting gold from them. *Mining information and analytical bulletin*, 2021, no. 11–1, pp. 346–365. (In Russ.)
12. Crabtree R.H. *The organometallic chemistry of the transition metals*. New Haven, John Wiley & Sons, 2009. 546 p.
13. Silaev V.I., Smoleva I.V., Antoshkina A.I., Chaykovskiy I.I. Experience of conjugate analysis of the isotopic composition of carbon and nitrogen in carbonaceous substances of different origin. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Proceedings of scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*. Perm, PGU Publ., 2012. No. 15, pp. 342–366. (In Russ.)
14. Plyusnina L.P., Kuzmina T.V., Likhoidov G.G. The influence of sulfur on chemisorption of gold by carbonaceous matter at 200–400 °C and Ptotal=1 kbar. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 429, no. 2, pp. 1587–1589. (In Russ.)
15. Kuzmina T.V., Plyusnina L.P., Likhoidov G.G. Experimental study of platinum interaction with carbonaceous matter and sulfur at 200–400 °C and 1 kbar. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 452, no. 2, pp. 1051–1055. (In Russ.)
16. Marchenko L.G. Nanomineralogy of gold, platinum and carbon is an innovative criterion for integrated assessment and reevaluation of gold deposits of "black shale" type. *Gold and technology*, 2018, no. 1 (39), pp. 114–125. (In Russ.)
17. Silaev V.I., Lyutov V.P., Petrovsky V.A., Khazov A.F. Experience in research of natural carbonaceous substances and some of their synthetic analogues by Raman spectroscopy. *Mineralogical Magazine*, 2013, vol. 35, no. 3, pp. 33–47. (In Russ.)
18. Groves D.I. The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 1993, vol. 28, pp. 366–374.
19. Groves D., Goldfarb R., Gebre-Mariam M., Hagemann S., Robert F. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 1998, vol. 13, no. 1–5, pp. 7–27.
20. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 2001, vol. 18, no. 1–2, pp. 1–75.
21. Goldfarb R.J., Baker T., Dubé B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terran. In *One Hundredth Anniversary Volume*. Denver, Society of Economic Geologists, 2005. pp. 407–450.
22. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collins G.S., Goryachev N.A., Orlandini O.F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*, 2014, vol. 25, no. 1, pp. 48–102.
23. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 2015, vol. 233, pp. 2–26.
24. Chugaev A.V., Budyak A.E., Larionova Y.O., Chernyshev I.V., Travin, A.V., Tarasova Y.I., Gareev B.I., Batalin G.A., Rassokhina I.V., Oleinikova T.I. 40Ar-39Ar and Rb-Sr age constraints on the formation of Sukhoi-Log-style orogenic gold deposits of the Bodaibo District (Northern Transbaikalia, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 144, pp. 1–20.
25. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 331–358.
26. Buryak V.A. *Metamorphism and ore formation*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p. (In Russ.)
27. Kucherenko I.V. Magmatogenous concept of hydrothermal ore formation in black shale strata. *Ores and metals*, 1993, no. 3–6, pp. 17–24. (In Russ.)
28. Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R., Yudovskaya M.A., Eremina A.V. Isotopic composition of lead according to the high-precision MC-ICP-MS method and the sources of the substance of the large-scale noble metal deposit Sukhoi Log (Russia). *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 6, pp. 550–559. (In Russ.)
29. Groves D.I., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the key to a unified model for orogenic gold deposits? *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 409–417.
30. Tarasova Y.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Y., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanov N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ( $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{34}S$  and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 119, pp. 1–24.
31. Goldfarb R.J., Pitcairn I. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Miner Deposita*, 2023, vol. 58, pp. 5–35.
32. Yakubchuk A. Russian gold mining: 1991 to 2021 and beyond. *Ore Geology Reviews*, 2023, vol. 53, 105287.
33. Konstantinov M.M., Nekrasov E.M., Sidorov A.A., Struzhkov S.F. *Gold mining giants of Russia and the world*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2000. 272 p. (In Russ.)
34. Migachev I.F., Karpenko I.A., Ivanov A.I., Cheremisin A.A., Kulikov D.A. Sukhoi Log gold deposit - reassessment and evaluation of the ore field and district forecasts. *Domestic geology*, 2008, no. 2, pp. 55–67. (In Russ.)
35. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Y., Akiniev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2016, no. 3 (7), pp. 453–481.
36. Savchuk Yu.S., Volkov A.V. Large and super-large orogenic gold deposits: geodynamics, structure, genetic consequences. *Lithosphere*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 813–833. (In Russ.)
37. Rundquist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Y., Danilova M.Y., Ashcheukov A.A. Evolution stages of the Bodaibo gold region. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)
38. Laverov N.P., Lishnevskii E. N., Distler V.V., Chernov A.A. Model of the ore-magmatic system of the Sukhoi Log gold-platinum deposit, Eastern Siberia, Russia. *Doklady Earth Sciences*, 2000, vol. 375, pp. 1362–1365.

39. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovsky S.E. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region. *Geology of ore deposits*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. (In Russ.)
40. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Correlation of metamorphism and ore formation processes at the Sukhoi Log gold black shale deposit according to U-Th-Pb isotope SHRIMP dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. (In Russ.)
41. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Y., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrologo-geochemical features of near-ore metasomatism in the Sukhoi log gold deposit (Lensky district). Part 3. Geochemistry of gold and silver. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 33–40. (In Russ.)
42. Buryak V.A., Mikhailov B.K., Tsymbalyuk N.V. Genesis, regularities of placement and prospects of gold and platinum bearing of black shale strata. *Ores and metals*, 2002, no. 6, pp. 25–36. (In Russ.)
43. Shao J., Hui D., Kong X., Shou N. Metallogeny of gold deposits of China. *Geology and Resources*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 246–250.
44. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L.V., Chang, Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
45. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M. Age and pyrite Pb-isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 2377–2391.
46. Kizilstein L.Ya. The role of organic matter in the formation of gold deposits (on the example of black shales). *Russian Chemical Magazine*, 2000, vol. 44, no. 3, pp. 108–114. (In Russ.)
47. Wu Y.-F., Evans K., Fisher L.A., Zhou M.-F., Hu S.-Y., Fougereuse D., Large R.R., Li J.-W. Distribution of trace elements between carbonaceous matter and sulfides in a sediment-hosted orogenic gold system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 276, pp. 345–362.
48. Vernadsky V.I. *Problems of biogeochemistry. Proceedings of the biogeochemical laboratory*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1935. 320 p. (In Russ.)
49. Zarubina N. V., Blokhin M. G., Ostapenko D. S., Chekryzhov I.Y., Arbizov S.I., Sudyko A.F. Analytical approaches to the quantitative determination of the contents of chemical elements in coals and carbonaceous rocks using the ISP-MS and INAA methods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 99–112. (In Russ.)
50. Ivanov V.P., Dmitrienko A.A., Rychkova I.V., Isayeva E.R., Timkin T.V., Boldina D.A., Pahtaeva M.G. Analysis of organic matter in caustobioliths by diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy. *Coke and Chemistry*, 2023, vol. 66, no. 5, pp. 264–276.
51. Ivanov V.P., Dmitrienko A.A. Determination of the types of silicon bonds with functional groups in the structures of organic substances of plant origin using the diffuse reflection method of infrared spectroscopy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 36–45. (In Russ.)
52. Gubin S.P. *Chemistry of clusters. Basics of classification and structure*. Moscow, Lenand Publ., 2020. 362 p. (In Russ.)
53. Nakamoto K. *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, part B: applications in coordination, organometallic, and bioinorganic chemistry*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. 400 p.

#### Information about the authors

**Vladimir P. Ivanov**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ivp2005@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7468-0174>

**Timofey V. Timkin**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. timkin@tpu.ru; <http://orcid.org/000-0002-8113-3555>

**Daria A. Boldina**, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. daboldina@gmail.com

**Marina G. Pakhtaeva**, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgp3@tpu.ru

Received: 06.11.2023

Revised: 21.11.2023

Accepted: 25.01.2024

УДК 556.314

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466

Шифр специальности ВАК 1.6.6

## Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ)

О.Е. Лепокурова<sup>1,2✉</sup>, И.С. Иванова<sup>1</sup>, А.Н. Пыряев<sup>3</sup>, О.А. Исмагулов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> ООО «Меретояханефтегаз», г. Тюмень, Россия

✉ LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

**Аннотация. Актуальность.** Исследование изотопного состава воды и растворенных веществ позволяет определить не только их генезис, но и процессы фракционирования, происходящие в системе «вода–порода–газ–органическое вещество» с течением времени, т. е. по мере прохождения различных этапов эволюции состава вод. Интерес к подземным водам арктических регионов Западной Сибири дополнительно связан с широким распространением здесь на глубинах пластовых вод нефтяных отложений и возможным влиянием на состав приповерхностных вод процессов криогенной метаморфизации. **Цель:** изучить и сопоставить изотопный состав кислорода, водорода и углерода в природных водах Ямало-Ненецкого автономного округа для выделения условных изотопных маркеров, а также для возможности проследить эволюцию изотопного состава вод вдоль вертикального разреза в районе Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения. **Объекты:** поверхностные (речные, почвенные и озерные), подземные воды зоны активного водообмена Ямало-Ненецкого автономного округа и пластовые воды нефтегазоносных отложений Тазовского месторождения. **Методы.** Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II. **Результаты и выводы.** Приведены данные по изотопному составу кислорода, водорода и водорастворенного углерода для природных вод Ямало-Ненецкого автономного округа. Определены характерные тренды изменения изотопного состава вод и растворенной углекислоты для различных водных объектов. Показано, что поверхностные и подземные воды активного водообмена по изотопному составу ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) являются инфильтрационными. По мере движения вод вниз по разрезу, с увеличением времени взаимодействия в системе «вода–порода» и повышением температур среды изотопный состав значительно утяжеляется с уклоном от глобальной линии метеорных вод вправо. Составлена схема эволюции изотопного состава водорастворенного углерода в регионе согласно полученным и некоторым литературным данным. Несмотря на широкий диапазон значений  $\delta^{13}C$  от  $-30,4$  до  $23,6$  ‰, в регионе, по-видимому, присутствуют только два источника углекислоты: биогенный и атмосферный, при этом для подземных вод преобладающим является биогенный.

**Ключевые слова:** Поверхностные и подземные воды, нефтяные воды, стабильные изотопы водорода, кислорода, углерода, эволюция, генезис, мерзлота, Тазовское месторождение

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность Западно-Сибирскому филиалу Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН в лице Андрея Гарьевича Плавника в организации доставки проб пластовой воды. Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 24-27-00372.

**Для цитирования:** Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, А.Н. Пыряев, О.А. Исмагулов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466

---

UDC 556.314

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466

## Distribution of stable H, O and C isotopes in natural waters in the area of the Taz oil and gas condensate field (Yamalo-Nenets autonomous region)

O.E. Lepokurova<sup>1,2✉</sup>, I.S. Ivanova<sup>1</sup>, A.N. Pyrayev<sup>3</sup>, O.A. Ismagulov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Institute of Geology and Mineralogy of SB of RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>4</sup> Meretoyakhaneftgaz LLC, Tyumen, Russian Federation

✉ LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

**Abstract. Relevance.** The study of isotopic composition of water and dissolved substances makes it possible to determine not only their genesis, but also the fractionation processes occurring in the “water–rock–gas–organic matter” system over time, i. e. as different stages of the evolution of water composition pass through. Interest in the groundwater of the Arctic regions of Western Siberia is additionally associated with the widespread occurrence of oil deposits at the depths of formation waters and the possible influence of cryogenic metamorphization processes on composition of near-surface waters. **Aim.** To study and compare the isotopic composition of oxygen, hydrogen and carbon in natural waters of the Yamalo-Nenets autonomous region to identify conditional isotopic markers, as well as to be able to trace the evolution of the isotopic composition of waters along a vertical section in the area of the Taz oil and gas condensate field. **Objects.** Surface (river, soil and lake), underground waters of the active water exchange zone of the Yamalo-Nenets autonomous region and formation waters of oil and gas deposits of the Taz field. **Methods.** The study of the isotopic composition of oxygen, hydrogen, and carbon of water-dissolved carbon dioxide was carried out in the Research Equipment Sharing Center at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS using Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253 equipped with H/Device and GasBench II for sample preparation. **Results and conclusions.** The paper introduces the data on isotopic composition of O, H and C for natural waters of the Yamalo-Nenets autonomous region. The authors have determined the characteristic trends in changes in the isotopic composition of water and dissolved carbon dioxide for various water bodies. Surface and underground waters with active water exchange in terms of isotopic composition ( $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ ) are infiltration. As water moves down the section, with an increase in the time of interaction of the “water–rock” system and increase in temperatures, the isotopic composition becomes significantly heavier with a slope from the GMWL to the right. The authors compiled the diagram of the evolution of water-dissolved carbon isotopic composition in the region according to the obtained and some literature data. Despite the wide range of  $\delta^{13}C$  values from  $-30.4$  to  $23.6$  ‰, there are, obviously, only two sources of carbon dioxide in the region: biogenic and atmospheric, with biogenic being predominant for groundwater.

**Keywords:** Surface and underground waters, oil waters, stable isotopes of hydrogen, oxygen, carbon, evolution, genesis, permafrost, Taz field

**Acknowledgements:** The research was financially supported by the RSF no. 24-27-00372.

**For citation:** Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyrayev A.N., Ismagulov O.A. Distribution of stable H, O and C isotopes in natural waters in the area of the Taz oil and gas condensate field (Yamalo-Nenets autonomous region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466

### Введение

Состав природных вод претерпевает значительные изменения за время прохождения атмосферного, биогенного, литогенного этапов формирования и далее, в глубь по геологическому разрезу, на стадиях диа- и катагенезиса. Одним из интересных объектов для изучения формирования состава вод являются природные воды арктических регионов по следующим причинам: 1) в приповерхностных условиях дополнительно могут накладываться про-

цессы криогенной метаморфизации (изменение минерализации и состава вод при оттаивании–промерзании мерзлых пород) [1]; 2) в глубинных условиях широко распространены пластовые воды нефтяных месторождений, которые можно рассматривать как один из конечных этапов формирования вод. При этом химический состав вод в регионе по последним данным достаточно изучен в отличие от химического состава поверхностных [2–3], неглубокого залегания [4] и глубоких нефтяных [5–8],

а вот работ по изотопному составу вод не так много. Имеются данные по  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  почвенных, речных и озерных вод [9], снегу [10], льду [11], некоторых подземных вод [12, 13]; недавно вышла большая комплексная работа по  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  и  $\delta^{13}C$  пластовых нефтяных вод [14] и статья авторов по аналогичным данным в системе «почвы–просадки–озера–реки» [15]. Исследования распределения  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  и  $\delta^{13}C$  природных вод региона от поверхностных до нефтяных пока не проводились.

В 2022 г. в районе Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения были получены новые данные по изотопному составу пластовых вод в контуре водонефтяного контакта. Интерес к данному месторождению связан с технологией добычи углеводородов, а именно, с отсутствием системы заводнения пласта для поддержания пластового давления, что гарантирует получение более объективных результатов по химическому и изотопному составу природной воды. К тому же в данном регионе накоплен массив данных по поверхностным и подземным водам зоны активного водообмена [15], что позволит проследить эволюцию изотопного состава вод вдоль вертикального разреза и определить реперные показатели для каждого водного объекта. Иными словами, цель настоящего исследования – изучить и сопоставить изотопный состав О, Н, С в природных водах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) (поверхностные, подземные воды зоны активного водообмена и пластовые воды нефтегазоносных отложений Тазовского месторождения) для выделения условных изотопных маркеров.

### Объекты и методы исследования

Территория исследований относится к арктической зоне Западной Сибири, для которой характерны наличие многолетней мерзлоты и обилие болот, озёр и рек, а также наличие крупнейших залежей углеводородов в мире [16]. Почвенный покров представлен в основном торфяными, преимущественно олиготрофными, почвами. Водноболотный и озерный покров может варьировать от 20 до 80 % в течение года, в зависимости от сезонных гидрологических условий. Питание рек происходит в основном за счет осадков, преимущественно снеговых, в меньшей степени – дождевых, а также болотно-грунтовыми водами. Замедленный круговорот веществ в условиях низких температур и заболоченность водосборов способствуют накоплению в поверхностных водах широкого спектра органических веществ [3, 9, 15]. В разрезе песчано-глинистых отложений выделяются два гидрогеологических этажа. Верхний этаж, характеризующийся свободным газоводообменом, представлен турон-палеогеновым и эоцен-четвертичным водоносными

комплексами, содержащими пресные воды. Гидрогеологические условия осложнены наличием преимущественно сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) до глубины 400–450 м. Питание подземных вод происходит в основном в летний период за счет инфильтрации атмосферных осадков. Нижний гидрогеологический этаж слагают сверху вниз: апт-альб-сеноманский, неокомский, юрский водоносные комплексы, содержащие высоконапорные термальные минерализованные воды [7].

Полевые исследования проходили в течение трех лет, в летне-осенний период 2020–2022 гг. Объектами изучения были: 1) поверхностные воды: 9 речных, 11 озерных, 2 пробы почвенных вод и 3 пробы воды просадок (начальная стадия образования термокарстовых озер) и 2) подземные воды: 19 проб из скважин на хозяйственно-питьевое водоснабжение (в основном атлым-новомихайловский водоносный горизонт) и 3 пробы из нефтедобывающих скважин (апт-альб-сеноманский водоносный комплекс) (рис. 1). Для сравнения также были привлечены данные по водам, отобраным на Западно-Малобалыгском, Унтыгейском и Федоровском месторождениях. Всего изучен изотопный состав 49 проб воды и 1 пробы нефти.

В полевых условиях измерялись: температура, рН, Eh и быстроизменяющиеся компоненты. Аналитические исследования проводились стандартными методами в Томском политехническом университете и Томском филиале Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Исследования изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) проводились в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device, GasBench II и FlashEA 1112, согласно методикам [17–20], относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 – при измерениях  $\delta^{13}C_{DIC}$ ; IAEA-CH7, USGS-24 и NBS-22 – при измерениях  $\delta^{13}C_{org}$ ; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  [21]. Погрешность измерений не превышала 0,2 ‰ при анализе изотопного состава углерода и кислорода и 2 ‰ – водорода. Полученные значения по углероду приведены относительно мирового стандарта VPBD (Vienna Pee Dee Belemnite – Венский стандарт Белемнита формации Пии Дии), по кислороду и водороду – относительно VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water – Венский стандарт средней океанической воды).



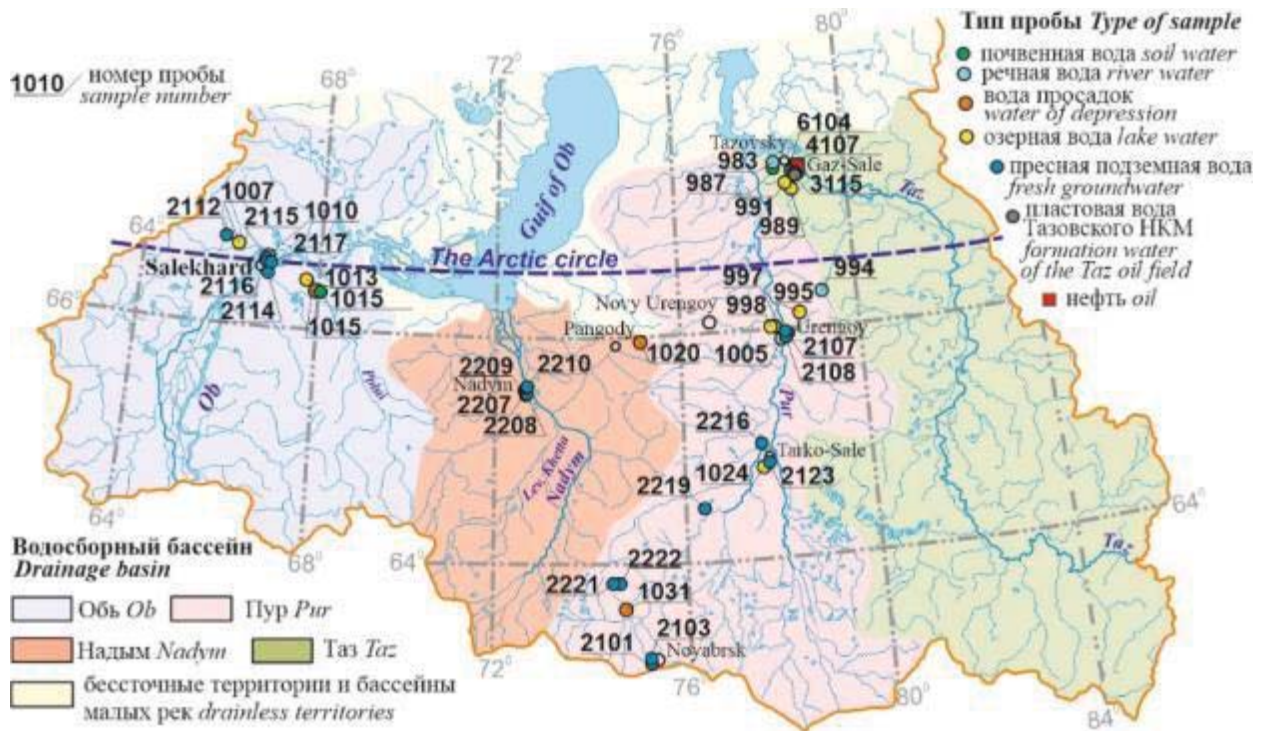


Рис. 1. Схема точек отбора проб в ЯНАО

Fig. 1. Scheme of sampling points in Yamalo-Nenets Autonomous Region (YaNAR)

### Химический состав природных вод

**Поверхностные воды.** Практически повсеместно на исследуемой территории преобладают ультрапресные (минерализация от 2 до 130 мг/л) воды с высокими концентрациями растворенного органического вещества (РОВ) (Сорг до 122 мг/л) и широким диапазоном значений pH от 3,9 до 7,9. В направлении просадка–озеро–река увеличивается минерализация и pH вод, но уменьшаются концентрации РОВ, состав вод меняется от сложного органо-сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного аммонийно-кальциево-натриевого (болота, просадки) до гидрокарбонатного кальциевого (реки) [3].

**Подземные воды верхнего гидрогеологического этажа.** Рассматривались в основном воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в большинстве случаев атлым-новомихайловского водоносного горизонта. Воды пресные с минерализацией от 29 до 357 мг/л, pH от 5,5 до 7,9, температура 2–5 °С. По химическому составу воды в основном гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 29–289 мг/л, отобраны с глубин 10–180 м. Лишь три пробы подземной воды имеют содовый состав с повышенным содержанием хлор-иона (до 87 мг/л), соленостью 191–357 мг/л, отобранные с глубин 100–244 м. Концентрации органических веществ значительно ниже, чем в поверхностных водах – 0,6–12,7 мг/л. Криогенная метаморфизация подземных вод вследствие многократного промерзания и оттаивания водовмещающих отложений

верхнего этажа ведет к постоянным колебаниям минерализации, росту  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  ионов [1].

**Подземные воды нижнего гидрогеологического этажа.** Изучена достаточно небольшая выборка, состоящая из трех проб воды апт-альбсеноманского водоносного комплекса Тазовского месторождения, также для сравнения использовались данные по двум пробам вод, отобранных на Западно-Малобалыгском и Федоровском месторождениях в аналогичных горизонтах. Воды в основном нейтральные (pH 6,9–7,4) с величиной общей минерализации 18,3–20,2 г/л, по химическому составу достаточно однотипные – хлоридные натриевые [22].

### Результаты и их обсуждение

Изотопный состав – это соотношение различных изотопов одного и того же химического элемента в образце, в данном случае воды. Колебания значений таких соотношений определяется как генезисом веществ, так и процессами фракционирования, происходящими в системе «вода–порода–газ–органическое вещество» с течением времени [23–25].

Изотопный состав вод и водорастворенного углерода природных вод исследуемой территории представлен в табл. 1, 2: усредненный по поверхностным водным объектам – в табл. 1 [15] и детальный по подземным водам – в табл. 2. Также были рассчитаны и приведены в таблицах: величина дейтериевого эксцесса ( $d_{\text{exc}}$ ), т. е. недостаток

дейтерия от его количества в равновесном состоянии с кислородом [26], рассчитанный по уравнению  $d_{\text{exc}} = \delta D - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ ; и кислородный сдвиг (КС), рассчитанный по уравнению  $\text{КС} = (\delta D - 10) / 8$ .

Для сравнения с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ, – Global Meteoric Water Line – GMWL) [27] были нанесены фигуративные точки по изо-

топному составу вод разных водных объектов на диаграмму  $\delta D - \delta^{18}\text{O}$  (рис. 2). Также была показана зависимость КС от  $d_{\text{exc}}$  (рис. 3), которая, конечно, легла в прямую линию и имеет обратную линейную корреляцию, но она оказалась показательной для выделения реперных показателей по каждому водному объекту.

**Таблица 1.** Изотопный состав поверхностных вод севера Западной Сибири

**Table 1.** Isotopic composition of surface waters in the north area of Western Siberia

Водный объект Water body	N	$\delta^2\text{H}$ (VSMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)	КС/OS	$d_{\text{exc}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (VPDB)
‰						
Почвенные воды Soil water	2	<u>-110,2...-106,2</u> -108,2	<u>-15,3...-15,0</u> -15,1	<u>-0,5...-0,3</u> 0,4	<u>12,6...14,1</u> 13,8	<u>-23,5...-17,9</u> -20,7
Речные воды River water	9	<u>-126,8...-100,0</u> -111,7	<u>-16,9...-12,3</u> -15,1	<u>-1,1...1,4</u> 0,1	<u>-1,3...18,7</u> 9,2	<u>-17,2...-3,9</u> -10,4
Воды просадок Depressions water	3	<u>-101,3...-89,6</u> -94,5	<u>-14,0...-11,6</u> -12,6	<u>-0,1...0,9</u> 0,5	<u>2,9...10,9</u> 6,3	<u>-23,0...-19,5</u> -21,7
Озерные воды Lake water	11	<u>-101,6...-69,3</u> -87,2	<u>-14,1...-7,3</u> -10,2	<u>-0,2...2,8</u> 1,9	<u>-12,1...11,3</u> -5,2	<u>-25,9...-6,0</u> -14,8

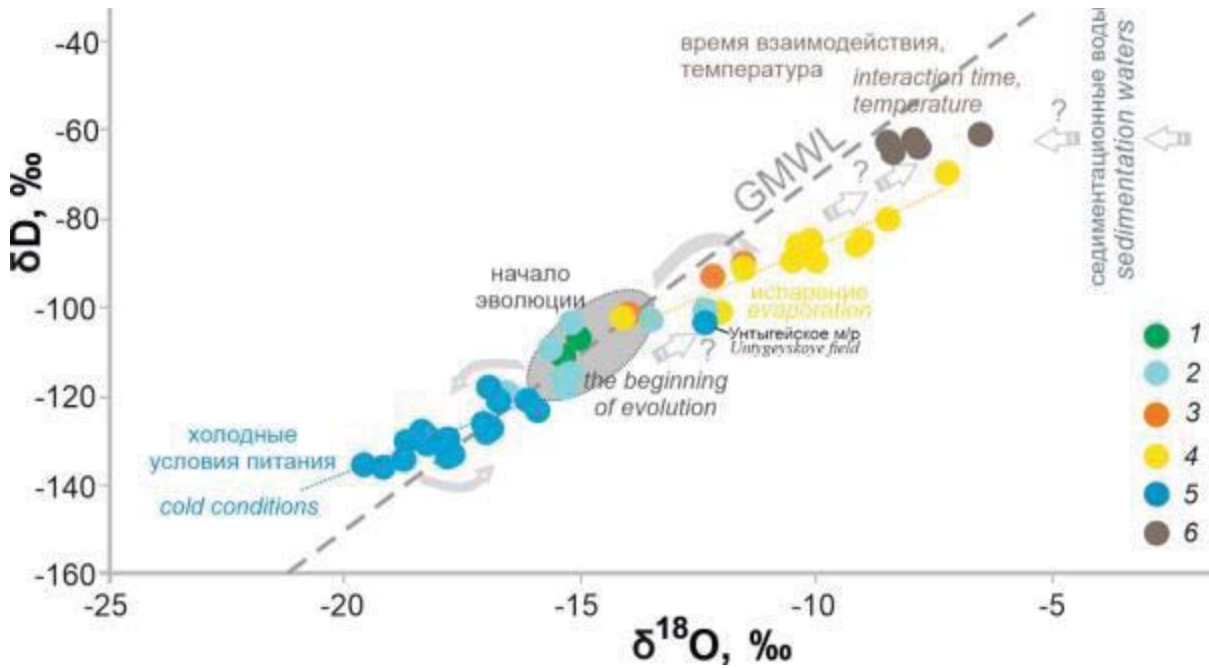
Примечание: в числителе – пределы содержаний, в знаменателе – средние значения; N – количество проб воды; КС – кислородный сдвиг.

Note: in the numerator – the limits (range of values) of the contents, in the denominator – the average values; N – number of the water samples; OS – oxygen shift.

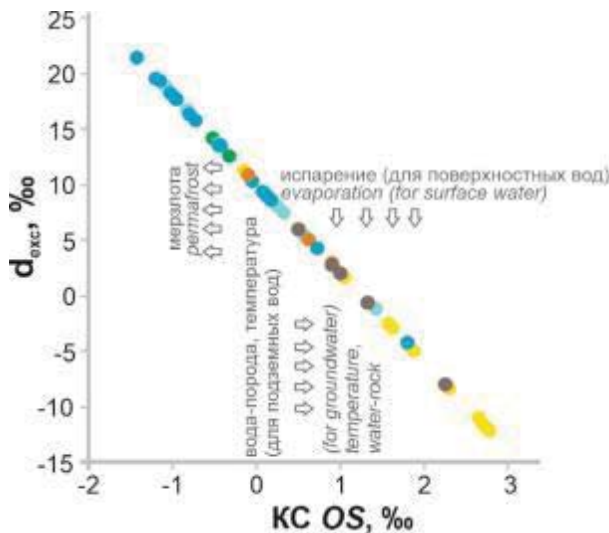
**Таблица 2.** Изотопный состав подземных вод севера Западной Сибири

**Table 2.** Stable isotope composition of groundwaters in the north area of Western Siberia

Номер пробы Sample number	БК (БГ) AC (AH)	Глубина, м Depth, m	$\delta^2\text{H}$ (VSMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW)	КС/OS	$d_{\text{exc}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (VPDB)	
			‰					
Подземные воды верхнего гидрогеологического этажа Groundwater of the upper hydrogeological level								
2209	Q	5	-122,8	-15,9	0,7	4,3	-19,2	
2210		16	-133,4	-17,8	0,1	9,2	-21,0	
2221		17	-126,2	-17,1	-0,1	10,4	-10,0	
2117		23	-128,2	-18,2	-0,9	17,6	-15,3	
2112		30	-117,2	-16,9	-1,0	18,2	-10,0	
2115		P (P <sub>3</sub> <sup>1-2</sup> at+nm)	41	-129,8	-18,7	-1,2	19,7	-30,4
2114			50	-120,6	-16,8	-0,5	13,6	-19,9
2216			65	-127,1	-17,1	0,1	9,4	-19,0
2208			70	-120,4	-16,1	0,2	8,6	-8,7
2116			80	-127,3	-18,3	-1,2	19,3	-4,7
2107			100	-135,2	-19,1	-1,0	18,0	-6,8
2108			100	-133,6	-18,8	-0,8	16,4	-6,9
2101			101	-135,0	-19,6	-1,4	21,5	-4,1
2219			120	-132,7	-17,7	0,1	9,0	-18,7
2103			128	-130,2	-18,3	-0,7	15,8	-5,4
2222	155	-133,1	-17,8	0,1	9,0	-10,6		
2123	180	-129,0	-17,8	-0,4	13,5	-18,9		
2207	244	-126,7	-16,9	0,2	8,4	-13,7		
Унтыгейское месторождение Untygeyskoe field		200	-103,1	-12,3	1,8	5,5	-4,7	
Подземные воды нижнего гидрогеологического этажа Groundwater of the lower hydrogeological level								
3115	K <sub>1-2</sub>	1220	-64,2	-8,4	0,9	2,8	18,2	
4107		1255	-62,1	-8,5	0,5	6,1	22,0	
6104		1240	-61,4	-7,9	1,0	2,1	23,6	
Западно-Малобалыгское Zapadno-Malobalygskoe		1550	-60,3	-6,5	2,3	1,8	0,3	
Федоровское Fedorovskoe		1370	-63,4	-7,9	1,3	1,1	2,4	



**Рис. 2.** Диаграмма  $\delta D-\delta^{18}O$  с нанесением данных по изотопному составу вод (стрелками показана эволюция состава вод): 1 – почвенные воды; 2 – речные воды; 3 – воды просадки; 4 – озерные воды; 5 – подземные воды верхнего гидрогеологического этажа; 6 – подземные воды апт-альб-сеноманского водоносного горизонта  
**Fig. 2.** Diagram  $\delta D-\delta^{18}O$  with stable isotope composition of investigated waters (arrows show the evolution of water composition): 1 – soil waters; 2 – river waters; 3 – depressions waters; 4 – lake waters; 5 – groundwaters of the upper hydrogeological level; 6 – groundwaters of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer



**Рис. 3.** Диаграмма зависимости  $KC-d_{exc}$ . Условные обозначения – на рис. 2  
**Fig. 3.** Diagram  $OS$  vs  $d_{exc}$ . Symbols are in Fig. 2

На линию метеорных вод хорошо ложатся группы точек, отвечающие изотопному составу речных ( $\delta D$  от  $-126,8$  до  $-100,0$  ‰ при  $\delta^{18}O$  от  $-16,9$  до  $-12,3$  ‰) и почвенных вод ( $\delta D$  от  $-110,2$  до  $-106,2$  ‰ при  $\delta^{18}O$  от  $-15,3$  до  $-15,0$  ‰). Рассматривая вариации изотопного состава природных вод региона в контексте его преобразования, получен-

ные диапазоны значений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , пожалуй, можно назвать начальным этапом изменения изотопного состава. Далее эволюционное развитие идет двумя путями: 1) на поверхности формируются сначала просадки, затем озера; 2) воды фильтруются через почвы и породы в подземные воды.

Озёрные воды формируются в застойном режиме, вода успевает нагреться по сравнению с речными и почвенными водами, начинают проявляться эффекты эвапотранспирации [28]. На диаграмме  $\delta D-\delta^{18}O$  это выражается как в утяжелении значений  $\delta D$  от  $-101,6$  до  $-69,3$  ‰ и  $\delta^{18}O$  от  $-14,0$  до  $-7,3$  ‰ (более теплые условия формирования), так и в отклонении фигуративных точек вправо от ГЛМВ (проявление процессов испарения).

Подземные воды зоны активного водообмена, наоборот, обеднены тяжелыми изотопами:  $\delta D$  от  $-135,2$  до  $-117,2$  ‰,  $\delta^{18}O$  от  $-19,6$  до  $-15,9$  ‰, что может быть следствием более холодных условий питания вод. Смещение группы точек изотопного состава влево от ГЛМВ указывает на неравновесные условия формирования влаги этих вод [29]. Отдельные работы [30, 31] объясняют, что такое смещение связано с конденсатогенными условиями их формирования. Но авторы этих работ также подчеркивают, что первопричиной отклонения являются неравновесные условия формирования влаги за счет относительно низких температур. Можно

предположить, что в формировании подземных вод верхнего гидрогеологического этажа участвовали воды, образовавшиеся при оттаивании мерзлых пород, широко развитые на данных глубинах.

Намного глубже, в отложениях нижнего этажа, совершенно другая картина. В водах апт-альб-сеноманского водоносного горизонта (~1200 м) наблюдается значительное утяжеление изотопного состава: значения  $\delta D$  составляют от  $-64,2$  до  $-60,3$  ‰ при  $\delta^{18}O$  от  $-8,5$  до  $-6,5$  ‰. Проследить полную эволюцию изотопного состава вод в интервале глубин от 200 до 1200 м не представляется возможным, поскольку на текущий момент мы не располагаем полным объемом данных. По-видимому, промежуточное положение между водами верхнего и нижнего этажей занимает проба из атлым-новомихайловского горизонта Унтыгейского месторождения со значениями  $\delta D$   $-103,1$  ‰ и  $\delta^{18}O$   $-12,3$  ‰ (рис. 2), выбивающаяся из этих двух групп точек. Можно сделать вывод о том, что, по мере просачивания вод из зоны активного водообмена в зону замедленного и весьма замедленного водообменов, изотопный состав воды значительно утяжеляется, особенно по кислороду (КС от 0,5 до 2,3 ‰). Данный эффект довольно ожидаем для вод глубоких водоносных горизонтов и объясняется наличием более высоких температур на глубине и достаточно длительным взаимодействием подземных вод с вмещающими алюмосиликатными горными породами, для которых характерны значения  $\delta^{18}O$

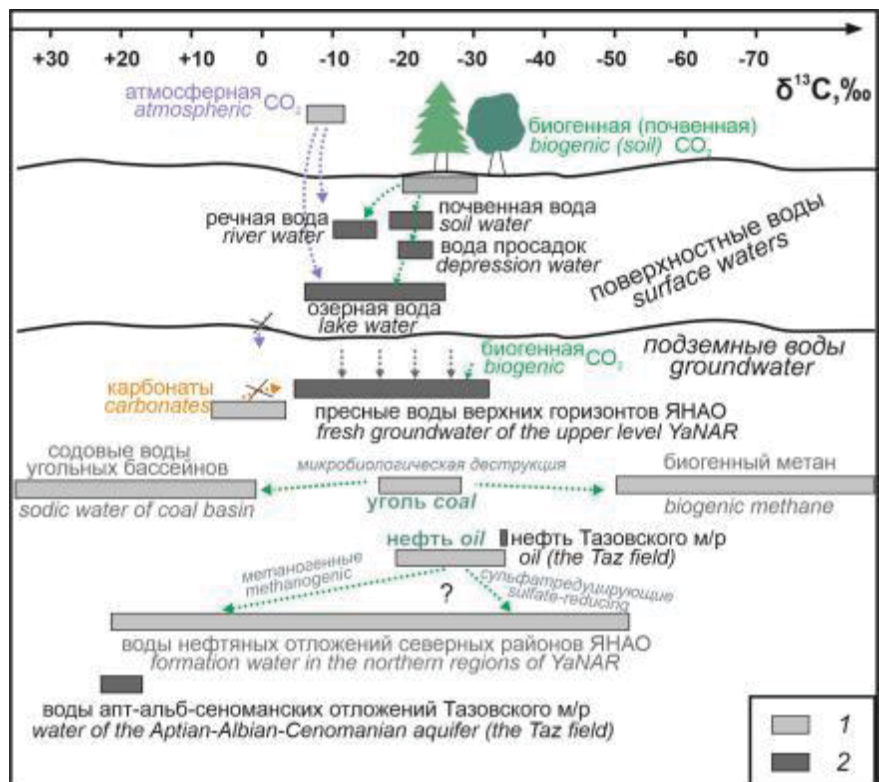
на 20–30 ‰ тяжелее, чем в водах [32]. При относительно длительном времени взаимодействия происходит изотопный обмен «легкого» кислорода вод с «тяжелым» кислородом пород [33].

Подтверждает полученные результаты недавно вышедшая работа [14] по изотопному составу более 200 проб вод нефтегазоносных отложений (с возрастом от палеозоя до верхнего мела) северных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна, где КС достигает в некоторых случаях 8 и более ‰. Представленные нами данные по водам апт-альб-сеноманского водоносного горизонта укладываются в пределы значений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  аналогичных вод всего региона. Если объединить все имеющиеся исследования по водам нефтегазоносных отложений с результатами по водам верхнего гидрогеологического этажа, то, несмотря на общий широкий разброс значений, усредненная линия пройдет по мере возрастания глубины и возраста вмещающих пород с утяжелением  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , и с уклоном от ГЛМВ вправо. Однако выборка еще недостаточно представительная и разбросы значений велики, чтобы делать конкретные выводы.

Результаты изучения изотопного состава водорастворенного углерода  $\delta^{13}C_{DIC}$  показали широкий диапазон значений от  $-30,4$  до  $23,6$  ‰ (табл. 1), т. е. от резко отрицательных до крайне положительных. В причинах такого разброса попробуем разобраться, для наглядности представив схему эволюции состава водорастворенного углерода (рис. 4).

**Рис. 4.** Схема распределения значений  $\delta^{13}C_{DIC}$  в регионе в сравнении с диапазонами  $\delta^{13}C$  в различных глобальных экологических системах [14, 34–37]. Цветом показаны возможные источники углекислоты. 1 – литературные данные; 2 – данные авторов. Линия  $\delta^{13}C$  (сверху) идет в обратную сторону (от положительных значений к отрицательным), как это принято в литературе по  $\delta^{13}C$

**Fig. 4.** Scheme of distribution of  $\delta^{13}C_{DIC}$  values in the region in comparison with  $\delta^{13}C$  ranges in various global ecological systems [14, 34–37]. Possible sources of carbon dioxide are shown in color. 1 – literature data; 2 – authors' data. The  $\delta^{13}C$  line (top) goes in the opposite direction (from positive to negative values) as it is customary in the literature on  $\delta^{13}C$



В поверхностных водах интервал значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-25,6$  до  $-3,9$  ‰, что в данных условиях указывает на наличие как минимум двух источников углекислоты: легкой биогенной (от  $-25,6$  до  $-15,6$  ‰) и тяжелой атмосферной (от  $-11,0$  до  $-3,9$  ‰). Процесс формирования и изотопного обмена углекислоты между водным и воздушным резервуарами в природных объектах многостадийный и комплексный. Отдельные размышления на эту тему приведены в работах [15, 38, 39]. Комплексный характер изменения изотопного состава DIC в общем виде приводит к следующим наблюдаемым закономерностям для различных природных водоемов региона. В почвенных водах и водах просадок однозначно превалирует биогенный источник  $\text{CO}_2$ . В данном случае можно сказать, что гидрокарбонат-ион формировался в восстановительной среде с большим содержанием органических веществ, малой циркуляцией вод и изотопным обменом с атмосферным  $\text{CO}_2$ . Речные и озерные воды характеризуются уже более тяжелыми значениями  $\delta^{13}\text{C}$ , указывающими на смешанный источник  $\text{CO}_2$ . Здесь «приток» атмосферной углекислоты за счет перемешивания вод становится более ощутимым. Для малых озер (с площадью менее 100 тыс. м<sup>2</sup>) (рис. 5, а) и в истоках, и заводях рек, насыщенных органическим веществом и с малоинтенсивным перемешиванием вод (застойные воды – низкая скорость обмена углекислотой с воздухом), вклад биогенной углекислоты в DIC существенно выше. В крупных водоемах с интенсивным течением воды и большой площадью зеркала (реки и крупные озера) вклад атмосферной углекислоты в общий баланс  $\text{HCO}_3^-$  будет большим.

В пресных подземных водах верхнего гидрогеологического этажа интервал значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-30,4$  до  $-4,1$  ‰. В целом можно сказать, что воды наследуют изотопный состав гидрокарбонат-иона поверхностных вод смешанного (биогенно-атмосферного) генезиса. Немногостораживает сохраняющийся тяжелый состав углерода, поскольку в данных условиях уже нет дополнительного вклада атмосферного  $\text{CO}_2$  и не развиты в таких количествах карбонатные породы, которые обогащены  $^{13}\text{C}$ . Тем не менее источником насыщенной изотопом  $^{13}\text{C}$  углекислоты может служить диффузионная почвенная углекислота [40], отлагающаяся в порах почв, либо вторичные процессы преобразования изотопного состава исходно биогенной углекислоты. В качестве возможных причин можем предположить наличие: 1) бактериальных процессов, переводящих обедненную легкими изотопами углекислоту в метан, оставляя в субстрате DIC, насыщенный  $^{13}\text{C}$  [41], или 2) криогенной метаморфизации, в результате которой более легкий углерод остается во льду, а более тяжелый переходит в жидкость, или же освобождается метан при оттаивании мерзлоты [13]. В поддержку второй причины говорит тот факт, что в двух пробах с максимальными концентрациями ионов хлора (87 и 62 мг/л) и натрия (84 и 52 мг/л), т. е. свидетельствующих о возможной криогенной метаморфизации, как раз тяжелые значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  ( $-6,8$  и  $-6,9$  ‰). Однако, судя по зависимости на рис. 5, b, вопрос этот требует дальнейшего изучения, в том числе – определений изотопного состава углерода и водорода в самом метане.

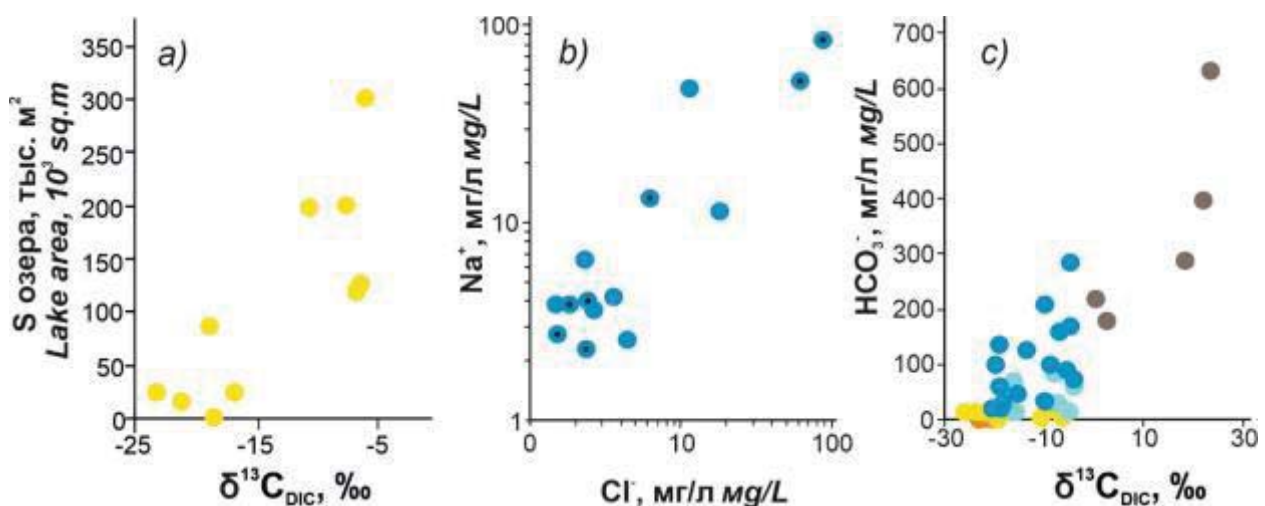


Рис. 5. Графики зависимости: а) значений  $\delta^{13}\text{C}$  озерных вод от площади озера; б) концентрации ионов натрия от хлора (с точкой внутри – значения  $\delta^{13}\text{C} > -11$  ‰); в) значений  $\delta^{13}\text{C}$  природных вод региона от концентрации гидрокарбонат иона. Условные обозначения представлены на рис. 2

Fig. 5. Graphs of dependence of: а)  $\delta^{13}\text{C}$  values of lake waters on the lake area; б) concentration of sodium ions on chlorine (with a dot inside –  $\delta^{13}\text{C}$  values  $> -11$  ‰); в)  $\delta^{13}\text{C}$  values of natural waters in the region on bicarbonate ion concentration. Symbols are in the Fig. 2

Представленная на рис. 5, с изотопно-концентрационная характеристика (ИКХ) [38] изученных вод показательно разделяет воды различных групп и, в первую очередь, – подземные воды апт-альб-сеноманского водоносного горизонта. Их точки ИКХ отстоят отдельно от всех других вод, несмотря на близость показателей изотопного состава кислорода и водорода с озерными водами. Речные воды и воды верхних водоносных горизонтов, ожидаемо, занимают промежуточное положение на графике ИКХ между озерными водами и водами глубинных водоносных горизонтов. При этом подземные воды в большей степени насыщены DIC. То есть на графике изотопно-концентрационной характеристики вод прослеживается линейный тренд насыщения вод DIC и тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$  по мере погружения во все более глубокие водоносные горизонты.

Поскольку в данном регионе изотопный состав вод замедленного водообмена не был изучен, на схеме (рис. 4) для примера приведены данные по содовым водам Кузнецкого угольного бассейна. Уникальные содовые воды высокой минерализации (до 27 г/л) имеют аномально положительные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  до 30 ‰ [36]. Объясняется такой эффект длительным взаимодействием системы «вода–уголь–метан», что привело к масштабному фракционированию изотопов углерода, в результате которого метан забрал «легкий» углерод, а углекислый газ – «тяжелый», затем последний унаследовал гидрокарбонат ион. Исследователи сходятся, что данному процессу способствует микробиологическая активность в угольном пласте [37, 42].

Изученные воды апт-альб-сеноманских отложений Тазовского месторождения имеют положительные значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от 18,2 до 23,6 ‰, в водах Западно-Малобалыгского и Федоровского месторождений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  полегче – от 0,3 до 2,4 ‰. При этом изотопный состав самой нефти достаточно легкий:  $\delta^{13}\text{C} = -32,8$  ‰. Более представительная выборка по пластовым водам из работы [14] показала очень широкий диапазон вариаций  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-51,8$  до  $21,8$  ‰. Имеются данные и по другим нефтяным бассейнам, например, в Калифорнии и Техасе (США), где  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  варьирует от  $-20$  до  $28$  ‰ [43] или в Мексике – от  $-23,6$  до  $11,2$  ‰ [34]. Столь широкий разброс значений объясняется микробиологической деструкцией органического вещества, протекающей по двум схемам: 1) низкие значения  $\delta^{13}\text{C}$  ( $< -10$  ‰), вероятно, являются результатом разложения анионов органических кислот сульфатредуцирующими бактериями; 2) высокие значения  $\delta^{13}\text{C}$  являются результатом деградации анионов метаногенными бактериями (как в случае и с угольными отложениями, описанными выше). В пластовых водах с температурами выше  $80^\circ\text{C}$  значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  обусловлены изотопным

равновесием между  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , образованных при термическом декарбоксилировании анионов короткоцепочечных алифатических кислот (в основном ацетата) [43–45].

В целом в природных водах ЯНАО, если рассматривать эволюцию изотопов водорастворенного углерода всех водных объектов, с увеличением концентрации  $\text{HCO}_3^-$  значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  увеличиваются (рис. 5, с), но необходимо учитывать, что выборка пока не очень представительная.

## Выводы

В работе показано распределение стабильных изотопов О, Н, С в природных водах ЯНАО начиная с поверхностных и до пластовых вод нефтегазовых отложений Тазовского месторождения. По результатам можно сделать несколько выводов.

1. По изотопному составу ( $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) поверхностные и подземные воды активного водообмена являются инфильтрационными. Почвенные и речные воды по составу близки к метеорным, в просадках и озерных водах изотопный состав смешивается в сторону утяжеления, особенно по кислороду (КС до 3 ‰), что указывает на наличие процессов испарения. Для пресных подземных вод верхнего гидрогеологического этажа характерен более легкий изотопный состав, что может свидетельствовать о большей доле участия талых вод многолетнемерзлых пород. Для соленых вод апт-альб-сеноманских отложений Тазовского месторождения характерен более тяжелый изотопный состав с небольшим уклоном от ГЛМВ вправо (КС от 0,5 до 2 ‰), что говорит о большем времени взаимодействия системы «вода–порода» и высоких температурах. Вопрос о возможности смешения инфильтрационных вод с седиментационными требует дополнительных исследований и на данном этапе не рассматривался.
2. По изотопному составу водорастворенного углерода ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ), совместно с привлечением и других данных по геологии и гидрогеологии региона, в водах ЯНАО присутствуют два источника углекислоты: биогенный и атмосферный. В водах почв и просадок принимает участие только биогенный  $\text{CO}_2$ , а в речных и озерных водах, с увеличением размера озер и интенсивности потока движения, начинает принимать активное участие атмосферная утяжеленная углекислота. В подземной гидросфере атмосферная углекислота перестает принимать участие в формировании состава вод. Согласно геологическим условиям не участвует углерод, образующийся при разложении карбонатных пород (по крайней мере, в больших масштабах), и любой глубинный (магматический, метаморфический).

Остается только биогенная углекислота, изменения изотопного состава которой связаны с различными процессами. Пресные подземные воды верхнего этажа наследуют изотопный состав гидрокарбонат-иона поверхностных вод смешанного генезиса. Сохранение достаточно высоких значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  при отсутствии атмосферной углекислоты, возможно, связано с криогенной метаморфизацией вод. Более тяжелый состав водорастворенного углерода аптальб-сеноманских отложений может свидетель-

ствовать о разложении анионов органических кислот метаногенными бактериями.

3. Это первый этап в изучении эволюции изотопного состава природных вод региона, которое мы собираемся продолжать с привлечением большего фактического материала и углублением в расшифровки. Но уже сейчас определены некоторые реперные характеристики по изотопному составу, на которые можно ориентироваться при интерпретации формирования химического состава вод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бешенцев В.А., Семенова Т.В. Криогенез пресных подземных вод Западно-Сибирской равнины (в пределах Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего района // Геология, поиски и разведка месторождений нефти и газа. – 2014. – № 1. – С. 6–11.
2. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia / I.S. Ivanova, O.G. Savichev, N.S. Trifonov, Yu.V. Kolubaeva, N.A. Volkova // Water. – 2021. – Vol. 13. – P. 3107.
3. Особенности формирования химического состава поверхностных вод арктических территорий Западной Сибири / Е.А. Солдатова, И.С. Иванова, Ю.В. Колубаева, Д.А. Соколов // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – № 11. – С. 1142–1156.
4. Бешенцев В.А., Семенова Т.В., Трофимова Н.С. Гидрогеохимия пресных подземных вод северной части ЗСМБ (в пределах Ямало-Ненецкого нефтегазодобывающего региона). – Тюмень: Изд-во ТИУ, 2017. – 233 с.
5. Вертикальная и латеральная гидрогеохимическая зональность подземных вод Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна / Б.П. Ставицкий, А.Р. Курчиков, А.Э. Конторович, А.Г. Плавник // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 58–84.
6. Нефтегазовая гидрогеология Западно-Сибирского мегабассейна / В.М. Матусевич, А.Р. Курчиков, Т.В. Семенова, О.Л. Павленко. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2008. – 100 с.
7. Подземные воды мезозойского гидрогеологического бассейна в пределах северной части Западно-Сибирского мегабассейна / В.А. Бешенцев, Т.В. Семенова, Р.Н. Абдрашитова, М.Д. Заватский. – Тюмень: ТИУ, 2021. – 170 с.
8. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Ян П.А. Особенности латеральной гидрогеохимической и аутигенно-минералогической зональности оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60 (6). – С. 843–859.
9. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape / P. Ala-Aho, C. Soulsby, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, J. Karlsson, S. Serikova, S.N. Vorobyev, R.M. Manasypov, S. Loiko, D. Tetzlaff // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 556. – P. 279–293.
10. Изотопно-кислородный и дейтериевый состав снежного покрова Западной Сибири на профиле от Томска до Обской губы / Ю.К. Васильчук, В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, Н.А. Буданцева, С.Н. Воробьев, С.Н. Кирпотин, И.В. Крицков, Р.М. Манасыпов, О.С. Покровский, Ю.Н. Чижова // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 471. – № 5. – С. 590–594.
11. Чижова Ю.Н., Бабкин Е.М., Хомутов А.В. Изотопный состав кислорода и водорода повторно-жильных льдов Центрального Ямала // Лед и снег. – 2021. – Т. 61 (1). – С. 137–148.
12. Соколовский Л.Г., Поляков В.А. Изотопно-гидрогеохимическое изучение подземных и поверхностных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна и Уральской сложной гидрогеологической складчатой области // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 7. – С. 65–71.
13. Methane in West Siberia terrestrial seeps: origin, transport, and metabolic pathways of production / A.F. Sabrekov, I.E. Terentjeva, G.J. McDermid, Y.V. Litt, A.S. Prokushkin, M.V. Glagolev, A.V. Petrozhitskiy, P.N. Kalinkin, D.V. Kuleshov // Global Change Biology. – 2023. – Vol. 29 (18). – P. 5334–5351.
14. Новиков Д.А., Пыряев А.Н. Стабильные изотопы O, H, C в подземных водах нефтегазоносных отложений северных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна // Геология и минеральные ресурсы Сибири. – 2023. – Т. 2 (54). – С. 23–30.
15. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 7–19.
16. Khafizov S., Syngaevsky P., Dolson C.J. The West Siberian Super Basin: the largest and most prolific hydrocarbon basin in the world // AAPG Bulletin. – 2022. – Vol. 106 (3). – P. 517–572.
17. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub> / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczebak, M.O. Jedrysek // Environmental Pollution. – 2011. – Vol. 159. – P. 294–301.
18. Epstein S., Mayeda T. Variation of O<sup>18</sup> content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – Vol. 4 (5). – P. 213–224.
19. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods // Rapid Communications in Mass Spectrometry. – 2000. – № 4. – P. 1044–1046.
20. Новые данные по распространению и изотопная характеристика остатков мамонта Mammuthus Primigenius (Proboscidea, Elephantidae) в позднем плейстоцене минусинской котловины (Ожняя Сибирь) / Д.Г. Маликов, С.В. Святко, А.Н. Пыряев, К.А. Колобова, И.Ю. Овчинников, Е.Л. Маликова // Зоологический журнал. – 2023. – Т. 102. – № 8. – С. 924–938.

21. Reference products for environment and trade. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (дата обращения 17.10.2022).
22. Плавник А.Г., Сальникова Ю.И. Гидрогеохимия сеноманских отложений района Тазовского месторождения // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 2. – № 2. – С. 191–196.
23. Zhang C., Li X., Ma J. Stable isotope and hydrochemical evolution of shallow groundwater in mining area of the Changzhi Basin, northern China // Environmental Earth Sciences. – 2022. – Vol. 81. – P. 294.
24. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater. under the influences of anthropogenic activities / Z. Li, Q. Yang, Y. Yang, H. Ma, H. Wange, J. Luoa, J. Bian, J.D. Martin // Journal of Hydrology. – 2019. – Vol. 576. – P. 685–697.
25. Water isotope analyses and flow measurements for understanding the stream and meteoric recharge contributions to the Poiano evaporite karst spring in the North Apennines, Italy / F. Ronchetti, M. Deiana, S. Lugli, M. Sabattini, V. Critelli, A. Aguzzoli, M. Mussi // Hydrogeology Journal. – 2023. – Vol. 31. – P. 601–619.
26. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – Vol. 19. – P. 435–463.
27. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – Vol. 133. – P. 1702–1703.
28. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – Vol. 210. – P. 106445.
29. Deuterium excess in marine water vapor: dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation / M. Benetti, G. Reverdin, C. Pierre, L. Merlivat, C. Risi, H.C. Steen-Larsen, F. Vimeux // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – Vol. 119. – P. 584–593.
30. D’amore F., Panichi C. Geochemistry in geothermal exploration // International Journal of Energy Research. – 1985. – Vol. 9 (3). – P. 277–298.
31. Oxygen isotopes as a tool to quantify reservoir-scale CO<sub>2</sub> pore-space saturation / S. Serno, S. Flude, G. Johnson, B. Mayer, R. Karolytė, R.S. Haszeldine, S.M.V. Gilfillan // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2017. – Vol. 63. – P. 370–385.
32. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 9<sup>th</sup> ed. – Switzerland: Springer Nature AG, 2021. – 528 p.
33. Ферронский В., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный Мир, 2009. – 632 с.
34. Birkle P., Angulo M., Lima S. Hydrochemical-isotopic tendencies to define hydraulic mobility of formation water at the Samaria-Sitio Grande oil field, Mexico // Journal of Hydrology. – 2006. – Vol. 317. – P. 202–220.
35. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 226 с.
36. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 116. – 104579.
37. Colding S., Boreham C.J., Esterle J.S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters // International Journal of Coal Geology. – 2013. – Vol. 120. – P. 24–40.
38. Пырьев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 148–157.
39. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением / А.Н. Пырьев, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 22–33.
40. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – Vol. 236. – P. 419–429.
41. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico / J.W. Pohlman, C. Ruppel, D.R. Hutchinson, R. Downer, R.B. Coffin // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – Vol. 25. – P. 942–951.
42. Biogeochemical controls on methane generation: a review on Indian coal resources / T. Adsul, S. Ghosh, S. Kumar, B. Tiwari, S. Dutta, A.K. Varma // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – P. 695.
43. Carothers W.W., Kharaka Y.K. Stable carbon isotopes of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in oil-field waters –implications for the origin of CO<sub>2</sub> // Geochimica et Cosmochimica Acta, – 1980. – Vol. 44 (2). – P. 323–332.
44. Microbial communities and sulfur isotopes of the cenozoic sulfurous oil reservoirs in the southwestern Qaidam Basin, Western China / Y. Jiao, L. An, W. Wang, J. Ma, Ch. Wu, X. Wu // Geology Scientific reports. – 2023. – 368942843.
45. Geological control on carbon isotope equilibrium and kinetic fractionation of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in microbial coalbed and shale gas systems / X. Chen, M. Tao, Z. Zhou, G. Holland, Y. Wang // Chemical Geology. – 2023. – Vol. 635. – 121609.

### Информация об авторах

**Олеся Евгеньевна Лепокурова**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. [LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru](mailto:LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

**Ирина Сергеевна Иванова**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4. [ivanovais\\_1986@mail.ru](mailto:ivanovais_1986@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6240-2724>

**Александр Николаевич Пырьев**, кандидат химических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. [pyrayev@igm.nsc.ru](mailto:pyrayev@igm.nsc.ru)



**Олег Айтжанович Исмагулов**, начальник Управления лицензирования, подготовки проектов и работы с государственными органами ООО «Меретояханефтегаз», Россия, 625048, г. Тюмень, ул. 50 лет Октября, 14. Ismagulov.OA@gazprom-neft.ru

Поступила в редакцию: 10.01.2024

Поступила после рецензирования: 16.01.2024

Принята к публикации: 25.01.2024

## REFERENCES

1. Beshentsev V.A., Semenova T.V. Cryogenesis of fresh underground waters in west siberian plane. (within Yamal-Nenets oil and gas production region). *Geology, prospecting and exploration of oil and gas fields*, 2014, no. 1, pp. 6–11. (In Russ.)
2. Ivanova I.S., Savichev O.G., Trifonov N.S., Kolubaeva Yu.V., Volkova N.A. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of Northern West Siberia. *Water*, 2021, vol. 13, 3107 p.
3. Soldatova E.A., Ivanova I.S., Kolubaeva Yu.V., Sokolov D.A. Features of the formation of the chemical composition of surface water in the arctic territories of western Siberia. *Geochemistry*, 2022, vol. 67, no. 11, pp. 1142–1156. (In Russ.)
4. Beshentsev V.A., Semenova T.V., Trofimova N.S. *Hydrogeochemistry of fresh groundwater in the northern part of the West Siberian Basin (within the Yamalo-Nenets oil and gas producing region)*. Tyumen, TIU Publ., 2017. 233 p. (In Russ.)
5. Stavitsky B.P., Kurchikov A.R., Kontorovich A.E., Plavnik A.G. Vertical and lateral hydrogeochemical zoning of groundwater in the West Siberian oil and gas basin. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2006, no. 5–6, pp. 58–84. (In Russ.)
6. Matushevich V.M., Kurchikov A.R., Semenova T.V., Pavlenko O.L. *Oil and gas hydrogeology of the West Siberian megabasin*. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2008. 100 p. (In Russ.)
7. Beshentsev V.A., Semenova T.V., Abdrashitova R.N., Zavatsky M.D. *Groundwater of the Mesozoic hydrogeological basin within the northern part of the West Siberian megabasin*. Tyumen, TIU Publ., 2021. 170 p. (In Russ.)
8. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Yan P.A. Lateral zoning of groundwater chemistry and authigenic mineralogy in the oxfordian regional reservoir of the Nadym–Taz interfluvium. *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 6, pp. 662–674. (In Russ.)
9. Ala-Aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasypov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 556, pp. 279–293.
10. Vasilchuk Yu.K., Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Budantseva N.A., Vorobyov S.N., Kirpotin S.N., Kritskov I.V., Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Chizhov Yu.N. Oxygen isotope and deuterium composition of the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Gulf of Ob. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 471, no. 5, pp. 590–594. (In Russ.)
11. Chizhova Yu.N., Babkin E.M., Khomutov A.V. Isotopic composition of oxygen and hydrogen in ice wedges in Central Yamal. *Ice and Snow*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 137–148. (In Russ.)
12. Sokolovsky L.G., Polyakov V.A. Isotope-hydrogeochemical study of underground and surface waters of the West Siberian artesian basin and the Ural complex hydrogeological folded region. *Exploration and protection of subsurface resources*, 2010, no. 7, pp. 65–71. (In Russ.)
13. Sabrekov A.F., Terentjeva I.E., McDermid G.J., Littl Y.V., Prokushkin A.S., Glagolev M.V., Petrozhitskiy A.V., Kalinkin P.N., Kuleshov D.V. Methane in West Siberia terrestrial seeps: Origin, transport, and metabolic pathways of production. *Global Change Biology*, 2023, vol. 29, no. 18, pp. 5334–5351.
14. Novikov D.A., Pyryaev A.N. Stable isotopes O, H, C in groundwater of oil and gas deposits in the northern regions of the West Siberian sedimentary basin. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2023, vol. 54, no. 2, pp. 23–30. (In Russ.)
15. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N. The use of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon in interpreting the conditions for the formation of surface water bodies of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 6, pp. 7–19. (In Russ.)
16. Khafizov S., Syngaevsky P., Dolson J.C. The West Siberian SuperBasin: The largest and most prolific hydrocarbon basin in the world. *AAPG Bulletin*, 2022, vol. 106, no. 3, pp. 517–572.
17. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 294–301.
18. Epstein S., Mayeda T. Variation of O<sup>18</sup> content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4, no. 5, pp. 213–224.
19. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2000, no. 4, pp. 1044–1046.
20. Malikov D.G., Svyatko S.V., Pyryaev A.N., Kolobova K.A., Ovchinnikov I.Yu., Malikova E.L. New data on the distribution and isotopic characteristics of the remains of the mammoth *Mammuthus Primigenius* (Proboscidea, Elephantidae) in the Late Pleistocene of the Minusinsk Basin (Southern Siberia). *Zoological Journal*, 2023, vol. 102, no. 8, pp. 924–938. (In Russ.)
21. *Reference products for environment and trade*. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (accessed 17 October 2022).
22. Plavnik A.G., Salnikova Yu.I. Hydrogeochemistry of Cenomanian deposits of the Tazovskoye deposit area. *Interexpo Geo-Siberia*, 2023, vol. 2, no. 2, pp. 191–196. (In Russ.)
23. Zhang C., Li X., Ma J. Stable isotope and hydrochemical evolution of shallow groundwater in mining area of the Changzhi Basin, northern China. *Environmental Earth Sciences*, 2022, vol. 81, pp. 294.
24. Li Z., Yang Q., Yang Y., Ma H., Wange H., Luo J., Bian J., Martin J.D. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 576, pp. 685–697.

25. Ronchetti F., Deiana M., Lugli S., Sabbatini M., Critelli V., Aguzzoli A., Mussi M. Water isotope analyses and flow measurements for understanding the stream and meteoric recharge contributions to the Poiano evaporite karst spring in the North Apennines, Italy. *Hydrogeology Journal*, 2023, vol. 31, pp. 601–619.
26. Dansgaard W. Sable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 19, pp. 435–463.
27. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
28. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, 106445 p.
29. Benetti M., Reverdin G., Pierre C., Merlivat L., Risi C., Steen-Larsen H.C., Vimeux F. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, vol. 119, pp. 584–593.
30. D'Amore F., Panichi C. Geochemistry in geothermal exploration. *International Journal of Energy Research*, 1985, vol. 9 (3), pp. 277–298.
31. Serno S., Flude S., Johnson G., Mayer B., Karolytè R., Haszeldine R.S., & Gilfillan S.M.V. Oxygen isotopes as a tool to quantify reservoir-scale CO<sub>2</sub> pore-space saturation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, vol. 63, pp. 370–385.
32. Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 9<sup>th</sup> ed. Switzerland, Springer Nature AG, 2021. 528 p.
33. Ferronsky V., Polyakov V.A. *Isotops of the Earth's hydrosphere*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p. (In Russ.)
34. Birkle P., Angulo M., Lima S. Hydrochemical-isotopic tendencies to define hydraulic mobility of formation water at the Samaria-Sitio Grande oil field, Mexico. *Journal of Hydrology*, 2006, vol. 317, pp. 202–220.
35. Galimov E.M. *Geochemistry of stable carbon isotopes*. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p. (In Russ.)
36. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 116, 104579.
37. Golding S., Boreham C.J., Esterle J.S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters. *International Journal of Coal Geology*, 2013, vol. 120, pp. 24–40.
38. Pyrayev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A. Stable isotopes as a tool to check the boundaries of closed ecosystems, by the example of the Vitim river basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.)
39. Pyrayev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Derkachev A.S., Chernykh A.V., Khvachevskaya A.A. Isotope-concentration characteristics of natural waters in the Novosibirsk region as a tool for control of their interaction with the environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 22–33. (In Russ.)
40. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, pp. 419–429.
41. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, vol. 25, pp. 942–951.
42. Adsul T., Ghosh S., Kumar S., Tiwari B., Dutta S., Varma A.K. Biogeochemical controls on methane generation: a review on Indian coal resources. *Minerals*, 2023, vol. 13, pp. 695.
43. Carothers W.W., Kharaka Y.K. Stable carbon isotopes of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in oil-field waters –implications for the origin of CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, vol. 44, no. 2, pp. 323–332.
44. Jiao Y., An L., Wang W., Ma J., Wu Ch., Wu X. Microbial communities and sulfur isotopes of the cenozoic sulfurous oil reservoirs in the Southwestern Qaidam Basin, Western China. *Geology Scientific reports*, 2023, 368942843.
45. Chen X., Tao M., Zhou Z., Holland G., Wang Y. Geological control on carbon isotope equilibrium and kinetic fractionation of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in microbial coalbed and shale gas systems. *Chemical Geology*, 2023, vol. 635, 121609.

### Information about the authors

**Olesya E. Lepokurova**, Dr. Sc., Leading Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

**Irina S. Ivanova**, Cand. Sc., Senior Researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, 4, Academicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. ivanovais\_1986@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6240-2724>

**Aleksandr N. Pyrayev**, Cand. Sc., Researcher, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. Pyrayev@igm.nsc.ru

**Oleg A. Ismagulov**, Head of the Department of Licensing, Project Preparation and Work with Government Authorities of Meretoyakhaneftegaz LLC, 14, 50 let Oktyabrya avenue, Tyumen, 635048, Russian Federation. Ismagulov.OA@gazprom-neft.ru

Received: 10.01.2024

Revised: 16.01.2024

Accepted: 25.01.2024

УДК 551.312.2 (551.8:556.5)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535  
Шифр специальностей ВАК: 1.6.6, 1.6.16. 1.6.21

## Изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании Западно-Сибирской равнины в голоцене

О.Г. Савичев✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉OSavichev@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью понимания и долгосрочного прогноза условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод в бассейне реки Оби. *Цель:* выявление закономерностей изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании равнинной части бассейна реки Оби в голоцене. *Методы:* методы математического моделирования, статистические методы, географо-гидрологический метод. *Результаты и выводы.* Выполнен анализ материалов многолетних гидрогеологических и гидрологических наблюдений на заболоченных территориях Обского бассейна. Изучены гидродинамические и геохимические условия взаимодействия подземных, речных и болотных вод. Показано, что возникновение и эволюция болотных экосистем на рассматриваемой территории представляет собой комплекс эрозионно-аккумулятивных процессов, развитие которого до современного периода проходило в три стадии: 1) от начала интенсивной деградации оледенения до 4...6 тыс. лет назад – формирование первичной гидрографической сети примерно современного вида, распространение торфяных болот; режим подземных вод близок к режиму подземных вод криолитозоны на севере современной Западной Сибири; 2) от 4...6 тыс. лет назад до 1,5...3 тыс. лет назад – широкомасштабное распространение низинных болот и деградация части первичной речной сети; уровни подземных вод на водоразделах рек в целом ниже, чем в настоящее время, но амплитуда их колебаний высока; значительная часть водосборов в половодье и паводки затоплена, а в межень – подтоплена; 3) от 1,5...3 тыс. лет назад – деградация значительной части первичной речной сети, широкое распространение верховых болот, формирование на болотах вторичной гидрографической сети; на водоразделах происходит подъем уровней подземных вод, но амплитуда их колебаний снижается, а водообмен с болотами существенно сокращается; в долинах средних и больших рек водообмен между поверхностными и подземными водами наиболее интенсивный, что обуславливает поступление в речные и грунтовые воды из болот значительного количества органических веществ и продуктов их трансформации. Оценены сценарии возможных изменений условий взаимодействия поверхностных и подземных вод.

**Ключевые слова:** Подземные, болотные и речные воды, условия взаимодействия, сценарии изменения, Обской бассейн, Западная Сибирь

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта РФ (проект № 23-27-00039).

**Для цитирования:** Савичев О.Г. Изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании Западно-Сибирской равнины в голоцене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 170–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535

---

UDC 551.312.2 (551.8:556.5)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535

## Changes in conditions of interaction of ground, river and swamp water during swamping of the West Siberian plain in the Holocene

O.G. Savichev✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉OSavichev@mail.ru

**Abstract. Relevance.** The need to understand and long-term forecast the conditions of interaction between groundwater, river and swamp waters in the Ob River basin. **Aim.** To identify patterns of changes in the conditions of interaction of groundwater, river and swamp waters during swamping of the flat part of the Ob River basin in the Holocene. **Methods.** Mathematical modeling methods, statistical methods, geographical-hydrological method. **Results and conclusions.** The author has carried out an analysis of materials from long-term hydrogeological and hydrological observations in the wetlands of the Ob basin and studied the hydrodynamic and geochemical conditions for interaction of groundwater, river and swamp waters. It is shown that the emergence and evolution of swamp ecosystems in the territory under consideration is a complex of erosion-accumulation processes, the development of which until the modern period took place in three stages: 1) from the beginning of intense degradation of glaciation to 4...6 thousand years ago is the formation of a primary hydrographic network approximately modern appearance, distribution of peat bogs; the groundwater regime is close to the groundwater regime of the permafrost zone in the north of modern Western Siberia; 2) from 4...6 thousand years ago to 1.5...3 thousand years ago is large-scale distribution of lowland swamps and degradation of part of the primary river network; groundwater levels in river watersheds are generally lower than at present, but the amplitude of their fluctuations is high; a significant part of the watersheds are flooded during high water and floods, and underflooded during low water periods; 3) from 1.5...3 thousand years ago is degradation of a significant part of the primary river network, wide distribution of raised swamps, formation of a secondary hydrographic network in the swamps; at watersheds, groundwater levels rise, but the amplitude of their fluctuations decreases, and water exchange with swamps is significantly reduced; in the valleys of medium and large rivers, water exchange between surface and groundwater is most intense, which causes the flow of significant amounts of organic substances and products of their transformation into river and groundwater from swamps. Scenarios of possible changes in the conditions of interaction between surface and groundwater were assessed.

**Keywords:** groundwater, swamp and river waters, interaction conditions, change scenarios, Ob basin, Western Siberia

**Acknowledgements:** The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

**For citation:** Savichev O.G. Changes in conditions of interaction of ground, river and swamp water during swamping of the West Siberian plain in the Holocene. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 170–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4535

---

## Введение

В Сибири в голоцене произошли значительные изменения климата и состояния окружающей среды, в результате которых к настоящему времени сформировались обширнейшие болотные массивы [1–11]. По мнению многих исследователей, в перспективе наиболее вероятно дальнейшее увеличение температуры атмосферного воздуха и, как следствие, активизация экзогенных геологических процессов и деформаций границ водных объектов на территориях распространения болот и многолетней мерзлоты [4, 5, 8, 11–23]. В то же время скорость и направление эволюции болотных систем в настоящее время не очевидны: что более вероятно – деградация болот с выделением огромного количества парниковых газов, переформирование гидрографической сети с появлением большого количества труднопроходимых водотоков и водоемов (которое в ряде случаев воспринимается как следствие потепления) или что-то еще?

Не вызывает сомнений, что подобная неопределенность (пока в недостаточной мере регулируемая нормативными документами в области проектирования, строительства и эксплуатации на заболоченных территориях) может привести к увеличению количества отказов технических систем в составе нефтегазодобывающего, нефтегазотранспортного, автодорожного и жилищно-коммунального комплексов. Это обуславливает актуальность исследований в области прогнозирования изменения окру-

жающей среды и повышения безопасности и надежности технических компонентов природно-техногенных комплексов и определяет цель рассматриваемого исследования – выявление закономерностей изменения условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод при заболачивании равнинной части бассейна реки Оби в голоцене.

Исследование направлено на оценку тенденций эволюции болотных экосистем Западной Сибири, уточнение сценариев изменения крупных природно-техногенных комплексов, разработку рекомендаций по повышению надежности и безопасности технических систем, функционирующих в условиях сильной заболоченности, и является в значительной мере результатом обобщения работ, выполненных в последние три десятилетия под руководством и/или при непосредственном участии автора в Томском политехническом университете (ТПУ) совместно с коллегами из Томского государственного университета (ТГУ), акционерного общества (АО) «Томскгеомониторинг», Сибирского регионального центра Федерального государственного бюджетного учреждения (СРЦ ФГБУ) «Гидроспецгеология», Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской Академии наук (ТФ ИНГТ СО РАН) и ООО «ИНГЕОТЕХ» [24–33].

## Объекты и методика исследования

Основные объекты исследования – левобережные притоки р. Оби – реки Шегарка и Чая с ее притоками

(рр. Андарма, Бакчар, Галка, Ключ, Икса) – расположены в южно-таежной подзоне Западной Сибири. Дополнительно изучены реки в Горном Алтае (в верховьях Катуня; р. Обь образуется при слиянии рек Катуня и Бии), на границе лесостепной зоны и южно-таежной подзоны в районе юго-восточной части Васюганского болотного комплекса, в подзоне средней тайги, а также на границе северной тайги и лесотундры, лесотундры и тундры (рис. 1, а).

Для достижения поставленной цели поэтапно рассмотрены следующие задачи: 1) оценка гидро-

динамических условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод на характерных участках с различными условиями развития болотных процессов; 2) выявление взаимного влияния подземных, речных и болотных вод на их химический состав; 3) обобщение полученных данных и их сопоставление с состоянием водных объектов на разных стадиях развития болотных процессов. В указанной последовательности были выполнены следующие мероприятия, которые условно можно сгруппировать в три этапа.



а



б

**Рис. 1.** Схема Обского бассейна (а) и расположения профиля моделирования изменения уровней подземных вод в голоцене (б; расчет по уравнениям (1)–(3)); природные зоны в бассейне р. Оби: I – тундра; II – лесотундра и северная тайга; III – средняя тайга; IV – южная тайга; V – лесостепь; VI – степь; VII – горные районы (схема а приведена по [33]); ● – участок размещения основных объектов исследования в районе профиля AP–OP (б), который проходит через посты: AP – р. Андарма у с. Панычево; GB – р. Галка у с. Бакчар; TNM – р. Тетеренка у урочища Ново-Макаровка; BP – р. Бакчар у с. Поляньянка; IP – р. Икса у с. Плотниково; SB – р. Шегарка у с. Бабарыкино; OP – р. Обь у п. Победа; участки наблюдений ТПУ на болотах: bV – восточная часть Васюганского болота между с. Поляньянка и урочищем Гавриловка; bO – часть Обского болота у сел Нащеково (фон) и Мельниково (загрязненный участок); bT – болото у п. Тимирязево; гидрогеологические скважины: 63р – с. Мельниково; 89р – с. Каргала; 110р – с. Бакчар; - - - - положение расчетного профиля уровней грунтовых вод, вычисленных по уравнениям (1)–(3) (основа – снимок Google Earth); ♦ – дополнительные объекты исследования;

**Fig. 1.** Scheme of the Ob basin (a) and location of the modeling profile for changes in groundwater levels in the Holocene (b; calculation using equations (1)–(3)); natural areas in the river basin Ob: I – tundra; II – forest-tundra and northern taiga; III – middle taiga; IV – southern taiga; V – forest-steppe; VI – steppe; VII – mountainous areas (Scheme a is given after [33]); ● – the area where the main research objects are located in the area of the AP–OP profile (b), which passes through the posts: AP is the Andarma river at the Panychevo village; GB is the Galka river at the Bakchar village; TNM is the Teterenka river at the Novo-Makarovka tract (non-residential place); BP is the Bakchar river at the Polnyanka village; IP is the Iksa river at the Plotnikovo village; SB is the Shegarka river at the Babarykino village; OP is the Ob river at the Pobeda village; TPU observation areas in swamps: bV is the eastern part of the Vasyugan swamp between the Polnyanka village and Gavrilovka tract; bO is the part of the Ob fen near the villages of Nashchekovo (background) and Melnikovo (polluted area) villages; bT is the swamp near the Timiryazev area; hydrogeological wells: 63p is the Melnikovo village; 89p is the Kargala village; 110p is the Bakchar village; - - - - is the position of the calculated profile of groundwater levels calculated using equations (1)–(3) (based on Google Earth image); ♦ – the additional research objects

1. Проведены расчёты характерных уровней речных вод  $H_r$  (среднегодовых, средних максимальных, средних за период открытого русла, максимальных с обеспеченностью 1, 5, 10 %) и оценены условия затопления и подтопления долин рек Оби, Томи (правый приток р. Оби), Васюган, Парабель (левые притоки р. Оби), Икса (элемент речной системы «Икса–Чая–Обь»), Бакчар («Бакчар–Чая–Обь»), Ключ («Ключ–Бакчар–Чая–Обь»), Киевский Еган (Киевский Еган – протока Киевская – Обь) в пределах Томской области. Полученные данные сопоставлены с материалами обследований болот с целью выявления условий водообмена между реками, горизонтами подземных вод и болотами разных типов. С этой же целью по материалам поисковых и разведочных работ на торф построены кривые депрессии грунтовых вод по профилю от р. Андармы («Андарма–Парбиг–Чая–Обь») у с. Панычево до р. Оби у с. Мельниково.

В качестве исходной информации использованы материалы многолетних наблюдений Росгидромета за расходами и уровнями речных вод, уровнями болотных вод (Баксинское болото в верховьях р. Шегарки в Новосибирской области), данные многолетних наблюдений в сети государственного мониторинга недр на территории Томской области (Томская геолого-разведочная экспедиция (ГРЭ), АО «Томскгеомониторинг», СРЦ ФГБУ «Гидроспецгеология») за уровнями подземных вод, а также данные наблюдений на болотном стационаре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа (СибНИИСХиТ) СО РАН в районе с. Польшанка в Бакчарском районе Томской области, результаты поисковых и геолого-разведочных работ на торф в 1950–1980-е гг., материалы проведенных сотрудниками ТПУ обследований болот и речных долин, а также опубликованные результаты исследований других авторов [25–28, 30–47].

Полевые работы на болотах и в речных долинах в разные годы проводились под руководством и при непосредственном участии автора с учетом требований [48–50]. Гидрологические расчеты выполнены автором, согласно [51], с использованием трехпараметрического гамма-распределения, а расчёты фактических (среднегодовых) и ретроспективных уровней подземных вод  $H_{gr}$  и положения водоразделов  $L_{ws}$  – с использованием уравнения Дюпюи (1, 2):

$$H_{gr,x} = \sqrt{H_{r,1}^2 - \frac{H_{r,1}^2 - H_{r,2}^2}{L_{12}} \cdot x + \frac{Inf}{K_f} \cdot (L_{12} - x) \cdot x}, \quad (1)$$

$$L_{ws} = \frac{L_{12}}{2} - \frac{K_f}{Inf} \cdot \left( \frac{H_{r,1}^2 - H_{r,2}^2}{2 \cdot L_{12}} \right), \quad (2)$$

где  $H_{r,1}$  и  $H_{r,2}$  – среднегодовые месячные или годовые уровни воды смежных рек  $p_1$  и  $p_2$  (либо подземных вод в гидрогеологической скважине  $p_1$  и

реки  $p_2$ );  $H_{gr,x}$  – уровень подземных (или болотных) вод на расстоянии  $x$  от уреза реки  $p_1$ ;  $L_{12}$  – расстояние между объектами  $p_1$  и  $p_2$ ;  $L_{ws}$  – расстояние от объекта  $p_1$  до водораздела между объектами  $p_1$  и  $p_2$ ;  $K_f$  – средний по профилю коэффициент фильтрации;  $Inf$  – средняя по профилю инфильтрация. Для оценки инфильтрации в первом приближении использовалось допущение о примерном равенстве инфильтрации и подземной составляющей речного стока в среднем за многолетний период. При этом слой месячного стока подземных вод  $Y_{gr,i}$  определяется следующим образом [26, 28, 52]:

$$Y_{gr,i} = \begin{cases} Y_{r,i}; & i = ib, \dots, ie \\ Y_{r,ie} + (Y_{r,ib} - Y_{r,ie}) \cdot (i - ie) / (ib - ie); & \end{cases} \quad (3)$$

где  $Y_{r,i}$  – слой суммарного речного стока за  $i$ -й месяц календарного года;  $ib$  и  $ie$  – начало и конец зимней межени согласно [53]; для притоков Средней Оби зимняя межень – с декабря по март. При оценке влияния различных факторов на соотношение  $Inf/K_f$ , величину подземной составляющей суммарного речного стока, а также ряд других величин проводился корреляционный и регрессионный анализ с учетом выполнения условия (4):

$$|r| \geq 2 \cdot \delta_r, \quad \delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad |k_i| \geq 2 \cdot \delta_k, \quad (4)$$

где  $N$  – общий объем наблюдений;  $r$  и  $\delta_r$  – коэффициент корреляции и погрешность его определения;  $k_i$  и  $\delta_k$  –  $i$ -й коэффициент регрессии и погрешность его определения.

2. Для подтверждения и уточнения результатов анализа гидрогеодинамических условий взаимодействия подземных, речных и болотных вод выполнено обобщение и анализ гидрогеохимических данных. Поскольку сопряженные наблюдения за химическим составом подземных, речных и болотных вод проводятся очень редко, был выполнен расчет средних арифметических и средних квадратических значений, проверка на однородность по среднему с использованием критерия Стьюдента (5) и дисперсии по критерию Фишера (6), составлены уравнения геохимического баланса (7) и оценены объемы разгрузки подземных вод из отложений разного возраста в русловую сеть рек Шегарки, Чаи и ее притоков – рек Бакчар, Галки, Иксы (8), (9):

$$K_S = \frac{|A_1 - A_2|}{\sqrt{N_1 \cdot \sigma_1^2 + N_2 \cdot \sigma_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2 \cdot (N_1 + N_2 - 2)}{(N_1 + N_2)}}, \quad (5)$$

$$K_F = \frac{\max(\sigma_1^2, \sigma_2^2)}{\min(\sigma_1^2, \sigma_2^2)}, \quad (6)$$

$$G_Y = G_r + G_{sn} \pm \Delta G, \quad (7)$$

$$Q_{g2} = Q_g \cdot \frac{(S_{rw} - S_{g1})}{(S_{g2} - S_{g1})}, \quad (8)$$

$$Q_{g1} = Q_g - Q_{g2}, \quad (9)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  – объемы сравниваемых выборок совокупности, для каждой из которых рассчитаны среднее арифметическое  $A_1$ ,  $A_2$  и стандартное отклонение  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ;  $K_S$  и  $K_F$  – фактические значения критериев Стьюдента и Фишера;  $G_Y$  – годовой суммарный сток растворенных солей в замыкающем створе исследуемой реки, т/год;  $G_r$ ,  $G_{sn}$  – поступление растворенных веществ с дождем и снеготалыми водами;  $\Delta G$  – результат взаимодействий в системе «вода–порода»;  $Q_g$  – среднегодовой расход подземных вод;  $Q_{g1}$  и  $Q_{g2}$  – составляющие подземного стока, соответствующие притоку подземных вод из неоген-четвертичного и палеогенового комплексов;  $S_{rw}$  – среднее (многолетнее) значение суммы главных ионов в речных водах в зимний период при допущении, что в это время речной сток формируется в основном за счет подземных вод;  $S_{g1}$  и  $S_{g2}$  – среднее (многолетнее) значение сумм главных ионов в подземных грунтовых и артезианских водах. Более подробная информация об исходных данных и методике расчетов приведена в [29, 32].

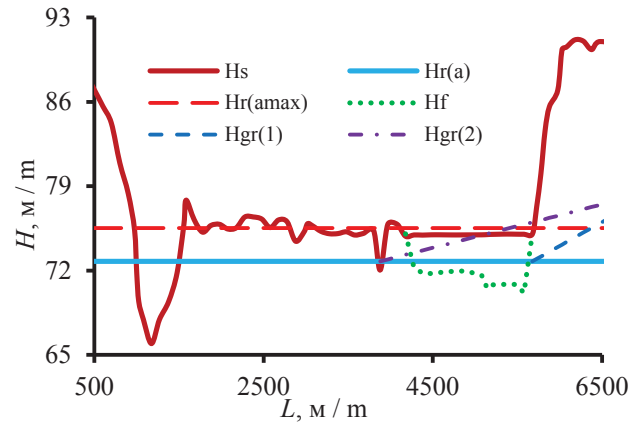
3. Реализация третьего этапа основывалась на эргодической гипотезе, при соблюдении которой для стационарного случайного процесса  $x(t)$  с вероятностью 1 среднее по времени из измерений функции  $f[x(t_1), \dots, x(t_n)]$  равно среднему по множеству [54]. Дополнительное условие при решении этой задачи: болотный процесс в целом для голоцена нестационарный, но внутри него можно выделить серию условно однородных периодов, в пределах которых наблюдались условия и стадии болотного процесса, сопоставимые по ряду показателей с каким-либо из участков современных болот в бассейне р. Оби и прилегающих территориях. Методика исследований на этом этапе – та же, что и на первых двух этапах в части анализа информации. На заключительном этапе проводилось обобщение всех материалов, их согласование и сопоставление с материалами полевых работ, проведенных при участии и под руководством автора в 1990–2023 гг. с учетом требований [48–50, 55].

### Результаты исследования

На первом этапе исследования был выполнен анализ взаимосвязей уровней речных, подземных и болотных вод, выявивший существенные различия в водном режиме низинных долинных и верховых водораздельных болот, а также в характере их взаимодействия с другими водными объектами.

В случае долинных низинных болот (особенно для больших рек, согласно [56]), отмечен достаточно интенсивный водообмен, связанный с существенной вероятностью затопления (речными водами) части низинных болот во время весенне-летнего половодья, притока грунтовых вод с прилегающих суходолов, возможностью выхода на границе болот напор-

ных вод из более глубоких водоносных горизонтов и поступления смеси речных и болотных вод как минимум в первый от поверхности постоянный водоносный горизонт [13, 40, 27, 46].

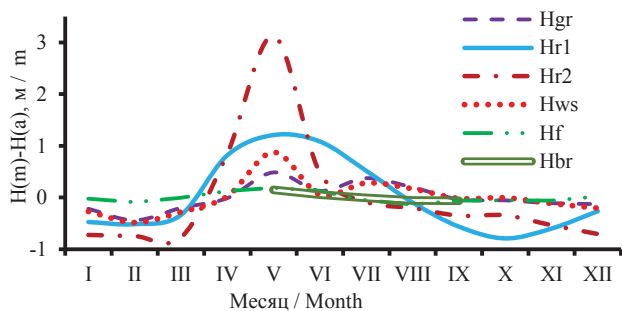


**Рис. 2.** Поперечный профиль долины р. Оби у с. Мельниково [27, 46]; условные обозначения:  $L$  – расстояние от условной точки на левом берегу; уровни воды  $H$  в Балтийской системе высот:  $H_s$  – высотная отметка поверхности долины или дна р. Оби;  $H_r(a)$  и  $H_r(amax)$  – средне-многолетний и средний максимальный уровни воды р. Оби за 1967–2015 гг.;  $H_f$  – нижняя граница Обского болота;  $H_{gr}(1)$  и  $H_{gr}(2)$  – расчетные отметки кривой депрессии подземных вод от средне-многолетнего уровня воды в скважине 63р до внешней границы болота (1) и среднего уреза воды в протоке Оби (2)

**Fig. 2.** Cross profile of the Ob River valley near the village of Melnikovo [27, 46]; symbols:  $L$  is the distance from the conventional point on the left bank; water levels  $H$  in the Baltic height system:  $H_s$  is the elevation of the surface of the valley or bottom of the Ob River;  $H_r(a)$  and  $H_r(amax)$  are the long-term average and average maximum water levels of the Ob River for 1967–2015;  $H_f$  is the lower boundary of the Ob swamp;  $H_{gr}(1)$  and  $H_{gr}(2)$  are the calculated marks of the groundwater depression curve from the average long-term water level in well 63p to the outer boundary of the swamp (1) and the average water edge in the Ob River channel (2)

При этом отметим следующее: 1) совместное влияние речных и подземных вод прослеживается практически по всей ширине долинного низинного болота – если не прямое (затопление), то косвенное, за счёт формирования в среднем за многолетний период кривой депрессии от водораздела в сторону реки; 2) поверхность долинного низинного болота примерно соответствует среднему максимальному уровню речных вод (рис. 2); 3) наблюдается и обратное влияние болотных вод на водный режим реки и подземных вод, связанное с: 3.1) дополнительной задержкой воды на спаде половодья на пойменных участках болота вследствие значительной шерохова-

тости поверхности, а также задержкой влаги в торфяной залежи в случае относительно низкой влажности торфов в предшествующий маловодный период; 3.2) поступлением в межень болотных, в половодье болотно-речных вод в водоносные отложения прилегающих суходолов на участках до 800–900 м; 3.3) взаимодействие поверхностных и подземных вод в долине р. Оби и на прилегающей территории достигает примерно 110–120 м [27, 46].



**Рис. 3.** Внутригодовое изменение отклонений среднемесячных уровней воды  $H(m)$  от их среднемноголетних значений  $H(a)$ ; уровни воды:  $Hgr$  – в скважине 89р (с. Каргала; возраст отложений  $aQ_{IIb}$ ; средний уровень за 1965–1995 гг.  $Hgr(a)=99,39$  м; отметка устья скважины 109,40 м);  $Hr1$  – уровень воды р. Оби у п. Победа (в среднем за 1967–2015 гг.  $Hr1(a)=72,76$  м);  $Hr2$  – уровень воды р. Шегарки у с. Бабарыкино (в среднем за 1967–2005 гг.  $Hr2(a)=89,91$  м);  $Hws$  – расчетный уровень грунтовых вод на водоразделе рек Оби и Шегарки ( $Hws(a)=102,00$  м при среднем расстоянии водораздела от р. Оби 23,8 км с отметками 115–120 м);  $Hf$  – уровень вод на Баксинском болоте (скважина 104, осоково-тростниковый кочкарник; в среднем за 1961–1969 гг.  $Hf(a)=140,84$  м при средней высоте поверхности болота 141,11 м [37]);  $Hbr$  – уровень вод на верховом сосново-сфагново-кустарничковом участке Васюганского болота (в среднем за 1998–2008 гг.  $Hbr(a)=112,13$  м [41])

**Fig. 3.** Intra-annual changes in deviations of average monthly water levels  $H(m)$  from their average long-term values  $H(a)$ ; water levels:  $Hgr$  is in the well 89p (Kargala village; sediment age  $aQ_{IIb}$ ; average level for 1965–1995  $Hgr(a)=99.39$  m; wellhead elevation 109.40 m);  $Hr1$  is the water level of the Ob River near the Pobeda village (average for 1967–2015  $Hr1(a)=72.76$  m);  $Hr2$  is the water level of the Shegarka River near the Babarykino village (average for 1967–2005  $Hr2(a)=89.91$  m);  $Hws$  is the calculated groundwater level at the watershed of the Ob and Shegarka rivers ( $Hws(a)=102.00$  m with an average distance of the watershed from the Ob River of 23.8 km with elevations of 115–120 m);  $Hf$  is the water level in the Baksinskoe swamp (well 104, sedge-reed hummock; on average for 1961–1969  $Hf(a) = 140.84$  m with an average height of the swamp surface of 141.11 m [37]);  $Hbr$  is the water level in the upper pine-sphagnum-shrub area of the Vasyuganskoe swamp (on average for 1998–2008  $Hbr(a)=112.13$  m [41])

На водораздельных пространствах, в зависимости от преобладающего типа торфяной залежи, могут наблюдаться различные условия взаимодействия подземных, болотных и речных вод, которые можно условно объединить в две основные группы. Соответственно этим группам выделяются два типа территорий. Для первого типа характерно преимущественное распространение низинных болот, возникших при эвтрофикации водоемов и/или постоянном подтоплении земель подземными водами. В этом случае, например, на междуречье рек Оби и Шегарки (рис. 3), наблюдается: 1) достаточно резкое внутригодовое изменение уровней речных вод; 2) существенно меньшая амплитуда колебаний уровней подземных вод в верхней части геологического разреза (возраст отложений  $Q_{II}$ ,  $Q_{III} + P_3$ ) в гидрогеологических скважинах, смещенных от водоразделов к речной долине; 3) изменение (расчетное) уровней грунтовых вод на водоразделе меньше, чем у рек, но больше, чем в гидрогеологических скважинах, более приближенных к речным долинам; положение водораздела меняется в течение года [30]; 4) наименьшая амплитуда колебаний в случае уровней болотных вод.

Второй тип территорий характеризуется широким распространением верховых болот, в пределах которых среднегодовой уровень подземных вод приближается к нижней части торфяной залежи [31], но непосредственный обмен между подземными и болотными водами обычно сильно затруднен (рис. 4). Маловероятно и затопление верховых болот речными водами, поскольку в этом случае затрудняются условия функционирования олиготрофной болотной растительности [9, 16, 17, 24]. Однако низинные участки болот могут затапливаться или подтапливаться (рис. 5).

Предполагаемый механизм ухудшения водообмена между первоначальным низинным болотом и подземными водоносными горизонтами (в результате чего и начинается олиготрофизация болота) связан с сочетанием ряда условий, ключевыми среди которых являются следующие:

- 1) в торфяной залежи формируются два основных геохимических и механических барьера – вверху торфяной залежи, в районе границы деятельного и инертного горизонтов, и внизу, на границе с минеральными грунтами; соответственно, в верхней части торфяной залежи накапливаются гидроксиды железа, образующие достаточно крупные частицы, на поверхности которых осаждаются соединения ряда химических элементов; в нижней части торфяной залежи при активной деятельности микрофлоры формируется восстановительная обстановка и увеличивается присутствие сульфидов [25, 26];

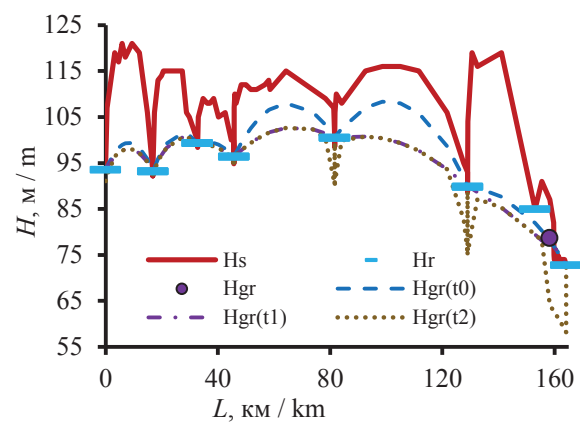


2) в долинах крупных рек вследствие разгрузки напорных подземных вод и существенных колебаний уровней речных вод происходит механический вынос частиц грунтов из отложений на нижней границе болота [27, 46], что предотвращает ухудшение фильтрационных свойств грунтов; соответственно, водообмен между болотом и подземными водоносными горизонтами и в целом условия водно-минерального питания болотной растительности сохраняются, что поддерживает неизменность (низинного) типа торфяной залежи; 3) в долинах малых рек и, особенно, на их водоразделах ухудшение фильтрационных свойств отложений на нижней границе болота может протекать более интенсивно, чем фильтрационные деформации; соответственно, на этих участках изменяются условия водно-минерального питания болотной растительности, а через определенное время формируются переходные и верховые торфа вплоть до смены типа торфяной залежи с низинного на верховой. При этом определенное влияние оказывает и возможность пространственно-временного перераспределения токсичных (для болотной растительности) продуктов трансформации органических веществ согласно схеме, предложенной в [24].

В целом на территориях второго типа происходит ухудшение инфильтрационного питания подземных вод, увеличение их среднегодовых уровней и уменьшение амплитуды внутригодовых изменений. При этом верховые болота фактически соответствуют условно бессточной части водосборов, что приводит к снижению подземной составляющей  $Q_{gr}(a)$  среднегодовых расходов воды малых и средних рек. Так, для рек Шегарки, Иксы, Бакчар, Тетеренки, Галки, Андармы получена обратная зависимость от доли верховых болот в суммарной площади водосбора  $f_{hm}$ :  $\ln Q_{gr}(a) = (1,57 \pm 0,29) - (0,11 \pm 0,01) \cdot f_{hm}$ ;  $Q_{gr}(a)$  в м<sup>3</sup>/с, а  $f_{hm}$  в %; квадрат корреляционного отношения  $R^2=0,96$ ; коэффициент корреляции между  $Q_{gr}(a)$  и  $f_{hm}$ :  $r = -0,68 \pm 0,20$ . Статистически значимая зависимость от доли низинных болот  $f_{lm}$  (%) не отмечена, но зато выявлена обратная связь между величиной  $f_{lm}$  и средним отношением инфильтрации к коэффициенту фильтрации  $Inf/Kf$ :  $\ln Inf/Kf = (-10,85 \pm 0,37) + (0,27 \pm 0,07) \cdot f_{lm}$ ;  $R^2=0,73$ ;  $r = -0,67 \pm 0,22$ .

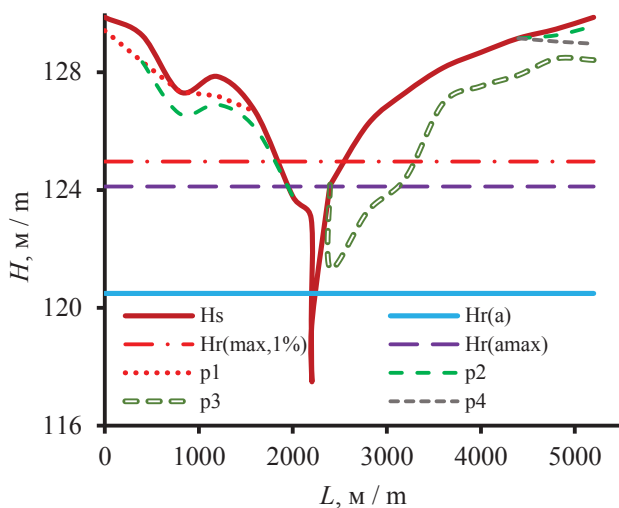
С учетом последней зависимости, материалов оценки распределения по территории водосбора р. Чаи разных типов торфяной залежи и возраста отложений [1–3, 8–10, 34, 40, 43] с использованием уравнений (1)–(3) было выполнено моделирование уровней грунтовых вод в голоцене для условий распространения преимущественно низинных болот (2,0...1,5 тыс. лет назад) и начальной стадии

(массовое распространение болот с толщиной торфяной залежи 0,3 м и более примерно 4 тыс. лет назад) заболачивания [31]. В результате показано, что среднегодовые значения уровней грунтовых вод были заметно ниже, чем сейчас (рис. 4). Но при этом, по сравнению с современными значениями для территорий с незначительной заболоченностью (рис. 3), наблюдалась и меньшая амплитуда их внутригодовых изменений. Кроме того, с высокой вероятностью высотные отметки дна водотоков в начальный период заболачивания были ниже, чем сейчас (рис. 4), что указывает на тесную связь взаимно направленных аккумуляционных и эрозионных процессов.



**Рис. 4.** Профиль AP–OP (рис. 1, б) и уровни подземных вод в голоцене: Hs – поверхность водосбора или дна рек; Hr – современный среднегодовое значение уровня речных вод; Hgr – современный среднегодовое значение уровня воды в скважине 63р в с. Мельниково; Hgr(t0) – расчетный среднегодовое значение уровня подземных вод в среднем за 1967–2005 гг.; Hgr(t1) – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа, а их площадь в 1,7 раз больше, чем в настоящее время (ориентировочно 1,5...2,0 тыс. лет назад); Hgr(t2) – расчетный уровень подземных вод при условии, что все болота низинного типа с глубиной не более 0,3 м, а их площадь в 2 раза меньше, чем в настоящее время (ориентировочно 4 тыс. лет назад)

**Fig. 4.** AP–OP profile (Fig. 1, b) and groundwater levels in the Holocene: Hs is the surface of the catchment area or river bottom; Hr is the current average long-term river water level; Hgr is the current average long-term water level in the well 63p in the Melnikovo village; Hgr(t0) is the estimated average annual groundwater level on average for 1967–2005; Hgr(t1) is the calculated groundwater level, provided that all swamps are of lowland type, and their area is 1.7 times larger than at present (approximately 1.5...2.0 thousand years ago); Hgr(t2) is the calculated groundwater level, provided that all swamps are of lowland type with a depth of no more than 0.3 m, and their area is 2 times less than at present (approximately 4 thousand years ago)



**Fig. 5.** Поперечный профиль долины р. Бакчар в 87 км от истока;  $H_s$  – высотная отметка поверхности водосбора или дна реки;  $H_r(a)$ ,  $H_r(max,1\%)$ ,  $H_r(amax)$  – средний годовой, максимальный с обеспеченностью 1 % и средний максимальный уровни воды в р. Бакчар;  $p$  – высотная отметка нижней поверхности слоя торфяной залежи с преобладанием торфов верхового сфагново-мочажинного ( $p_1$ ) и низинных осокового ( $p_2$ ), травяного ( $p_3$ ) и березового ( $p_4$ ) торфов

**Fig. 5.** Cross profile of the Bakchar river valley is 87 km from the source;  $H_s$  is the elevation of the surface of the catchment area or river bottom;  $H_r(a)$ ,  $H_r(max,1\%)$ ,  $H_r(amax)$  are the average annual, maximum with a probability of 1% and average maximum water levels in the Bakchar river;  $p$  is the elevation of the lower surface of the peat layer with a predominance of high-moor sphagnum-hollow peats ( $p_1$ ) and lowland sedge ( $p_2$ ), grass ( $p_3$ ) and birch ( $p_4$ ) peats

На втором этапе исследования было проведено обобщение данных о химическом составе речных, подземных и болотных вод, полученных совместно с рядом сотрудников ТГУ, ТПУ и СРЦ ФГБУ «Гидроспецгеология», а также опубликованных работ других авторов [29, 32, 33, 36, 39, 57, 58], оценка поступления в русловую сеть подземных вод из водоносных отложений четвертичного и палеогенового возрастов, а также проверка на однородность рядов гидрогеохимических наблюдений за состоянием подземных и болотных вод в районе расположения Васюганского, Обского и Тимирязевского болот (табл. 1, 2).

В результате установлено, что доля подземного питания рек Шегарки, Чай и ее притоков в среднем составляет около 16 % от суммарного речного стока. Минимальный вклад подземного питания характерен для р. Иксы в створе с. Плотниково с наибольшей (среди изученных рек) заболоченностью водосбора, максимальный (29 %) – для р. Чай

у с. Подгорное. Примерно такая же, за некоторым исключением, тенденция характерна и для притока подземных вод из отложений палеогена: среднее для изученных рек – 53,5 % от подземного питания; минимум (20 %) для р. Иксы у с. Плотниково; максимум – 90 % для р. Бакчар у п. Горелый (участок нижнего течения р. Бакчар; в настоящее время – с. Гореловка) и 67 % для р. Чай у с. Подгорное.

**Таблица 1.** Среднемноголетняя гидрогеохимическая характеристика речных, подземных и болотных вод в таежной зоне р. Оби (по [33] с дополнением автора по болотным водам)

**Table 1.** Average long-term hydrogeochemical characteristics of river, groundwater and swamp waters in the taiga zone of the Ob River (according to [33] with the author's addition on swamp waters)

Объект/Object	$S$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	$PO$ , мгО/дм <sup>3</sup> mgO/dm <sup>3</sup>	Тип воды Water type
Средняя тайга/Middle taiga			
р. Обь у с. Александровское Ob at Alexandrovskoe ( $L_q=1820$ км/км)	154,4±8,4	9,0±0,8	$C_{II}Ca$
р. Обь у с. Прохоркино Ob at Prokhorkino ( $L_q=1626$ км/км)	170,5±10,7	7,3±0,7	$C_{II}Ca$
Южная тайга/Southern taiga			
Подземные воды (возраст отложений: Q) Ground waters (age of deposits: Q)	257,6±6,6	4,5±0,2	$C_{II}Ca$
Подземные воды (возраст отложений: P) Ground waters (age of deposits: P)	462,2±10,5	6,3±0,3	$C_{II}Ca$
Воды низинных болот* Waters of low-moor swamps*	293,5±33,9	61,6±8,9	$C_{III}Ca$
Воды переходных болот Waters of transitional-moor swamps*	63,7±11,0	82,2±6,8	$C_{III}Ca$
Воды верховых болот Waters of high-moor swamps*	36,2±4,9	84,3±4,7	$C_{III}Ca$
Притоки Средней Оби Tributaries of the Middle Ob river	220,4±6,9	25,0±1,0	$C_{II}Ca$
р. Обь у г. Колпашево Ob at Kolpashevo ( $L_q=1228$ км/км)	180,0±6,1	4,1±0,3	$C_{II}Ca$
Подтайга, лесостепь, горные районы Subtaiga, forest-steppe, mountainous areas			
р. Обь у с. Победа Ob at Pobeda ( $L_q=928$ км / км)	218,2±13,9	4,8±1,1	$C_{II}Ca$

Примечание:  $L_q$  – расстояние от истока реки до створа;  $S$  – сумма главных ионов;  $PO$  – перманганатная окисляемость; тип воды – классификация по О.А. Алекину; \*болота в таежной зоне в целом.

Note:  $L_q$  is the distance from the river source to the site;  $S$  is the sum of the main ions;  $PO$  is the permanganate oxidation; type of water by classification according to O.A. Alekin; \*swamps in the taiga zone in general.

**Таблица 2.** Среднедолгосрочные значения суммы главных ионов *S* и результаты проверки на однородность рядов гидрогеохимических наблюдений по среднему (критерий Стьюдента *t*) и дисперсии (критерий Фишера *F*) [29, 46]

**Table 2.** Long-term average values of the sum of the main ions *S* and results of testing for homogeneity of series of hydrogeochemical observations by mean (Student's *t*-test) and dispersion (Fisher *F*-test) [29, 46]

Болотные воды Swamp waters		Подземные воды, возраст отложений, <i>S</i> , мг/дм <sup>3</sup> Groundwater, age of sediments, <i>S</i> , mg/dm <sup>3</sup>							
Участок Section	<i>S</i> , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	Q		P		K		PZ	
		<i>t/t<sub>5</sub></i>	<i>F/F<sub>5</sub></i>	<i>t/t<sub>5</sub></i>	<i>F/F<sub>5</sub></i>	<i>t/t<sub>5</sub></i>	<i>F/F<sub>5</sub></i>	<i>t/t<sub>5</sub></i>	<i>F/F<sub>5</sub></i>
Васюганское болото/Vasyuganskoe swamp		350,5±11,2		637,6±23,5		878,3±31,2		-	
Верховой грядово-мочажинный комплекс High-moor ridge-hollow complex	32,1±9,6	<b>5,20</b>	<b>7,16</b>	<b>10,31</b>	<b>3,42</b>	<b>8,65</b>	<b>39,34</b>	-	-
Верховой «рям»/High-moor «ryam»	30,6±5,8	<b>8,12</b>	<b>8,02</b>	<b>15,73</b>	<b>3,83</b>	<b>13,58</b>	<b>44,08</b>	-	-
Переходный/Transition-moor	68,1±22,9	<b>5,04</b>	0,95	<b>8,45</b>	0,46	<b>8,93</b>	<b>5,24</b>	-	-
Низинный/Low-moor	153,7±77,1	<b>1,78</b>	0,30	<b>3,76</b>	0,38	<b>4,03</b>	<b>1,84</b>	-	-
Тимирязевское болото/Timiryazevskoe swamp		474,2±25,0		484,4±18,6		750,2±55,8		463,7±34,3	
Переходный/Transition-moor	36,8±9,9	<b>4,86</b>	<b>8,30</b>	<b>5,78</b>	<b>7,21</b>	<b>2,95</b>	<b>74,58</b>	<b>5,13</b>	<b>3,31</b>
Обское болото/Obское fen		432,8±58,3		726,8±306,4		2540,9±27,3		-	
Низинный загрязненный/Low-moor contaminated	1153,7±70,2	<b>2,20</b>	<b>2,44</b>	0,61	<b>9,02</b>	<b>4,24</b>	<b>11,17</b>	-	-
Низинный фоновый/Low-moor background	578,6±36,4	0,91	0,49	0,19	<b>40,22</b>	<b>12,23</b>	<b>2,25</b>	-	-

Примечание: полужирным шрифтом выделены случаи нарушения однородности при уровне значимости 5 %.

Note: cases of violation of homogeneity at a significance level of 5% are highlighted in bold.

Поступление грунтовых вод из четвертичных отложений в среднем составляет 46,5 %. В целом доля подземного питания в суммарном речном стоке (в %) увеличивается с площадью водосбора (коэффициент корреляции  $r=0,87\pm0,11$ ) и глубиной вреза русловой сети. При этом возрастает и приток (и в абсолютном (м<sup>3</sup>/с), и в относительном (%) выражении) напорных подземных вод из отложений палеогенового возраста ( $r=0,99\pm0,01$ ). Зависимость между площадью водосбора и поступлением грунтовых вод более сложная, что, видимо, связано с указанным выше влиянием верховых болот.

Анализ имеющейся информации также показал, что воды низинных долинных болот и грунтовые воды (четвертичные отложения) с уровнем значимости 5 % статистически неразличимы по сумме главных ионов [29, 32, 46], что подтверждает приведенные выше выводы о существенном взаимовлиянии этих вод (табл. 2). Еще одним подтверждением являются материалы изучения изменения состава водных вытяжек из торфов в пяти скважинах на «фоновом» участке Обского болота у с. Нащекново в Томской области, свидетельствующие о периодическом появлении в торфяной залежи водных линз с повышенной минерализацией, сопоставимой с минерализацией подземных вод палеогеновых отложений у с. Нащекново [46].

В целом для изученной территории отмечено преобладание процессов растворения и выщелачивания горных пород. Интенсивность взаимодействия подземных и поверхностных вод в таежной зоне Западной Сибири минимальна в зоне распространения верховых болот и максимальна в пределах заболоченных долин больших рек. В долинах притоков Средней Оби на участках их среднего течения обычно наблюдается некоторое соответствие нисходящего и подпорного режимов взаимо-

действия речных и подземных вод, а в верхнем и нижнем течении – даже некоторое преобладание последнего (подпорного). В первом случае (на участках верхнего течения малых рек) долины часто слабо выражены, приток в русловую сеть представляет собой смесь слабо различимых поверхностных и подземных вод, а во втором (на участках нижнего течения средних рек) увеличивается врез и общая мощность аллювиальных отложений [32].

### Обсуждение результатов исследования

На третьем, заключительном, этапе исследования проведено обобщение всех полученных результатов и их сопоставление с материалами полевых работ, что позволило сформулировать следующую концепцию формирования гидрографической сети и заболачивания южной и центральной частей Западно-Сибирской равнины:

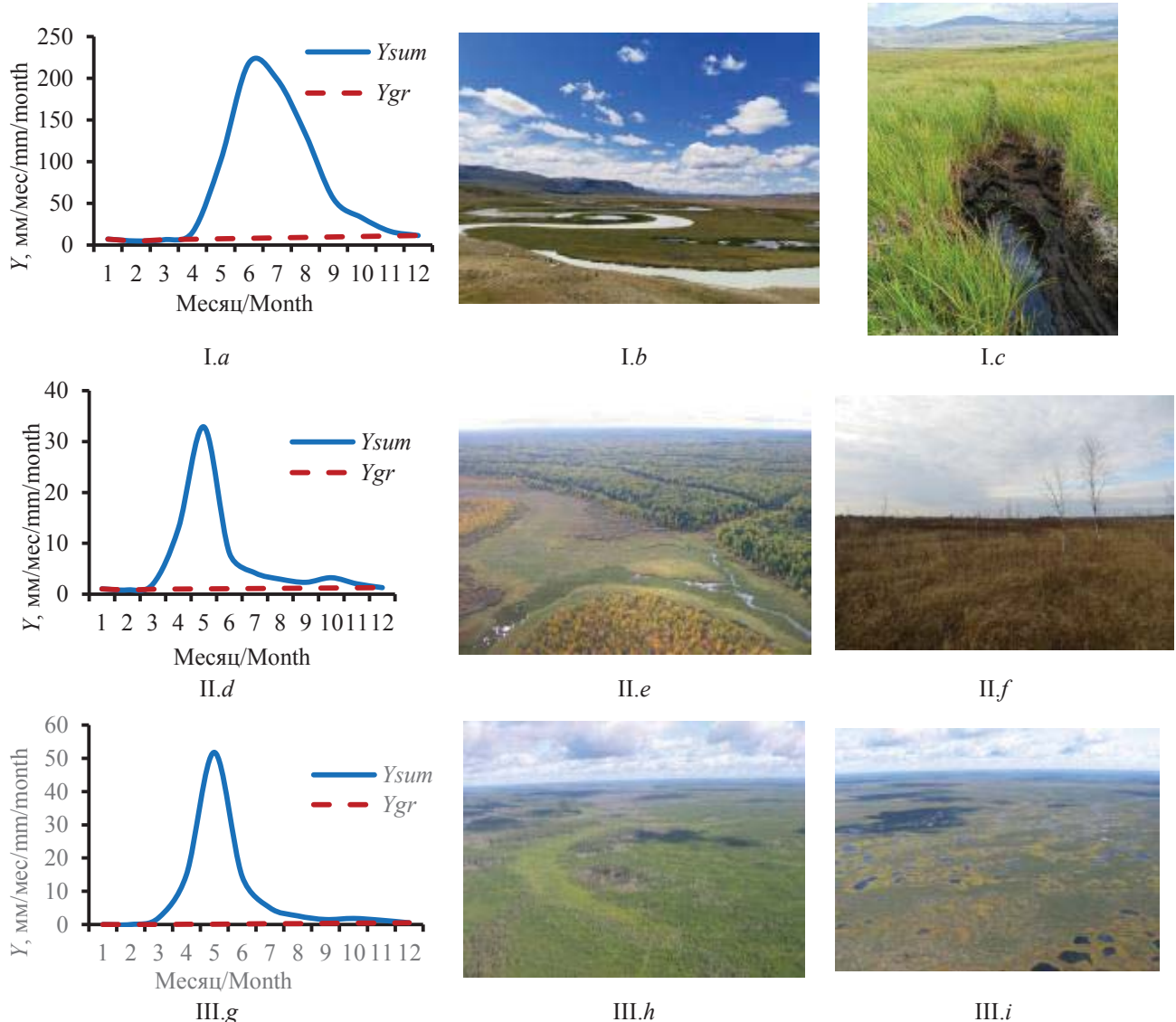
- 1) начальный этап заболачивания примерно соответствует спаду водного стока на фоне широкого распространения многолетнемерзлых пород на Западно-Сибирской равнине и усиленной деградации оледенения Алтая вплоть до образования торфяных болот с мощностью залежи 0,3 м и более, примерно 6...4 тыс. лет назад (в разных частях указанной территории); в течение этого периода происходил сперва интенсивный размыв русел и поверхности будущих водосборов, а затем широкое распространение таких типов руслового процесса, как свободное и незавершенное меандрирование (на малых и средних реках), пойменная и русловая многоорукавность (на больших реках), после чего последовала некоторая стабилизация водного стока (на фоне его спада), русловых процессов с учетом залесения водосборов и эвтрофикации многочисленных старичных водоемов; наиболее ха-

рактрным примером такой обстановки является состояние водосборов на плато Укок в Горном Алтае (рис. 6.I); водно-болотные системы севера Западной Сибири в этом случае соответствуют, скорее всего, одному из возможных будущих сценариев их развития, но не являются достоверной иллюстрацией прошлого, поскольку на плато Укок наблюдается заболачивание речных долин в настоящее время (рис. 6.I), а в зоне тундры и лесотундры севера западной Сибири – преимущественно унаследованные от прошлого формы – полигональные и бугристые болота, полностью или частично сформировавшиеся в более теплые периоды [1–3, 5]; при этом необходимо отметить, что, на наш взгляд, необходимым условием образования низинных болот на основе старичных водоемов является существенно неоднородное внутригодовое распределение водного стока, способствующее накоплению влаги в долине и последующему зарастанию последней, в результате чего распространяется болотная растительность; в свою очередь, это способствует увеличению влажности почвогрунтов и ее поддержанию на достаточно высоком уровне большую часть года; среднегодовое температура приземных слоев атмосферного воздуха примерно в диапазоне от минус 5...6 до минус 1 °С, что обеспечивает максимальный прирост торфяной залежи в условиях, благоприятных для распространения болотной растительности, но недостаточных для полной минерализации растительных остатков [26];

- 2) на этапе повсеместного преобладания низинных болот (от 6...4 до 3...1,5 тыс. лет назад) речной сток уменьшился вследствие заметного сокращения стока ледников Алтая, но сохранилась его существенная внутригодовая изменчивость, способствующая дальнейшему заболачиванию речных долин и водоемов на водосборах рек (рис. 6.II); вертикальные и горизонтальные деформации речных русел заметно уменьшились; среднегодовые значения уровней подземных вод ниже, чем в настоящее время, но амплитуда их изменения выше, вследствие чего подземные воды (грунтовые безнапорные и слабонапорные – на водоразделах и в долинах малых и средних рек, артезианские напорные – в долинах средних и больших рек) могут выходить на поверхность; начинается распространение переходных и верховых болот, пока преимущественно в виде «островов», которые наблюдаются и в настоящее время на территории Новосибирской области [3, 59];
- 3) примерно 3...1,5 тыс. лет назад началось широкое распространение верховых болот (рис. 6.III) – как путем олиготрофизации торфяных залежей (при предварительном ухудшении фильтраци-

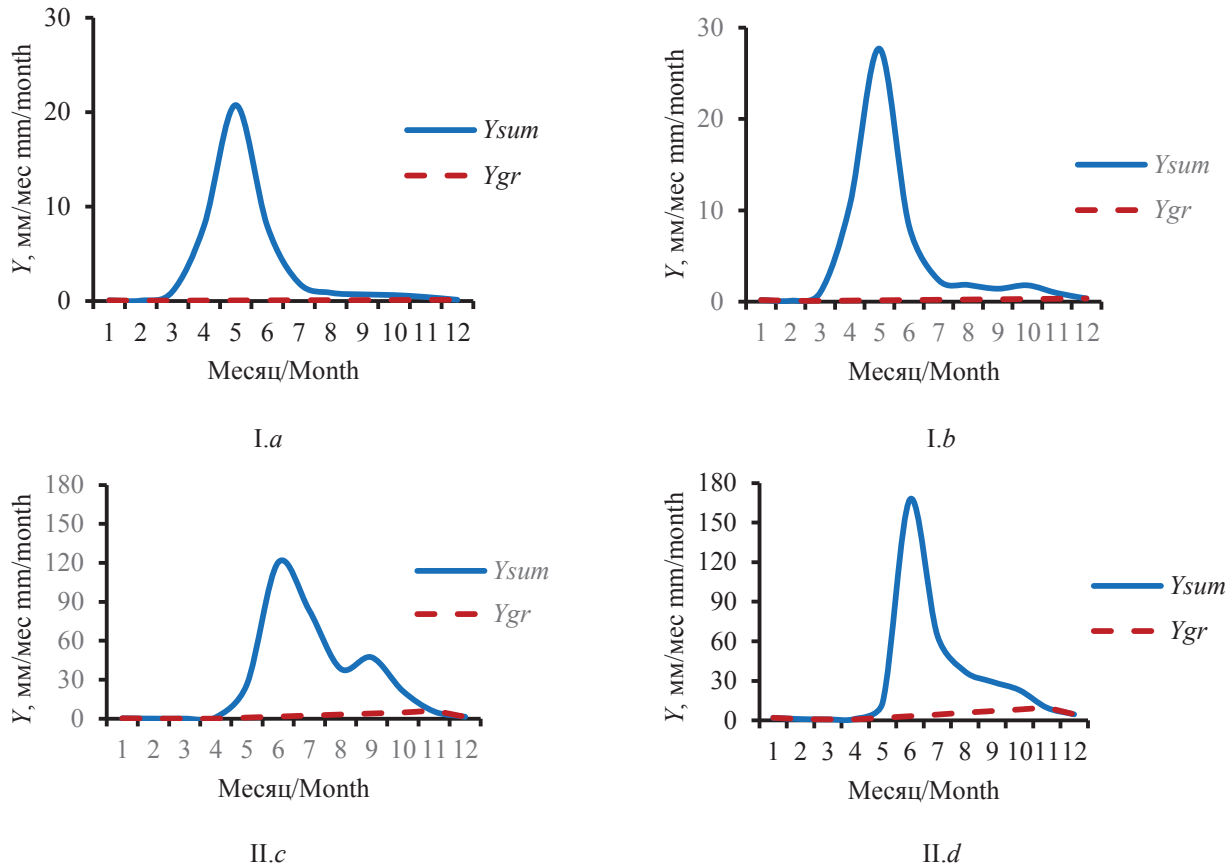
онных свойств отложений на нижней границе болот, сокращении водообмена между болотом и подземными водоносными горизонтами и изменении условий водно-минерального питания болотной растительности), так и «наполнением» верховых болот на суходолы; механизм такого «наполнения», описанный в общих чертах в [26, 31], заключается в подъеме уровней грунтовых вод на водоразделах и накоплении избыточной влаги на границе болотных и лесных экосистем вследствие различий в водопрпускной способности микроландшафтов [60]; на водоразделах формируются «рямы» (сосново-сфагново-кустарничковые верховые болота) и (верховые) грядово-мочажинные и грядово-мочажинно-озерковые комплексы, долины ряда малых рек фактически погребены болотами (рис. 6.III); на водоразделах формируется вторичная русловая сеть, причем в ряде случаев на месте водоразделов первичной сети [26]; взаимодействие болотных и подземных вод в основном приурочено к речным долинам, влияние верховых болот на речной сток сходно с влиянием перемерзания в регионах с холодным климатом и пересыхания – в регионах с аридным теплым климатом.

В каком направлении возможна дальнейшая эволюция гидрографической сети Западно-Сибирской равнины? Наиболее вероятных сценариев, на наш взгляд, три: 1) условная стабилизация на фоне современных значений нормы и внутригодовой изменчивости температуры и влажности атмосферного воздуха, атмосферных осадков при дальнейшем постепенном расширении площади верховых болот (рис. 6.III); 2) потепление климата, сопровождающееся волнами лесных (с учетом дискретного характера изменения растительного покрова при общей тенденции смещения лесной зоны на север) и торфяных пожаров; суммарный речной сток уменьшается, но возрастает его внутригодовая изменчивость, а подземная составляющая уменьшается; в речных долинах в долгосрочной перспективе распространены низинные болота, вода из которых поступает в речную сеть и ухудшает качество речных вод (рис. 7.I); 3) похолодание климата в отдаленной перспективе, сопровождающееся распространением многолетней мерзлоты, бугристых и полигональных болот; речной сток несколько увеличивается за счет снижения испарения и инфильтрации (рис. 7.II). Указанные варианты основаны на анализе фактических гидрографов в разных природных зонах, что не исключает ни другие сценарии, ни актуальности исследований в части обоснования применимости принципа актуализма. В любом случае очевидна необходимость дискуссии на основе анализа результатов применения различных подходов к реконструкции климата и болотных процессов в Западной Сибири.



**Рис. 6.** Типовые гидрографы рек и примеры видов речных и болотных систем на разных этапах болотного процесса: I – начальный этап формирования низинных болот на фоне интенсивных русловых процессов; II – широкое распространение низинных болот; III – широкое распространение верховых болот, формирование вторичной гидрографической сети на болотах; а) гидрограф р. Ак-Алаха у п. Бертек; б) вид долины р. Ак-Алаха на плато Укок, участок свободного и незавершенного меандрирования; в) участок заболоченного лога, который примыкает к р. Аргамджи; д) гидрограф р. Шегарки у с. Бабарыкино; е) вид заболоченной долины притока протоки Карги; ф) участок низинного Обского болота у с. Нащеково; г) гидрограф р. Ключ у с. Полынянка; h) вид заболоченной долины притока р. Парабель; и) грядово-мочажинно-озерковый комплекс (верховое болото) в междуречье рек Васюган и Парабель; Y – слой стока, в том числе: Ysum – слой суммарного стока реки; Ygr – слой стока подземной составляющей по формуле (5); фото О.Г. Савичева

**Fig. 6.** Typical river hydrographs and examples of types of river and swamp systems at different stages of swamp process: I – initial formation of lowland swamps against the background of intense channel processes; II – widespread occurrence of lowland swamps; III – wide distribution of raised bogs, formation of a secondary hydrographic network in swamps; a) hydrograph of the Ak-Alakha river at Bertek; b) view of the Ak-Alakha river valley on the Ukok plateau, an area of free and incomplete meandering; c) swampy ravine area adjacent to the Argamdzhi river; d) hydrograph of the Shegarka river at Babarykino; e) view of the swampy valley of the tributary of the Karga channel; f) section of the low-lying Obskoe swamp at Nashchekovo; g) hydrograph of the Klyuch river at Polnyanka; h) view of the swampy valley of the tributary of the Parabel river (nameless tributary – the Parabel river – the Ob river); i) ridge-hollow-lake complex (raised bog) in the interfluvium of the Vasyugan and Parabel rivers; Y – runoff layer, including: Ysum is the layer of total river flow; Ygr is the drainage layer of the underground component according to the formula (5); photo by O.G. Savichev



**Рис. 7.** Типовые гидрографы рек на разных этапах дальнейшего развития болотного процесса: I – потепление с обсыханием болот, их деградацией на водоразделах и сохранением в долинах рек; II – похолодание с формированием (усилением) зоны многолетней мерзлоты; типовые гидрограф: а) р. Каргат – с. Гавриловское; б) р. Омь – с. Крещенка; в) р. Щучья – п. Щучье; д) р. Советская речка – п. Советская речка; остальные обозначения те же, что и на рис. 5

**Fig. 7.** Typical river hydrographs at different stages of further development of swamp process: I – warming with drying out of swamps, their degradation in watersheds and preservation in river valleys; II – cooling with the formation (intensification) of a permafrost zone; typical hydrograph: a) the Kargat river at Gavrilovskoe; b) the Om river at Kretchenka; c) the Shchuchya river at Shchuchye; d) the Sovetskaya Rechka river at Sovetskaya Rechka; other designations are the same as in Fig. 5

### Заключение

Возникновение и эволюция болотных экосистем в таежной зоне Западной Сибири в границах бассейна р. Оби представляет собой комплекс эрозивно-аккумулятивных процессов, развитие которого до современного периода проходило в три стадии:

- 1) от начала интенсивной деградации оледенения до 4...6 тыс. лет назад (на рассматриваемой территории в водосборе р. Чай – примерно 4 тыс. лет назад) – трансформация первичной гидрографической сети примерно к современному виду и распространение торфяных болот с мощностью торфяной залежи 0,3 м и выше; режим подземных вод близок к режиму подземных вод криолитозоны на севере современной Западной Сибири;
- 2) от 4...6 тыс. лет назад до 1,5...3 тыс. лет назад (на рассматриваемой территории в водосборе

- р. Чай – примерно 1,5 тыс. лет назад) – широко-масштабное распространение низинных болот и деградация части первичной речной сети; уровни подземных вод на водоразделах рек в целом ниже, чем в настоящее время, но амплитуда их колебаний высока, а значительная часть водосборов в половодье и паводки затоплена, а в межень – подтоплена;
- 3) от 1,5...3 тыс. лет назад – деградация значительной части первичной речной сети, широкое распространение верховых болот, формирование на болотах вторичной гидрографической сети; на водоразделах происходит подъем уровней подземных вод, но амплитуда их колебаний снижается, а водообмен с болотами существенно сокращается; в долинах средних и больших рек водообмен между поверхностными и подземными водами наиболее интенсивный, что обуславливает поступление в речные и грунто-

вые воды значительного количества органических веществ и продуктов их трансформации; кроме того, на территориях широкого распространения верховых болот в среднетаежной подзоне несколько сокращается поступление минеральных солей, что сказывается на ионном стоке р. Оби.

В дальнейшем в пределах южно- и среднетаежной подзон в Обском бассейне (на территории Томской, Новосибирской и Омской областей) возможны ситуации, аналогичные: а) при сохранении природных условий в перспективе ближайших де-

сятилетий – указанной выше третьей стадии; б) при существенном повышении температуры атмосферного воздуха и уменьшении атмосферных осадков – ситуации, наблюдаемой в настоящее время в Новосибирской и Омской областях, – низинные болота в речных долинах, достаточно высокая вероятность затопления и подтопления приречных территорий и существенное сокращение водных ресурсов (и подземных, и поверхностных вод) в межень; с) при значительном похолодании – ситуации, наблюдаемой в настоящее время на территории Ямало-Ненецкого автономного округа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас торфяных ресурсов СССР. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1968. – 96 с.
2. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
3. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слукса, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
4. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / Т. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – Vol. 190. – P. 315–341.
5. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб: ВВМ, 2009. – 536 с.
6. Syso A.I., Peregon A.M. The features of peat-accumulation process at the Southern slope of the Great Vasyugan bog // Contemporary Problems of Ecology. – 2009. – Vol. 2. – № 2. С. 124–127. DOI: 10.1134/S1995425509020064.
7. Chlachula J. Climate history and early peopling of Siberia, earth and environmental sciences / Ed. by I.A. Dar. – Rijeka, Croatia: InTech Europe, University Campus, 2011. – P. 495–538. URL: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (дата обращения 25.12.2023).
8. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Novikov S.M. Vasyugan mire: natural conditions, structure and functioning. – Tomsk: Tomsk State Pedagogical University, 2011. – 163 p.
9. Great Vasyugan mire: landscape structure and peat deposit structure features / A.E. Berezin, V.A. Bazanov, A.A. Skugarev, T.A. Rybina, N.V. Parshina // International Journal of Environmental Studies. – 2014. – Vol. 71. – № 5. – P. 618–623. DOI: 10.1080/00207233.2014.942537.
10. Инишева Л.И., Кира И., Инишев Н.Г. Заболочивание на Васюганском болоте // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24. – № 2. – С. 119–126. DOI: 10.15372/SEJ20170202.
11. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
12. Прейс Ю.И. Криогенез болотообразовательного процесса на территории Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 45–63.
13. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // Applied Vegetation Science. – 2006. – № 9. – P. 175–184.
14. Кабанов М.В. Некоторые закономерности климатических и экосистемных изменений в сибире // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2008. – Т. 1. – № 4. – С. 312–322.
15. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
16. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России (на примере болота Ламмин-Суо) / под ред. С.М. Новикова, В.И. Батуева. – СПб: Свое издательство, 2019. – 448 с.
17. Батуев В.И., Калюжный И.Л. Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – № 6. – С. 28–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-2.
18. Biophysical permafrost map indicates ecosystem processes dominate permafrost stability in the Northern Hemisphere / Y. Ran, M.T. Jorgenson, X. Li, H. Jin, T. Wu, R. Li, G. Cheng // Environmental Research Letters. – 2021. – Vol. 16. – № 095010. – P. 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/ac20f3.
19. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types / A. Feurdean, M. Pfeiffer, G. Butiseaca, A. Niamir, A.C. Diaconu, I. Tantau, M. Galka, S.M. Hutchinson, N. Gorina, S. Tonkov, H. Zhang, S. Kirpotin // Climate of the Past. – 2022. – Vol. 18. – № 6. – P. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
20. Water balance model (WBM) v.1.0.0: a scalable gridded global hydrologic model with water-tracking functionality / D.S. Grogan, S. Zuidema, A. Prusevich, W.M. Wollheim, S. Glidden, R.B. Lammers // Geoscientific Model Development. – 2022. – Vol. 15. – P. 7287–7323. DOI: 10.5194/gmd-15-7287-2022.

21. The effects of discharge changes in Siberian rivers on Arctic sea-ice melting / D. Hu, M. Xu, S. Kang, J. Chen, C. Yang, Q. Yang // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – № 3477. – P. 1–21. DOI: 10.3390/rs15143477.
22. Long-term trends of extreme climate indexes in the southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions / T. Watanabe, H. Matsuyama, I. Kuzhevskaya, O. Nechepurenko, V. Chursin, V. Zemtsov // *Atmosphere*. – 2023. – Vol. 14. – № 7. – P. 1131. DOI: 10.3390/atmos14071131.
23. Soil water regime, air temperature, and precipitation as the main drivers of the future greenhouse gas emissions from West Siberian peatlands / A. Mikhalechuk, Yu. Kharanzhevskaya, E. Burnashova, E. Nekhoda, I. Gammerschmidt, E. Akerman, S. Kirpotin, V. Nikitkin, A. Khovalyg, S. Vorobyev // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – № 17. – P. 3056. DOI: 10.3390/w15173056.
24. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвашевская, Н.Г. Наливайко // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2016. – № 5. – С. 60–69. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-60-69.
25. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
26. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
27. Савичев О.Г., Ян Хэнь Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3147>.
28. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2022. – Vol. 147 (3–4). – P. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
29. Сравнительный анализ подземных и болотных вод в юго-восточной части Западной Сибири / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Х. Ян, Е.В. Перегудина // *Разведка и охрана недр*. – 2022. – № 5. – С. 26–33. DOI: 10.53085/0034-026X\_2022\_05\_26.
30. Савичев О.Г., Лобурь Я.Н. Количественная оценка взаимосвязей речных и грунтовых вод в бассейне Средней Оби (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 106–115. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3998.
31. Савичев О.Г. Изменения гидрогеологических условий при заболачивании юго-востока Западно-Сибирской равнины // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 187–198. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4379.
32. Условия взаимодействия природных вод в пределах Бакчарского рудного узла (Западная Сибирь) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, О.Н. Владимировна, Е.В. Перегудина, Б.К. Кенесбаев // *Разведка и охрана недр*. – 2023. – № 10. – С. 61–67. DOI: 10.53085/0034-026X\_2023\_10\_61.
33. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob river (Western Siberia) under the influence of its tributaries and underground feeding // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – № 13. – P. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.
34. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолторфразведка, 1973. – 83 с.
35. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
36. Рассказов Н.М. Основные гидрогеологические и гидрогеохимические особенности торфяных месторождений центральной части Обь-Иртышского междуречья и некоторые вопросы гидрогеохимических исследований болот / Н.М. Рассказов, П.А. Удолов, Т.Я. Емельянова, А.Д. Назаров, В.А. Шамолин // *Подземные воды Сибири и Дальнего Востока* / отв. ред. И.С. Ломоносов, Н.А. Маринов, Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1971. – С. 229–232.
37. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 408 с.
38. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 488 с.
39. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
40. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecology*. – 2007. – Vol. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
41. Харанжевская Ю.А. Подземный сток бассейна р. Чая (Западная Сибирь) и его многолетняя изменчивость: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 20 с.
42. Моисеева Ю.А. Изменения подземного стока таежной зоны Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
43. Бляхарчук Т.А., Курьина И.В., Пологова Н.Н. Позднеголоценовая динамика растительного покрова и увлажнённости климата юго-восточного сектора Западно-Сибирской равнины по данным палинологического и ризоподного исследований торфяных отложений // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2019. – № 45. – С. 164–189. DOI: 10.17223/19988591/45/9.
44. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
45. Кузеванов К.К. Изменение гидрогеологических условий при эксплуатации подземных вод хозяйственно-питьевого назначения Томской области: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 23 с.



46. Ян Хэн. Особенности взаимодействия подземных и болотных вод в гумидных условиях умеренного и субтропического климатов (на примере объектов Западной Сибири России и Восточного Китая): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 26 с.
47. Харанжевская Ю.А. Особенности уровня режима осушенного участка северо-восточных отрогов Васюганского болота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 97–108. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4231.
48. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2<sup>nd</sup> ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
49. Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
50. СП 482.1325800.2020 Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Стандартиформ, 2020. – 49 с.
51. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Минстрой РФ, 2023. – 152 с.
52. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review // Hydrology and Earth System Sciences. – 2006. – № 10. – P. 873–887. URL: [www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006) (дата обращения 25.12.2023).
53. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб: Изд-во «Нестор-История», 2009. – 193 с.
54. Korn G.A., Korn Th.M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. Originally publ. – New York: Mc Graw-Hill, 1968. – US: Courier Corporation, 2013. – 1152 p.
55. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
56. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
57. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
58. Shiyan L.N., Machekhina K.I., Frantczuskaia E.O. Groundwater sources in the West Siberian region: Chemical composition, analysis, and water treatment technologies // Cleaner Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 7. – № 100441. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100441.
59. Biogeochemistry of holocene peatlands in the Baraba forest-steppe (southern West Siberia) / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, Yu.I. Preis, L.V. Miroshnichenko // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 124. – № 104811. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
60. Иванов К.Е. Водобмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.

### Информация об авторах

**Олег Геннадьевич Савичев**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. OSavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Поступила в редакцию: 09.01.2024

Поступила после рецензирования: 18.01.2024

Принята к публикации: 25.01.2024

### REFERENCES

1. *Atlas of peat resources of the USSR*. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1968. 96 p. (In Russ.)
2. *Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note*. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p. (In Russ.)
3. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bog of Western Siberia and their conservation value*. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.)
4. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
5. *Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia*. Ed. by S.M. Novikov. St. Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p. (In Russ.)
6. Syso A.I., Peregon A.M. The features of peat-accumulation process at the Southern slope of the Great Vasyugan bog. *Contemporary Problems of Ecology*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 124–127. DOI: 10.1134/S1995425509020064.
7. Chlachula J. *Climate history and early peopling of Siberia, earth and environmental sciences*. Ed. by Dr. Imran Ahmad Dar. Rijeka, Croatia, InTech Europe, University Campus, 2011. pp. 495–538. Available at: <http://www.intechopen.com/books/earth-and-environmental-sciences/climate-history-and-early-peopling-of-siberia> (accessed 25 December 2023).
8. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Novikov S.M. *Vasyugan mire: natural conditions, structure and functioning*. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University, 2011. 163 p.
9. Berezin A.E., Bazanov V.A., Skugarev A.A., Rybina T.A., Parshina N.V. Great Vasyugan mire: landscape structure and peat deposit structure features. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 618–623. DOI: 10.1080/00207233.2014.942537

10. Inisheva L.I., Kira I., Inishev N.G. Waterlogging in the Vasyugan swamp. *Siberian Environmental Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 119–126. DOI: 10.15372/SEJ20170202.
11. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
12. Preis Yu.I. Cryogenesis of the swamp-forming process on the territory of the Great Vasyugan swamp. *Big Vasyugan bog. Current status and development*. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 45–63. (In Russ.)
13. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
14. Kabanov M.V. Some patterns of climate and ecosystem changes in Siberia. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2008, vol. 1, no. 4, pp. 312–322. (In Russ.)
15. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
16. *Hydrometeorological regime and water balance of raised bogs in the North-West of Russia (on the example of the Lammin-Suo swamp)*. Eds. S.M. Novikov, V.I. Batueva. St. Petersburg, Svoe izdatelstvo Publ., 2019. 448 p. (In Russ.)
17. Batuyev V.I., Kalyuzhnyy I.L. Analysis of factors determining long-term changes in runoff from oligotrophic swamps. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2020, no. 6, pp. 28–46. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-2. (In Russ.)
18. Ran Y., Jorgenson M.T., Li X., Jin H., Wu T., Li R., Cheng G. Biophysical permafrost map indicates ecosystem processes dominate permafrost stability in the Northern Hemisphere. *Environmental Research. Letters*, 2021, vol. 16, no. 095010, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/ac20f3.
19. Feurdean A., Pfeiffer M., Butiseaca G., Niamir A., Diaconu A.C., Tantau I., Gařka M., Hutchinson S.M., Gorina N., Tonkov S., Zhang H., Kirpotin S. Holocene wildfire regimes in Western Siberia: interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types. *Climate of the Past*, 2022, vol. 18, no. 6, pp. 1255–1274. DOI: 10.5194/cp-18-1255-2022.
20. Grogan D.S., Zuidema S., Prusevich A., Wollheim W. M., Glidden S., Lammers R.B. Water balance model (WBM) v.1.0.0: a scalable gridded global hydrologic model with water-tracking functionality. *Geoscientific Model Development*, 2022, vol. 15, pp. 7287–7323. DOI: 10.5194/gmd-15-7287-2022.
21. Hu D., Xu M., Kang S., Chen J., Yang C., Yang Q. The effects of discharge changes in Siberian rivers on Arctic sea-ice melting. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 3477, pp. 1–21. DOI: 10.3390/rs15143477.
22. Watanabe T., Matsuyama H., Kuzhevskaya I., Nechepurenko O., Chursin V., Zemtsov V. Long-term trends of extreme climate indexes in the southern part of Siberia in comparison with those of surrounding regions. *Atmosphere*, 2023, vol. 14, no. 7, p. 1131. DOI: 10.3390/atmos14071131.
23. Mikhchalchuk A., Kharanzhevskaya Yu., Burnashova E., Nekhoda E., Gammerschmidt I., Akerman E., Kirpotin S., Nikitkin V., Khovalyg A., Vorobyev S. Soil water regime, air temperature, and precipitation as the main drivers of the future greenhouse gas emissions from West Siberian peatlands. *Water*, 2023, vol. 15, no. 17, p. 3056. DOI: 10.3390/w15173056.
24. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivayko N.G. Hydrogeochemical conditions for the formation of oligotrophic swamp ecosystems. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. (In Russ.) DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-60-69.
25. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
26. Savichev O.G. *Hydroecological substantiation of water management decisions*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p. (In Russ.)
27. Savichev O.G., Yang Heng. Hydro-geological and hydrological conditions of functioning of the Obskoe and Baksinskoe fens (the southeast of the Western Siberian plain). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 43–56. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/4/3147>.
28. Savichev O., Moiseeva J., Guseva N. Changes in the groundwater levels and regimes in the taiga zone of Western Siberia as a result of global warming. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, vol. 147 (3–4), pp. 1121–1131. DOI: 10.1007/s00704-021-03879-4.
29. Savichev O.G., Domarenko V.A., Yang Heng, Peregudina E.V. The comparative analysis of ground and mire waters in the southeast part of the Western Siberia. *Razvedka i okhrana nedr*, 2022, no. 5, pp. 26–33. (In Russ.) DOI: 10.53085/0034-026X\_2022\_05\_26.
30. Savichev O.G., Lobur Y.N. Quantitative assessment of relations of river and ground water in the middle Ob basin (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334 (1), pp. 106–115. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3998.
31. Savichev O.G. Changes in hydrogeological conditions during bogging in the southeast of the West Siberian plain. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 187–198. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4379.
32. Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N., Peregudina E.V., Kenesbaev B.K. Conditions of interaction of natural water within the Bakchar ore close (Western Siberia). *Exploration and protection of subsoil*, 2023, no. 10, pp. 61–67. (In Russ.) DOI: 10.53085/0034-026X\_2023\_10\_61.
33. Zemtsov V., Savichev O., Petrova V. The mechanism and regularities of ion runoff formation in the Ob river (Western Siberia) under the Influence of its tributaries and underground feeding. *Water*, 2023, vol. 15, no. 13, pp. 2413. DOI: 10.3390/w15132413.
34. *Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia*. Moscow, Geoltorfrazvedka Publ., 1973. 83 p. (In Russ.)
35. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)*. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p. (In Russ.)
36. Rasskazov N.M., Udodov P.A., Emelyanova T.Ya., Nazarov A.D., Shamolin V.A. Main hydrogeological and hydrogeochemical features of peat deposits in the central part of the Ob-Irtysh interfluvium and some issues of hydrogeochemical studies of bogs.

- Ground waters of Siberia and the Far East*. Eds. I.S. Lomonosov, N.A. Marinov, E.V. Pinneker. Moscow, Nauka Publ., 1971. pp. 229–232. (In Russ.)
37. *Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob*. Ed. by O.N. Panin. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p. (In Russ.)
38. *Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p. (In Russ.)
39. Yermashova N.A. *Geochemistry of groundwater in the active water exchange zone of the Tomsk region in connection with solving issues of water supply and protection*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 1998. 44 p. (In Russ.)
40. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
41. Kharanzhevskaya Yu.A. *Underground drainage of the river basin Chaya (Western Siberia) and its long-term variability*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2018. 20 p. (In Russ.)
42. Moiseeva Yu.A. *Changes in the underground runoff of the taiga zone of Western Siberia in the Holocene*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2018. 22 p. (In Russ.)
43. Blyakharchuk T.A., Kurina I.V., Pologova N.N. Late Holocene dynamics of vegetation cover and climate moisture in the southeastern sector of the West Siberian Plain according to palynological and rhizopod studies of peat deposits. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2019, no. 45, pp. 164–189. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988591/45/9.
44. *Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin*. Tomsk, branch «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidrospetsgeologiya» Publ., 2022. Vol. 18, 204 p. (In Russ.)
45. Kuzevanov K.K. *Changes in hydrogeological conditions during the exploitation of groundwater for domestic and drinking purposes in the Tomsk region*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2022. 23 p. (In Russ.)
46. Yang Heng. *Features of the interaction of groundwater and swamp waters in humid conditions of temperate and subtropical climates (on the example of objects in Western Siberia, Russia and Eastern China)*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2023. 26 p. (In Russ.)
47. Kharanzhevskaya Yu.A. Features of the level regime of the drained area of the northeastern spurs of the Vasyugan swamp. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 97–108. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4231.
48. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2<sup>nd</sup> ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
49. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
50. SP 482.1325800.2020. *Engineering hydrometeorological survey for construction. General regulations for execution of work*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 49 p. (In Russ.)
51. SP 529.1325800.2023. *Determination of the main calculated hydrological characteristics. Determination of the Main Design Hydrological Characteristics*. Moscow, Ministry of Construction of the Russian Federation Publ., 2023. 152 p. (In Russ.)
52. Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, vol. 10, pp. 873–887, 2006. Available at: [www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/873/2006) (accessed 25 December 2023).
53. *Methodological recommendations for determining the estimated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations*. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2009. 193 p. (In Russ.)
54. Korn G.A., Korn Th.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. US, Courier Corporation, 2013. 1152 p.
55. *Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000*. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p. (In Russ.)
56. *SS 19179-73. Land hydrology. Terms and definitions*. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p. (In Russ.)
57. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
58. Shiyan L.N., Machekhina K.I., Frantczuskaia E.O. Groundwater sources in the West Siberian region: Chemical composition, analysis, and water treatment technologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, vol. 7, no. 100441, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100441.
59. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko L.V. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 124, no. 104811, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
60. Ivanov K.E. *Water exchange in mire landscapes*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p. (In Russ.)

### Information about the authors

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. OSavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Received: 09.01.2024

Revised: 18.01.2024

Accepted: 25.01.2024

УДК 556.114.6:546.65:550.424-047.58(571.63)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4459  
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

## Особенности миграции химических элементов в природных водах и их отложения в виде минеральных новообразований в живых организмах (физико-химическое моделирование с верификацией на животных)

Н.В. Барановская<sup>1</sup>, С.И. Мазухина<sup>2</sup>, А.М. Паничев<sup>3</sup>, Е.А. Вах<sup>4,3</sup>, И.А. Тарасенко<sup>4</sup>,  
И.В. Серёдкин<sup>3</sup>, С.С. Ильенок<sup>1</sup>, В.В. Иванов<sup>4</sup>, Е.В. Агеева<sup>1</sup>, Р.А. Макаревич<sup>3</sup>,  
Д.А. Стрепетов<sup>1</sup>✉, А.В. Ветошкина<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>2</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, г. Апатиты

<sup>3</sup> Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

<sup>4</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, г. Владивосток

✉ das57@tpu.ru

**Аннотация. Актуальность.** Предложен оригинальный метод моделирования, позволяющий получить качественно новые результаты в практике эколого-геохимических и медико-биологических исследований. **Цель.** Работа нацелена на получение новых данных по формам миграции элементов в условиях параметров организма животных и человека с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор») с заверкой расчетных данных результатами, полученными по реальным природным объектам и организмам животных. **Объекты:** пробы природных вод и тканей диких животных. **Методы:** компьютерное моделирование (ПК «Селектор»); масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, спектрометр Agilent 7700x) – 55 элементов; атомно-эмиссионная спектрометрия (АЭС, спектрометр iCAP 7600 Duo) – 5 макрокатионов; ионная хроматография (ИХ, ионно-жидкостный хроматограф LC-20, Shimadzu) – 6 анионов; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр NexION 300D); сканирующие электронные микроскопы Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным спектрометром Bruker X@Flash 5010. **Результаты.** С помощью моделирования определен качественный и количественный состав системы «раствор – кристаллическое вещество» с учетом условий окружающей среды и физиологических показателей организма животных и человека, где в качестве раствора были природные питьевые воды, желудочный сок, смесь питьевых вод и желудочного сока, а в качестве кристаллического вещества – равновесные с раствором новообразованные минеральные фазы. Работа позволила установить, что предполагаемые в модельном эксперименте комплексы могут являться причиной появления в отдельных тканях живого организма наноминеральных фаз химических элементов.

**Ключевые слова:** моделирование, природные (питьевые) воды, формы миграции элементов, редкоземельные элементы, наноминеральные фазы, органы и ткани млекопитающих, Сихотэ-Алинь

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ: № 20-67-47005 и № 20-64-47021. Авторы выражают признательность администрации Сихотэ-Алинского государственного природного заповедника за предоставленную возможность работы на заповедной территории.

**Для цитирования:** Особенности миграции химических элементов в природных водах и их отложения в виде минеральных новообразований в живых организмах (физико-химическое моделирование с верификацией на животных) / Н.В. Барановская, С.И. Мазухина, А.М. Паничев, Е.А. Вах, И.А. Тарасенко, И.В. Серёдкин, С.С. Ильенок, В.В. Иванов, Е.В. Агеева, Р.А. Макаревич, Д.А. Стрепетов, А.В. Ветошкина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 187–201. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4459

---

UDC 556.114.6:546.65:550.424-047.58(571.63)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4459

## Features of chemical elements migration in natural waters and their deposition in the form of neocrystallisations in living organisms (physico-chemical modeling with animal testing)

N.V. Baranovskaya<sup>1</sup>, S.I. Mazukhina<sup>2</sup>, A.M. Panichev<sup>3</sup>, E.A. Vakh<sup>4,3</sup>, I.A. Tarasenko<sup>4</sup>,  
I.V. Seryodkin<sup>3</sup>, S.S. Ilenok<sup>1</sup>, V.V. Ivanov<sup>4</sup>, E.V. Ageeva<sup>1</sup>, R.A. Makarevich<sup>3</sup>,  
D.A. Strepetov<sup>1</sup>✉, A.V. Vetoshkina<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Industrial Ecology Problems of the North – separate subdivision of the Federal Research Center  
"Kola Scientific Center of the RAS", Apatity, Russian Federation

<sup>3</sup> Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

<sup>4</sup> Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

✉ das57@tpu.ru

**Abstract. Relevance.** An original modeling method is presented, which allows obtaining qualitatively new results in practice of ecological-geochemical and biomedical research. **Aim.** To obtain new data on the forms of element migration in the conditions of animal and human organism parameters by means of physicochemical modeling (PC "Selector") with verification of calculated data with the results obtained for real natural objects and animal organisms. **Objects.** Samples of natural waters and tissues of wild animals. **Methods.** Computer modeling (PC "Selector"); inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS, Agilent 7700x spectrometer) – 55 elements; atomic emission spectrometry (AES, spectrometer iCAP 7600 Duo) – 5 macrocations; ion chromatography (IC, ion-liquid chromatograph LC-20) – 6 anions; inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS, mass spectrometer NexION 300D; scanning electron microscopes Hitachi S-3400N with Bruker X@Flash 5010 energy dispersive spectrometer). **Results.** By means of modeling, the authors have determined the qualitative and quantitative composition of the system "solution – crystalline substance". They took into account environmental conditions and physiological parameters of animal and human organism. Natural drinking water, gastric juice, mixture of drinking water and gastric juice were used as a solution, and crystalline substance was used as newly formed mineral phases in equilibrium with the solution. The work allowed establishing that the complexes assumed in the model experiment can be the cause of appearance of nanomineral phases of chemical elements in separate tissues of a living organism.

**Keywords:** modeling, natural (drinking) water, forms of element migration, rare earth elements, nanomineral phases, mammalian organs and tissues, Sikhote Alin

**Acknowledgements:** This research was supported by the Russian Science Foundation grants no. 20-67-47005 and 20-64-47021. The authors express their gratitude to the administration of the Sikhote-Alin State Nature Reserve for the opportunity to work in their territory.

**For citation:** Baranovskaya N.V., Mazukhina S.I., Panichev A.M., Vakh E.A., Tarasenko I.A., Seryodkin I.V., Ilenok S.S., Ivanov V.V., Ageeva E.V., Makarevich R.A., Strepetov D.A., Vetoshkina A.V. Features of chemical elements migration in natural waters and their deposition in the form of neocrystallisations in living organisms (physico-chemical modeling with animal testing). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 187–201. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4459

### Введение

Состав природных вод обусловлен закономерностями взаимодействия в системе «вода–порода». Создание модели миграции химических элементов от коренных горных пород в живые организмы, а также их концентрирования внутри организмов с оценкой способности полноценно выполнять свои физиологические функции является весьма актуальной задачей. Она позволяет подойти к вопросу выявления специфики воздействия природных гео-

химических аномалий, которая определяет развитие некоторых геохимически обусловленных патологий среди растительных и всеядных животных и человека, а также инстинктивное стремление растительных животных потреблять воду минеральных источников и некоторые виды горных пород (преимущественно глинистых), что характерно для многих территорий мира.

Исследования подобного рода продолжают оставаться весьма актуальными, несмотря на то, что изу-

чению закономерностей миграции и концентрирования химических элементов в различных компонентах природных ландшафтов, в том числе в биологических организмах, уже уделено немало внимания [1–3]. Актуальность подобных исследований вызвана сравнительно недавно открывшимися аналитическими возможностями ИСР-спектроскопии, которые позволяют существенно расширить круг изучаемых элементов и углубить наши знания об их месте и функциональном назначении в структурах живой материи. Среди определяемых химических элементов особое внимание нами сконцентрировано на группах редких и редкоземельных, поскольку изучению их биологических свойств в последние годы уделяется особо пристальное внимание как в России, так и за рубежом.

Немаловажную роль играют и методы электронно-микроскопического анализа, позволяющие устанавливать наличие наноминеральных фаз элементов и делать выводы о специфике их концентрирования в органах-концентраторах и барьерных тканях организма млекопитающего. Полученная нами в процессе исследований информация имеет не только теоретическое значение, она может быть использована в практике животноводства, в ветеринарии и медицине. Данный методический подход к изучению закономерностей накопления химических элементов в организме млекопитающих в совокупности с моделированием по фактическому составу потребляемых животными вод не имеет зарубежных аналогов. Предлагаемые исследования относятся к пионерным разработкам и направлены на выявление влияния неблагоприятных для животных и человека геохимических факторов среды в природных ландшафтах с разным геологическим фундаментом.

Эти работы проведены нами в условиях Приморского края не случайно. В качестве основных признаков территорий с неблагоприятными геохимическими средовыми факторами выбрано наличие массовых случаев геофагии среди растительноядных животных как специфического пищевого поведения, направленного на компенсирование дисбаланса элементного состава в организме. На территории Приморского края характерны проявления массовой геофагии среди диких копытных в местах развития раннекайнозойских вулканитов, что было выявлено нами еще в 1980-е гг. В период с 2020 по 2023 гг. сотрудниками ТИГ ДВО РАН и ТПУ в рамках гранта РНФ был изучен минеральный и химический состав таких горных пород, а также производных по ним глинистых кор выветривания (в том числе поедаемых животными), почв и вод, в том числе источников, активно потребляемых животными [4]. Исходные данные по составу вод одного из таких источников послужили основой для проведения моделирования с целью выявления

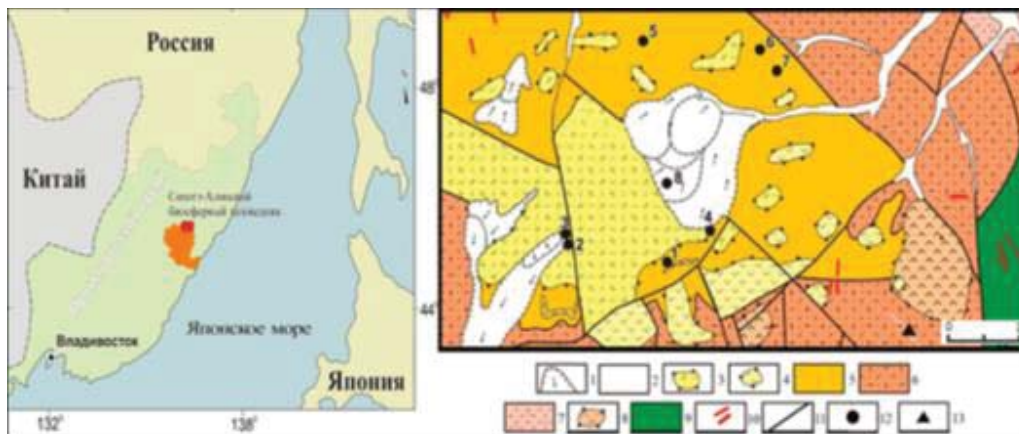
возможных форм миграции химических элементов в организме млекопитающих.

Использование такого подхода позволяет определить закономерности формирования новообразованных фаз в зависимости от различных параметров (рН, Eh, температуры, химического состава воды в зависимости от условий ее формирования и др.) и выявить трансформации этих форм при поступлении в организм млекопитающих, включая организм человека, а также дает возможность прогнозировать патологические состояния и осуществлять профилактику заболеваний.

#### **Краткая характеристика района с ландшафтными компонентами, выбранными для заверки результатов физико-химического моделирования**

Для детальных исследований были выбраны природные воды ручья Самаркин в окрестностях г. Солонцовая и пробы тканей диких животных, собранные нами в относительной близости в приграничной части Сихотэ-Алинского государственного природного заповедника (рис. 1, 2). Данный район входит в три детально изученных нами территории в Сихотэ-Алине, где распространена массовая геофагия среди копытных на природных солонцах-кудурах. В районе г. Солонцовая нами обнаружено 8 солонцов-кудууров. Сама гора и окружающие ее территории являются разрушенным палеоценовым вулканом Шандуйский, который был выделен и изучен геологом В.В. Ветренниковым [5]. Остатки вулканической постройки сложены вулканическими и вулканогенно-осадочными породами преимущественно кислого и среднего состава с преобладанием пирокластических разновидностей. Как показали наши исследования [4], местные вулканиты содержат повышенные количества легкорастворимых минералов редкоземельных элементов (РЗЭ), в результате чего сформировался ландшафтный комплекс с аномальной геохимической спецификой, включающий почвы, природные воды, растительность и животных с повышенным содержанием РЗЭ. Установлено также, что выявленная геохимическая специфика является причиной геофагии среди местных животных (преимущественно среди растительноядных).

На всех местных солонцах-кудурах животные потребляют оглиненные (с преобладанием в составе глинистых смектита) цеолитосодержащие туфы и туффиты с повышенным содержанием в обменном комплексе натрия и кальция. Химический анализ потребляемых глинистых пород и копролитов (экскрементов с содержанием минерального вещества более 75 %), а также результаты кислотных (HCl, рН-1,0) вытяжек из поедаемых пород показали, что потребляемые породы активно выводят из организма РЗЭ тяжелой подгруппы (ТРЗЭ).



**Рис. 1.** Местоположение и фрагмент геологической карты (L-53-94-в; В.Н. Королев, 1982) района исследований: 1, 2 – четвертичные рыхлые отложения, в том числе оползни (1) и речной аллювий (2); 3–6 –эоценовые вулканиты и вулканогенно-осадочные породы, в том числе: риолитовые экструзии (3), андезитовые экструзии (4), риолитовые игнимбриты (5) и угленосные вулканогенно-осадочные отложения (6); 7, 8 – палеоценовые вулканиты и вулканогенно-осадочные отложения, в том числе туфогенные алевралиты и песчаники с прослоями риолитовых туфов (7) и андезитовые экструзии (8); 9 – верхнемеловые-палеоценовые нерасчлененные преимущественно вулканические породы кислого, среднего и основного состава; 10 – разновозрастные дайки; 11 – разрывные нарушения; 12 – закартированные солонцы-кудурсы; 13 – место добычи животных на руч. Петлёвочный

**Fig. 1.** Location and fragment of the geologic map of the study area (L-53-94-v; V.N. Korolev, 1982): 1, 2 – Quaternary loose sediments, including landslides (1) and river alluvium (2); 3–6 – Eocene volcanites and volcanogenic-sedimentary rocks, including: rhyolite extrusions (3), andesite extrusions (4), rhyolite ignimbrites (5) and coal-bearing igneous-sedimentary rocks (6); 7, 8 – Paleocene volcanites and igneous-sedimentary rocks, including tufogene siltstones and sandstones with interbedded rhyolite tuffs (7) and andesite extrusions (8); 9 – Upper Cretaceous-Paleocene undivided predominantly volcanic rocks of acidic, medium and basic composition; 10 – different-age dikes; 11 – discontinuities; 12 – mapped salt licks-kudurs; 13 – place of animal extraction on Petlevochny brook



**Рис. 2.** А, В – общий вид солонцов-кудуров в районе г. Солонцовая; С – самое большое из Шандуйских озер – Большое Солонцовое; D – типичный вид руч. Самаркин

**Fig. 2.** A, B – fragments of salt licks-kudurs in the area of Solontsovaya Mountain; C – the largest of Shandui lakes – Bolshoe Solontsovoe; D – typical view of Samarkin brook

В итоге был сделан вывод, что потребление природных смектит-цеолитовых сорбентов помогает животным компенсировать проблемы в нервной и эндокринной системах, связанные с их отравлением ТРЗЭ, поступающими в организм с кормами и питьевой водой.

### Материалы и методы

В этой статье использована часть материалов (преимущественно данные по водным и биологическим пробам), собранных коллективом авторов летом 2020 г. в рамках проекта РФФИ «Влияние литолого-геохимической специфики горных ландшафтов Сибири и Дальнего Востока на формирование элементного состава организма млекопитающих» на территории Сихотэ-Алинского биосферного заповедника, в окрестностях г. Солонцовая. В данном районе нами были опробованы воды горных озер, родников и ручьевых вод в бассейнах ручьев Солонцовый, Самаркин и Петлёвочный. Кроме того, в данном районе был проведен отбор проб органов и тканей животных двух видов: изюбрь (*Cervus elaphus*) и дикий кабан (*Sus scrofa*). Общее количество биопсийных проб органов и тканей составило 116. Предварительная подготовка проб органов и тканей животных проводилась во Владивостоке, в лаборатории геохимии ТИГ ДВО РАН. Пробы извлекались из холодильника, в котором они хранились, размораживались, нарезались на 1-см кубики, помещались в тарированные фарфоровые тигли и высушивались в сушильном шкафу при медленном, в течение двух суток, подъеме температуры до 105 °С и дальнейшей сушке до достижения постоянной массы. Пробы крови высушивались при 60 °С.

Некоторые отобранные ткани и органы были изучены с применением электронно-микроскопических исследований на предмет выявления в их составе микроминеральных фаз. Данный анализ проводился в двух лабораториях. Образцы исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным спектрометром Bruker X@Flash 5010. Оборудование располагается в МИНОЦ «Урановая геология имени Л.П. Рихванова» при отделении геологии инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ. Изучаемые пробы крепились на углеродную ленту, которая, в свою очередь, фиксировалась на предметном столике, после чего препарат обдувался сжатым воздухом во избежание возможного загрязнения образца атмосферной пылью. Изучение препаратов производилось в режиме низкого вакуума (40–60 Па) при ускоряющем напряжении 20 кВ с использованием детектора обратно-рассеянных электронов. В ДВГИ ДВО РАН препарат фиксировали на углеродном скотче на алюминиевом столике (обелиске). Затем проводили напыление платиной и (или) углеродом. Толщи-

на/плотность покрытия составила ~10 нм/2,25 г/см<sup>3</sup>. После этого препарат исследовали на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMH + EDS AZtec X-Max 80 Standart с применением автоматизированного поиска и классифицирования микро-наноразмерных минеральных фаз (зерен, включений) и их рентгеноспектральным микроанализом с применением энергодисперсионного спектрометра (ЭДС), интегрированного со сканирующим электронным микроскопом.

Аналитические исследования проб биологического материала выполнялись в г. Томске в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (ТПУ) (зав. лабораторией канд. геол-минерал. наук А.А. Хвощевская, аналитик В.В. Куровская). Пробы перед анализом методом ИСП-МС истирались, развешивались в пластиковые пробирки по 200 мг и растворялись в смеси азотной кислоты и перекиси водорода. Определение концентраций химических элементов проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре NexION 300D (Perkin Elmer, США).

Пробы воды, в том числе из источников на курортах, отбирались в полиэтиленовые пробирки объемом 250 мл. В полевых условиях собранные пробы транспортировались в переносной холодильной установке (не более 10 дней).

Непосредственно пробоподготовка для проведения анализа проводилась в лаборатории геохимии Тихоокеанского института географии ДВО РАН. До осуществления фильтрации в пробах измерялись электропроводность, показатель pH и количество HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. В качестве фильтра использовалась мембрана с диаметром ячейки 0,45 микрон, через которую вакуумный насос прокачивал воду. После очистки пробы направлялись в Аналитический центр коллективного пользования при Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН.

Очищенная проба делилась в равном объеме на две, каждая из которых помещалась в пробирки объемом 50 мл. Первая проба отправлялась на определение концентраций 55 элементов методом ИСП-МС (спектрометр Agilent 7700x, Agilent Techn., США). Для этого вода в пробирке подкислялась особо чистой азотной кислотой. Во второй пробирке определялись 6 анионов методом ионной хроматографии (ионный жидкостный хроматограф LC-20, Shimadzu, Япония), а также 5 макрокатионов методом атомно-эмиссионной спектрометрии (спектрометр iCAP 7600 Duo). Концентрация растворенного органического углерода устанавливалась методом термодинамического окисления с помощью анализатора TOCvcprn (Shimadzu). Общая минерализация воды ( $\Sigma n$ ) определялась как сумма макрокомпонентов:



$$\sum n = [Na^+] + [K^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Si^{4+}] + [SO_4^{2-}] + [Cl^-] + [HCO_3^-].$$

При проведении геохимических исследований широко распространено нормирование содержаний РЗЭ к их содержанию в эталонных образцах с целью определения процессов фракционирования элементов в различных физико-химических условиях [6]. В большинстве работ, в том числе и в данной, содержание РЗЭ нормировано на североамериканский сланец (NASC) [7].

Для интерпретации и анализа полученных данных проводился стандартный анализ среднестатистических параметров с использованием программы SigmaPlot 12.0 и Excel. Для построения диаграммы Пайпера использовалась программа AquaChem 5.1.

Для термодинамического моделирования использовали программный комплекс (ПК) «Селектор», разработанный под руководством профессора И.К. Карпова (Институт геохимии им. Виноградова СО РАН, г. Иркутск). Программный комплекс снабжен системой встроенных баз термодинамических данных [8–13] и модулем формирования моделей различной сложности.

Выбранный комплекс основан на минимизации потенциала Гиббса моделируемой системы методом выпуклого программирования [14]. Подобный метод позволяет производить расчеты сложных химических равновесий в изобарно-изотермических, изохорных и адиабатических условиях в мультисистемах с одновременным присутствием минералов в виде однокомпонентных фаз и твердых растворов, газовых смесей, водных растворов электролитов, твердых и жидких углеводородов.

В настоящей работе ПК «Селектор» использован для моделирования в системах «жидкая фаза – газовая фаза» и «жидкая фаза – минеральная твердая фаза». Для решения поставленной задачи разработана физико-химическая модель (ФХМ) взаимодействия «вода–порода». В ФХМ включены 42 независимых компонента (H, He, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Ba, La, Ce,

Hg, Pb, Au, U), 1062 зависимых компонента, в том числе, в водном растворе – 435, в газовой фазе – 76, жидких углеводородов – 111, твердых фаз, органических и минеральных веществ – 440 [15]. В модели для расчета равновесия рассмотрены системы «вода–атмосфера» и «вода–порода–атмосфера», где под породой подразумеваются новообразованные фазы, а в качестве воды рассматриваются атмосферные осадки. Для модели принят следующий состав 1 кг атмосферы, моль: Ar – 0,3209, C – 0,01036, N – 53,9478, Ne – 0,000616, O – 14,48472 [14]. Граничными условиями модели являются количество воды (1000 кг), состав породы, 100 кг атмосферы. Температура 5 °C выбрана как средняя температура апреля и осенних месяцев (октябрь). Весной в это время сходит снежный покров, а осенью образуется новый. Температура при выполнении химических анализов – 20 °C.

## Результаты и обсуждение

### Гидрохимия

Полученные данные по основным ионам свидетельствуют о том, что вода в руч. Самаркин является ультрапресной гидрокарбонатно-кальциево-натриевой с повышенным содержанием кремния. В воде ручья присутствуют незначительные содержания сульфат-ионов (табл. 1). Средний показатель минерализации (М) составляет 35,6 мг/л. Показатель pH нейтральный и изменяется по течению ручья от 6,00 до 7,46 (сказывается отсутствие сульфатов). Содержание Cl-иона в среднем составляет 0,83 мг/л. Содержание иона NO<sub>3</sub> изменяется незначительно и в среднем составляет около 1 мг/л. Концентрации ионов F, Br, NH<sub>4</sub> и NO<sub>2</sub> оказались ниже пределов обнаружения. В составе главных катионов преобладают ионы Na, ионы Ca существенную долю составляют в верховьях ручья Самаркин. Средний показатель по Na – 7,02 мг/л; среднее содержание по Ca – 1,37 мг/л. Среднее содержание по K – 1 мг/л. Магния в водах также мало, в среднем 0,22 мг/л. Содержания растворенного углерода колеблются от 3,0 до 4,3 при среднем 3,88 мг/л.

**Таблица 1.** Состав главных компонентов в воде руч. Самаркин

**Table 1.** Composition of main components in water of Samarkin brook

Номер пробы Sample number	pH	мг/л (mg/L)										
		M	PO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si
C1	6,00	32,28	4,3	19	2,47	0,84	0,68	1,32	0,18	6,33	1,46	12,19
C2	6,19	32,9	3,8	19	2,74	0,92	0,96	1,98	0,29	5,72	1,29	12,36
C3	6,25	35,2	3,7	19,3	3,46	0,82	1,12	0,22	<0,1	9,13	1,15	17,78
C4	6,17	29,67	4,6	16,6	2,48	0,83	1,08	0,89	0,1	7,06	0,63	17
C5	6,89	37,78	3	23,4	2,71	0,75	0,89	2,44	0,29	6,85	0,45	11,95
Среднее/Mean	6,30	33,57	3,88	19,46	2,77	0,83	0,95	1,37	0,22	7,02	1,00	14,26

Примечание: C1 – руч. Самаркин; C2 – прав. приток руч. Самаркин; C3 – прав. приток руч. Самаркин № 2; C4 – вершина руч. Самаркин; C5 – лев. приток руч. Самаркин.

Note: C1 – Samarkin brook; C2 – right tributary of Samarkin brook; C3 – right tributary of Samarkin brook no. 2; C4 – top of Samarkin brook; C5 – left tributary of Samarkin brook.

**Таблица 2.** Состав микроэлементов в водных пробах руч. Самаркин (мкг/л)

**Table 2.** Composition of trace elements in water samples of Samarkin brook (µg/l)

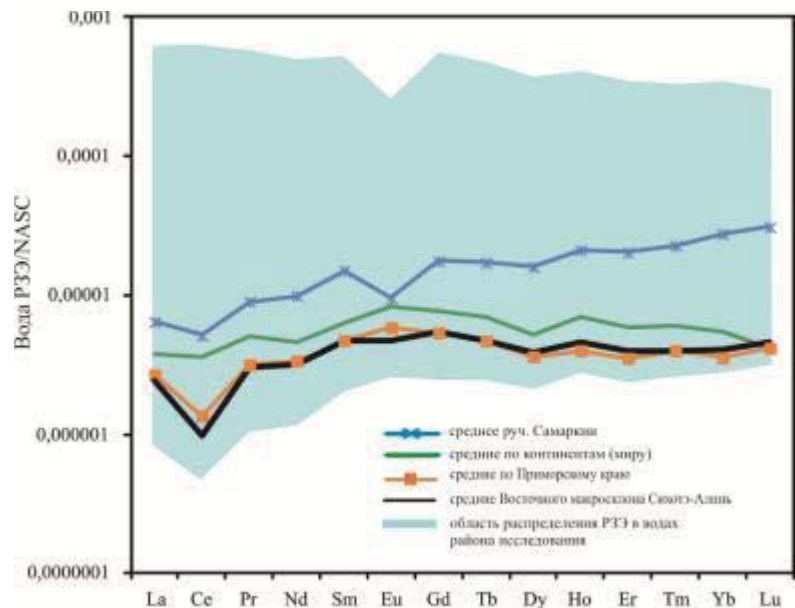
Элементы Elements	C1	C2	C3	C4	C5	Среднее Mean
Li	3,56	2,94	8,47	4,17	3,31	4,49
Be	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03
B	5,24	4,04	5,99	6,54	4,16	5,19
Al	89,4	171	161	254	195	174
P	43,9	49,7	162	55,7	52,6	72,7
S	672	680	804	595	602	670
Sc	0,09	0,01	0,11	0,14	0,08	0,10
Ti	1,60	3,02	2,38	4,38	2,47	2,77
V	0,74	0,63	0,84	0,66	0,54	0,68
Cr	0,13	0,15	0,16	0,18	0,17	0,16
Mn	0,52	1,14	0,67	1,33	0,88	0,91
Fe	39,8	76,5	52,2	77,5	58,1	60,8
Co	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Ni	0,15	0,16	0,16	0,25	0,16	0,18
Cu	0,38	0,38	0,53	0,61	0,38	0,44
Zn	2,06	3,21	1,85	3,42	2,01	2,51
Ga	0,03	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04
Ge	0,02	0,03	0,23	0,07	0,04	0,08
As	0,71	0,72	6,15	2,58	2,06	2,44
Se	0,05	0,07	0,07	0,11	0,05	0,07
Rb	3,38	2,01	0,75	1,54	0,91	1,72
Sr	1,44	3,23	1,08	1,66	8,34	3,14
Zr	1,04	0,87	0,85	1,05	0,45	0,85
Nb	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
Mo	0,39	0,31	0,96	0,80	0,54	0,61
Ag	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01
Sn	0,01	0,02	0,02	0,24	0,01	0,02
Sb	0,05	0,05	0,25	0,16	0,11	0,12
Te	0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01	0,01
Cs	0,04	0,05	0,31	0,18	0,19	0,15
Ba	0,61	0,61	0,42	0,68	0,72	0,61
Hf	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03
W	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Tl	0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,01
Pb	0,06	0,06	0,08	0,11	0,06	0,07
Th	0,16	0,15	0,18	0,22	0,08	0,15
U	0,10	0,10	0,21	0,13	0,07	0,12

Примечание: Места отбора (Табл. 1); <0,01 – значение ниже предела обнаружения метода.

Note: See Table 1 for sampling locations; <0,01 – value below the detection limit of the method.

**Рис. 3.** Профили распределения средних показателей концентраций NASC-нормированных РЗЭ [7] в водных пробах района г. Солонцовая в сравнении со средними по рекам мира [17], средними по рекам Приморского края, средними показателями по рекам Восточного макросклона Сихотэ-Алиня и область распределения РЗЭ в районах исследования

**Fig. 3.** Distribution profiles of the mean values of NASC-normalized REE concentrations [7] in water samples from the Solontsovaya Mountain area compared to the mean values for rivers of the world [17], average for rivers of Primorsky Krai, average for rivers of the Eastern macro-slope of Sikhotealin and REE distribution area in the study areas



В водах руч. Самаркин наибольшая вариация среди концентраций микроэлементов отмечается для Ge (от 0,02 до 0,23 при среднем значении 0,078 мг/л), As (0,7–6,15/2,44), Cs (0,04–0,31/0,154), Sr (1,08–8,34), Sb (0,05–0,25/0,124), Rb (0,75–3,38/1,72). Концентрации остальных элементов в русле ручья изменяются в 2–3 раза (табл. 2). В пробах воды ручья отмечены повышенные концентрации Li, V, As, Rb, Cs и Th относительно рек Восточного Сихотэ-Алиня в 3–5 раз и Al в 7 раз [16].

Суммарная концентрация растворенных форм РЗЭ в водах руч. Самаркин изменяется (с учетом скандия и иттрия) от 1,5 до 2,8 мкг/л при среднем значении 2,1. Разброс сумм легких РЗЭ (ЛРЗЭ) – от 67 до 75 %.

**Таблица 3.** Содержание РЗЭ в водах руч. Самаркин, мкг/л  
**Table 3.** REE concentrations in waters of Samarkin brook, µg/l

Элементы Elements	C1	C2	C3	C4	C5	Среднее Mean
Y	0,47	0,49	0,46	0,62	0,31	0,47
La	0,21	0,20	0,18	0,31	0,14	0,21
Ce	0,27	0,25	0,47	0,53	0,36	0,38
Pr	0,06	0,07	0,07	0,11	0,05	0,07
Nd	0,28	0,30	0,37	0,47	0,22	0,33
Sm	0,07	0,08	0,10	0,12	0,06	0,09
Eu	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Gd	0,08	0,09	0,10	0,13	0,06	0,09
Tb	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Dy	0,09	0,09	0,11	0,12	0,06	0,09
Ho	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02
Er	0,07	0,07	0,08	0,08	0,05	0,07
Tm	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Yb	0,09	0,10	0,11	0,09	0,05	0,09
Lu	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
ΣРЗЭ/ΣREE	1,27	1,32	1,66	2,04	1,10	1,48
ЛРЗЭ/LREE	0,88	0,89	1,19	1,54	0,83	1,07
ТРЗЭ/HREE	0,39	0,43	0,48	0,50	0,27	0,41
ЛРЗЭ/LREE, %	69,6	67,5	71,3	75,3	75,4	71,8
ТРЗЭ/HREE, %	30,4	32,5	28,7	24,7	24,6	28,2
Y/Ho	22,9	22,0	19,3	24,9	22,3	22,3
La/Yb	0,23	0,20	0,16	0,33	0,27	0,24
Eu/Eu*	0,52	0,52	0,58	0,63	0,63	0,58
Ce/Ce*	0,51	0,48	0,86	0,63	0,92	0,68
La/Sm	0,54	0,44	0,32	0,45	0,43	0,44
Sm/Y	0,42	0,46	0,52	0,74	0,62	0,55
ЛРЗЭ/ТРЗЭ LREE/HREE	0,22	0,21	0,23	0,31	0,28	0,25

Примечание: Места отбора (Табл. 1).  $Eu/Eu^*=2Eu^*/(Sm^*+Gd^*)$  и  $Ce/Ce^*=2Ce^*/(La^*+Pr^*)$  – формулы расчета европиевой и цериевой аномалий из NASC-нормированных значений; n – отношение NASC-нормированных значений элементов; ΣРЗЭ – сумма концентраций РЗЭ; ЛРЗЭ – сумма концентраций ЛРЗЭ; ТРЗЭ – сумма концентраций ТРЗЭ.

Note: See Table 1 for sampling locations.  $Eu/Eu^*=2Eu^*/(Sm^*+Gd^*)$  and  $Ce/Ce^*=2Ce^*/(La^*+Pr^*)$  – formulas for calculating europium and cerium anomalies from NASC-normalized values; n – ratio of NASC-normalized values of elements; ΣREE – sum of REE concentrations; LREE – sum of light LREE concentrations; HREE – sum of heavy HREE concentrations.

На диаграмме – профили распределения концентраций NASC-нормированных РЗЭ, стекающих с подножия г. Солонцовая. Очевидна их резкая обогащенность элементами тяжелой подгруппы. На диаграмме (рис. 3) представлены NASC-нормированные средние содержания РЗЭ в водах в районе г. Солонцовая, средние показатели по основным рекам Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, средние по рекам Приморского края, а также средние показатели для рек мира. Как очевидно из диаграммы, концентрации РЗЭ в поверхностных водах района г. Солонцовая превышают средние по Приморью и миру в несколько раз. Особенно большой разрыв наблюдается по ТРЗЭ.

### Химические элементы в организме млекопитающих и моделирование образования твердых фаз

Рассмотрение среднего содержания химических элементов в организме двух млекопитающих – изюбря и кабана – позволяет говорить о том, что оно несколько отличается от известных в литературе концентраций на макрокомпонентном уровне (сравнение проводилось с данными по [1] и [2]). Так, среднее содержание натрия в организме изюбря составляет 0,6 %, в организме кабана – 0,8 % на фоне литературного показателя 0,7 %. Можно отметить несколько более высокое содержание калия (1,2 % в организме изученных животных при литературном показателе 0,75 %) и низкое кальция (2 и 3 % в изюбре и кабана соответственно в сравнении с 8,5 % по [1]). Установлено более существенное концентрирование ионов хлора (на фоне литературного показателя 0,3–1,1 % в организме изюбря – 1,2 % и кабана – 1,4 %). Магния в организме изученных млекопитающих содержится порядка 0,2 % на фоне 0,1 % приведенных литературных данных. Содержание кремния, избыточное количество которого обнаружено в водах, потребляемых животными региона, в целом отличается от известных ранее концентраций незначительно (120 мг/кг по [1] и от 70 до 450 мг/кг по [2]). Для организма изюбря он составляет 119 мг/кг, а для кабана – 130 мг/кг. Гораздо более существенные различия в сравнении с данными литературных источников наблюдаются для титана, который в организме животных в 10–16 раз выше, и марганца (в 10 раз выше в организме изюбря и в 40 – в организме кабана), а также ванадия, содержание которого в 10 раз ниже в организме изученных животных. Отмечается некоторое концентрирование железа, меди, бария, олова и брома. Поскольку органы и ткани млекопитающих различаются по степени накопления того или иного химического элемента, то весьма информативным показателем является вариативность содержания элемента. Так, например, содер-

жание кремния в организме изюбря колеблется от 2 мг/кг в зубах до 371 мг/кг в слепой кишке. У кабана содержание этого элемента менее 2 мг/кг в челюсти при содержании в ободочной кишке – 289 мг/кг и высоком содержании (120 мг/кг) в головном мозге. Литературные источники свидетельствуют о том, что данный элемент не имеет тенденции к концентрированию в головном мозге и, как правило, его содержание в нем минимально (80 мг/кг по [1] и 70 по [2]). Анализ элементного состава организма млекопитающих (изюбрь, кабан) с участка «Солонцовый» показал, что большинство изученных химических элементов характеризуются неоднородным характером распределения в организме. Низкая вариативность в накоплении характерна только для серы, калия, цинка, цезия и рубидия.

В целом анализ концентрирования и вариативности элементов, которые имеют значимые вариации содержаний в водах региона, в организме изученных животных показывает, что прямых сопоставлений найти почти невозможно по большинству химических элементов, за редким исключением. Очевидно, что на распределение того или иного химического элемента в организме будет оказывать значительное влияние ряд факторов, в том числе форма его поступления в организм и преобразование в условиях самого организма. Можно констатировать, что в организме млекопитающих химические элементы, поступающие с воздухом, водой и пищей активно мигрируют, оседая в органах-концентраторах. Вопрос о формах, в которых это происходит, и механизмах данных процессов остается открытым. Для того, чтобы представить, какие возможные формы могут образовываться в организме при поступлении с водой известного состава, нами было проведено моделирование на основе фактически полученных данных и сделано сопоставление с результатами электронно-микроскопического анализа наблюдаемых фаз химических элементов в органах и тканях изученных млекопитающих. В табл. 4 представлены результаты моделирования.

Анализ результатов (табл. 4) указывает на состав твердых фаз, которые равновесны с водой и могут выпадать из раствора. К таковым относятся: гидроксиды железа, оксид марганца, глины (монтмориллонит), оксид кремния. Это отражается на химическом составе раствора – уменьшаются концентрации и формы миграции алюминия, кремния, марганца, железа. Разработанная ранее в рамках гранта РФФИ (2018 г.) модель среды желудка (ПК «Селектор») позволяет нам прогнозировать результаты работы системы «раствор – кристаллическое вещество» с учетом условий окружающей среды и физиологических показателей живого организма,

где в качестве кристаллического вещества рассматриваются новообразованные фазы, равновесные с раствором. А под самим раствором понимаются желудочный сок и природные питьевые воды, а также их смесь [18]. Взаимодействие воды и желудочного сока само по себе является геохимическим барьером, т. е. зоной смены геохимической обстановки, в которой происходит резкое изменение геохимических условий и содержаний химических элементов [3, 19]. Применение физико-химического моделирования системы «природные воды – желудочный сок» в условиях пониженной ( $pH=6,24$ ,  $Eh=0,218$  V) и повышенной ( $pH=2,02$ ,  $Eh=0,044$  V) кислотности позволило: определить состав минеральных фаз, вероятно, транспортирующихся из желудка в другие органы и ткани организма; оценить и определить изменчивость параметров  $Eh$  и  $pH$  модели желудочного сока; исследовать формы миграции химических элементов [18, 20]. Так, с применением модели показано, что при нормальной кислотности и содержании воды в желудке от 320 до 1000 мл возможно выпадение твердой фазы  $SiO_2$ . Термодинамические исследования показали, что возможность образования твердой фазы составляет 97 % (табл. 4, рис. 4, б). Модель показала, что при низкой кислотности уже при наличии 10 мл воды в желудке выпадают алюмосиликаты, а при наличии 100 мл воды в восстановительных условиях выпадает  $FeS_2$  (рис. 4, в, г).

Важным вопросом является возможность появления на уровне желудка и кишечника таких форм элементов, которые способны активно всасываться и далее мигрировать с кровью в ткани животного. Так, по данным моделирования, в кислой среде желудка может образовываться отрицательный анион кремния ( $HSiO_3^-$ ), содержание которого увеличивается с ростом показателя  $pH$  и смещением кислотного равновесия в щелочную среду (табл. 4). Этот факт, по-видимому, приводит к активной миграции кремния с поступлением в различные органы животного и выпадением в дальнейшем в виде наноминеральных фаз, в том числе в виде прогнозируемого моделью оксида кремния. Доказательством этому служит факт обнаружения таких фаз в костях, головном и костном мозге изюбрей данной территории (рис. 5–7). При этом обнаруживаются микроминеральные включения смешанного состава, в составе которых наблюдаются такие элементы, как кремний, алюминий, железо и некоторые другие.

Согласно модели, при изменении объема воды в системе от 1 до 1000 мл при нормальной кислотности желудка на несколько порядков увеличивается содержание катиона  $LaCl^{2+}$ , которые не устанавливаются в природных водах, а также отмечается появление  $CeCl_3$ . Кроме того, отмечено появление

разных форм урана. Анализ корреляционных взаимосвязей химических элементов, концентрирующихся в органах и тканях у животных с этой территории, показал, что, несмотря на разный характер

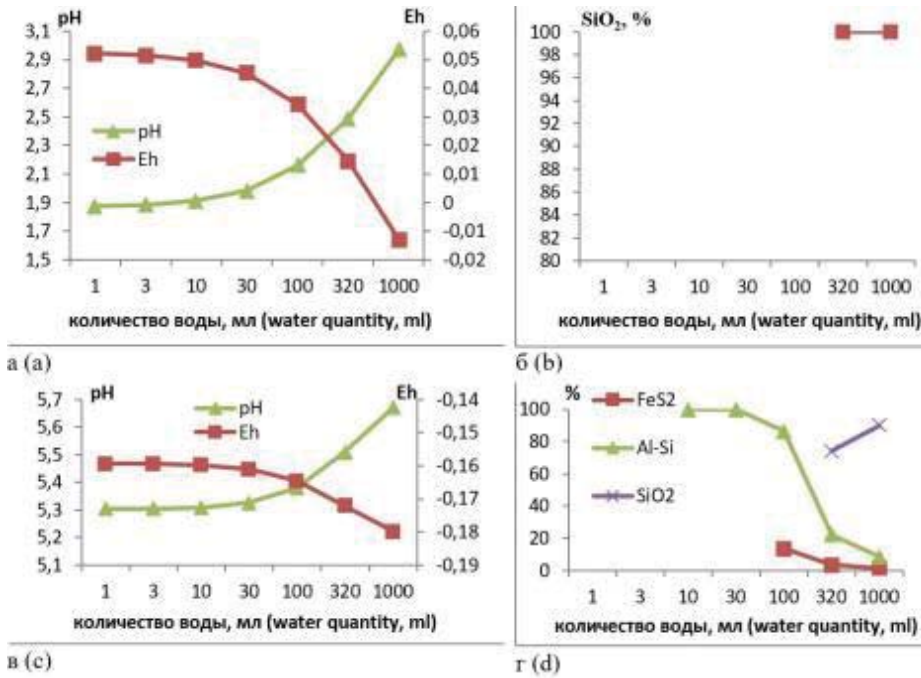
питания, видовую специфику и характер поведения, для всех характерна присутствующая в организме ассоциативная связь редкоземельной группы элементов с ураном.

**Таблица 4.** Аналитические данные (АД) и результаты моделирования (PM) с пробой воды ручья Самаркин (в мг/л), (T=5 °C, P=1 бар)

**Table 4.** Analytical data (AD) and modeling results (MR) with Samarkin brook water sample (in mg/L), (T=50 °C, P=1 bar)

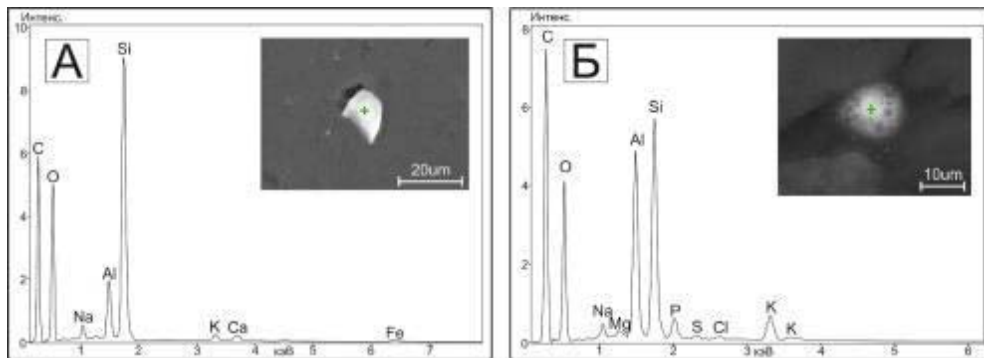
Показатель Index	Вода Water		Вода/порода Water/rock	Показатель Index	Вода Water		Вода/порода Water/rock
	АД (AD)	PM (MR)	PM (MR)		АД (AD)	PM (MR)	PM (MR)
Eh	-	0,8785	0,770	Ba	0,000605	6,05E-04	6,05E-04
pH	6,00	6,129	7,688	Ba <sup>2+</sup>	-	6,05E-04	6,05E-04
Is (ионная сила)	-	-	0,001381	Si	12,19	12,2	1,84
Al	0,089	8,94E-02	1,64E-05	SiO <sub>2</sub>	-	7,06	3,93
Al(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	-	1,94E-02	1,02E-05	HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	2,09E-03	1,14E-03
AlSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	3,90E-05	7,51E-07	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	-	30,4	-
AlO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-	5,34E-03	7,51E-07	Sr	0,00144	1,44E-03	1,44E-03
HALO <sub>2</sub>	-	3,45E-02	4,97E-06	Sr <sup>2+</sup>	-	1,44E-03	1,44E-03
Al(OH) <sup>+2</sup>	-	6,59E-02	9,79E-06	SrHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	7,64E-06	-
Al(OH) <sub>3</sub>	-	2,48E-02	3,57E-06	Cl	0,84	8,40E-01	8,40E-01
Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	8,95E-03	1,26E-06	Cl <sup>-</sup>	-	8,40E-01	-
Al <sup>3+</sup>	-	1,13E-02	1,69E-06	HCl*	-	1,74E-07	-
Ca	1,32	1,32	1,32	P	0,04	4,38E-02	4,38E-02
Ca <sup>2+</sup>	-	1,31	1,31	HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-	8,98E-03	-
CaCO <sub>3</sub>	-	5,34E-05	-	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	1,28E-01	-
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sup>+</sup>	-	1,18E-02	-	Zr	0,001040	1,04E-03	1,04E-03
CaSO <sub>4</sub>	-	1,26E-02	-	HZrO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	3,63E-04	-
B	0,00524	5,24E-03	5,24E-03	ZrO <sub>2</sub>	-	1,09E-03	-
B(OH) <sub>3</sub> <sup>*</sup>	-	2,99E-02	2,99E-02	ZrO <sup>+2</sup>	-	1,39E-07	-
Fe	0,04	3,98E-02	4,87E-08	U	0,0000978	9,78E-05	9,78E-05
Fe <sup>+2</sup>	-	2,20E-10	2,72E-16	HUO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	9,35E-08	-
FeSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	3,52E-08	4,46E-14	UO <sub>2</sub> <sup>+2</sup>	-	4,98E-06	-
Fe(OH) <sub>3</sub>	-	5,87E-04	7,05E-10	UO <sub>2</sub> OH <sup>+</sup>	-	1,19E-05	-
Fe(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	1,79E-06	2,10E-12	UO <sub>3</sub>	-	1,00E-04	-
FeOH <sup>+2</sup>	-	3,08E-04	3,81E-10	Li	0,00356	3,56E-03	3,56E-03
FeO <sup>+</sup>	-	4,58E-02	5,60E-08	Li <sup>+</sup>	-	3,56E-03	-
HFeO <sub>2</sub>	-	5,93E-03	7,13E-09	Ce	0,000266	2,66E-04	2,66E-04
FeO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-	6,32E-07	7,41E-13	Ce <sup>+3</sup>	-	2,45E-04	2,45E-04
K	1,46	1,46	1,46	CeHCO <sub>3</sub> <sup>+2</sup>	-	7,57E-06	-
K <sup>+</sup>	-	1,46	1,46	CeSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	2,63E-05	-
KCl	-	1,08E-07	-	CeOH <sup>+2</sup>	-	1,16E-07	-
KOH	-	1,54E-09	-	La	0,000205	2,05E-04	2,05E-04
KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	9,37E-04	-	La <sup>+3</sup>	-	1,54E-04	1,54E-04
Mg	0,18	1,80E-01	0,18	LaCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	5,38E-05	-
Mg <sup>+2</sup>	-	1,79E-01	-	LaHCO <sub>3</sub> <sup>+2</sup>	-	5,91E-06	-
MgOH <sup>+</sup>	-	1,39E-07	-	LaOH <sup>+2</sup>	-	4,36E-08	-
MgCO <sub>3</sub>	-	5,52E-06	-	LaSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	1,66E-05	-
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sup>+</sup>	-	2,15E-03	-	Na <sup>+</sup>	6,33	6,32	6,32
MgCl <sup>+</sup>	-	7,74E-06	-	NaOH	-	1,73E-08	1,73E-08
MgSO <sub>4</sub>	-	3,26E-03	-	NaCl	-	5,68E-05	5,68E-05
MgHSiO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	-	4,14E-07	-	NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	3,86E-03	3,86E-03
Mn	0,0005	5,24E-04	1,95E-07	NaHSiO <sub>3</sub>	-	5,38E-05	5,38E-05
Mn <sup>+2</sup>	-	5,23E-04	1,94E-07	O <sub>2</sub>	-	5,97	5,97
MnOH <sup>+</sup>	-	3,80E-09	1,40E-12	CO <sub>2</sub>	-	32,7	33,3
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	-	7,26E-04	6,91E-04	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2,47	2,45	2,45
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	19	19,0	18,7	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,68	6,80E-01	6,80E-01
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-	1,04E-04	1,08E-04	-	-	-	-
Твердые фазы, моль/%/Solid phases, mole/%							
MnO <sub>2</sub>	-	-	9,53E-06/0	-	-	-	-
FeO(OH)	-	-	7,13E-04/ 0,28	-	-	-	-
Msc	-	-	2,25E-08/0	-	-	-	-
Mnt	-	-	1,42E-03/2,33	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	-	-	0,363/97,38	-	-	-	-

Примечание (Note): MscKAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>O<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>4,5</sub>MntNa<sub>0,33</sub>Al<sub>2,33</sub>Si<sub>3,67</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>.



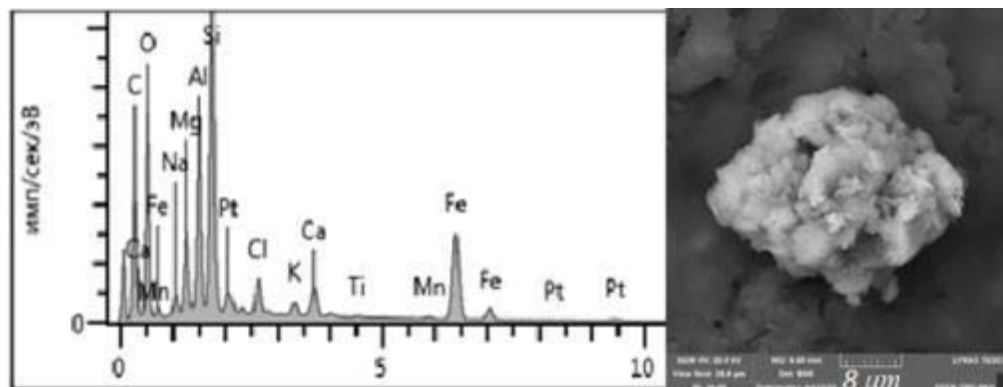
**Рис. 4.** Изменение параметров системы pH, Eh (а, в) и образование твердых фаз (б, г) при изменении объёма воды в системе «вода – желудочный сок». Объем желудочного сока  $V_{ЖС}=100$  мл,  $T=+38$  °C,  $P=1$  бар. Al-Si – алюмосиликаты. при начальных значениях ЖС: pH=6,24, Eh=-0,218 В,  $C(HCl)=2284,6$  мг/л

**Fig. 4.** Change of system parameters – pH, Eh (a, c) and formation of solid phases (b, d) at change of water volume in the system "water – gastric juice".  $V_{GJ}=100$  ml,  $T=+38^{\circ}C$ ,  $P=1$  bar at initial values of GJ: pH=6.24, Eh=-0.218 V,  $C(HCl)=2284.6$  mg/l



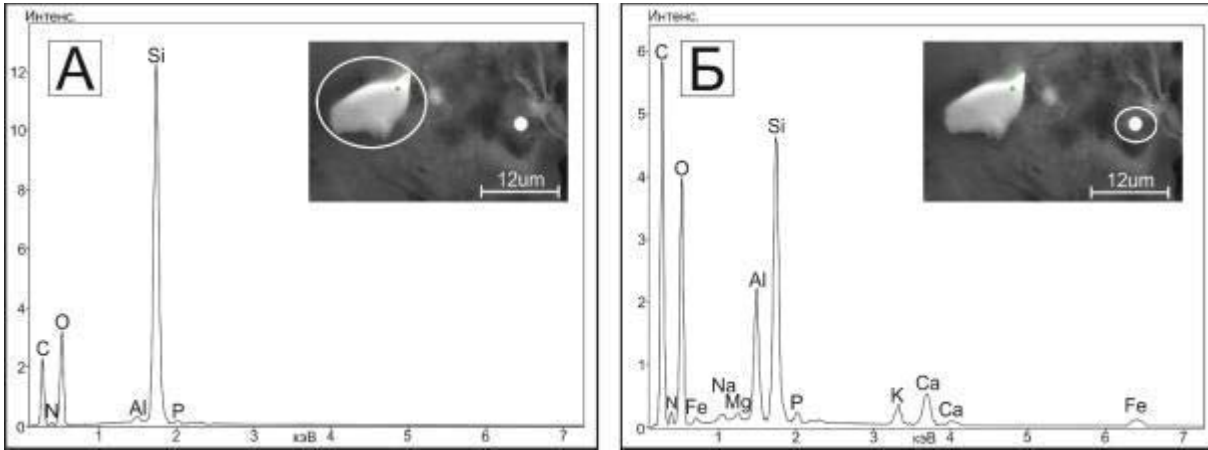
**Рис. 5.** Силикатные и алюмосиликатные минеральные фазы в костном (а) и головном (б) мозге изюбря

**Fig. 5.** Silicate and aluminosilicate mineral phases in the bone (a) and brain (b) of the red deer



**Рис. 6.** Минеральные фазы смешанного состава с преобладанием Si в головном мозге изюбря

**Fig. 6.** Mineral phases of mixed composition with Si predominance in the brain of red deer



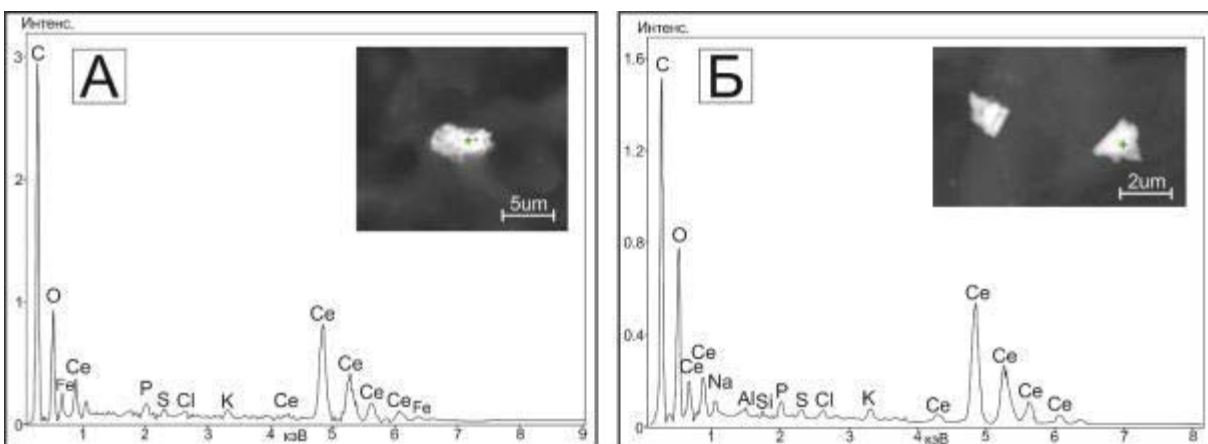
**Рис. 7.** Минеральные фазы Si в бедренной кости изюбря  
**Fig. 7.** Mineral phases of Si in the femur of red deer

При проведении факторного анализа было установлено, что данная ассоциация совместно с рядом других элементов формирует первый, ведущий фактор. В организме животных данные элементы фракционируются и мигрируют в виде органо-минеральных комплексов в депонирующие органы и ткани.

Легкие лантаноиды, по-видимому, обладают большими миграционными способностями, что хорошо демонстрируют данные моделирования. Это приводит к возможности преодоления естественных биологических барьеров организма, в частности гематоэнцефалического. Результаты электронной микроскопии свидетельствуют о наличии церий-содержащих минеральных фаз в головном мозге изюбря (рис. 8).

Таким образом, полученные нами результаты по изучению распределения химических элементов в составе органов и тканей живых организмов территории Сихотэ-Алиня свидетельствуют о том, что

несомненное влияние на формирование минеральных новообразований оказывает состав природных вод территории. Важным вопросом является их преобразование в пищеварительной системе животных с одновременным поступлением химических элементов с поедаемыми породами и растительными кормами. В результате в организме образуются комплексы, содержащие химические элементы в виде наноминеральных фаз, способных мигрировать и отлагаться в разных частях организма, преодолевая существующие биологические барьеры. Большую роль в понимании этих процессов играет моделирование, позволяющее увидеть многообразие потенциально образующихся форм химических элементов. Подобные исследования открывают возможность к подтверждению точности модели на практике, а следовательно, расширяют спектр ее применения не только в геологических исследованиях, но и в геоэкологии, медицине, биологии и ветеринарии.



**Рис. 8.** Церий-содержащие минеральные фазы в головном мозге изюбря и их состав  
**Fig. 8.** Cerium-containing mineral phases in red deer brain and their composition

## Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в условиях организма млекопитающих с возникновением геохимического барьера происходит изменение форм миграции таких элементов, как лантаноиды, кремний, железо и других. Также на примере животных исследуемого района подтверждена возможность образования конкрементов в условиях параметра живого организма. Так, установлен ряд кремнийсодержащих фаз в организме изюбрей изученной территории, что хорошо предсказано моделью исходя из состава вод региона. Также с применением модели показана возможность выпадения наноминеральных частиц, содержащих редкоземельные элементы, которыми аномально обогащены природные воды.

Примененный подход в рамках единой мультисистемы позволяет прогнозировать состав конкрементов и форм миграции элементов в зависимости от индивидуальных особенностей организма, тогда как в большинстве других работ имеется только констатация фактов.

В ходе работы показано, что изучение роли минеральных процессов в организме млекопитающих является актуальным направлением для экологии и медицины, а новые научные исследования, уточняющие место макро- и микроэлементов в этиологии, патогенезе, а также особенности течения многих заболеваний, являются перспективными в рамках поиска путей повышения эффективности выявления, профилактики и лечения нарушений минерального обмена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. – Ташкент: АН УзССР, 1987. – 236 с.
2. Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B. Trace elements from soil to human. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2007. – 561 p.
3. Перельман А.И. Геохимия. 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1989. – 528 с.
4. A study of Kudurs used by wild animals located on the water sources high in REE content in the Caucasus nature reserve / A.M. Panichev, I.V. Serejkin, R.A. Makarevich, K.S. Golokhvast, I.Yu. Chekryzhov, E.A. Vakh, A.S. Kholodov, S.A. Trepet, V.V. Ivanov, D.S. Ostapenko, T.G. Eskina, K.V. Bibina, T.A. Stolyarova, E.I. Mitina // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – Vol. 43. – № 1. – P. 91–112.
5. Ветренников В.В. Геологическое строение Сихотэ-Алинского государственного заповедника и центрального Сихотэ-Алиня. – Владивосток: ДВ книжное изд-во, 1976. – 183 с.
6. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area // *Environmental Pollution*. – 2002. – Vol. 117. – P. 499–514.
7. The «North American shale composite»; its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – Vol. 48. – № 12. – P. 2469–2482.
8. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The properties of gases and liquids. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1977. – 688 p.
9. Рид Р., Праусниц Д., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 591 с.
10. Shock E.L., Helgeson H.C. Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures: correlation algorithms for ionic species and equation of state predictions to 5 kb and 1000 C // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1988. – Vol. 52. – P. 2009–2036.
11. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // *Journal of the national chemical laboratory for industry*. – 1988. – Vol. 83. – P. 27–121.
12. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT92: a software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bar and 0 to 1000 °C // *Computers and Geosciences*. – 1992. – Vol. 7. – № 18. – P. 899–947.
13. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15K and 1bar pressure and at higher temperatures. – Washington: US Geological Survey, 1995. – 461 p.
14. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 287 с.
15. Effect of water treatment on the chemical composition of drinking water: a case of Lovozero, Murmansk Region, Russia / S.I. Mazukhina, S.V. Drogobuzhskaya, S.S. Sandimirov, V.A. Masloboev // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – № 24. – P. 16996–17008.
16. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 392 с.
17. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – Vol. 5. – P. 225–272.
18. Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека: монография / С.И. Мазухина, В.В. Максимова, К.В. Чудненко, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, С.В. Дрогобужская, П.С. Терещенко, В.И. Пожиленко, А.В. Гудков. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – 158 с.
19. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. – М.: Медицина, 1985. – 288 с.
20. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia / S.S. Sandimirov, V.I. Pozhilenko, S.I. Mazukhina, S.V. Drogobuzhskaya, A.A. Shirokaya, P.S. Tereshchenko // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2022. – Vol. 8. – № 3. – P. 4307–4315.

## Информация об авторах

**Наталья Владимировна Барановская**, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nata@tpu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>



**Светлана Ивановна Мазухина**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, 184029, г. Апатиты, микрорайон Академгородок, 14А.; simazukhina@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-2715-4021>

**Александр Михайлович Паничев**, доктор биологических наук, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. sikhote@mail.ru

**Елена Александровна Вах**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159; старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии, Тихоокеанский институт океанологии им. Ильичева ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. adasea@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

**Ирина Андреевна Тарасенко**, доктор геолого-минералогических наук, директор Дальневосточного геологического института ДВО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159. tarasenko\_irina@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

**Иван Владимирович Серёдкин**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

**Сергей Сергеевич Ильенко**, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ilenokss@tpu.ru. <http://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

**Владимир Викторович Иванов**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией микро- и наноисследований, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159. d159327@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0002-7917-9757>

**Елена Владимировна Агеева**, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. evk26@tpu.ru. <http://orcid.org/0000-0001-9104-9325>

**Раиса Алексеевна Макаревич**, научный сотрудник лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. mak@tugdvo.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

**Дмитрий Александрович Стрепетов**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. das57@tpu.ru. <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>

**Алена Владимировна Ветошкина**, младший научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159. vetoshkina.alena@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.11.2023

Поступила после рецензирования: 11.12.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

## REFERENCES

1. Kist A.A. *Phenomenology of biogeochemistry and bioinorganic chemistry*. Tashkent, SA UzSSR Publ., 1987. 236 p. (In Russ.)
2. Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. *Trace elements from soil to human*. Berlin, Springer Science & Business Media, 2007. 561 p.
3. Perelman A.I. *Geochemistry*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1989. 528 p. (In Russ.)
4. Panichev A.M., Seredkin I.V., Makarevich R.A., Golokhvast K.S., Chekryzhov I.Yu., Vakh E.A., Kholodov A.S., Trepet S.A., Ivanov V.V., Ostapenko D.S., Eskina T.G., Bibina K.V., Stolyarova T.A., Mitina E.I. A study of kudurs used by wild animals located on the water sources high in REE content in the Caucasus Nature Reserve. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, vol. 43, no. 1, pp. 91–122.
5. Vetretnikov V.V. *Geological structure of the Sikhote-Alin state reserve and central Sikhote-Alin*. Vladivostok, FE Publ., 1976. 183 p. (In Russ.)
6. Protano G., Riccobono F. High contents of rare earth elements (REEs) in stream waters of a Cu-Pb-Zn mining area. *Environmental Pollution*, 2002. vol. 117, pp. 499–514.
7. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»; its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, no. 12, pp. 2469–2482.
8. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. *The properties of gases and liquids*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1977. 688 p.
9. Reid R., Prausnic D., Shervud T. *Gases and liquids properties*. 3<sup>rd</sup> ed. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 592 p. (In Russ.)

10. Shock E.L., Helgeson H.C. Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures: correlation algorithms for ionic species and equation of state predictions to 5 kb and 1000 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, vol. 52, pp. 2009–2036.
11. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds. *Journal of the national chemical laboratory for industry*, 1988, vol. 83, pp. 27–121.
12. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT92: software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of mineral, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 to 1000 °C. *Computers and Geosciences*, 1992, vol. 7, no. 18, pp. 899–947.
13. Robie R.A., Hemingway B.S. *Thermodynamic properties of minerals and related substances of 298.15 K and 1 Bar pressure and at higher temperatures*. Washington, US Geological Survey, 1995. 461 p.
14. Chudnenko K.V. *Thermodynamic Modeling in Geochemistry: Theory, Algorithms, Software, Applications*. Novosibirsk, Academic Publ. House “Geo”, 2010. 287 p. (In Russ.)
15. Mazukhina S.I., Drogobuzhskaya S.V., Sandimirov S.S., Masloboev V.A., Effect of water treatment on the chemical composition of drinking water: a case of Lovozero, Murmansk Region, Russia. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 24, pp. 16996–17008.
16. Chudaeva V.A. *Migration of chemical elements in the waters of the Far East*. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. 392 p. (In Russ.)
17. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 5, pp. 225–272.
18. Mazukhina S.I., Maksimova V.V., Chudnenko K.V., Masloboev V.A., Sandimirov S.S., Drogobuzhskaya S.V., Tereshenko P.S., Pozhilenko P.S., Gudkov A.V. *Water quality of the Arctic zone of the Russian Federation: physical and chemical modeling of water formation, forms of element migration, influence on human organism: monograph*. Apatity, FRC KSC RAS Publ., 2020. 158 p. (In Russ.)
19. Moskalev Yu.I. *Mineral exchange*. Moscow, Medicine Publ., 1985. 288 p. (In Russ.)
20. Sandimirov S.S., Pozhilenko V.I., Mazukhina S.I., Drogobuzhskaya S.V., Shirokaya A.A., Tereshchenko P.S. Chemical composition of natural waters of the Lovozero massif, Russia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 4307–4315.

#### Information about the authors

**Natalia V. Baranovskaya**, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

**Svetlana I. Mazukhina**, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology Problems of the North – separate subdivision of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the RAS”, 14A, Akademgorodok micro-district, Apatity, 184029, Russian Federation. simazukhina@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-2715-4021>

**Alexander M. Panichev**, Dr. Sc., Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. sikhote@mail.ru

**Elena A. Vakh**, Cand. Sc., Senior Researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russian Federation; Senior Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, Stoletie Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. adasea@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-6690-6505>

**Irina A. Tarasenko**, Dr. Sc., Deputy Director for Research, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, Stoletie Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. tarasenko\_irina@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4612-0708>

**Ivan V. Seryodkin**, Cand. Sc., Leading Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. seryodkinivan@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0003-4054-9236>

**Sergey S. Ilenok**, Cand. Sc., Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ilenokss@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0216-4485>

**Vladimir V. Ivanov**, Cand. Sc., Head of Laboratory of Micro- and Nanoscale Researches, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, Stoletie Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. d159327@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7917-9757>

**Elena V. Ageeva**, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evk26@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9104-9325>

**Raisa A. Makarevich**, Researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russian Federation. mak@tigdvo.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6787-6870>

**Dmitry A. Strepetov**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. das57@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1041-4747>

**Alena V. Vetoshkina**, Junior Researcher, Far East Geological Institute FEB RAS, 159, Stoletie Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russian Federation. adasea@mail.ru

Received: 02.11.2023

Revised: 11.12.2023

Accepted: 25.01.2024

УДК 622.271.3  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203  
Шифр специальности ВАК: 2.8.7

## Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послыйного фрезерования

С.И. Фомин✉, А. Лелен

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

✉fominsi@mail.ru

**Аннотация. Актуальность.** При открытой разработке месторождений основными видами потерь и разубоживания руды, подлежащих нормированию, являются потери и разубоживание, образующиеся при отработке рудо-породных контактов. Карьерные комбайны Surface Miner позволяют осуществлять тонкослоевую разработку месторождения, которая способствует снижению влажности цементного сырья и уменьшению энергетических затрат на цементном заводе. На карьерах по добыче цементного сырья повышение экономической эффективности разработки месторождения карьерными комбайнами Surface Miner обеспечивается при рациональных значениях потерь и разубоживания руды. **Цель:** обоснование рационального уровня потерь цементного сырья при разработке месторождений карьерными комбайнами Surface Miner. **Объекты:** карьеры цементной промышленности, обрабатываемые с применением карьерных комбайнов Surface Miner. **Методы.** В качестве основных методов исследования был проведен технико-экономический анализ работы цементного завода Беочин (Сербия), синтез и обобщение материалов, источников и данных, находящихся в открытом доступе, а также были проведены расчеты по определению объемов потерь и разубоживания полезного ископаемого на контакте руда–порода для горнотехнических условий карьера по добыче цементного сырья. **Результаты.** Были обозначены основные проблемы, которые возникают при отработке карьеров по добыче цементного сырья, касающиеся определения объемов потерь минерального сырья при добыче на контакте руда–порода для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента Беочин. Авторами представляются и обосновываются выводы о дальнейшем эффективном применении оптимальной технологии отработки с применением карьерных комбайнов Surface Miner, которая позволяет снизить себестоимость добычи полезных ископаемых и удельные эксплуатационные затраты на транспортирование карбонатных горных пород по сравнению с традиционной технологией горных работ на 50–60 %.

**Ключевые слова:** разработка, месторождение минерального сырья, карьер, безвзрывная технология, фрезерный комбайн, параметры, потери, руда, разубоживание, экономический ущерб, коэффициент крепости

**Для цитирования:** Фомин С.И., Лелен А. Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послыйного фрезерования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 202–208. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

---

UDC 622.271.3  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

## Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines

S.I. Fomin✉, A. Ljeljen

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

✉fominsi@mail.ru

**Abstract. Relevance.** The need to optimize production of cement raw materials and reduce the cost of processing raw materials. A surface miner combine allow high selective mining of a deposit, which helps to reduce moisture content of cement raw materials and reduce energy costs in a cement plant. In open-cast mining of cement raw materials deposits with the use

of the surface miner combines, the increase in economic efficiency of mining operations can be achieved by determining the rational values of ore losses and dilution. **Aim.** To determine rational level of cement raw material losses during field development by surface miners. **Objects.** Cement industry quarries excavated with of the surface miner combines. **Methods.** Technical and economic analysis of the cement plant Beočin (Serbia), summation and synthesis of materials, sources and data available in the public domain, as well as calculations to determine the amount of loss and dilution of mineral resources at ore–rock contact for mining conditions of the quarry for extracting cement raw materials. **Results.** The main problems that arise during mining quarries for extracting cement raw materials have been identified. It concerns the determination of the volume of losses and dilution of mineral resources at the ore–rock contact for mining conditions of the quarry for extraction of cement raw materials. The authors present and substantiate conclusions about further effective application of optimal mining technology, with the use of the surface miner combines, which allows reducing the cost of production of minerals and specific operating costs of transporting carbonate rocks compared to the traditional technology of mining works at 50–60%.

**Keywords:** mining, mineral deposit, opencast mine, non-blast technology, surface miner, parameters, mineral loss, ore, mineral dilution, economic damage, strength coefficient

**For citation:** Fomin S.I., Ljeljen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 202–208. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4203

## Введение

Сырьевой базой предприятия по производству цемента Беочин с годовой производительностью 1,6 млн т цемента являются месторождения карбонатных пород, отрабатываемые двумя карьерами с годовой производственной мощностью соответственно 0,9 и 1,4 млн т [1, 2]. Полезная толща горизонтальная, мощностью более 40 м [3].

В табл. 1 представлены основные показатели разработки месторождения цементного сырья Беочин карьерными комбайнами Surface Miner.

**Таблица 1.** Показатели разработки месторождения цементного сырья Беочин комбайнами послойного фрезерования SM [составлено авторами]

**Table 1.** Indicators of Beočin cement deposit development by surface miner combines [compiled by the authors]

Показатели/Indicators	Цементный завод Беочин (Сербия) Cement plant Beočin (Serbia)
Разрабатываемые породы Rocks to be mined	Известняк, мергель Limestone, marl
Предел прочности на одноосное сжатие/среднее, МПа Uniaxial compressive strength/average, MPa	25–75/50
Коэффициент крепости по М.М. Протодряконову Strength coefficient by M.M. Protodyakonov	5–6
Типоразмер комбайна Combine type	2600 SM
Мощность фрезеруемого слоя, м Milling layer thickness, m	0,25
Скорость рабочего хода, м/мин Working speed, m/min	8
Производительность комбайна, т/ч Combine capacity, t/h	600
Расход резцов, шт./1000 т Cutter consumption, pcs./1000 tons	3
Расход дизельного топлива, л/ч Diesel fuel consumption, l/h	81

На предварительной стадии проектирования были рассмотрены следующие варианты технологий отработки:

1. Бульдозер-рыхлитель – пневмоколесный погрузчик – мобильный дробильный агрегат – забойный конвейер в контуре карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки;
2. Буровзрывные работы – пневмоколесный погрузчик – транспортирование карьерными автосамосвалами – дробление на борту карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки;
3. Комбайн послойного фрезерования 2600 SM (отделение горных пород от массива и дробление) – транспортирование карьерными автосамосвалами – перегрузка на борту карьера, с дальнейшим перемещением минерального сырья конвейером по поверхности к месту переработки.

Анализ технико-экономических показателей [4–7] для различных вариантов технологий отработки месторождения позволил установить, что при третьем варианте отработки месторождения карьером Беочин удельные затраты на добычу и переработку минерального сырья будут на 35–40 % ниже, чем при других вариантах.

По итогам анализа результатов работы карьерного комбайна Surface Miner для горнотехнических условий карьеров предприятия по производству цемента Беочин (Сербия) получены следующие выводы:

- Послойное фрезерование горных пород карьерным комбайном Surface Miner, по сравнению с подготовкой пород к выемке буровзрывным способом, обеспечивает уменьшение расхода горюче-смазочных материалов на предприятии более чем в 2 раза, уменьшение влажности до-

бываемого полезного ископаемого и повышение энергетической эффективности цементного производства.

- Применение карьерного комбайна Surface Miner позволило отказаться от стадии крупного дробления.
- При работе карьерного комбайна Surface Miner происходит выравнивание поверхности рабочих площадок, что с повышением использования грузоподъемности карьерных автосамосвалов способствует увеличению наработки на отказ, продолжительности эксплуатации горнотранспортного оборудования.
- Достижение рационального фракционного состава разрабатываемых горных пород, с размером куска меньше 80 мм, позволило обосновать целесообразность внедрения на предприятии поточной технологии.

#### **Обоснование рационального уровня потерь руды при разработке месторождений карьерными комбайнами Surface Miner**

При открытой разработке месторождений традиционно возникают потери минерального сырья в области контакта руды и вскрышных пород [8–11].

Увеличение потерь ( $\eta$ ) приводит к уменьшению разубоживания ( $\rho$ ) в области контакта руды и вскрышных пород [12–16]. Взаимозависимость этих величин можно оценить через коэффициент  $R$ , характеризующий отношение содержаний полезного компонента в руде и вмещающих породах [17]:

$$R = \frac{(\alpha_0 - b)\gamma_p}{(\alpha - \alpha_0)\gamma_b},$$

где  $\alpha_0$  – минимальное, экономически целесообразное содержание полезного компонента в руде, %;  $\alpha$  – содержание полезного компонента в балансовых запасах руды, %;  $b$  – содержание полезного компонента во вмещающих породах, %;  $\gamma_p$  – плотность руды, т/м<sup>3</sup>;  $\gamma_b$  – плотность вмещающих пород, т/м<sup>3</sup>.

Технологические схемы отработки карьерными комбайнами Surface Miner применяются для горно-геологических условий месторождений, сложенных горизонтальными и наклонными рудными телами (пластами), без подготовки горных пород к выемке буровзрывным способом [18–20].

При реализации традиционной технологии ведения горных работ, после проведения буровзрывных работ, отработка запасов осуществляется с использованием гидравлических экскаваторов. Высота добычных уступов принимается равной 5 м, а на участках выклинивания с целью минимизации потерь возможна разбивка уступов на два подступа. При отработке запасов маломощных (до 2,0 м) участков выклинивания негативным аспектом при-

менения буровзрывной технологии является повышенное разубоживание, а также выход негабарита, требующего вторичного дробления.

При повышенных требованиях к качеству минерального сырья и необходимости снижения себестоимости, при ограниченности сырьевой базы, целесообразен переход на безвзрывную технологию фрезерования пластов полезного ископаемого.

Эффективное применение безвзрывной технологии послынного фрезерования для обеспечения минимизации потерь и разубоживания в условиях нечётких контактов руды и вмещающих пород невозможно без перманентно проводимой эксплуатационной разведки, геометрия сети которой сопоставима с технологическими параметрами работы горного комбайна: глубиной и шириной фрезерования [21]. Полученные расчётным путём оптимальные соотношения между потерями и разубоживанием, при горно-геологических условиях отсутствия четких визуальных границ рудных тел, возможны при обеспечении соответствия геометрии разведочных выработок частотной и амплитудной изменчивости отметок кровли и почвы рудных тел.

Частотная изменчивость требует дополнительного изучения по паспортам забоев горных выработок при последующих сопоставлениях материалов геологической разведки и эксплуатации. В противном случае полученные отношения потерь и разубоживания могут варьироваться, так же как и абсолютные значения этих показателей.

Анализ результатов исследований показывает, что полная зачистка запасов в углублениях почвы будет сопровождаться дополнительным разубоживанием – расчётная величина разубоживания повысится до 30 %.

При горно-геологических условиях отсутствия чётких разделительных границ между кондиционными рудами и вмещающими породами практически невозможно обеспечить точную зачистку пласта руды при работе карьерного комбайна Surface Miner.

На рис. 1 представлены технологические схемы образования потерь и разубоживания руды при отработке слабонаклонных залежей цементного сырья карьерным комбайном Surface Miner.

Потери полезного ископаемого  $\Delta P$  и засорение  $\Delta V$  происходят в основном при отработке зон контакта руда–порода.

Величина потерь и разубоживания руды может быть значительно уменьшена при отработке залежей цементного сырья карьерным комбайном Surface Miner [22–24].

Объемы потерь и засорения руды, м<sup>3</sup>/м [25, 26]

$$\Delta P = \frac{(h - 2)^2}{2} (\cot \beta - \cot \alpha),$$

$$\Delta V = \frac{a^2}{2} (\cot \beta - \cot \alpha),$$

где  $h$  – высота добычного уступа, м;  $a$  – высота треугольника пород, примешиваемых к руде ( $a=h/2$ ), м;  $\alpha$  – угол откоса уступа, град.;  $\beta$  – угол падения пласта руды (рудного тела), град.

Исходные данные геологической разведки носят стохастический характер, и в случае неподтверждения данных разведочного бурения при вскрытии эксплуатационным забоем рудного пласта происходит снижение производительности горного комбайна, повышение расхода твёрдосплавных зубьев, снижение наработки на отказ и коэффициента технической готовности.

Потери и разубоживание на рудо-породных контактах представляют собой треугольники теряемой руды и примешиваемых вскрышных пород, образующиеся из-за несовпадения углов откосов уступов с углами падения залежи.

При работе карьерного комбайна Surface Miner, когда максимальная мощность обрабатываемого слоя составляет 0,6 м, величина потерь и разубоживания стремится к минимуму. Обрабатываемый контур близок по форме к гипсографии рельефа кровли и почвы рудных тел. Точность зачистки кровли пласта определяется объёмами и оперативностью данных, полученных при проведении эксплуатационной разведки.

От положения рабочего органа фрезерного комбайна относительно рудо-породного контакта (рис. 1), при несовпадении угла откоса уступа с углом падения контакта залежи, зависят объёмы потерь и разубоживания руды.

На рис. 1 представлены технологические схемы образования потерь и засорения полезного ископаемого при отработке наклонных залежей фрезерным комбайном для трех вариантов положения ра-

бочего органа фрезерного комбайна относительно рудо-породного контакта.

При определении объёмов потерь полезного ископаемого на контакте руда–порода высота уступа для экскаватора принята 12 м, а для карьерного комбайна Surface Miner – 0,4 м.

Для сравнительного анализа результатов применения при разработке месторождения экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner принимается  $\alpha=70^\circ$  и  $\alpha=90^\circ$ , соответственно.

График зависимости потерь руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и фрезерного комбайна представлен на рис. 2.

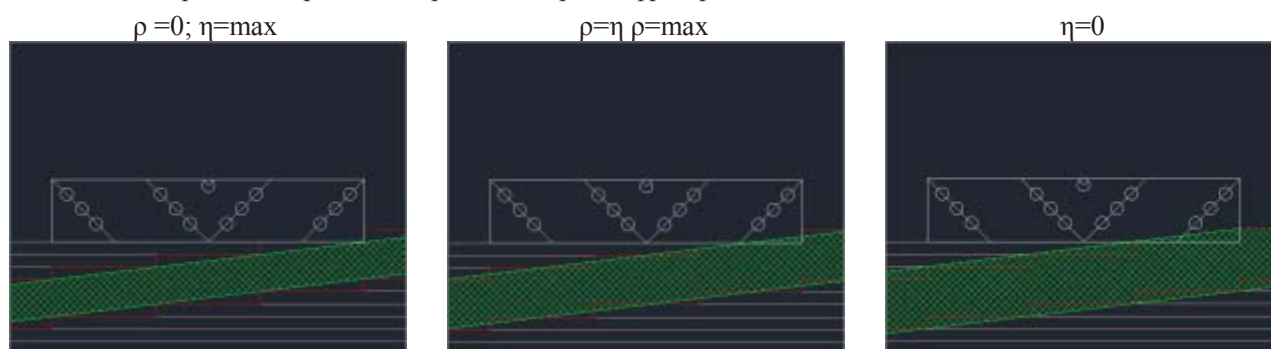
Данные, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод, что потери руды при отработке месторождения с применением карьерного комбайна Surface Miner сокращаются на 10–15 % по сравнению потерями при использовании экскаватора.

График зависимости объёмов разубоживания руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner представлен на рис. 3.

Высота треугольника вскрышных пород, включаемых в добываемое полезное ископаемое ( $a=h/2$ ) принимается 6 м, а для карьерного комбайна Surface Miner – 0,2 м.

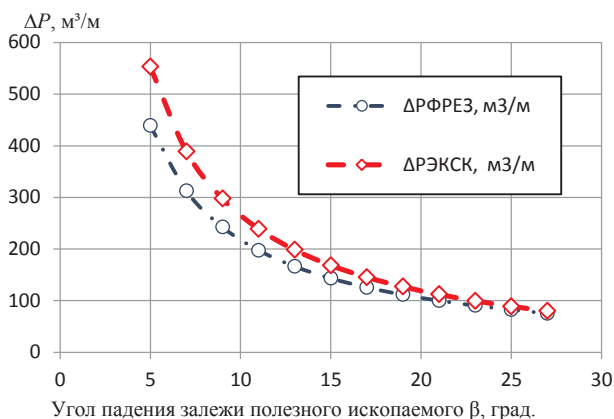
Данные, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что разубоживание руды при отработке месторождения с применением карьерного комбайна Surface Miner сокращается на 70–80 % по сравнению с разубоживанием с использованием на добыче экскаватора.

Варианты пересечения рабочего органа фрезерного комбайна с контактной зоной:



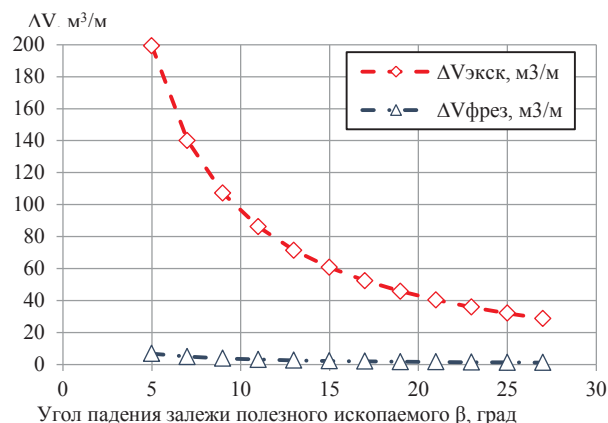
**Рис. 1.** Технологические схемы образования потерь и засорения полезного ископаемого при отработке слабонаклонных залежей фрезерным комбайном [27]

**Fig. 1.** Technological schemes of formation of losses and clogging of minerals during mining of slightly inclined deposits by surface miner combine [27]



**Рис. 2.** График зависимости потерь руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner [составлено авторами]

**Fig. 2.** Ore losses at the ore–rock contact as a function of the dip angle of the ore layer (ore body) for mining conditions of the deposit using excavator and surface miner combine [compiled by the authors]



**Рис. 3.** График зависимости объемов разубоживания руды на контакте руда–порода от угла падения пласта руды (рудного тела) для горнотехнических условий отработки месторождения с использованием экскаватора и карьерного комбайна Surface Miner [составлено авторами]

**Fig. 3.** Ore dilution at the ore–rock contact as a function of the dip angle of the ore layer (ore body) for mining conditions of the deposit using excavator and surface miner combine [compiled by the authors]

## Заключение

Невозможность обеспечить при буровзрывной подготовке горных пород к выемке тонкослоевую отработку приводит к тому, что значительные по мощности пропластки с низким содержанием полезных компонентов или вмещающие вскрышные породы включаются в рудную толщу. Одновременно при добыче руды выемка без потерь качества невозможна, в результате извлекаемые пласты горной массы относятся к некондиционным. Решение этой проблемы в значительной степени может обеспечить безвзрывная технология послойного фрезерования горных пород с использованием различных видов карьерного транспорта и селективной отработки руды.

Уровень потерь и разубоживания зависит от соответствия выбранных систем разработки особенностям геологического строения рудных тел.

Повышение экономической эффективности от применения рациональной технологии отработки месторождения достигается при применении карьерного комбайна Surface Miner за счёт уменьшения потерь руды, себестоимости добычи и удельных

эксплуатационных затрат на транспортирование горных пород, по сравнению с традиционной технологией горных работ, на 50–60 %.

Возможность получения оперативной геологической информации при отработке месторождения наряду с проектируемым изменением направления фронта горных работ карьерного комбайна Surface Miner по пласту руды, регулировка глубины заглабления барабана фрезерного комбайна обеспечивают снижение потерь и разубоживания руды, оптимальные условия для проведения селективной выемки и первичного усреднения руды.

Определение оптимальных потерь полезных ископаемых следует проводить с учётом горно-геологических и горнотехнических условий сложноструктурных месторождений, разработанных технологических схем отработки рудно-породных контактов, показателей извлечения полезных ископаемых из недр, обеспечивающих повышение экономической эффективности и достоверности проектных решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jovanović B. Technical project for limestone and overburden exploitation at the open pit Mutalj – I Stage // Mining Institute I.I.c. Belgrade. – 2014. – Vol. 1. – P. 112–119. (In Serbian).
- Aničić S., Medak N. Study on lime stone reserves as cement ore in the Mutalj Basin near Bešenovo // Geostim I.I.c. Belgrade. – 2011. – Vol. 3. – P. 30–38. (In Serbian).
- Management of the limestone mining and deposition process at the open pit Mutalj for the purpose of achieving the necessary quality / V. Jovanović, D. Milosevic, V. Čanović, K. Konc-Janković // Mining and Metallurgy Engineering Bor. – 2016. – № 1. – P. 51–54.
- Чебан А.Ю. Совершенствование технологий открытой разработки месторождений с использованием карьерных комбайнов и отвалообразователей // Записки Горного института. – 2015. – Т. 214. – С. 23–29.
- Чебан А.Ю. Применение фрезерных комбайнов в строительстве и на добыче строительных материалов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2012. – Т. 26. – № 3. – С. 105–108.

6. Зайцев Г.Д., Ческидов В.И. Оценка технологических и технических возможностей оборудования для безвзрывной добычи полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 2. – С. 222–227.
7. Решетняк С.П., Мелихов М.В. Обоснование проектирования участков карьерных бортов без предохранительных берм // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование. – 2015. – Отдельный выпуск № 60-1. – С. 439–448.
8. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и др. Открытые горные работы – XXI век. Справочник / под ред. К.Ю. Анистратова. – М.: ООО «Система максимум», 2019. – Т. 1. – 640 с.
9. Анистратов К.Ю., Анистратов Ю.И., Щадов М.И. Справочник по открытым горным работам. – М.: Горное дело, 2010. – 700 с.
10. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – Т. I. – 519 с.
11. Арсентьев А.И. Производительность карьеров. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В. Плеханова (техн. ун-т), 2002. – 85 с.
12. Characterization and quality evaluation of cement raw materials and their possible substitutes in Yemen / A.M. Al-Anweh, M.M. Abu-Zeid, M.I. El-Anbaawy, I.A. Al-Akhaly // Arabian Journal of Geosciences. – 2022. – Vol. 15. – № 14. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10527-2> (дата обращения: 15.04.2023).
13. Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit // Geoscience Frontiers. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 243–253.
14. Bralić N., Malvić T. Cement raw material reserve calculation – geological sections vs. structural maps approaches, case study from Southern Croatia // Minerals. – 2022. – Vol. 12. – № 8. – 1056.
15. Фомин С.И., Кава П.Б. Нормирование и планирование полноты и качества добычи руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2011. – № 4 – С. 371–373.
16. Зубов В.П., Анисимов К.А. Ресурсосберегающая технология подземной отработки запасов алмазосодержащих кимберлитовых рудных тел ниже дна карьера под защитной подушкой // Горный журнал. – 2023. – № 4. – С. 23–38. DOI: 10.17580/gzh.2023.04.05.
17. Фомин С.И., Чан Динь Бао Оптимизация потерь и разубоживания руды при открытой разработке сложноструктурных карбонатных месторождений // Маркшейдерия и Недропользование. – 2016. – Т. 82. – № 2. – С. 58–60.
18. Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Технология и схемы ведения горных работ при использовании комбайнов 2100 и 2200 SM фирмы Wirtgen gmbh // Горная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 51–53.
19. Zajączkowski M. Technological and economic analysis of the application of surface miner on the example of a limestone deposit in Poland // Inżynieria Mineralna. – 2021. – Vol. 48. – № 2. URL: <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-21> (дата обращения: 15.04.2023).
20. Авраамова Н.С. Технологические схемы разработки наклонных залежей с использованием фрезерного комбайна // Проблемы машиноведения и машиностроения. – СПб: Северо-Западный открытый технический университет, 2006. – № 35. – С. 149–152.
21. Виноградов И.П., Смелянский И.В. Определение потерь руды при проектировании технологии послыйного фрезерования наклонных залежей сложного строения // Новая наука: проблемы и перспективы. – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. – С. 184–188.
22. Фомин С.И., Виноградов И.П. Анализ безвзрывной технологии тонкослойной выемки с применением фрезерных комбайнов при открытой разработке месторождений цементного сырья // Цемент и его применение. – 2017. – № 4. – С. 42–44.
23. Volk H-J. Wirtgen drivers the development of surface mining // Procedia Engineering. – 2016. – № 138. – P. 30–39.
24. Dey K., Ghose A.K. Predicting “cuttability” with surface miners – a rockmass classification approach // Journal of Mines, Metals and Fuels. – 2008. – Vol. 56. – № 5–6. – P. 85–91.
25. Dagdelen K., Asad M.W.A. Optimum cement quarry scheduling algorithm // Proceedings of the 30th symposium on application of computers and operations research in the mineral industry. – Phoenix, USA: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002. – P. 697–709.
26. Optimisation of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant / T. Vu, T. Bao, C. Drebenstedt, H. Pham, H. Nguyen, D. Nguyen // Mining Technology. – 2021. – Vol. 130. – № 3. – P. 146–158.
27. Шевченко А.Г., Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Безвзрывная разработка бокситовых руд комбайнами Wirtgen Surface Miner расширяет сырьевую базу рудника Дебеле (Гвинея) // Горная промышленность. – 2003. – № 2. – С. 44–45.

### Информация об авторах

**Сергей Игоревич Фомин**, доктор технических наук, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. [fominsi@mail.ru](mailto:fominsi@mail.ru); <http://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

**Алекса Лелен**, аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. [s215134@stud.spmi.ru](mailto:s215134@stud.spmi.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>

Поступила в редакцию: 22.04.2023

Поступила после рецензирования: 19.06.2023

Принята к публикации: 25.01.2024



## REFERENCES

1. Jovanović B. Technical project for limestone and overburden exploitation at the open pit Mutalj – I Stage. *Mining Institute l.l.c. Belgrade*, 2014, vol. 1, pp. 112–119. (In Serbian).
2. Aničić S., Medak N. Study on lime stone reserves as cement ore in the Mutalj Basin near Bešenovo. *Geostim l.l.c. Belgrade*, 2011, vol. 3, pp. 30–38. (In Serbian).
3. Jovanović B., Milosevic D., Čanović V., Konc-Janković K. Management of the limestone mining and deposition process at the open pit Mutalj for the purpose of achieving the necessary quality. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 2016, no. 1, pp. 51–54.
4. Cheban A.Y. Improving the technology of open-cast mining using surface miners and spreaders. *Journal of Mining Institute*, 2015, vol. 214, pp. 23–29. (In Russ.)
5. Cheban A.Y. Application of milling combines in construction and mining of construction materials. *Bulletin of Pacific National University*, 2012, vol. 26, no. 3, pp. 105–108. (In Russ.)
6. Zajcev G.D., Cheskidov V.I. Assessment of technological and technical capabilities of equipment for blast-free mining. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2006, no. 2, pp. 222–227. (In Russ.)
7. Reshetnyak S.P., Melihov M.V. Substantiation of pit walls without safety berms design. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2015, vol. 60-1, pp. 439–448. (In Russ.)
8. Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. *Opencast mining – XXI century*. Handbook. Ed. by K.Y. Anistratov. Moscow, OOO «Sistema maksimum» Publ., 2019. Vol. 1. 640 p. (In Russ.)
9. Anistratov K.Yu., Anistratov Yu.I., Shchadov M.I. *Open-pit mining technology*. Moscow, Gornoe delo Publ., 2010. 700 p. (In Russ.)
10. Trubetskoy K.N., Krasnyanskiy G.L., Khronin V.V. *Quarry design*. Moscow, Mining Academy Publ., 2001. Vol. I, 519 p. (In Russ.)
11. Arsentev A.I. *Quarry productivity*. St Petersburg, G.V. Plekhanov St Petersburg Mining Institute Publ., 2002. 85 p. (In Russ.)
12. Al-Anweh A.M., Abu-Zeid M.M., El-Anbaawy M.I., Al-Akhaly I.A. Characterization and quality evaluation of cement raw materials and their possible substitutes in Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, no. 14, 1291.
13. Afeni T.B., Akeju V.O., Aladejare A.E. A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit. *Geoscience Frontiers*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 243–253.
14. Bralić N., Malvić, T. Cement raw material reserve calculation – geological sections vs. structural maps approaches, case study from Southern Croatia. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 8, 1056.
15. Fomin S.I., Kava P.B. Rationing and planning of completeness and quality of ore mining. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (Nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2011, no. 4, pp. 371–373. (In Russ.)
16. Zubov V.P., Anisimov K.A. Resource-saving underground mining technology for diamond-bearing kimberlite ore under protective cushion below open pit mine bottom. *Gorny Zhurnal*, 2023, no. 4, pp. 23–38. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2023.04.05
17. Fomin S., Chan Din Bao. Ore dilution and loss optimization for open-pit mining of carbonate rock deposits with complex structure. *Marksheyderiya i Nedropolzovanie*, 2016, vol. 82, no. 2, pp. 58–60. (In Russ.)
18. Pihler M., Pankevich Yu.B. Mining technology and schemes for using the 2100 and 2200 SM shearers from Wirtgen gmbh. *Gornaya promyshlennost*, 2001, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.)
19. Zajączkowski M. Technological and economic analysis of the application of surface miner on the example of a limestone deposit in Poland. *Inżynieria Mineralna*, 2021, vol. 48, no. 2, pp. 237–242.
20. Avraamova N.S. Technological schemes for the development of sloping deposits with the use of a Surface miner. *Problems of Mechanical Science and Engineering*. St Petersburg, North-West Open Technical University, 2006, vol. 35, pp. 149–152. (In Russ.)
21. Vinogradov I.P., Smelyanskiy I.V. Determination of ore losses when designing the technology of layer-by-layer milling of inclined deposits of complex structure. *The New Science: Problems and Prospects*. RIC. Sterlicamat, AMI Publ., 2015. pp. 184–188. (In Russ.)
22. Fomin S.I., Vinogradov I.P. Analysis of blast-free high selective mining excavation technology using milling machines in open-cast mining of cement raw material deposits. *Tsement i ego primenenie*, 2017, no. 4, pp. 42–44. (In Russ.)
23. Volk H-J. Wirtgen drivers the development of surface mining. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 138, pp. 30–39.
24. Dey K., Ghose A.K. Predicting “cuttability” with surface miners – a rockmass classification approach. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2008, vol. 56, no. 5–6, pp. 85–91.
25. Dagdelen K., Asad M.W.A. Optimum cement quarry scheduling algorithm. *Proceedings of the 30<sup>th</sup> symposium on application of computers and operations research in the mineral industry*. Phoenix, USA: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002. pp. 697–709.
26. Vu T., Bao T., Drebenstedt C., Pham H., Nguyen H., Nguyen D. Optimisation of long-term quarry production scheduling under geological uncertainty to supply raw materials to a cement plant. *Mining Technology*, 2021, vol. 130, no. 3, pp. 146–158.
27. Shevchenko A.G., Pihler M., Pankevich Yu.B. Blast-free mining of bauxite ores with Wirtgen Surface Miners expands the raw material base of the Debele mine in Guinea. *Gornaya promyshlennost*, 2003, no. 2, pp. 44–45.

## Information about the authors

**Sergey I. Fomin**, Dr. Sc., Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation. fominsi@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0939-1189>

**Aleksa Ljeljen**, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg, 199106, Russian Federation. s215134@stud.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1358-1142>

Received: 22.04.2023

Revised: 19.06.2023

Accepted: 25.01.2024

UDC 628.179.3  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4262

## Characteristics of water supply network zoning

A.A. Sahakyan✉

*National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, Armenia*

✉sahakyan.aram@nuaca.am

**Abstract. Relevance.** The original studies of water supply network and network exploitation data, as well as international experience, applied in similar conditions, and the data of existing literature, data of works on water supply zoning, which were carried out in the networks of various settlements in the Republic of Armenia, have been improved and are now being implemented effectively through the clear procedure developed by us. In our case, zoning is carried out under the conditions of the existing system, therefore the methods developed during design and reconstruction work consider the features of the existing system. **Aim.** To develop a technique to enhance the efficiency of water supply systems by implementing network zoning. It involves transforming the network into hydraulically separated zones isolated from each other. Within each zone, water supply can be regulated based on consumption requirements. **Objects.** The article discusses issues related to design and reconstruction procedures of existing water supply network zones. It defines the priority of zoning implementation for the current stage and proposes a method for assessing the permissible level of losses, taking into account the technical condition of the water supply network. **Methods.** The calculations for this study were performed using well-known hydraulic principles and laws. Experimental studies were conducted directly on the water supply network under production conditions. **Results.** The actual implementation of these measures in various urban locations revealed that reduction in water usage in a service zone was only 8–10%. However, analysis of the functioning of the reconstructed zones led to the conclusion that the already constructed zones now offer suitable conditions for productive work on leak detection and elimination. In the given example, during the operation of the study zone, 4300 m (about 25%) of the existing 17400 m pipelines in the reconstruction zone were decommissioned, along with 13 of 22 pumping stations. Over two years of work, the cost of electricity at the existing yard pumping stations was reduced by more than six times, the total cost of electricity in the zone was reduced by more than twelve times, and the amount of water entering the zone was reduced by 44% as a result of the water supply system reconstruction presented in the example.

**Keywords:** water supply network zoning, leakage, zone hydraulic isolation, reduction of electrical energy consumption

**For citation:** Sahakyan A.A. Characteristics of water supply network zoning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 209–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4262

---

УДК 628.179.3  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4262

## Характеристики зонирования сети водоснабжения

А.А. Саакян✉

*Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Армения, г. Ереван*

✉sahakyan.aram@nuaca.am

**Аннотация. Актуальность.** Результаты оригинальных исследований водопроводной сети и данные эксплуатации сети, а также зарубежный опыт, применяемый в аналогичных условиях, и данные изученной литературы, работ по районированию водопровода, которые проводились в сетях различных населенных пунктов Республики Армения, были усовершенствованы и в настоящее время эффективно реализуются посредством разработанной нами четкой процедуры. Поскольку в нашем случае зонирование осуществляется в условиях действующей системы, методы, разработанные при проведении проектно-реконструкционных работ, учитывают особенности существующей системы. **Цель:** разработка методики повышения эффективности функционирования систем водоснабжения путем зонирования сети, т. е. преобразования сети в гидравлически разделенные зоны, которые изолированы друг от друга, где

подача воды регулируется в зависимости от потребления. **Объекты.** Рассматриваются вопросы, связанные с проектированием и проведением реконструкции существующих зон водопроводных сетей. Определена очередность выполнения работ по зонированию на текущем этапе, и предложен метод оценки допустимого уровня потерь с учетом технического состояния водопроводной сети. **Методы.** Расчеты для данного исследования проводились с использованием известных гидравлических принципов и законов. Экспериментальные исследования проводились непосредственно на сети водоснабжения в производственных условиях. **Результаты.** Фактическая реализация этих мероприятий в различных городских населенных пунктах показала, что сокращение водопотребления в зоне обслуживания составило всего 8–10 %. Однако анализ функционирования реконструированных зон позволил сделать вывод о том, что в уже построенных зонах созданы условия для продуктивной работы по обнаружению и устранению утечек. В приведенном примере за время эксплуатации исследуемой зоны было выведено из эксплуатации 4300 м (около 25 %) из существующих 17400 м трубопроводов в зоне реконструкции, а также 13 из 22 насосных станций. За два года работы в результате реконструкции системы водоснабжения, представленной в примере, стоимость электроэнергии на действующих дворовых насосных станциях снижена более чем в шесть раз, общая стоимость электроэнергии в зоне снижена более чем в двенадцать раз, уменьшено количество воды, поступающей в зону, на 44 %.

**Ключевые слова:** зонирование водопроводных сетей, протечки, зональная гидроизоляция, снижение потребления электрической энергии

**Для цитирования:** Саакян А.А. Характеристики зонирования сети водоснабжения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 209–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4262

## Introduction

To increase the controllability of water supply distribution networks, it is necessary to implement effective zoning of a network, i. e. to transform the network into separate zones that are hydraulically isolated from each other. The isolation must be carried out by installing the existing or new valves, which will be closed during normal operation of the water supply network, but can be opened if necessary.

Our original research showed that by creating zones using the existing developed, constructed, reconstructed and fragmented network, some additional challenges have arisen:

- defects in the design task;
- comprehensive investigation of the network;
- application of incorrect zoning and pressure management principles.

The aim of the study is to increase the efficiency of existing water supply systems, improve zoning methods, and develop clear procedures for the systematic implementation of reconstruction works on the existing systems. Of course, to increase the manageability and reliability of the water supply distribution network, it is necessary to develop appropriate schemes that allow for the efficient use of limited human and financial resources and save time.

To achieve this aim, the following objectives are accomplished:

- to develop a procedure for reconstructing the existing water supply networks;
- to create specifications for determining the priority of system zoning.

The studies carried out for reconstructing the water supply network, including the analysis of available data, original research, foreign experience, and the study of existing literature, have improved the zoning and reconstruction of the water supply network in dif-

ferent settlements of the republic of Armenia (RA) and are currently being applied according to a clearly defined methodology.

Special approaches were raised to overcome these issues. This study presents the results of the approach in Lower Zeytun district in Yerevan.

The requirement for zoning the distribution network arises in mountainous conditions when there is a significant difference in levels within the boundaries of a settlement. Both gravity and pressing systems (reverse zoning) may require zoning. When high-rise multi-residential buildings are constructed in areas where low-rise buildings are already present or when the high-rise buildings absolute height exceeds that of the low rise buildings within the water supply zone's boundaries, zoning becomes crucial. Therefore, to increase the controllability of the distribution network, it is necessary to implement effective zoning of the network, i. e. to transform the network into hydraulically separated zones that are isolated from one another.

## Literature review and problem statement

In the existing literature, there are various options for water network zoning principles. Recently, with the use of specially developed computer programs, various methods of automatic network zoning have been widely used.

Different models were proposed, based on classic optimization methodologies or on meta-heuristic approaches [1, 2]. Some authors proposed hybrid approaches for the automatic partitioning of a water distribution network, based on both meta-heuristic algorithms and on applications from graph theory [3–5]. The analysis of the functioning of the reconstructed zones, however, led to the conclusion that the already constructed zones now offer suitable conditions for productive work on leak detection and elimination.

Many attempts are made to follow the known methods, but due to many circumstances mentioned in this article, improvements in the water supply network efficiency for reconstruction and zoning of existing systems should be carried out on the basis of experimental data. We find that the use of calculation programs in such works has low accuracy.

The proposed models mainly focus on preservation of hydraulic reliability of the network, while less control is allowed on the costs of the provided solutions [6–8]. Spatial analysis of zoning approach based on the METIS graph partitioning tool was developed in [9]. More recently [10, 11], an approach for automatic creation of district metered areas (DMAs) based on the hierarchical community structure of the water distribution networks (WDN) was introduced.

A comprehensive description of the possible objective functions for the problem can be found in [6]. The two-step approach proposed by the authors consists of a preliminary partitioning of the WDN into suitable DMAs through the application of the design criteria and graph theory concepts. Although there were satisfying results, the global optimality of the solution is not ensured by the Simulated Annealing (SA).

The distribution network should be zoned in complex terrain conditions when there are differences in levels between residence boundaries. In this case, there is excess (unacceptable) pressure in the network before zoning and pressure management. This regulation reduces leaks and improves the conditions under which plumbing equipment and reinforcement operate, reducing water consumption and the amount of electricity consumed in pumping systems.

Since in our case, zoning is carried out under the conditions of the existing system, the methods developed during the design and reconstruction work consider the features of this system: a great difference in the levels, dictating the levels of the daily regulating reservoir, location and volumes, diameters of the existing pipes, the stores of the buildings, population density, etc.

Our original research showed that some additional problems arise when creating zones using existing weathered, prefabricated, reconstructed, or fragmented networks.

### **Materials and methods**

This research presents the studies of the zoning problems of the water supply network, considering various local conditions. It is obvious that the water supply distribution network controllability and efficiency can be achieved through system zoning. However, the known methods cannot be used while reconstructing already operating, technically poor, elementally constructed systems. Based on the above, developing unique techniques for solving problems and overcoming defects is necessary. Many attempts are

made to follow the known methods, but due to the many circumstances mentioned in this article, improvements in the water supply network efficiency for the reconstruction and zoning of existing systems should be carried out on the basis of experimental data. We find that the use of calculation programs in such works has low accuracy.

The calculations related to the studies were performed by the following well-known hydraulic principles and laws. The experimental studies were conducted directly on the water supply network under production conditions. The zoning developed principles can be successfully applied during reconstruction of the water supply networks of other settlements.

### **Aim and objectives of the study**

#### ***Roadmap for reconstructing the existing water supply systems***

To assess the water balance within the boundaries of separate zones, to determine the quantity of unaccounted water, and subsequently determine the nature and location thereof, it is proposed to temporarily turn the cyclic network existing within the zone into a dead-end network using valves. To divide the zone into separate sections, magnetic flow meters and pressure recording sensors should be installed on the supplying pipes. The study aims to estimate the amount of water entering each zone and compare it with the calculated amount of water received by the number of subscribers. By creating water supply sections with a one-way supply and a precise number of subscribers, it is possible to estimate the unaccounted volume of water in a given zone. Before starting the zoning work, it is necessary to examine the issues and operational data, set registration guidelines, form a working group, purchase the required monitoring and measurement equipment, and avoid obvious (visible) leaks.

The following work sequence was developed for zone design and implementation (construction):

- The existing water supply distribution network designed in the plan is divided into separate zones by valves. This separation should consider the possibility of creating optimal pressure regimes in the zones and exclude the dead-end sectors in the pipelines. Designing sectors with a limited number of subscribers is essential to enable the controllability of the pressure zone. According to the results of the studies, it is desirable that the zone include 500–3000 subscribers, depending on the level of leaks, construction features of the district, methods used to control leaks, and hydrological conditions. In densely populated areas, such as in the central parts of settlements, the water zone may include more than 3000 subscribers. In this case, it is difficult to identify small failures and their locations from the data recorded at night, and it takes a long time to find them. However, by temporarily closing the

valves, the water supply areas can be divided into subsectors of two or smaller sizes. In this case, additional valves may need to be installed during the design phase of water supply areas.

- The power source is determined based on the case of providing an uninterrupted water supply to the facility in the most dangerous (critical) conditions in the specified area. In design practice, the following zone-supplying options are possible:
  - 1) the zone may have one or two power sources: an aquifer or a reservoir;
  - 2) zoning can be carried out sequentially: here, the second zone receives water from the first zone in a transit way (Fig. 1).
- It is planned to close off the valves on all boundary feeding lines during the hydraulic isolation of the separated zones, leaving only the planned feeding line. To guarantee total isolation, it is sometimes required to install new valves. Small-scale maps of the distribution water lines, information from the staff about them, and current hydraulic data are all employed at this stage of the contour demarcation of the water supply zone design.
- “Zero tests” are used to ensure that the design is in accordance with the completed reconstruction works. The requirements are as follows:
  - 1) inspecting the installed flow meter for accuracy;
  - 2) checking the functioning (hermetic) of the boundary valves;
  - 3) detecting the hydraulic connections between neighboring zones;
  - 4) evaluating and assessing the changes in the quality of water supplied to customers in the reconstructed zone and neighboring zones;
  - 5) inspecting for excessive pressures:
- decommissioning redundant pipes;
- control of pressure in the isolated zone and regulation of excess pressures;
- detection and elimination of hidden failures and leakages;
- recording the parameters of the reconstructed zone and creating the zone passport.

Because of the formation of sectors within the borders of a separate zone, the existing ring network turns into a dead-end having a one-way supply. Hydraulic calculations are required to verify the transmittivity and pressure losses of the sections to maintain the water supply of the dead-end network. For this purpose, a calculation scheme for the dead-end network was created. It is divided into calculation sections, where the directions of water flow are noted, and the actual outputs in the sections are measured.

In contrast to the well-known method for calculating the dead-end network, during the conducted studies, the outputs obtained through the experimental measurements are taken as the calculation output for each section based on the maximum actual water demand. When choosing the endpoint for the constructing pressure lines based on the measured outputs, not only the distance and relief but also the required pressure at that point, considering the height and location of the buildings, are considered.

The optimal design of water distribution systems is a widely explored research area, which still faces many barriers and practical challenges [12], such as the difficulty of defining the objective functions and constraints, the variability of flow in the network, the design optimization difficulties related to the fact that these systems are not typically constructed at once, and the fact that solutions of optimization problems directed at cost minimization often lead to under-sized networks. Composed of pipes, pumps, valves and other components, the water distribution networks are modeled and simulated based on the laws of mass conservation (the hydraulic balance between the provided and consumed flows) and energy conservation (which relates the hydraulic heads and losses over the network). The flows in these laws are governed by complex, non-linear, non-convex and discontinuous hydraulic equations [13]. The classical and extensively described model of water distribution network design optimization has as an objective function the minimization of network deployment costs, which are used to define the smallest pipe diameters that meet the hydraulic requirements in terms of the pressures and flows [14–17].

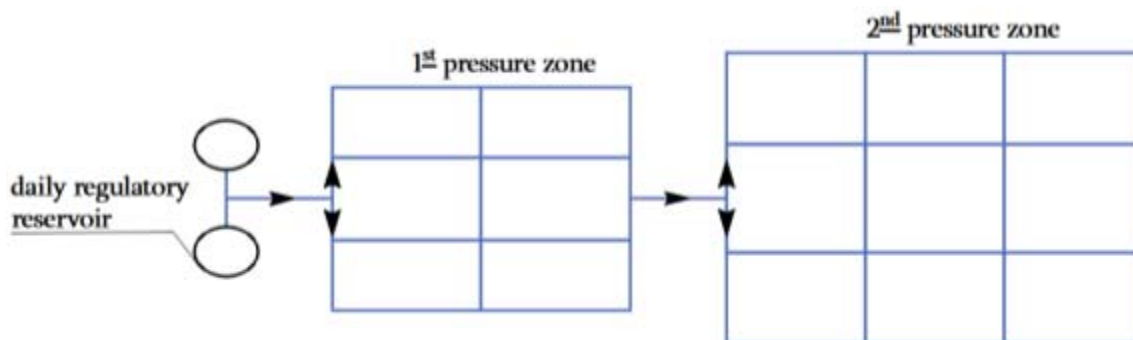


Fig. 1. Sequential zoning scheme

Рис. 1. Схема последовательного зонирования

After measuring the outputs of the designed dead-end network segments, the network transmittivity condition is checked. For this purpose, the pressure losses, occurring in the sections, are determined by the formula  $h_l = SQ^2$ , using Shevelev's Tables. Based on the Tables the free pressure lines of the network are built to have the pressure magnitude at all points of the selected calculation direction. The free pressure lines are installed in every possible direction to assess the pressure at the examined network points. The circular network temporarily turns into a dead-end network until the end of the studies (recording of the defined result). The mentioned operation is carried out using valves installed in the necessary sections of the network, which can remain open after the completion of studies and relevant reconstructions.

Within the established water supply zones, the effective pressure management is crucial to ensure the reliable and sustainable provision of water to consumers. The use of pressure control is a cost-effective measure to reduce leakages in water distribution systems [18]. Leakages are considered to be pressure-driven demands in the hydraulic analysis and modeling of water losses [19–21]. To prevent excessive or insufficient pressures in the network, it is essential to use modern computer programs for hydraulic calculations of the water supply network. The program enables the identification of critical and vulnerable parts of the water supply network, as well as the determination of appropriate diameters for pressure regulators and installation points.

In case of pressure providing problem in the subzone of the designed dead-end network, based on specific conditions, it can be solved by:

- over-correcting the pressure regulators or opening the compressed valves on the supplying water pipe (if available);
- excessing pressure regulation increased the pressure in the initial part of the considered subzone in the neighboring sub-sector;
- changing the power source of the zone that will provide the required pressure or apply another zone scheme;
- pressure losses in the specified sections revealing the significant leaks by finding and fixing leaks in any section(s). Therefore, it may be found that the cause of the pressure loss is a hidden local resistance (unknown compressed valve, presence of a gasket, or blockage);
- increasing the diameter of a specific network section if the pressure line in that section has a steep slope;
- installing local pumps if the pressure is insufficient for a few high-rise buildings.

The last two options are advisable to use in case of economic feasibility. It should be added that when performing zoning, the need to increase the diameter or install a pump arises in rare cases because the diameters of pipelines built in the Soviet era are chosen with a high stockage.

#### **The priority of network zoning distribution**

Because of zoning financial and technical requirements, it is impossible to carry out operations simultaneously in all planned zones. Instead, priority is given to the zones with the highest leakage levels. Based on the technical condition of the Yerevan city distribution network, it is recommended to use the following expression of specific losses of flow:

$$q_{\text{leak}} = (Q_{\text{night}} - Q_{\text{const}}) / L_w \text{ (l/hour m)},$$

where  $q_{\text{leak}}$  is the specific loss of flow, l/s m;  $Q_{\text{night}}$  is the average night flow recorded by the zone flowmeter, l/h;  $Q_{\text{const}}$  is the average consumption of subscribers during the night, l/h;  $L_w$  is the length of pipelines of the zone, m.

In the sector of own residences, the accepted average consumption per subscriber during the night was 1.7 l/h, while in multi-apartment buildings, it was 0.6 l/h. These values were adopted based on the data recorded during the experimental studies performed in various pressure zones.

The nighttime price for many customers is calculated separately based on actual measurements, as it can significantly affect the zone nighttime loss estimate.

Analyzing the results of multi-year studies and considering the current technical situation of the distribution network, it is recommended to continue the accident detection and elimination work for the current phase until the nighttime consumption of the zone is less than a half of the daytime consumption:

$$Q_{\text{night}} \leq Q_{\text{day}} / 2 \text{ (l/s)},$$

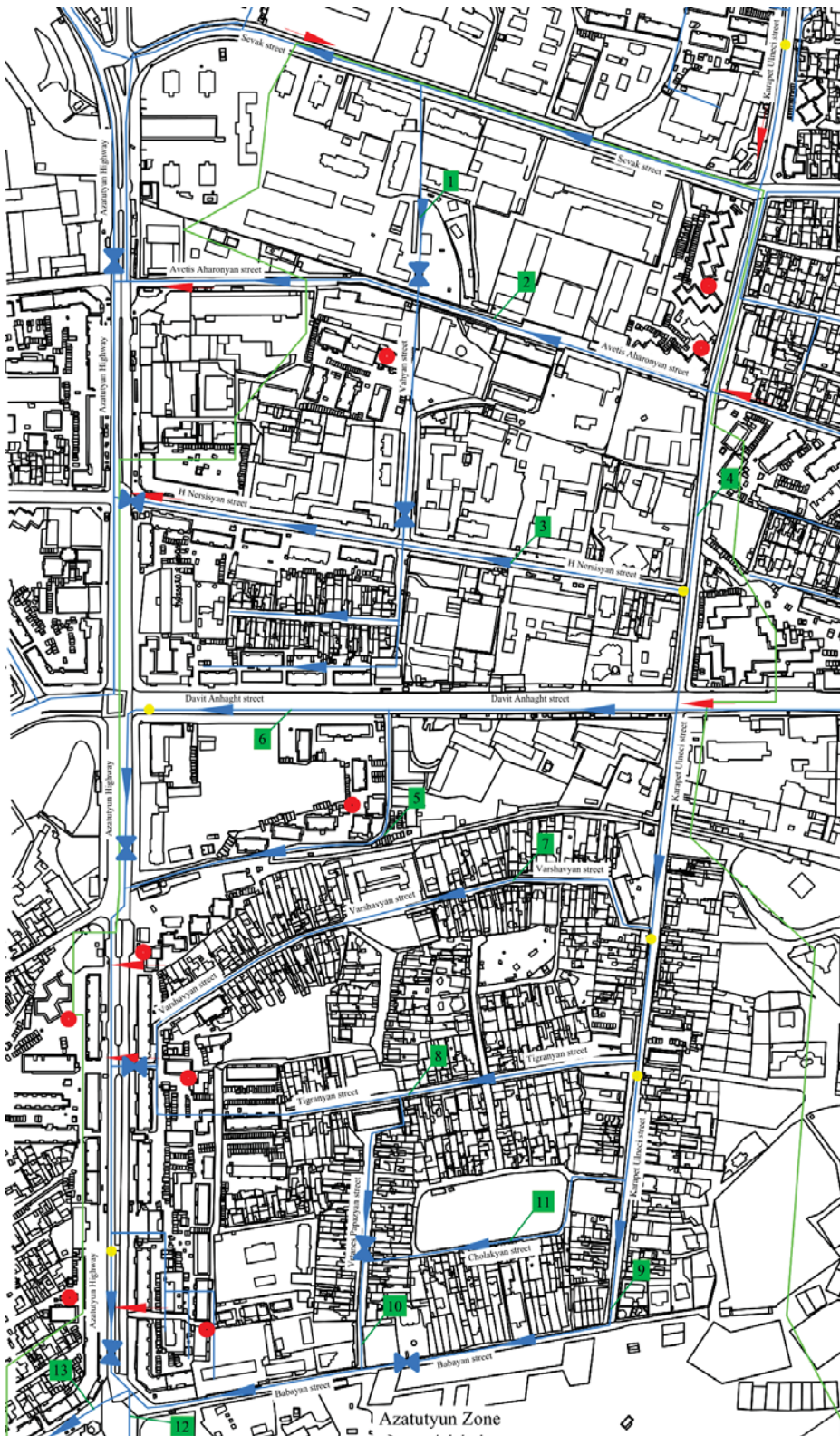
where  $Q_{\text{night}}$  and  $Q_{\text{day}}$  are the average water volumes given to the zone during the night (100–500 period) and daytime.

The mentioned expression was defined after studying the zones with the lowest water losses in Yerevan city (Davtashen, South West, and other districts).

#### **Discussion of the results for water supply network zoning on the example of Yerevan Inner Zeytun district**

The zoning work of the district started back in 2008. The scheme of the separated water supply zone of the district is given in the section of the cadastral map (Fig. 2).

Pressure monitoring and transmission devices were installed at different points within the network to check the hydraulic distribution scheme of the district water supply network.



**Fig. 2.** Scheme of water supply zone in Inner Zeytun district: → - eliminated hydraulic connection; → - water flow direction; ● - pump station; ● - PRV; ↔ - closed valve; — - zone initial boundary; — - pipelines

**Рис. 2.** Схема зоны водоснабжения в районе Внутренний Зейтун: → - устраненное гидравлическое соединение; → - направление потока воды; ● - насосная станция; ● - клапан регулирования давления; ↔ - закрытый клапан; — - начальная граница зоны; — - трубопроводы

The planned zone hydraulic linkages to nearby zones were discovered through interdisciplinary research, and their effects on the zone operation were identified. According to the operation data, the zone was supplied from Zeytun day regulator reservoir (DRR) at the crossroads of P. Sevak-Ulnetsi streets and considered the zone boundaries for P. Sevak, Ulnetsi, Babayan Streets, and Azatutyun Avenue.

The research revealed that the zone is hydraulically connected to all surrounding zones, and four additional points supply the mentioned district, receiving around 90 l/s of water (Table 1). The figures in the Table 1 show that the amount of water entering the zone is 320 l/s, but before the studies, we knew only one power source: an aqueduct with a diameter of 400 mm with a capacity of 230 l/s, powered by Zeytun DRR.

**Table 1.** Characteristics of supply sources in Lower Zeytun district

**Таблица 1.** Характеристика источников водоснабжения района Нижний Зейтун

Zone supplying points Зональные точки водоснабжения	Aqueduct Водовод	Output, l/s Производительность, л/с	Pipe diameter, mm Диаметр трубы, мм	Mark, m Отметка, м
Zeitun DRR ДРР Зейтун	Katnaghbyur 3 Катахбюр 3	230	400	1285
Crossroads of Hasratyan-Avetisyan streets Перекресток улиц Асратян-Аветисян		25	250	1279
Crossroads of Tbilisi highway-Sevak street Перекресток Тбилисского шоссе и улицы Севака	Arzaqan Арзакан	10	400	1281
Crossroads of D. Anhaght-Ulnetsi streets Перекресток улиц Д. Анахт-Улнеци	Katnaghbyur 2 Катахбюр 2	30	200	1211
Crossroads of Ulnetsi-Aharonyan streets Перекресток улиц Улнеци-Агаронян	Katnaghbyur 3 Катахбюр 3	25	200	1236

For proper zoning, it was necessary to disconnect all additional connections found to supply the district, leaving only the main one, and check the possibility of increasing the amount of water provided by it to maintain the water supply level. The presence of hydraulic connections from one area to the other was investigated. Along Azatutyun Avenue, seven connections were found, connecting the zone to the adjacent lower-pressure zones, and a certain amount of water was flowing into these zones (Table 2).

**Table 2.** Estimation of the amount of water directed to other zones

**Таблица 2.** Оценка количества воды, направляемой в другие зоны

Zone leak points Зона точек утечки	Pipe diameter, mm Диаметр трубы, мм	Output, l/s Производительность, л/с	Mark, m Отметка, м
Crossroads of Aharonyan-Azatutyun Streets Перекресток улиц Агаронян-Азатутюн	250	5	1221
Crossroads of Nersisyan-Azatutyun streets Перекресток улиц Нерсисян-Азатутюн	150	10	1208
Crossroads of Zaryan-Azatutyun streets Перекресток улиц Зарьян-Азатутюн	400	15	1186
Near Azatutun 11 building Рядом со зданием Азатутун 11	50	9	1180
Near Azatutun 8 building Рядом со зданием Азатутун 8	125	8	171
Near Azatutun 3 building Рядом со зданием Азатутун 3	80	1.5	1157
Crossroads of Azatutyun-Babayan streets Перекресток улиц Азатутюн-Бабаяна	250	12	1149

It can be seen from the Table 2 that about 60 l/s of water flowed from the designed zone to neighboring zones, so to regulate the pressure in the designed zone, it was necessary to disconnect them or add the service areas of the specified connections to the area of the zone.

The presented study analysis results serve as a basis for drawing up the final design task for changing the network boundaries, and it was decided:

- to disconnect four of the five supply lines and leave the pipe supplied from the Zeytun DRR at the highest level. The selected zone supply scheme follows the zoning principles: the network is supplied by the daily control tank, which provides the required pressure throughout the zone;
- to disconnect four of the seven connections going to other zones (Azatutyun-Aharonyan, Nersisyan, Zaryan crossroads, and near the Azatutyun 8 building) and provides water supply to deprived customers from the other zones. It was considered to include the areas supplied by the remaining three connections within the project zone boundaries (near the buildings of Azatutyun 11 and 3, and the crossroads of Azatutyun-Babayan streets).

During the zone border adjustment studies, it was also discovered that several structures within the specified area (in this example, enterprises such as the Insti-



tute of Biochemistry, Armentel, and Relay Factory) are fed by the adjacent zone. Fig. 2 displays the predicted zone with adjusted borders. Further research to improve zone performance continued within the adjusted area.

The results of the study once again confirm that the water supply network of Yerevan was developed simply without proper justification and zoning. A dead-end network was developed and rebuilt into a cyclic network to supply water to new regions of the city.

After putting into operation the pipelines constructed or reconstructed at different stages, the existing technically worn-out water supply network was not decommissioned. The consequence was a hydraulically interconnected “spider” or “chaotic” system. It is evidenced by the examples of control unit photos in Fig. 3. It was challenging to determine, which pipes were supplying which users. It is obvious that, under such circumstances, network operation is seriously hindered.

The project scheme was being redesigned and changed at the same time. During this time, it was vital to include in the projects the decommissioning of redundant water lines and to connect the inputs of the subscribers fed from these pipes to the protected pipelines, as well as to simplify unnecessarily complicated units. During the operation, 4300 m (about 25%) of the existing 17400 m pipelines in the reconstruction zone were decommissioned, and the control units that were part of them were reconstructed. The performed activities contributed to reducing the probability of water losses and accidents. To measure water volumes and detect hidden accidents and illegal connections, it was necessary to temporarily convert the existing cycle network into a dead-end by installing valves.

In the area under reconstruction, the water supply network was divided into 13 dead-end sections (Fig. 2). During the design phase, portable magnetic

flow meters should be provided at the start points of all dead-end networks. They should be installed in wells, away from the compression valves, on a rectilinear pipe section, the length of which depends on the pipe diameter.

To constantly monitor the quantity of water entering the Lower Zeytun zone, a magnetic flowmeter with a data transmission system is installed at the beginning of the supply pipe in the sanitary zone of the DRR (the quantity of water is monitored every 5 min).

The next step in the district zoning is a zero pressure test. The positive results of the experiment in the Lower Zeytun zone were obtained after about three months.

After waterproofing and delineation of the water area, cost and pressure measurements show that there was a significant change in the parameters compared to the measurements taken at the initial stage.

To regulate the pressure in the isolated zone and avoid excessive pressures, as well as to use position energy efficiently, the next step is to determine the needed pressures in the sectors created in the zone. Based on the regulatory requirements and operational experience, the following values for the required pressure are defined in Yerevan city: up to 20 meters in districts built with 1–2-story private houses; 27–30 meters for 5-story multi-apartment buildings; in higher-rise buildings, it is advisable to supply the required pressure with local pumping stations because with higher pressures, the emergency of the network increases.

A problem of pressure management in the water supply area is the decommissioning of local pumping stations. Because of the construction activities, 13 out of 22 pumping stations in the reconstruction zone were disabled. The remaining pumps were replaced with contemporary, reliable, high-efficiency pumps (Table 3).



**Fig. 3.** Water supply network management units before reconstruction: a) network; b) chamber  
**Рис. 3.** Узел управления сетью водоснабжения до реконструкции: а) сеть; б) камера

**Table 3.** Characteristics of reconstructed pumping stations

**Таблица 3.** Характеристики реконструируемых насосных станций

Pumping station address Адрес насосной станции	Number of served buildings Количество обслуживаемых зданий	Number of subscribers Количество абонентов	Monthly energy consumption, kWh Ежемесячное потребление энергии, кВтч		Saved energy Сэкономленная энергия	
			Before reconstruction До реконструкции	After reconstruction После реконструкции	kWh кВтч	%
Azatutyun, 12/1 Азатутюн, 12/1	4	144	3600	810	2790	77.5
Azatutyun, 6 Азатутюн, 6	1	66	4080	540	3540	86.7
Tigranyan, 4 Тигранян, 4	1	75	3840	594	3246	84.5
Tigranyan, 3 Тигранян, 3	1	75	3480	594	2886	82.9
Zeitun 8, 113 8-я ул. Зейтун, 113	6	288	3648	900	2748	75.3
Aharonyan, 2/1 Агароняна, 2/1	2	96	4440	432	4008	90.2
Ulnetsi, 49 Улнеци, 49	2	121	4200	486	3714	88.4
Aharonyan, 7 Агароняна, 7	2	114	1800	378	1422	79.0
Ulnetsi, 66 Улнеци, 66	3	180	3840	648	3192	83.1
Total/Всего	22	1159	32928	5382	27546	83.6

**Table 4.** Characteristics of pressure regulators in the zone of Inner Zeytun district

**Таблица 4.** Характеристики регуляторов давления в зоне района Внутренний Зейтун

Location of regulators Расположение регуляторов	Installation mark, m Отметка установки, м	Pressure, m Давление, м		Regulator diameter, mm Диаметр регулятора, мм
		Before regulator До регулятора	After regulator После регулятора	
Ulnetsi-Sevak crossroads Перекрёсток Улнеци-Севак	1270	18	6	400
Ulnetsi-Vagharshyan crossroads Перекрёсток Улнеци-Вагаршян	1187	39	12	200
Ulnetsi-Tigranyan crossroads Перекрёсток Улнеци-Тигранян	1170	33	16	100
Near Azatutyun 8 Рядом с Азатутюн 8	1170	50	29	100
Near Lambda Bridge Рядом с мостом Ламбада	1198	40	28	100
Nersisyan-Ulnetsi crossroad Перекрёсток Нерсисян-Улнеци	1223	38	27	150

As a result, 1251 subscribers in 25 buildings received water by gravity, and about 61000 kWh of electricity per month was saved. Another 1159 subscribers in 22 buildings of the reconstructed pumping station service had a round-the-clock water supply instead of 8 hours (pumps operate on a round-the-clock schedule).

We should also add that before the zoning, the pumps worked on an 8-hour schedule, and the Table 3 shows the cost of electricity for 8 hours. After the re-

construction, they work around the clock, and the cost of electricity is also given for 24-hour work. Concurrently, the rebuilding reduced the zone overall electricity usage by more than 12 times and more than six times in the existing pumping stations.

Since the difference between the high (1252) and low (1130) levels of the reconstructed district is almost 120 meters, it was necessary to install six pressure regulators. The characteristics of the installed pressure regulators are shown in Table 4.

The zoning project, being the basis for the construction work, is not final. Numerous modifications and unexpected behavior are both possible. With this in mind, the construction company is often awarded a unit cost contract, which allows the zoning group to operate without restrictions and flexibility.

The actual use of zoning measures in various urban locations revealed that the water usage in the zone of service is reduced by just 8–10%. The analysis of the functioning of the reconstructed zones, however, led to the conclusion that the already constructed zones now offer suitable conditions for productive work on leak detection and elimination.

At our suggestion, in the Zeytun District, the implementation of such work began intensively. The operation lasted almost two years, where 175 hidden accidents with different water releases were detected and eliminated. It resulted in the district output of 268 l/s being reduced by 150 l/s, averaging 116 l/s during the day and 56 l/s at night.

We can say that the fluctuation of water consumption in this zone during the day was brought to the level set for Yerevan:

$$Q_{\text{night}} \leq Q_{\text{day}}/2 \text{ (l/s), } 116/56 \approx 2,$$

where  $Q_{\text{night}}$  and  $Q_{\text{day}}$  are the night (1<sup>00</sup>–5<sup>00</sup> period) and daytime average water volumes given to the zone.

Taking into account the current technical condition of the Yerevan water supply network, at the mentioned stage, it is recommended to confirm that the zone reconstruction works are considered completed. After performing these actions, the basic parameters of the operation received are recorded, which serve as a guide for the continued general operation of the zone. Reconstruction work began in all areas established in the Yerevan water supply network. Some of them were completed, and others are at various stages of implementation.

### Conclusions

1. Zoning should be implemented to ensure the efficient operation of the water supply network. The studies showed that, using the existing distribution

system and considering the position of the reservoirs, the distribution, the relief of the site, and the storeys of the buildings, the water network should be converted into hydraulically isolated zones. The creation of zone design and implementation procedures, which cover system management principles, the formation of sub-zones (dead-end networks), pressure calculation, leak detection, elimination, etc., became crucial. The network reconstruction (zoning) projects help to improve the following indicators: water supply reliability; regulation of environmental and social problems, reducing power costs; quality of supplied water; reduction of technical losses, adjustment and price.

2. It is necessary to define the priority of the distribution network zoning, to detect and eliminate losses at the current stage, considering the technical condition of the system.

### REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Urbinatti A.M., Fontana M.D., Stirling A., Giatti L.L. ‘Opening up’ the governance of water-energy-food nexus: towards a science-policy-society interface based on hybridity and humility. *Science of the Total Environment*, November, 2020, vol. 744, 140945. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140945> (accessed 3 April 2023).
2. Sahakyan A.A., Tsurikova E.G. The technological alternatives for energy and hydraulic improvements. *Journal of Architectural and Engineering Research*, July, 2022, no. 2 pp. 75–82. Available at: <https://jaer.nuaca.am/index.php/jaer/article/view/91> (accessed 3 April 2023).
3. Mehryar M., Hafezalkotob A., Azizi A., Sobhani F.M. Dynamic zoning of the network using cooperative transmission and maintenance planning: a solution for sustainability of water distribution networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, vol. 235, 109260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109260> (accessed 3 April 2023).
4. Di Nardo A., Di Natale M. A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks. *Engineering Optimization*, February, 2011, no. 43, pp. 193–211. Available at: <https://doi.org/10.1080/03052151003789858> (accessed 3 April 2023).
5. Alvisi S., Franchini M. Una procedura per la distrettualizzazione delle reti di distribuzione idriche. *Proceeding XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Brescia, Italy, 10–14 September 2012. Available at: <https://doi.org/10.54338/27382656-2022.2-011> (accessed 3 April 2023).
6. Spedaletti S., Rossi M., Comodi G., Ciocolanti L., Salvi D., Lorenzetti M. Improvement of the energy efficiency in water systems through water losses reduction using the district metered area (DMA) approach. *Sustainable Cities and Society*, February, 2022, vol. 77, 103525. Available at: DOI: 10.1016/j.scs.2021.103525 (accessed 3 April 2023).
7. De Paola F., Fontana N., Galdiero E., Giugni M., Sorgenti degli Uberti G., Vitaletti M. Optimal design of district metered areas in water distribution Networks. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 70, pp. 449–457. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.050> (accessed 3 April 2023).
8. Karypis G., Kumar V. METIS – unstructured graph partitioning and sparse matrix ordering system, Version 2.0. *University of Minnesota, Department of Computer Science*, January, 1995. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/246815679> (accessed 3 April 2023).
9. Herrera M., Izquierdo J., Perez-Garcia R., Montalvo I. Multi-agent adaptive boosting on semi-supervised water supply clusters. *Advances in Engineering Software*, August, 2012, vol. 50 (1), pp. 131–136. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.02.005> (accessed 3 April 2023).
10. Sirsant S., Hamouda M.A., Shaaban M.F., Al Bardan M.S. A chaotic Sobol sequence-based multi-objective evolutionary algorithm for optimal design and expansion of water networks. *Sustainable Cities and Society*, September, 2022, vol. 87 (2). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104215> (accessed 3 April 2023).
11. Diao K., Zhou Y., Rauch W. Automated creation of district metered area boundaries in water distribution systems. *Water Resources Planning and Management*, March, 2013, vol. 139 (2), pp. 184–190. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247) (accessed 3 April 2023).
12. Di Pierro F., Khu S.-Th., Savić D., Berardi L. Efficient multi-objective optimal design of water distribution networks on a budget of simulations using hybrid algorithms. *Environ Modeling and Software*, 2009, vol. 24, Iss. 2, pp. 202–213. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.06.008> (accessed 3 April 2023).
13. Keedwell E., Khu S. A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, June, 2005, vol. 18, Iss. 4, pp. 461–472. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.10.001> (accessed 3 April 2023).
14. Gupta I., Gupta A., Khanna P. Genetic algorithm for optimization of water distribution systems. *Environ Modeling and Software*, March, 1999, vol. 14, Iss. 5, pp. 437–446. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00089-9) (accessed 3 April 2023).

15. Samani H.M.V., Mottaghi A. Optimization of water distribution networks using integer linear programming. *Journal of Hydraulic Engineering*, May, 2006, vol. 132 (5), pp. 501–509. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:5(501).
16. Zecchin A.C., Simpson A.R., Maier H.R., Leonard M., Roberts A.J., Berrisford M.J. Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization. *Mathematical and Computer Modelling*, December, 2006, vol. 44, Iss. 5–6, pp. 451–468. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.01.005> (accessed 3 April 2023).
17. Chu C., Lin M., Liu G., Sung Y. Application of immune algorithms on solving minimum-cost problem of water distribution network. *Mathematical and Computer Modelling*, 2008, vol. 48, Iss. 11–12, pp. 1888–1900. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.02.008> (accessed 3 April 2023).
18. Ulanicki B., Bounds P.L.M., Rance J.P., Reynolds L. Open and closed loop pressure control for leakage reduction. *Urban Water*, June, 2000, vol. 2, Iss. 2, pp. 105–114. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00048-0) (accessed 3 April 2023).
19. Giustolisi O., Savic D., Kapelan Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, May, 2008, vol. 134, Iss. 5, pp. 626–635. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:5\(626\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:5(626)) (accessed 3 April 2023).
20. Cabrera E., Pardo M.A., Cobacho R., Cabrera Jr. E. Energy audit of water networks. *Journal Journal of Water Resources Planning and Management*, November, 2010, vol. 136, Iss. 6, pp. 669–677. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000077) (accessed 3 April 2023).
21. Sahakyan A.A. Hydraulic pressure management of Yerevan city's water supply systems. *Journal of Architectural and Engineering Research*, 2022, no. 3, pp. 78–84. Available at: <https://jaer.nuaca.am/index.php/jaer/article/view/110/47> (accessed 3 April 2023).

### Information about the authors

**Aram A. Sahakyan**, Cand. Sc., Assistant, Dean of Construction Faculty, National University of Architecture and Construction of Armenia, 105, Teryan street, Yerevan, 0009, Armenia. [sahakyan.aram@nuaca.am](mailto:sahakyan.aram@nuaca.am); <https://orcid.org/0000-0002-4163-9949>

Received: 25.05.2023

Revised: 03.07.2023

Accepted: 25.01.2024

### Информация об авторах

**Арам Ашотович Саакян**, кандидат технических наук, ассистент кафедры водных систем, гидротехники и гидроэнергетики Национального университета архитектуры и строительства Армении, Армения, 0009, г. Ереван, ул. В. Теряна, 105. [sahakyan.aram@nuaca.am](mailto:sahakyan.aram@nuaca.am); <https://orcid.org/0000-0002-4163-9949>

Поступила в редакцию: 25.05.2023

Поступила после рецензирования: 03.07.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

УДК 502.175:621.039.7:597.2/.5(285.2)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242  
Шифр специальности ВАК 1.5.15

## Оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей ряда действующих атомных электростанций

В.Г. Городецкий, **А.В. Трапезников**, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин<sup>✉</sup>

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург*

<sup>✉</sup>BFS\_zar@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки радиационных рисков для основных видов рыбы в водоемах, находящихся под постоянным воздействием предприятий атомной энергетики. *Цель:* оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей действующих атомных электростанций, анализ источников и особенностей формирования радиационных рисков на разных этапах их эксплуатации. *Объекты:* мониторинговые исследования радиационных экологических рисков для референтных видов рыб в водоемах-охладителях Ленинградской, Белоярской и Нововоронежской АЭС. *Методы.* Расчет мощности доз облучения и количественная оценка риска облучения техногенными радионуклидами ихтиофауны водоемов-охладителей Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС проводились с использованием международного компьютерного комплекса обновленной версии ERICA Tool 2.0. *Результаты.* Показано, что радиационные экологические риски ихтиофауны в водоемах-охладителях действующих атомных станций обусловлены сочетанным воздействием радионуклидов разного происхождения. Особенности формирования радиационных рисков для каждого водоема специфичны и зависят от сложившейся радиационной ситуации. Для водоема-охладителя Белоярской АЭС характерна четко выраженная зависимость радиационной нагрузки от типов действующих энергоблоков. Наибольшие радиационные риски ихтиофауны испытывала в период работы первых двух энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Вывод из эксплуатации первых энергоблоков и строительство блоков с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) привели к значительному снижению радиационной нагрузки на ихтиофауну водоема-охладителя. В настоящее время радиационные риски обусловлены в основном влиянием  $^{90}\text{Sr}$ , который с Белоярской АЭС в водоем-охладитель почти не сбрасывается, а имеет преимущественно глобальное происхождение, поэтому формирование рисков больше связано с атмосферными выпадениями  $^{90}\text{Sr}$ , а не с работой атомной станции. Радиационные риски у ихтиофауны водоема-охладителя Ленинградской АЭС вызваны сочетанным воздействием  $^{137}\text{Cs}$ , как следствие радиационной аварии на Чернобыльской АЭС, и радионуклидами с наведенной активностью ( $^{14}\text{C}$ ;  $^{60}\text{Co}$ ;  $^3\text{H}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{65}\text{Zn}$ ), происхождение которых может быть связано с работой ядерных реакторов атомной электростанции. Уровень радиационного риска ихтиофауны водоема-охладителя Нововоронежской АЭС за 2009–2019 гг. повысился в 2,2 раза за счет увеличения содержания  $^{60}\text{Co}$  во многих компонентах водоема. В результате радиационные риски у придонных видов рыбы на 81,7 % были сформированы влиянием  $^{60}\text{Co}$ . Нельзя исключить, что увеличение содержания  $^{60}\text{Co}$  в водоеме-охладителе Нововоронежской АЭС является следствием радиоактивного загрязнения подземных вод в результате аварии 1985 г. Экологические риски ихтиофауны во всех водоемах-охладителях на два–три порядка величин ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Таким образом, при работе атомных электростанций в штатном режиме не создается недопустимых радиационных рисков, представляющих реальную экологическую угрозу для ихтиофауны водоемов-охладителей.

**Ключевые слова:** атомные электростанции, техногенные радионуклиды, дозовые нагрузки, радиационные экологические риски, ихтиофауна, водоемы-охладители

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, направление № 122021000077-6.

**Для цитирования:** Оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей ряда действующих атомных электростанций / В.Г. Городецкий, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 220–233. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

UDC 502.175:621.039.7:597.2/.5(285.2)  
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

## Assessment of radiation environmental risks for fish fauna of the cooling pools of a number of operating nuclear power plants

V.G. Gorodetsky, A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova, A.V. Korzhavin✉

*Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russian Federation*

✉BFS\_zar@mail.ru

**Abstract. Relevance.** The need to assess radiation risks for the main types of fish in pools that are under the constant influence of the nuclear power plants. **Aim.** To assess the radiation environmental risks for the ichthyofauna of cooling pools of the operating nuclear power plants, to analyze the sources and features of formation of the radiation risks at different stages of their operation. **Objects.** Monitoring studies of radiation environmental risks for reference fish species in cooling reservoirs of the Leningrad, Beloyarsk and Novovoronezh NPP. **Methods.** Calculation of the exposure dose rate and quantitative assessment of the risk of exposure to technogenic radionuclides of the ichthyofauna of the cooling pools of the Beloyarskaya, Leningradskaya and Novovoronezhskaya NPP were carried out using the international computer complex of the updated version of ERICA Tool 2.0. **Results.** The paper demonstrates that the radiation ecological risks for the ichthyofauna in the cooling pools of the operating nuclear power plants are caused by the combined effect of radioisotopes of the different origin. The features of the formation of the radiation risks for each pool are specific and depend on the current radiation situation. The cooling pool of the Beloyarskaya NPP is characterized by a pronounced dependence of the radiation load on the types of operating power units. The ichthyofauna experienced the greatest radiation risks during the operation of the first two power units with thermal reactors AMB-100 and AMB-200. The decommissioning of the first power units and the construction of the units with the fast neutron reactors (BN-600 and BN-800) led to a significant reduction in the radiation load on the ichthyofauna of the cooling pool. At present, the radiation risks are caused mainly by the influence of  $^{90}\text{Sr}$ , which is almost not discharged from the Beloyarskaya NPP into the cooling pools, but has a predominantly global origin. Therefore, the formation of the risks is more associated with atmospheric fallout of  $^{90}\text{Sr}$ , and not with the operation of the nuclear power plant. The radiation risks for the ichthyofauna of the Leningradskaya NPP cooling pool are caused by the combined effect of  $^{137}\text{Cs}$  as a result of the radiation accident at the Chernobylskaya NPP and radionuclides with induced activity ( $^{14}\text{C}$ ;  $^{60}\text{Co}$ ;  $^3\text{H}$   $^{54}\text{Mn}$  and  $^{65}\text{Zn}$ ), the origin of which may be associated with the operation of the nuclear reactors of the NPP. The level of radiation risk for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool for 2009–2019 increased 2.2 times due to  $^{60}\text{Co}$  content increase in many components of the pool. As a result, 81.7% of the radiation risks in demersal fish species were formed by the affect of  $^{60}\text{Co}$ . It cannot be ruled out that  $^{60}\text{Co}$  content increase in the cooling pool of the Novovoronezhskaya NPP is a consequence of radioactive contamination of the groundwater as a result of the 1985 accident. The ecological risks for the fish fauna in all cooling pools are two to three orders of magnitude lower than the maximum allowable hazard coefficient. Thus, the normal operation of the nuclear power plants does not create unacceptable radiation risks that pose a real environmental threat to the fish fauna of the cooling pools.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, technogenic radionuclides, dose loads, environmental radiation risks, ichthyofauna, cooling pools

**Acknowledgements:** The research was carried out within the State Task of the Institute of Plant and Animal Ecology Ural Branch Russian Academy of Science, direction no. 122021000077-6.

**For citation:** Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Assessment of radiation environmental risks for fish fauna of the cooling pools of a number of operating nuclear power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 220–233 DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

### Введение

Радиационная безопасность водоемов-охладителей атомных электростанций занимает особое место при радиозэкологической оценке территорий, прилегающих к предприятиям атомного профиля [1–3].

Как правило, водоемы-охладители атомных станций находятся под постоянным контролем со стороны природоохранных организаций и служб радиационной безопасности. В результате многолетнего мо-

ниторинга для каждого такого водоема накоплен значительный материал, отражающий во временной динамике изменения состояния водных экосистем. Представленный нами в сравнительном аспекте многолетний материал по водоемам-охладителям Ленинградской, Белоярской и Новovoroneжской АЭС показывает важность изучения особенностей формирования радиационных экологических рисков для основных видов рыб данных водных объектов.

Все три атомные станции находятся в эксплуатации уже достаточно длительное время. Строительство Ленинградской АЭС (ЛАЭС) было начато в июле 1967 г., а 22 декабря 1973 г. состоялся энергетический пуск первого блока РБМК-1000. Всего на ЛАЭС было построено 6 энергоблоков. Блок № 1 находился в эксплуатации в течение 45 лет и был остановлен 21 декабря 2018 г. Энергоблок № 2 (РБМК-1000) также выработал свой ресурс и выведен из эксплуатации 10 ноября 2020 г. В настоящее время функционируют четыре блока: № 3 и 4 (РБМК-1000), № 5 и 6 (ВВЭР-1200). Водоемом-охладителем для ЛАЭС служит естественный морской залив – Копорская губа Финского залива. Копорская губа площадью 255 км<sup>2</sup> по классификации является мелким полужамкнутым водоемом, имеющим протяжённую границу водораздела с основной акваторией. Максимальная глубина залива на границе с основной акваторией достигает 27 м. Дно водоема в большей части песчаное, но местами могут встречаться илы и камни. Сброс нагретых вод с атомной станции осуществляется в восточную часть Копорской губы. Туда же впадают три реки: Систа, Коваши и Воронка, с общим среднесуточным расходом воды около 10 м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> [4, 5].

На Белоярской атомной станции (БАЭС) в разные годы были построены и эксплуатировались энергоблоки с различными типами реакторов. Первые два реактора на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200) были запущены в эксплуатацию в 1964 и 1967 гг. В настоящее время они остановлены и находятся на стадии вывода из эксплуатации. Сейчас функционируют два реактора на быстрых нейтронах: блок № 3 (БН-600), работает с 1980 г., и блок № 4 (БН-800), введен в эксплуатацию в 2016 г. Водоемом-охладителем для БАЭС служит Белоярское водохранилище, созданное путем перекрытия русла реки Пышмы в 75 км от ее истока в период 1959–1963 гг. Площадь зеркала водоема составляет 47 км<sup>2</sup>. Сброс воды в водоем-охладитель после прохождения через системы охлаждения АЭС осуществляется через водосбросный канал в Теплый залив. Кроме водосбросного канала радиоактивные вещества в водоем-охладитель могут поступать с газоаerosольными выбросами и жидкими сбросами через промливневый и обводной каналы [6, 7].

Нововоронежская АЭС (НВАЭС) расположена в 45 км южнее Воронежа на берегу реки Дон. За годы работы на Нововоронежской АЭС было построено и введено в эксплуатацию семь энергоблоков с реакторами типа ВВЭР (водо-водяные энергетические реакторы корпусного типа с обычной водой под давлением). Первый энергоблок был пущен в 1964 г., второй – в 1969 г., третий – в 1971 г., четвертый – в 1972 г., пятый – в 1980 г. Первый и второй энергоблоки были остановлены в 1984 и

1990 гг., соответственно. На третьем и четвертом энергоблоках был выполнен комплекс работ, который позволил продлить срок эксплуатации блоков еще на 15 лет. Последними были введены в промышленную эксплуатацию еще два энергоблока: блок № 6 (ВВЭР-1200) – 27 февраля 2017 г.; блок № 7 (ВВЭР-1200) – 31 октября 2019 г. [8]. Для охлаждения теплообменного оборудования энергоблоков Нововоронежской АЭС используется вода р. Дон, пруда-охладителя блока № 5, прудов рыбо-разводного хозяйства «Нововоронежский» (рыбхоз), подземных артезианских водозаборов. Сброс возвратных сточных вод со станции осуществляется в реку Дон по четырем выпускам: № 1 – концевой водосброс первого и второго энергоблоков, № 2 – продувка циркуляционной системы третьего и четвертого энергоблоков, № 3 – кратковременная продувка пруда-охладителя пятого энергоблока № 4 – сброс продувочной воды с первого и второго энергоблоков [9].

В соответствии с требованиями федерального закона «Об охране окружающей среды» при безопасной работе объектов атомной энергетики должны обеспечиваться условия, достаточные для устойчивого функционирования естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов, а также сохранения биологического разнообразия. Это означает, что не только человек, но и другие организмы должны быть защищены от радиационных рисков, поскольку биологические организмы, такие как растения и животные, могут испытывать более высокие дозовые нагрузки по сравнению с человеком. В соответствии с данной парадигмой важным показателем для определения степени негативного радиационного воздействия на биоту является оценка радиационных рисков [10, 11].

Оценка радиационных рисков биоты предполагает переход от анализа радиационной ситуации по многочисленным показателям к единому интегральному значению безопасности окружающей среды – уровню радиационного экологического риска. Такой подход дает возможность сравнивать по единому универсальному показателю различные объекты, находящиеся под воздействием предприятий атомной энергетики, оценивать уровни загрязнения территорий и водных экосистем, унифицировать оценку радиационной опасности для биоты. Показателем оценки радиационного экологического риска для биоты в этом случае является безразмерный коэффициент опасности, определяемый как отношение мощности дозы облучения организмов к экологически безопасному уровню облучения [12, 13].

В качестве представительных организмов для водоемов-охладителей выбрана рыба, как вид, свя-

занный с пищевыми цепочками человека. В работе представлена сравнительная оценка радиационных рисков от хронического облучения для референтных видов рыб водоемов-охладителей Ленинградской, Нововоронежской и Белоярской атомных электростанций, выполненная по результатам собственных многолетних исследований на Белоярском водохранилище, а также по информации из литературных источников.

Цель работы – оценка уровней экологических рисков для биоты водоемов-охладителей действующих АЭС на разных этапах их эксплуатации, а также анализ критериев и особенностей формирования радиационных рисков у ихтиофауны водоемов в зависимости от меняющейся радиационной нагрузки и соотношения радиоизотопов в компонентах водных экосистем.

### Материалы и методика исследования

Сравнительная оценка экологических рисков для ихтиофауны водоемов-охладителей действующих АЭС на разных этапах их работы представлена на примере водоемов Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС.

В качестве наиболее распространенных видов рыбы Белоярского водохранилища (водоема-охладителя БАЭС) выбраны: лещ, окунь, плотва, щука. Оценка мощности доз облучения и риска для данных видов рыб проводилась на основании содержания техногенных радионуклидов в компонентах Теплого залива, в который поступает вода сбросного канала 1, 2, 3 блоков (табл. 1). Все данные получены в результате многолетнего мониторинга водоема-охладителя сотрудниками Биофизической станции – филиала Института экологии растений и животных УрО РАН. При расчете мощности дозовых нагрузок учитывался вклад  $^{60}\text{Co}$ , а также  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и их дочерних продуктов  $^{90}\text{Y}$  и  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , соответственно, в предположении векового равновесия в цепочке распадов.

**Таблица 1.** Содержание радионуклидов в компонентах Теплого залива Белоярского водохранилища

**Table 1.** Content of radionuclides in the components of the Teply Bay of the Belayarskoe Pond

Место отбора проб Sampling location	Период/Period							
	1977–1989			2011–2014		2016–2019		
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	
Вода, Бк/л Water, Bq/l	0,31	0,061	0,25	0,012	0,0165	0,0091	0,0158	
Донные отложения, Бк/кг Bottom sediments, Bq/kg	1490	22,4	10	126,75	36,07	29,93	21,33	
Рыба, Бк/кг/Fish, Bq/kg								
Плотва/Roach	155,4	4,5	7	2,95	3,4	1,73	7,45	
Лещ/Bream	50	3,7	14	2,55	3	1,48	8,95	
Окунь/Perch	92	11	9	4,05	2,55	2,4	3,1	
Щука/Pike	133	2,1	8	4,7	25	0,8	25,1	

Для оценки дозовых нагрузок в динамике были выделены следующие временные периоды в работе Белоярской АЭС:

- 1976–1989 гг. – соответствует работе первых двух энергоблоков (АМБ-100, АМБ-200) и вводу в эксплуатацию третьего энергоблока БН-600;
- 2011–2014 г. работа только одного БН-600;
- 2016–2019 г. – показывает изменение радиоэкологического состояния водоема-охладителя после ввода в эксплуатацию четвертого энергоблока БН-800.

Для водоема охладителя Ленинградской АЭС (Капорская губа Финского залива) в качестве представителей ихтиофауны выбраны: окунь, плотва, салака. Оценка мощности доз облучения и риска для рыб проводилась на основании содержания техногенных радионуклидов в компонентах Копорской губы в 1–3 км от ЛАЭС (табл. 2). Учитывался вклад радионуклидов:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ , в различных сочетаниях в зависимости от временного периода, в соответствии с данными, приведенными в работе [4]. Также учитывались дочерние продукты  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ :  $^{90}\text{Y}$  и  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , соответственно. Для расчета мощности дозовых нагрузок на виды рыб в период 2000–2019, где отсутствовали данные по содержанию радионуклидов в их тканях, были использованы коэффициенты накопления.

Периоды рассмотрения радиоэкологической ситуации в Капорской губе соответствуют периодам работы АЭС: до Чернобыльской аварии (1973–1985 гг.), во время аварии и сразу после нее (1986–1990 гг.), период (2000–2019 гг.) [4].

Для оценки рисков ихтиофауны пруда-охладителя Нововоронежской АЭС использовались данные по дозовым нагрузкам для придонной рыбы за периоды 2000–2010 и 2011–2019 гг., приведенные в работе [8]. Исследования на Нововоронежской АЭС направлены на оценку радиоэкологических последствий нештатной ситуации, связанной с утечкой  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  из хранилища жидких отходов в 1972 и 1985 гг. [14].

Расчет мощности доз облучения и количественная оценка риска облучения техногенными радионуклидами ихтиофауны водоемов-охладителей Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС проводились с использованием международного компьютерного комплекса обновленной версии ERICA Tool 2.0 [15–18].

Программа позволяет при расчетах учитывать вес организма и моделировать эллипсоидом его размеры, долю времени пребывания в среде обитания (для рыб вблизи дна или в толще воды). Также имеется возможность рассчитать риск облучения как от каждого учитываемого радионуклида, так и суммарный.



**Таблица 2.** Содержание радионуклидов в компонентах Копорской губы: рыбе (Бк/кг), донных отложениях (Бк/кг), воде (мБк/л) [4]

**Table 2.** Content of radionuclides in the components of Kопorskaya Bay: fish (Bq/kg), bottom sediments (Bq/kg), water (mBq/l)

Место отбора Sampling location	1973–1985					1986–1990	2000–2019					
	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>65</sup> Zn	<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>14</sup> C	<sup>3</sup> H
Вода, мБк/л/Water, Bq/l	27	18	30	31	0	365,6	12	20	26	0	–	21000
Донные отложения, Бк/кг Bottom sediments, Bq/kg	2	2,1	10	14	11	19,2	0,7	19	1,5	0,9	–	–
Рыба/Fish												
Окунь/Perch	1,5	2,7	10	6,3	14	100	0,3	6,2	–	0	63	38
Плотва/Roach	1,8	1,5	10	1,5	60	–	0,2	1,2	–	0	150	56
Салака/Herring	1,3	2	5,4	0,3	12	24,2	–	–	–	–	–	–

Радиационный риск для биоты определяется как отношение мощности дозы облучения организма к нормированному уровню [19]. В данной работе риск определялся как отношение рассчитанной мощности поглощенной дозы для выбранного организма к скрининговому уровню, обеспечивающему сохранение живучести популяции, в проекте ERICA (Экологический риск от ионизирующих загрязнителей: оценка и управление) для рыб – 10 мкГр/час [20].

С целью сравнения общей радиозэкологической ситуации в водоемах-охладителях БАЭС, ЛАЭС и НВАЭС на разных этапах их эксплуатации выполнены оценки ожидаемых рисков ихтиофауны от облучения.

Оценивались риски облучения отдельно от каждого радионуклида, находящегося в организме рыб и в окружающей среде.

Оценка риска проводилась для следующих видов рыб:

- лещ *Abramis brama* (L., 1758), возраст 3–5 лет, обитает вблизи дна, питается зообентосом. Рыба с высоким телом, сжатая с боков;
- окунь речной *Perca fluviatilis* (L., 1758), возраст 2–3 года, питается преимущественно рыбой и беспозвоночными. Тело сжато с боков;
- плотва *Rutilus rutilus* (L., 1758), возраст 3–5 лет. Объекты питания: зоопланктон, зообентос, водоросли и гидрофиты. Тело несколько сжато с боков;
- салака, или балтийская сельдь *Clupea harengus tembras* (L., 1758), возраст 3–5 лет. Питается нектобентосом, планктоном, бентосом и личинками рыб. Тело имеет вытянутую форму, немного сжатую с боков.

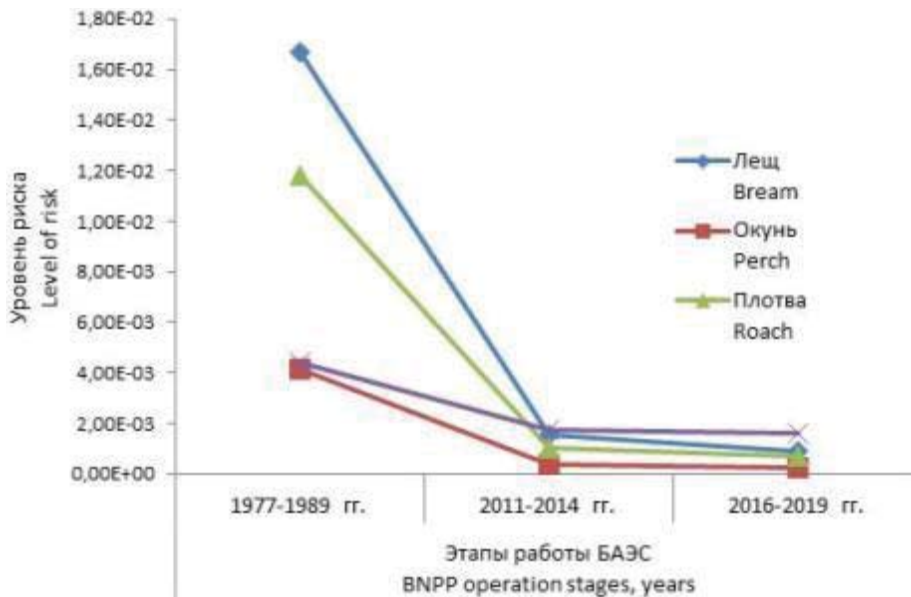
Учитывался вес каждого исследуемого вида рыб. Форма организма рыбы моделировалась эллипсоидом. Соотношение между размерами осей эллипсоида, аппроксимирующего форму рыбы, подбирали с учетом основных размерно-массовых характеристик тела, преобладающих в исследуемых видах (масса, длина, высота, ширина), таким образом, чтобы объем эллипсоида был равен объе-

му рыбы при условии, что ее плотность равна плотности воды.

### Результаты исследования и обсуждение

На рис. 1 представлены радиационные риски для ихтиофауны в водоеме-охладителе Белоярской АЭС на разных этапах работы атомной станции.

Показано, что более высокие радиационные риски ихтиофауна водоема-охладителя испытывала в начальный период деятельности Белоярской АЭС при работе энергоблоков АМБ-100 и АМБ-200. Наиболее высокий уровень радиационного риска отмечен у леща, но при этом полученное значение было все же в 60 раз ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Также и у других видов рыб уровень радиационного риска был ниже максимального коэффициента опасности: у плотвы в 85 раз, у щуки в 230 раз, у окуня в 240 раз. В период работы только одного третьего энергоблока БН-600 с 2011 по 2014 гг. у всех видов рыб водоема-охладителя наблюдается существенное снижение уровней радиационной нагрузки, связанное с общим улучшением радиационной обстановки в водоеме. Отмеченная тенденция прослеживается и в последующие годы. Так, уровень радиационного риска у леща за весь период наблюдения (1977–2019 гг.) уменьшился в 18,5 раз, у окуня – в 15,3 раз, у плотвы – в 17,6 раз, у щуки – 2,75 раза. Для правильной оценки причин произошедших изменений, а также для установления основных факторов, влияющих на формирование уровней радиационных рисков у ихтиофауны, была рассчитана степень участия отдельных радионуклидов в формировании радиационных рисков (рис. 2). В период 1977–1989 гг. основным источником радиационного риска для ихтиофауны водоема-охладителя являлся <sup>137</sup>Cs. Кроме радиоцезия на ихтиофауну водоема-охладителя оказывали влияние <sup>60</sup>Co и <sup>90</sup>Sr, но их участие в формировании рисков было незначительным по сравнению с <sup>137</sup>Cs. Так, у леща доля радиоцезия в формировании радиационного риска составила 94 %, у окуня – 78 %, у плотвы – 94 % и у щуки – 91 %.



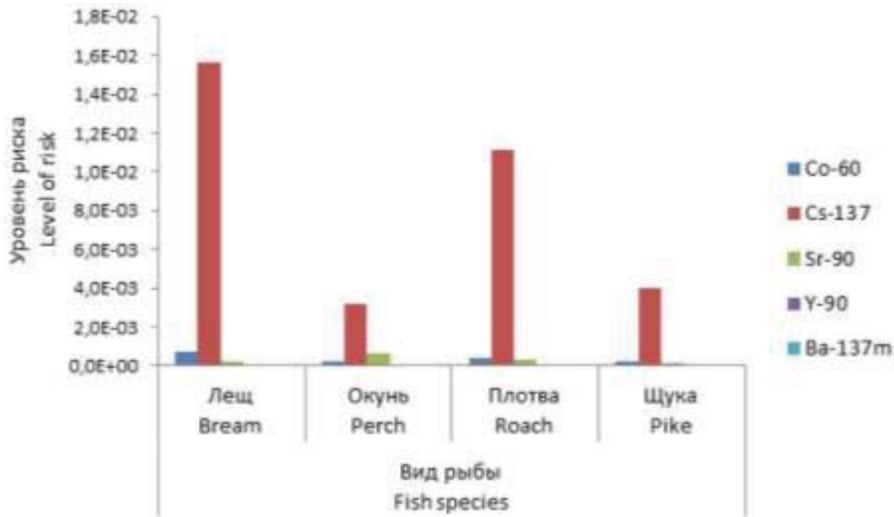
**Рис. 1.** Радиационные риски для ихтиофауны водоема-охладителя Белоярской АЭС  
**Fig. 1.** Radiation risks for the fish fauna of the Beloyarskaya NPP cooling pool

На заключительном этапе исследований, 2016–2019 гг., ситуация кардинально изменилась. В формировании рисков ихтиофауны водоема-охладителя участвовали  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  при существенном преобладании последнего. Доля  $^{90}\text{Sr}$  при формировании радиационного риска у леща составила 64 %, у окуня – 71 %, у плотвы – 69 % и у щуки – 97 %. Присутствие  $^{60}\text{Co}$  в компонентах водоема-охладителя в настоящее время настолько мало, что его участие в формировании радиационных рисков у ихтиофауны ничтожно.

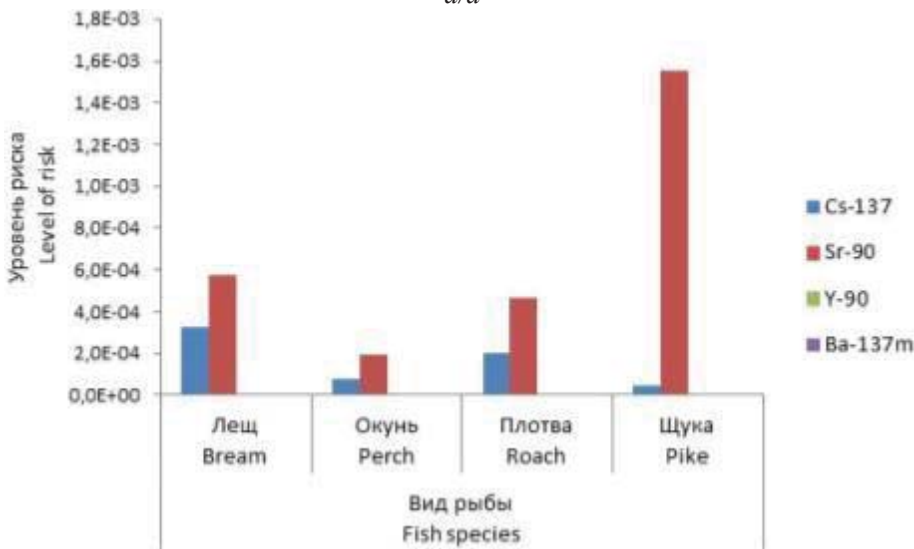
Анализируя полученные данные, можно заключить, что после вывода из эксплуатации двух первых энергоблоков с реакторами на тепловых нейтронах АМБ-100 и АМБ-200 радиоэкологическое состояние водоема-охладителя стабилизировалось, а радиационные риски для ихтиофауны стали в меньшей степени зависеть от работы атомной станции. На начальных этапах эксплуатации АЭС основным источником радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя был  $^{137}\text{Cs}$ , который поступал с атомной станции через технические каналы в составе дебалансных вод и промливневых стоков с территории промплощадки БАЭС. В последние годы определяющим радионуклидом стал  $^{90}\text{Sr}$ , который с атомной станции практически не сбрасывается, а в основном имеет глобальное происхождение. Таким образом, на уровни рисков ихтиофауны водоема-охладителя Белоярской АЭС в период работы энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах большое влияние оказывают внешние факторы, связанные с поступлением  $^{90}\text{Sr}$  в составе атмосферных выпадений, а не деятельность атомной станции.

Основные радиационные риски для ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС были связаны с радионуклидами коррозионного происхождения (рис. 3). Для окуня и плотвы радиационные риски в значительной степени были обусловлены присутствием  $^{60}\text{Co}$ , у плотвы кроме  $^{60}\text{Co}$  существенную роль играли  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{65}\text{Zn}$ . На долю радионуклидов с наведенной активностью у окуня в сумме приходилось 68,9 %, у плотвы – 85,5 %. Кроме элементов активации и коррозии присутствовали долгоживущие радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , но их роль в формировании радиационных рисков на данном этапе была существенно меньше, 31,1 и 14,5 % соответственно. Таким образом, радиационные риски у окуня и плотвы в Копорской губе в период 1973–1985 гг. были опосредованно связаны с функционированием Ленинградской АЭС и поступлением в водоем-охладитель радионуклидов с наведенной активностью, образующихся в результате работы атомных реакторов.

Несколько иначе происходило формирование радиационных рисков у салаки. Коррозионные элементы, такие как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ , тоже присутствовали, но их доля составляла не более 45 % от суммарной активности. Напротив, более существенную роль играли долгоживущие радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . По-видимому, это связано с особенностями обитания данного вида рыбы. В отличие от окуня и плотвы, салака при определенных условиях способна мигрировать из водоема-охладителя в открытое море и возвращаться обратно. Так, в весенний период салака держится на мелководье возле берегов в поверхностных горизонтах.



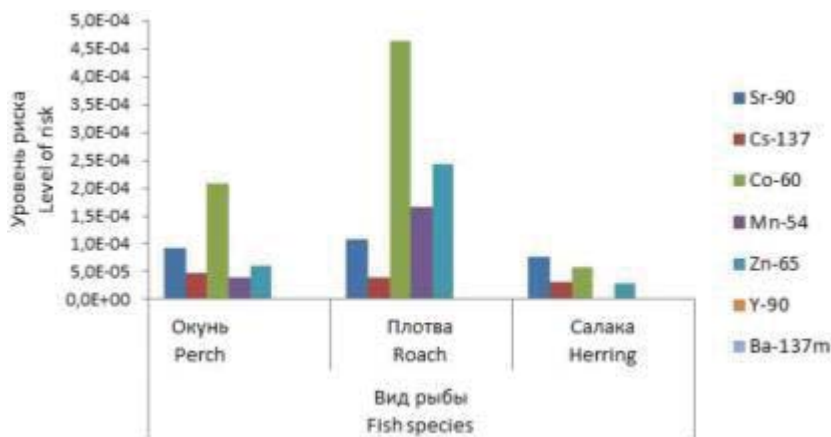
a/a



б/б

**Рис. 2.** Влияние ряда техногенных радионуклидов на уровень радиационного риска ихтиофауны Белоярского водохранилища в период работы Белоярской АЭС: а) 1977–1989 гг. б) 2016–2019 гг.

**Fig. 2.** Impact of a number of technogenic radionuclides on the radiation risk level for the fish fauna of the Beloyarskoe pool during Beloyarskaya NPP operation: a) 1977–1989; b) 2016–2019



**Рис. 3.** Формирование радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы на этапе 1973–1985 гг.

**Fig. 3.** Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Kopper Bay for 1973–1985

Летом, по мере прогревания воды, салака уходит от берегов в более глубокие места или держится в средних водных горизонтах. В начале осени при охлаждении поверхностных слоев воды салака обратно возвращается к берегам на мелководье. С наступлением холодного периода и сильным охлаждением поверхностных горизонтов салака стремится уходить на глубокие места в придонные слои воды. Таким образом, Копорскую губу нельзя считать местом постоянного обитания салаки, поэтому и радиационные риски у этого вида рыбы, по видимому, были сформированы под влиянием других условий.

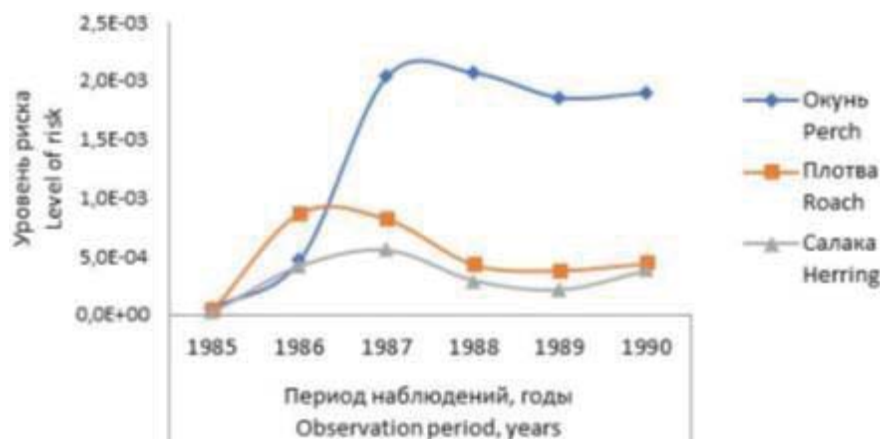
В период 1986–1990 гг. радиационные риски для ихтиофауны Копорской губы были в основном связаны с последствиями Чернобыльской аварии и радиоактивным загрязнением водоема-охладителя в результате атмосферных выпадений (рис. 4). После радиационной аварии на Чернобыльской АЭС особое внимание уделялось контролю содержания  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах водоема-охладителя, поэтому и оценка радиационного риска на ихтиофауну Копорской губы за этот период представлена в зависимости от изменения содержания радиоцезия. У всех представленных на рис. 3 видов рыб в первый год после аварии отмечено существенное увеличение уровней радиационных рисков. Так, у плотвы данный показатель увеличился в 20 раз, у салаки – в 16 раз. У окуня уровень радиационного риска плавно возрастал на протяжении двух лет после аварии. В первый год он вырос в 7,9 раза, а к концу 1987 г. – еще в 4,3 раза. Вероятно, это связано с накоплением в течение первого года радиоцезия в организмах рыб и беспозвоночных, которыми питается окунь, а последующее увеличение рисков вызвано поступлением  $^{137}\text{Cs}$  в организм окуня через пищеварительный тракт.

Всего к 1988 г. уровень радиационного риска у окуня по сравнению с доаварийным периодом уве-

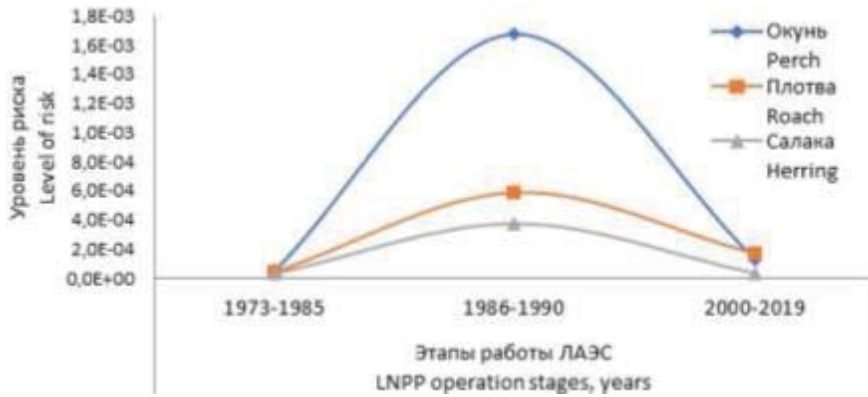
личился в 35 раз, но при этом оставался в 480 раз ниже максимально допустимого коэффициента опасности. У салаки и плотвы в период 1986–1987 гг. тоже прослеживалось увеличение уровня радиационного риска, но с разной интенсивностью. Если у плотвы активный период роста радиационных рисков к концу 1986 г. уже завершился, а далее наметилась тенденция на его снижение, то у салаки этот процесс проходил на протяжении двух лет и закончился к концу 1987 г., после чего последовало плавное снижение. Показатели радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы стабилизировались к 1990 г., но на более высоких уровнях по сравнению с 1985 г. Так, у окуня уровень радиационного риска остался в 32 раза выше, чем до аварии, у плотвы – в 10 раз, у салаки – в 15 раз.

Динамика изменения радиационных рисков за весь период наблюдения с 1973 по 2019 гг. представлена на рис. 5. Показано, что после 1990 г. у основных видов рыбы Копорской губы наметилось последовательное снижение радиационных рисков. К завершающему периоду (2000–2019 гг.), по сравнению с 1990 г., радиационные риски у окуня снизились в 13 раз, у плотвы – в 3,5 раза и у салаки – в 11 раз. Но при этом, спустя 33 года после аварии, значения радиационных рисков не вернулись к прежним показателям, которые были до Чернобыльской аварии. У окуня уровень радиационного риска остался в 2,7 раза выше первоначального, у плотвы – в 4,2 раза и у салаки – в 1,1 раза. Таким образом, последствия Чернобыльской аварии до настоящего времени оказывают заметное влияние на формирование радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы.

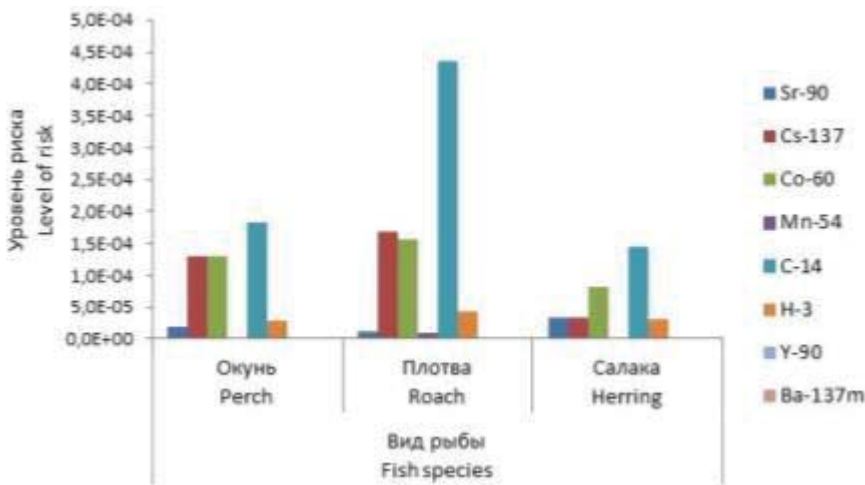
Кроме последствий радиационной аварии, существенная роль в формировании радиационного риска у ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС на этапе 2000–2019 гг. отводится  $^{14}\text{C}$  и  $^3\text{H}$  (рис. 6).



**Рис. 4.** Изменение радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы после Чернобыльской аварии  
**Fig. 4.** Change in radiation risks for the fish fauna of the Kopperskaya Bay after the Chernobyl accident



**Рис. 5.** Динамика изменения радиационных рисков для икhtiофауны Копорской губы в период 1973–2019 гг.  
**Fig. 5.** Dynamics of changes in radiation risks for the fish fauna of the Koporskaya Bay during 1973–2019

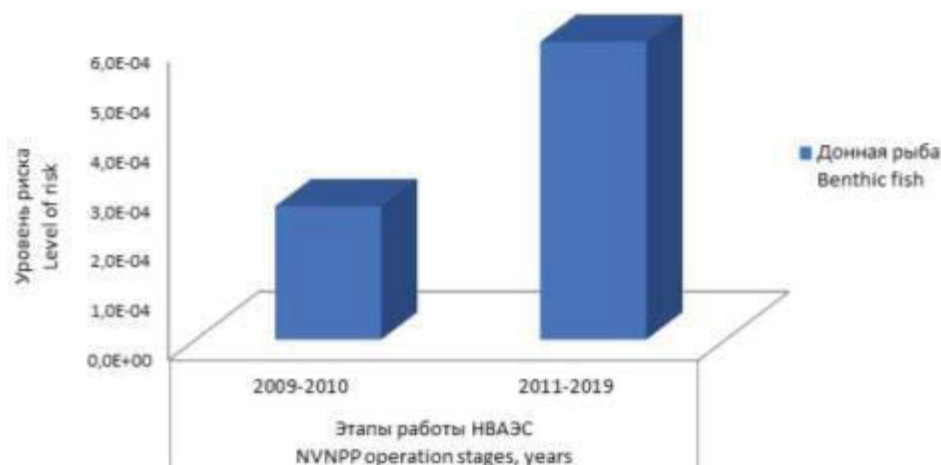


**Рис. 6.** Формирование радиационных рисков для икhtiофауны Копорской губы на этапе 2000–2019 гг.  
**Fig. 6.** Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Koporskaya Bay for 2000–2019

В последние годы было показано, что эти изотопы могут вносить существенный вклад в формирование радиационных дозовых нагрузок на биоту [21–23]. Ранее, на первом и втором этапах исследований, в доступной литературе не имелось информации о содержании  $^{14}\text{C}$  в компонентах водоема-охладителя, а появление ее на заключительном этапе в корне изменило соотношение влияния радионуклидов на формирование радиационных рисков у икhtiофауны водоема. Так, у окуня радиационные риски в основном были обусловлены присутствием трех радионуклидов:  $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . При этом вклад  $^{14}\text{C}$  составлял 37 % от суммарного показателя. Количественное соотношение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  было одинаково и составляло по 26,4 % от общего значения. Небольшая доля приходилась на  $^3\text{H}$  и  $^{90}\text{Sr}$  – 5,9 и 3,7 % соответственно. У плотвы радиационные риски на 52,8 % были сформированы влиянием  $^{14}\text{C}$ . Также прослеживалось присутствие  $^{137}\text{Cs}$  – 20,3 %,  $^{60}\text{Co}$  – 18,8 %,  $^3\text{H}$  – 5,2 %,  $^{90}\text{Sr}$  – 1,6 % и  $^{54}\text{Mn}$  – 1,3 %. Доля участия  $^{90}\text{Y}$  у всех видов рыб была ми-

нимальна и составляла 0,1–0,2 % от суммарного риска. У салаки формирование радиационных рисков в основном происходило под влиянием радионуклидов коррозионного происхождения:  $^{14}\text{C}$  – 44,6 % и  $^{60}\text{Co}$  – 24,7 %. Но при этом присутствовали и долгоживущие радионуклиды:  $^{90}\text{Sr}$  – 10,6 % и  $^{137}\text{Cs}$  – 10,4 %. Также был отмечен вклад  $^3\text{H}$  – 9,4 %.

Таким образом, на разных этапах работы ЛАЭС радиационные риски для икhtiофауны водоема-охладителя слагались под влиянием нескольких факторов: 1 – глобальные выпадения; 2 – авария на Чернобыльской АЭС; 3 – поступление в водоем-охладитель радионуклидов с наведенной активностью в результате работы ядерных реакторов ЛАЭС. Появление информации о содержании  $^{14}\text{C}$  в компонентах водоема-охладителя позволило оценить значительный вклад данного радионуклида в формирование радиационных рисков для икhtiофауны водоема. Более подверженной влиянию  $^{14}\text{C}$  оказалась плотва – 52,8 % от суммарного риска. У других видов влияние тоже заметно: салака – 44,6 %, окунь – 37 %.



**Рис. 7.** Динамика изменения радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС в период 2009–2019 гг.  
**Fig. 7.** Dynamics of change in radiation risks for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool during 2009–2019

Радионуклиды с наведенной активностью в сумме оказывали существенное влияние на ихтиофауну Копорской губы. У салаки радиационные риски на 79,0 % были обусловлены влиянием радионуклидов с наведенной активностью, у плотвы – на 78,2 %, у окуня – на 69,9 %. Если учесть, что данные изотопы являются производными работы ядерных реакторов, можно судить о высокой зависимости ихтиофауны водоема-охладителя от деятельности ЛАЭС.

В целом экологическую ситуацию для ихтиофауны Копорской губы в настоящее время можно считать стабильной и приемлемой для существования и размножения рыбы в данном водоеме. Уровни радиационных рисков у основных видов рыб до критических значений коэффициента опасности отделяет существенный запас. Так, у окуня суммарный радиационный риск ниже критического значения в 2000 раз, у плотвы – в 1200 раз, у салаки – в 3000 раз.

На рис. 7 представлена динамика значений радиационных рисков на ихтиофауну водоема-охладителя НВАЭС. Для расчета радиационных рисков в доступной литературе имеется исходная информация по обобщенной группе – донная рыба [8]. К этой группе можно отнести референтные для водоема-охладителя виды рыб: толстолобик и карп [24]. Показано, что за десятилетний период наблюдения общий уровень радиационных рисков для ихтиофауны увеличился в 2,2 раза. Анализ слагаемых суммарного радиационного риска (рис. 8) показывает, что данный рост обусловлен в основном увеличением во многих компонентах водоема  $^{60}\text{Co}$ . По сравнению с предыдущим периодом его влияние на формирование радиационного риска возросло в 3,8 раза и составило 81,7 % от суммарного риска. Таким образом, ситуация с  $^{60}\text{Co}$  в водоеме-охладителе до последнего времени остается неста-

бильной и, вероятно, связана с радиационной аварией, произошедшей на начальных этапах работы НВАЭС.

Так, в марте 1985 г. в результате утечки из емкостей хранилища около 480 м<sup>3</sup> жидких радиационных отходов произошло загрязнение подземных вод в районе ХЖО-2 НВАЭС с последующей инфильтрацией радиоактивных веществ в первый не питьевой водоносный горизонт. В составе загрязнения до 90 % составлял  $^{60}\text{Co}$ , оставшиеся 10 % приходились на  $^{137}\text{Cs}$  и другие техногенные радионуклиды. В подстилающий грунт поступило 76 ТБк  $^{60}\text{Co}$  и 15 ТБк  $^{137}\text{Cs}$ . Радиоизотопы  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  прошли на глубину до полутора метров и были задержаны песком,  $^{60}\text{Co}$  в песке практически не задержался и опустился до водоупорного глиняного слоя на глубину до 18 м. Загрязненный песок с суммарной активностью  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  около 1,1 ТБк был захоронен в могильники между ХЖО-1 и ХЖО-2. Для локализации радиационного загрязнения  $^{60}\text{Co}$  с 1986 по 1991 гг. проводилась откачка грунтовых вод из трех подземных скважин. Всего было откачано 40000 м<sup>3</sup> подземных вод с общей активностью 8,9 ТБк по  $^{60}\text{Co}$ . Однако это не смогло препятствовать формированию ореола загрязнения подземных вод на расстоянии до 50 м от ХЖО-2 с объемными активностями от 37 кБк/л и на расстоянии до 150 м от ХЖО-2 в сторону р. Дон с объемными активностями 0,37 кБк/л. Загрязненные подземные воды могут разгружаться на участках русла р. Дон преимущественно между сбросным каналом блоков № 1 и 2 и береговой насосной станцией блоков № 1 и 2; в ковше, устье и в средней части русла сбросного канала блоков № 1 и 2; в средней части русла отводного канала на рыбхоз [8, 24].

Расчеты показали, что процессы поступления  $^{60}\text{Co}$  в водоем-охладитель и связанные с этим радиационные риски в последнее время являются спон-

таннами, не связанными с работой энергоблоков НВАЭС. Это также подтверждается сообщениями: «Причиной поступления  $^{60}\text{Co}$  в р. Дон и пруды рыбхоза является разгрузка подземных вод из зоны локализации низкоактивных солевых промышленных отходов ХЖО-2 в устье сбросного канала 1 и 2 блоков. Колебания содержания этого радионуклида в гидробионтах, вероятно, связаны с природными явлениями (количество осадков, уровень воды в р. Дон и др.)» [25. С. 241].

В этой связи нельзя не отметить снижение роли  $^{137}\text{Cs}$  в формировании радиационных рисков для ихтиофауны на фоне роста значения  $^{60}\text{Co}$ . За рассмотренный десятилетний период влияние  $^{137}\text{Cs}$  снизилось в 1,6 раза (рис. 8). В итоге вклад  $^{137}\text{Cs}$  в формирование суммарного радиационного риска составил 7,7 %, вклад от  $^{90}\text{Sr}$  – 10,6 %, против 81,7 % от  $^{60}\text{Co}$ .

В табл. 3 представлены уровни радиационного риска для ихтиофауны водоемов-охладителей на завершающем этапе исследований. Показано, что в каждом водоеме радиационные риски для ихтиофауны были обусловлены изотопами разного проис-

хождения. В Белоярском водохранилище радиационные риски в основном связаны с влиянием долгоживущих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Экологические риски для ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС в настоящее время определяются влиянием двух радиационных составляющих. С одной стороны, еще значима роль  $^{137}\text{Cs}$ , как следствие аварии на Чернобыльской АЭС, с другой стороны, уже начинают доминировать радионуклиды с наведенной активностью ( $^{14}\text{C}$ ;  $^{60}\text{Co}$ ;  $^3\text{H}$  и др.), которые могут быть производными работы ядерных реакторов на ЛАЭС. В водоеме-охладителе НВАЭС на формирование радиационных рисков большое влияние оказывает  $^{60}\text{Co}$ , происхождение которого в основном связывают с аварией 1985 г. и образованием ореола загрязнения подземных вод. Несмотря на разные условия формирования, радиационные риски для ихтиофауны (кроме щуки) находятся в диапазоне одного порядка величин ( $10^{-4}$ ), то есть на три порядка величин ниже критического значения коэффициента опасности. У щуки, соответственно, ниже на два порядка величин.

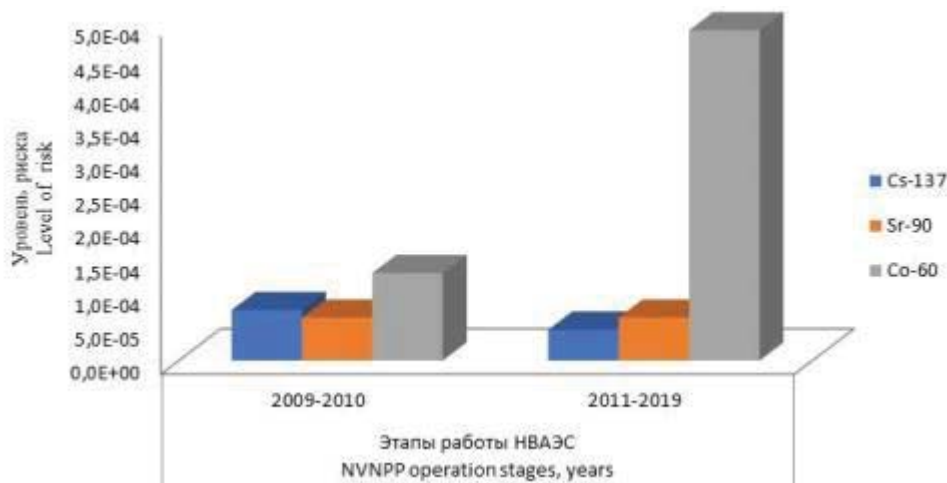


Рис. 8. Формирование радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС

Fig. 8. Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool

Таблица 3. Сравнительная оценка и основные слагаемые радиационных рисков для ихтиофауны водоемов-охладителей действующих АЭС

Table 3. Comparative assessment and main components of the radiation risks for the fish fauna of the operating NPPs cooling pools

Водоем-охладитель АЭС NPP cooling pool	Учетный период Accounting period	Рефератные виды ихтиофауны Reference species of fish fauna	Уровень радиационного риска Radiation risk level	Основные радиоизотопы main radioisotopes
Белоярское водохранилище (БАЭС) Beloyarsk reservoir (BNPP)	2016–2019	Лещ/Bream	9,0E-4	$^{90}\text{Sr}$ ; $^{137}\text{Cs}$
		Окунь/Perch	2,7E-4	
		Плотва/Roach	6,7E-4	
		Щука/Pike	1,6E-3	
Копорская губа (ЛАЭС) Koporskaya Bay (LNPP)	2000–2019	Окунь/Perch	5,0E-4	$^{14}\text{C}$ ; $^{60}\text{Co}$ ; $^{137}\text{Cs}$ ; $^3\text{H}$
		Плотва/Roach	8,3E-4	
		Салака/Herring	3,3E-4	
Пруд-охладитель НВАЭС NVNPP cooling pond	2011–2019	Донная рыба Benthic fish	6,0E-10 <sup>-4</sup>	$^{60}\text{Co}$ ; $^{90}\text{Sr}$ ; $^{137}\text{Cs}$

## Заключение

Радиационные экологические риски для ихтиофауны в водоемах-охладителях действующих АЭС обусловлены сочетанным воздействием радионуклидов разного происхождения, соотношение которых в разных водоемах может существенно меняться. Для Белоярского водохранилища характерна четко выраженная зависимость радиационной нагрузки на ихтиофауну от типов действующих энергоблоков на БАЭС. Наибольшие радиационные риски ихтиофауна водоема-охладителя испытывала в период работы первых двух энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Основным источником экологических рисков для ихтиофауны в этот период был  $^{137}\text{Cs}$ , который поступал с атомной станции через технические каналы в составе дебалансных вод и промливневых стоков с территории промплощадки БАЭС. После вывода из эксплуатации первых двух энергоблоков произошло значительное снижение уровней радиационной нагрузки на ихтиофауну. Такая тенденция продолжилась и после ввода в эксплуатацию четвертого энергоблока БН-800. На завершающем этапе исследований (2016–2019 гг.) радиационные риски для ихтиофауны водоема были обусловлены в основном влиянием  $^{90}\text{Sr}$ . При этом  $^{90}\text{Sr}$  с БАЭС в водоем-охладитель почти не сбрасывается, а имеет преимущественно глобальное происхождение. Таким образом, формирование рисков для ихтиофауны водоема-охладителя БАЭС в настоящее время больше зависит от поступления  $^{90}\text{Sr}$  в составе атмосферных выпадений, а не от деятельности атомной станции.

Формирование радиационных рисков у ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС в период 1973–1985 гг. было в значительной степени связано с присутствием в водоеме радионуклидов с наведенной ак-

тивностью ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{65}\text{Zn}$ ), образование которых может быть следствием работы ядерных реакторов АЭС. В период 1986–1990 гг. экологические риски у ихтиофауны Копорской губы были в основном вызваны последствиями радиационной аварии на Чернобыльской АЭС и загрязнением водоема  $^{137}\text{Cs}$ . В последние годы (2000–2019 гг.) радиационные нагрузки на ихтиофауну вызваны сочетанным воздействием радиоцезия и радионуклидов с наведенной активностью ( $^{14}\text{C}$ ;  $^{60}\text{Co}$ ;  $^3\text{H}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{65}\text{Zn}$ ) при доминировании последних в процессе формирования суммарного экологического риска.

Уровень радиационного риска для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС за десятилетний период наблюдения (2009–2019 гг.) повысился в 2,2 раза в основном за счет увеличения  $^{60}\text{Co}$  во многих компонентах водоема. За наблюдаемый период его влияние на формирование радиационных рисков возросло в 3,8 раза и составило 81,7 % от суммарного значения. Нельзя исключить, что увеличение  $^{60}\text{Co}$  в водоем-охладителе НВАЭС связано с радиоактивным загрязнением подземных вод в результате аварии в 1985 г.

В количественном выражении экологические риски для ихтиофауны во всех водоемах-охладителях на два–три порядка величин ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Таким образом, результаты исследований подтверждают, что во всех водоемах-охладителях действующих атомных электростанций (БАЭС, ЛАЭС, НВАЭС) радиационные риски являются приемлемыми для существования и развития разных видов рыб. При работе АЭС в штатном режиме не образуется недопустимых радиационных рисков, представляющих реальную экологическую угрозу для ихтиофауны водоемов-охладителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линге И.И., Крышев И.И. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
2. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 59. – P. 61–73.
3. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / U. Lee, C. Lee, M. Kim, H.R. Kim // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 51. – P. 1626–1632.
4. Оценка радиационной безопасности морской среды в районе расположения Ленинградской АЭС по данным многолетнего мониторинга (1973–2019) / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина, Н.Н. Павлова, И.В. Косых, А.А. Бурякова, А.И. Крышев // *Морской биологический журнал*. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 41–57.
5. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2022. – 342 с.
6. Радиозэкологические исследования Белоярского водохранилища / М.Я. Чеботина, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, Н.В. Куликов. – Свердловск: УрО АН СССР, 1992. – 78 с.
7. Радиозэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. – Екатеринбург: Изд-во АкадемНаука, 2019. – Т. IV. – 448 с.
8. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / под общ. ред. И.И. Линге, И.И. Крышева. – М.: ГК «Росатом», 2021. – 555 с.
9. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году. – Обнинск: ООО «Красногорский полиграфический комбинат», 2018. – 360 с.
10. Лаврентьева Г.В., Сызыныс Б.И. Современные тенденции оценки радиационного экологического риска. Обзор // *Радиация и риск*. – 2020. – Т. 29. – № 2. – С. 128–138.



11. Анализ подходов к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения ядерно и радиационно опасных объектов. Обзор / А.В. Панов, Н.И. Санжарова, В.К. Кузнецов, С.И. Спиридонов, Д.Н. Курбаков // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 75–95.
12. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. – М.: ООО «Маска», 2022. – 638 с.
13. Radiation weighting for reference animals and plants. ICRP Publication 148. – Ann. ICRP. – 2021. – Vol. 50. – № 2. – P. 3–133.
14. Шандала Н.К., Коренков И.П., Романов В.В. Состояние радиационно-гигиенической обстановки в районе размещения АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2015. – Т. 60. – № 2. – С. 15–21.
15. The ERICA tool / J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N.A. Beresford, D. Copplestone, G. Prohl, A. Ulanovsky // J. Environment. Radioactivity. – 2008. – Vol. 99. – № 9. – P. 1371–1383.
16. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals / J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N. Beresford, D. Copplestone, A. Hosseini // J. Environment. Radioactivity. – 2016. – Vol. 153. – P. 14–49.
17. D-ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. A Deliverable Report for the Project «ERICA» (Contract No. FI6R-CT-2004-508847) within the EC's VIth Framework Programme / N. Beresford, J. Brown, D. Copplestone, J. Garnier-Laplace, B. Howard, C.-M. Larsson, D. Oughton, G. Prohl, I. Zinger. – Stockholm: Swedish Radiation Protection Authority, 2007. – 82 p.
18. Larsson C.M. An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants // J. Environment Radioactivity. – 2008. – Vol. 99. – P. 1364–1370.
19. Оценка дозы и экологического риска для объектов биоты в районе расположения Горно-химического комбината / А.А. Бурякова, И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина, М.В. Ведерникова, С.В. Панченко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60. – № 6. – С. 661–670.
20. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // ICRP Publication 108. – 2008. – Vol. 38. – № 4–6. – 242 p.
21. Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public / T.Y. Kong, S. Kim, Y. Lee, J.K. Son, S.J. Maeng // Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 49. – P. 1772–1777.
22. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility // Radiation Protection Dosimetry. – 2001. – Vol. 93. – № 1. – P. 61–66.
23. Kim C.K., Han M.J. Dose assessment and behavior of tritium in environmental samples around Wolsong nuclear power plant // Applied Radiation and Isotopes. – 1999. – Vol. 50. – P. 783–791.
24. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома // под общ. ред. И.И. Линге, И.И. Крышева. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
25. Росгидромет, НПО «Гайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2005 году. – Обнинск: АНО «Метеоагентство Росгидромета», 2006. – 274 с.

#### Информация об авторах

**Владислав Геннадьевич Городецкий**, кандидат физико-математических наук, старший инженер лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. [vgorodetsky@mail.ru](mailto:vgorodetsky@mail.ru)

**Александр Викторович Трапезников**, доктор биологических наук, заведующий Биофизической станцией и Отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

**Вера Николаевна Трапезникова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. [vera\\_zar@mail.ru](mailto:vera_zar@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1576-8536>

**Александр Васильевич Коржавин**, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. [BFS\\_zar@mail.ru](mailto:BFS_zar@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Поступила в редакцию: 17.04.2023

Поступила после рецензирования: 02.11.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

#### REFERENCES

1. Linde I.I., Kryshev I.I. *Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located*. Moscow, SAM polygraphist Publ., 2015. 296 p. (In Russ.)
2. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 59, pp. 61–73.
3. Lee U., Lee C., Kim M., Kim H.R. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, vol. 51, pp. 1626–1632.
4. Kryshev I.I., Sazykina T.G., Pavlova N.N., Kosykh I.V., Buryakova A.A., Kryshev A.I. Assessment of radiation state of marine environment in the Leningrad NPP area according to long-term monitoring data (1973–2019). *Marine Biological Journal*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 41–57. (In Russ.)
5. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2021*. Obninsk, FGBI "VNIIGMI-MCD" Publ., 2022. 342 p. (In Russ.)

6. Chebotina M.Ya., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Kulikov N.V. *Radioecological studies of the Beloyarsky storage pond*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1992. 78 p. (In Russ.)
7. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. *Radioecological monitoring of the freshwater ecosystems*. Ekaterinburg, AkademNauka Publ., 2019. Vol. IV, 448 p. (In Russ.)
8. *Radioecological situation in the regions where the enterprises of the State Nuclear Energy Corporation "Rosatom" are located*. Eds. I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, Rosatom Group of Companies Publ., 2021. 555 p. (In Russ.)
9. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2017*. Obninsk, Krasnogorsk Printing Plant LLC Publ., 2018. 360 p. (In Russ.)
10. Lavrentyeva G.V., Synzynyns B.I. Modern trends in the radiation environmental risk assessment. Review. *Radiation and risk*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 128–138. (In Russ.)
11. Panov A.V., Sanzharova N.I., Kuznetsov V.K., Spiridonov S.I., Kurbakov D.N. Analysis of approaches to organization of radioecological monitoring on areas of nuclear and radiation-hazardous facilities location. Review. *Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 75–95. (In Russ.)
12. Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. *Modeling of the radioecological processes in the environment*. Moscow, OOO «Maska» Publ., 2022. 638 p. (In Russ.)
13. Radiation weighting for reference animals and plants. *ICRP Publication 148*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 3–133.
14. Shandala N.K., Korenkov I.P., Romanov V.V. The state of the radiation-hygienic situation in the NPP location area. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2015, vol. 60, no. 2, pp. 15–21.
15. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Prohl G., Ulanovsky A. The ERICA tool. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, pp. 1371–1383.
16. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N., Copplestone D., Hosseini A. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 153, pp. 141–149.
17. Beresford N., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.-M., Oughton D., Prohl G., Zinger I. *ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. A Deliverable Report for the Project «ERICA» (Contract No. FI6R-CT-2004-508847) within the EC's Vth Framework Programme*. Stockholm, Swedish Radiation Protection Authority, 2007. 82 p.
18. Larsson C.M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing contaminants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, pp. 1364–1370.
19. Buryakova A.A., Kryshev I.I., Sazykina T.G., Vedernikova M.V., Panchenko S.V. Dose and environmental risk assessment for biota objects in the area of the Mining and Chemical Plant. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 661–670. (In Russ.)
20. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *ICRP Publication 108*, 2008, vol. 38, no. 4–6, 242 p.
21. Kong T.Y., Kim S., Lee Y., Son J.K., Maeng S.J. Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, vol. 49, pp. 1772–1777.
22. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility. *Radiation Protection Dosimetry*, 2001, vol. 93, no. 1, pp. 61–66.
23. Kim C.K., Han M.J. Dose assessment and behavior of tritium in environmental samples around Wolsong nuclear power plant. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, vol. 50, pp. 783–791.
24. *Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located*. Eds. I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, SAM poligrafist Publ., 2015. 296 p. (In Russ.)
25. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2005*. Obninsk, ANO "Meteorological Agency of Roshydromet" Publ., 2006. 274 p. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Vladislav G. Gorodetsky**, Cand. Sc., Senior Engineer, Institute of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. vgorodetsky@mail.ru

**Aleksandr V. Trapeznikov**, Dr. Sc., Head of the Biophysical Station and the Department of Continental Radioecology, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

**Vera N. Trapeznikova**, Cand. Sc., Senior Researcher, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. vera\_zar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1576-8536>

**Aleksandr V. Korzhavin**, Cand. Sc., Senior Researcher, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. BFS\_zar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Received: 17.04.2023

Revised: 02.11.2023

Accepted: 25.01.2024

УДК 622.24.063

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/3783

Шифр специальности ВАК: 2.8.2

## Пептизация и ингибирование набухания глин в присутствии угольной кислоты, бикарбонатных, карбонатных ионов и ионов кальция

Д.А. Баранов<sup>1</sup>, С.Ф. Вязниковцев<sup>2</sup>, О.Г. Мамаева<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, г. Уфа

<sup>2</sup>Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва

✉oxana.mamaeva2013@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность* работы обусловлена необходимостью обеспечения целостности ствола скважины, сложенного глинистыми породами, и стабильности бурового раствора при бурении в условиях угольной и бикарбонатной агрессивности. *Цель:* экспериментально определить влияние на глину угольной кислоты, бикарбонатных и карбонатных ионов в зависимости от присутствия в дисперсионной среде ионов кальция. *Объекты:* загрязненные угольной кислотой, бикарбонатными и карбонатными ионами воды с разной эквивалентной концентрацией ионов кальция. *Методы.* Ингибирующие и пептизирующие свойства объектов исследования по отношению к глинистой породе изучали методом набухания глины при нахождении ее в исследуемом образце воды (на приборе Жигача-Ярова); для контроля состава и свойств вод были привлечены методы химического анализа (комплексометрическое и кислотно-основное титрование) и потенциометрии. *Результаты.* Показано, что пептизирующие и ингибирующие свойства буровой промывочной жидкости значительно зависят от присутствия в дисперсионной среде формы угольной кислоты и эквивалентного содержания ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . Выявлено, что угольная кислота  $\text{H}_2\text{CO}_3$  способствует ингибированию (коагуляции) глины, бикарбонат-ионы  $\text{HCO}_3^-$  и карбонат-ионы  $\text{CO}_3^{2-}$  – пептизации глины. Установлено, что ион  $\text{Ca}^{2+}$  не обладает ингибирующим действием в присутствии угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  – ионы  $\text{H}^+$  вытесняют обменные катионы из межслоевого пространства глин и за счет малого диаметра самостоятельно ингибируют набухание глины; в присутствии бикарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$  ион  $\text{Ca}^{2+}$  также не обладает ингибирующим действием – бикарбонатные ионы  $\text{HCO}_3^-$ , находясь в дисперсионной среде, оттягивают ионы  $\text{Ca}^{2+}$  от поверхности глины, увеличивая толщину двойного электрического слоя; при наличии карбонат-ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  ион  $\text{Ca}^{2+}$  выпадает в осадок и эффективно предотвращает пептизацию глин только в присутствии гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$ . Экспериментально доказано, что ион  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$  обладает лучшей ингибирующей способностью, чем ион  $\text{H}^+$  диссоциированной угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Предложен механизм ингибирования набухания глин ионами  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$ , основанный на адсорбции гидратированного иона  $\text{Ca}^{2+}$  на кремнекислородной решетке за счет предварительного протонирования ее атомов кислорода молекулами воды. Сформулированы условия, необходимые для эффективной пептизации глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] \geq 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] = 0$ ,  $\text{pH} > 11,5$ ; для ингибирования набухания глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] > 0$  и  $\text{pH} > 11,5$ .

**Ключевые слова:** пептизация глины, ингибирование набухания глины, угольный газ, угольная кислота, бикарбонатные ионы, карбонатные ионы, угольнокислотное загрязнение, бикарбонатное загрязнение, угольнокислая агрессивность

**Для цитирования:** Баранов Д.А., Вязниковцев С.Ф., Мамаева О.Г. Пептизация и ингибирование набухания глин в присутствии угольной кислоты, бикарбонатных, карбонатных ионов и ионов кальция // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 234–245. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/3783

UDC 622.24.063

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/3783

## Clay peptization and clay swelling inhibition in the presence of carbonic acid, bicarbonate and carbonate ions and calcium ions

D.A. Baranov<sup>1</sup>, S.F. Vyaznikovtsev<sup>2</sup>, O.G. Mamaeva<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

<sup>2</sup> National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

✉ oxana.mamaeva2013@yandex.ru

**Abstract. Relevance.** The need to ensure the integrity of the wellbore, composed of clay rocks, and the stability of drilling fluid when drilling in conditions of carbon dioxide and bicarbonate aggression. **Aim.** To determine experimentally the effect of carbonic acid, bicarbonate and carbonate ions on clay depending on the presence of calcium ions in the dispersion medium. **Objects.** Water contaminated with carbonic acid, bicarbonate and carbonate ions with different equivalent concentrations of calcium ions. **Methods.** Inhibitory and peptizing properties of the objects of study in relation to the clay rock were studied by the method of clay swelling when it was in the water under study (on the Zhigacha-Yarov device); methods of chemical analysis (complexometric and acid-base titration) and potentiometry were used to control water composition and properties. **Results.** The peptizing and inhibiting properties of drilling fluid depend significantly on the form of carbonic acid present in the dispersion medium and the equivalent content of calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ). It was found that carbonic acid ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) contributes to clay inhibition (coagulation), bicarbonate ions ( $\text{HCO}_3^-$ ) and carbonate ions ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) – clay peptization. Calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) do not have an inhibitory effect in the presence of carbonic acid ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) – hydrogen ions ( $\text{H}^+$ ) displace exchangeable cations from the interlayer space of clays and, due to their small diameter, independently inhibit clay swelling. In the presence of bicarbonate ions ( $\text{HCO}_3^-$ ), calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) also do not have an inhibitory effect – bicarbonate ions ( $\text{HCO}_3^-$ ), being in a dispersion medium, draw calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) from the clay surface, increasing the thickness of the electrical double layer. In the presence of carbonate ions ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) the calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) precipitate and effectively prevent clay peptization only in the presence of hydroxide ions ( $\text{OH}^-$ ). The authors proved experimentally that calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) in the presence of hydroxide ions ( $\text{OH}^-$ ) have a better inhibitory ability than hydrogen ions ( $\text{H}^+$ ) of dissociated carbonic acid ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). A mechanism was proposed for inhibiting the swelling of clays by calcium ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) in the presence of hydroxide ions ( $\text{OH}^-$ ), based on the adsorption of the hydrated calcium ion ( $\text{Ca}^{2+}$ ) on a silica tetrahedral sheet due to the preliminary protonation of its oxygen atoms by water molecules. The conditions required for clay effective peptization are formulated:  $[\text{CO}_3^{2-}] \geq 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] = 0$ ,  $\text{pH} > 11.5$ ; for clay swelling inhibition:  $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] > 0$  and  $\text{pH} > 11.5$ .

**Keywords:** clay peptization, clay swelling inhibition, carbon dioxide, carbonic acid, bicarbonate ions, carbonate ions, carbon dioxide contamination, bicarbonate contamination, carbon dioxide aggression

**For citation:** Baranov D.A., Vyaznikovtsev S.F., Mamaeva O.G. Clay peptization and clay swelling inhibition in the presence of carbonic acid, bicarbonate and carbonate ions and calcium ions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 234–245. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/3783

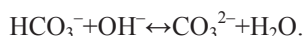
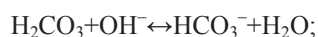
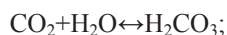
### Введение

Возникающие во время приготовления, бурения, промывки или обработки бурового раствора углекислая или бикарбонатная агрессии отрицательно сказываются на свойствах промывочной жидкости, что может потребовать остановки технологических процессов строительства скважины для выравнивания ее параметров, а также стать причиной потери контроля над системой «скважина–пласт».

Загрязнение промывочной жидкости угольной кислотой и бикарбонатами является результатом попадания их из разбуриваемых пород [1] либо следствием ферментативной или термоокислительной деструкции органических соединений, входящих в состав бурового раствора [2]. Зачастую

пресная техническая вода для приготовления промывочной жидкости содержит растворенный углекислый газ и бикарбонат-ионы [3]. Также в последнее время становится популярным использование в качестве основы или компонента буровых промывочных жидкостей морской [4, 5] или пластовых вод [6–10], для которых характерен данный вид загрязнения [11–13].

При попадании углекислого газа  $\text{CO}_2$  в дисперсионную среду буровой промывочной жидкости, растворяясь в воде, он образует угольную кислоту  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , которая при повышенных pH переходит в бикарбонат-ионы  $\text{HCO}_3^-$ , а они, в свою очередь, – в карбонат-ионы  $\text{CO}_3^{2-}$ ; при снижении pH процесс идет в обратном направлении:



Для данного вида загрязнения характерна не только взаимность перехода одной формы угольной кислоты в другую и обратимость процесса, но и возможность одновременного существования в воде сразу двух форм:  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  и  $[\text{HCO}_3^-]$  или  $[\text{HCO}_3^-]$  и  $[\text{CO}_3^{2-}]$ .

Помимо этого, при снижении pH, из-за поступления в раствор углекислого газа, возможно постепенное растворение водонерастворимого карбоната  $\text{CaCO}_3$  (как специально вводимого в буровой раствор, так и горной породы) до водорастворимых бикарбонатов:  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  [14, 15]. Это означает, что в некоторых случаях углекислая агрессия способна протекать с увеличением концентрации ионов кальция  $\text{Ca}^{2+}$ .

Практика показывает, что инженерно-технические работники, как правило, не связывают плохое распускание глины во время приготовления бурового раствора или, наоборот, значительную наработку твердой фазы, а также наличие осыпей и обвалов при бурении глиносодержащих интервалов с присутствием углекислого или бикарбонатного загрязнения. Однако хорошо известно, что состояние глины (скоагулирована или пептизирована) значительно зависит от растворенных в воде веществ.

При попадании в воду глинистые частицы диссоциируют на макроанионы и большое количество катионов. Последние, располагаясь вокруг отрицательно заряженных глинистых частиц, образуют двойные электрические слои (ДЭС). Взаимодействие между частицами определяется соотношением сил электростатического отталкивания и межмолекулярного притяжения. С уменьшением толщины ДЭС электростатические силы отталкивания снижаются, и частицы дисперсной фазы под действием межмолекулярных сил притяжения слипаются – происходит коагуляция глины; по мере увеличения толщины ДЭС электростатические силы отталкивания возрастают, и частицы дисперсной фазы разъединяются – происходит пептизация глины. В свою очередь, толщина ДЭС зависит от таких факторов, как валентность и размер ионов, образующих ДЭС, pH и концентрация растворенных веществ в дисперсионной среде, температура и т. д.

Отсюда понятно, что появление угольной кислоты, бикарбонатных или карбонатных ионов в дисперсионной среде буровой промывочной жидкости будет изменять ее состав и свойства и по-разному влиять на толщину ДЭС. Однако до сих пор нет четкого понимания влияния угольной кислоты и ее солей на глину. Поэтому для эффективного управления механизмами ингибирования и пептизации глин необходимо проведение специальных исследований

по определению влияния каждой формы угольной кислоты на взаимодействие глинистых частиц друг с другом. Также требуют экспериментального подтверждения сделанные ранее теоретические предположения о неэффективной ингибирующей способности  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии угольной кислоты, бикарбонатных и карбонатных ионов [16].

Результаты проведенных исследований могут быть полезны работникам буровой отрасли при применении, в частности, известковых и известково-гипсовых буровых растворов, а также всех типов буровых растворов на водной основе при загрязнении их углекислым газом или бикарбонатными ионами, попадающими в раствор с пластовым флюидом.

### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны три типа вод с разным эквивалентным соотношением  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$  или  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ :

- 1) воды, в которых ионы кальция *отсутствуют* ( $\text{Ca}^{2+}=0$ ;  $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^->0$  или  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}>0$ );
- 2) воды с *низкой* эквивалентной концентрацией ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+} \leq [\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-]$  или  $[\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}]$ );
- 3) воды с *высокой* эквивалентной концентрацией ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+} > [\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-]$  или  $[\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}]$ ).

Для получения вод первого типа дистиллированная вода изначально насыщалась углекислым газом при помощи бытового сифона; для получения вод второго типа в насыщенную углекислым газом воду добавлялся карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , и система герметично закрывалась на сутки, по истечении которых водная фаза отделялась и использовалась в дальнейших испытаниях; в качестве вод третьего типа применялась пластовая высокоминерализованная, насыщенная углекислым газом, вода со скважины. Получение определенной формы угольной кислоты в каждом типе вод достигалось за счет поэтапного увеличения pH добавлением каустической соды и последующего отстаивания системы в течение суток для достижения равновесного состояния (в случае выпадения осадка при добавлении щелочи в испытаниях использовали осветленную часть жидкости, которую аккуратно сливали из емкости после суточного отстоя). Химические процессы, протекающие в воде в присутствии каждой формы угольной кислоты, представлены в табл. 1.

Водородный показатель воды контролировали с помощью pH-метра; состав водной среды контролировали с помощью химического анализа: концентрацию угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  определяли титрованием образца воды раствором  $\text{NaOH}$  в присутствии фенолфталеина [17], бикарбонатных  $\text{HCO}_3^-$  и карбонатных  $\text{CO}_3^{2-}$  ионов раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в присутствии фенолфталеина и метилового оранжевого индикатора, ионов  $\text{Ca}^{2+}$  раствором ЭДТА в присутствии мурексиды [18].

**Таблица 1.** Химические процессы, протекающие в интервалах существования одной из форм угольной кислоты, в зависимости от концентрации ионов  $Ca^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $H_2CO_3$  или  $HCO_3^-$ , или  $CO_3^{2-}$   
**Table 1.** Chemical processes in each carbonic acid form interval depending on concentration of  $Ca^{2+}$  ions relative to the equivalent content of  $H_2CO_3$  or  $HCO_3^-$  or  $CO_3^{2-}$

Форма угольной кислоты/Carbonic acid form		
$CO_2$ или (or) $H_2CO_3$	$HCO_3^-$	$CO_3^{2-}$
$Ca^{2+}=0$		
$CO_2+H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$ $H_2CO_3 \rightleftharpoons H^++HCO_3^-$	$Na^++HCO_3^- \rightleftharpoons NaHCO_3$	$2Na^++CO_3^{2-} \rightleftharpoons Na_2CO_3$ $Na^++OH^- \rightleftharpoons NaOH$
$Ca^{2+} \leq [H_2CO_3 \text{ или (or) } HCO_3^-, \text{ или (or) } CO_3^{2-}]$		
$CO_2+H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$ $H_2CO_3 \rightleftharpoons H^++HCO_3^-$	$Ca^{2+}+2HCO_3^- \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$ $Na^++HCO_3^- \rightleftharpoons NaHCO_3$	$Ca^{2+}+CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow$ $2Na^++CO_3^{2-} \rightleftharpoons Na_2CO_3$ $Na^++OH^- \rightleftharpoons NaOH$
$Ca^{2+} > [H_2CO_3 \text{ или (or) } HCO_3^-, \text{ или (or) } CO_3^{2-}]$		
$CO_2+H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$ $H_2CO_3 \rightleftharpoons H^++HCO_3^-$	$Ca^{2+}+2HCO_3^- \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$	$Ca^{2+}+2OH^- \rightarrow Ca(OH)_2 \downarrow$ $Ca(OH)_2+CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow + 2OH^-$

Для определения эквивалентного соотношения рассчитывали:

1) концентрацию ионов кальция  $n$  по уравнению, моль-экв/л:

$$n = \left[ \frac{Ca^{2+}}{40 \times 1000} \right],$$

где  $Ca^{2+}$  – содержание ионов кальция, мг/л;

2) суммарное содержание угольной кислоты, бикарбонат-ионов и карбонат-ионов  $m$  по уравнению, моль-экв/л:

$$m = \left[ \frac{H_2CO_3}{62 \times 1000} + \frac{HCO_3^-}{122 \times 1000} + \frac{CO_3^{2-}}{60 \times 1000} \right],$$

где  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  – содержание угольной кислоты, бикарбонат-ионов и карбонат-ионов, мг/л.

Для исследования процессов взаимодействия глинистых частиц друг с другом в присутствии угольной кислоты, бикарбонатных и карбонатных ионов был выбран метод определения ингибирующей способности среды, основанный на увеличении объема образца глины при нахождении его в исследуемой жидкости (прибор Жигача–Ярова). Все исследования проводились с использованием наиболее предрасположенной к пептизации и коагуляции глины монтмориллонитового типа – необработанного бентонитового глинопорошка.

**Влияние на глину вод, содержащих угольную кислоту, бикарбонатные или карбонатные ионы, в отсутствии ионов кальция:  $Ca^{2+}=0$ ,  $H_2CO_3/HCO_3^- > 0$  или  $HCO_3^-/CO_3^{2-} > 0$**

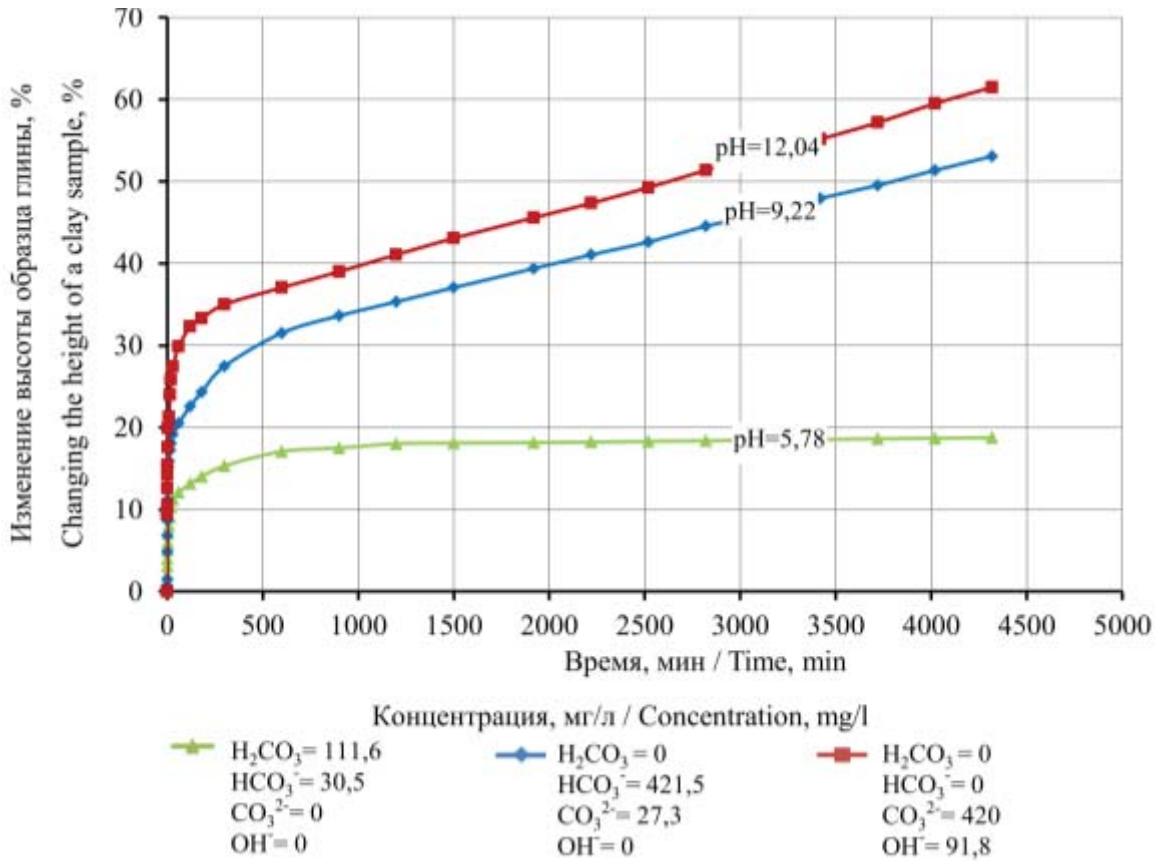
Графические зависимости, иллюстрирующие динамику набухания глинистого образца при наличии в воде угольной кислоты, бикарбонат- и карбонат-ионов в отсутствии ионов  $Ca^{2+}$  представлены на рис. 1.

Детальное изучение влияния концентрации каждой формы угольной кислоты на глину показывает следующее:

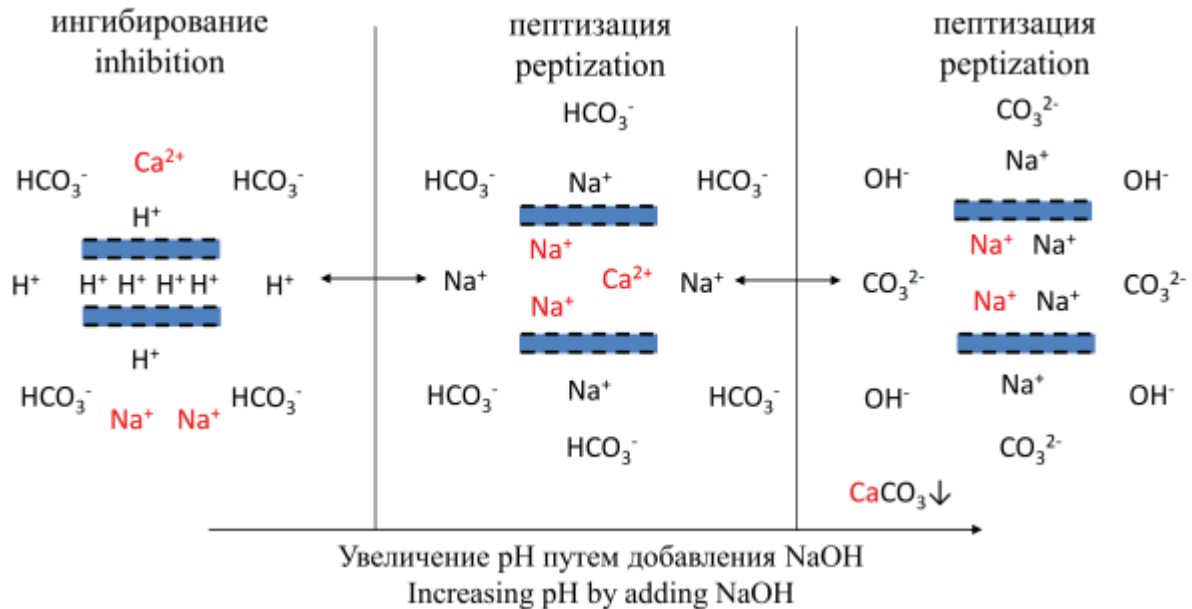
- присутствие в воде угольной кислоты  $H_2CO_3$ , которая диссоциирует на  $HCO_3^-$  и  $H^+$ , приводит к коагуляции глины; характер кривой набухания (с выходом на плато) аналогичен кривым набухания глин при нахождении их в калийсодержащих системах – благодаря малому размеру [19] ионы водорода  $H^+$ , вытесняя обменные катионы, размещаются в гексагональных пустотах тетраэдрических слоев глины подобно иону  $K^+$  и, компенсируя отрицательный заряд, предотвращают ее пептизацию;
- в отсутствии угольной кислоты бикарбонат-ионы  $HCO_3^-$  способствуют пептизации глины – находясь в дисперсионной среде, они оттягивают положительно заряженные противоионы ДЭС, тем самым увеличивая его толщину;
- карбонат-ионы  $CO_3^{2-}$  приводят к максимальному распусканию глины вследствие полного связывания из обменного комплекса глины двухвалентных ионов  $Ca^{2+}$  и замещения их ионами  $Na^+$ .

Также следует отметить, что поскольку при диссоциации  $H_2CO_3$  одновременно с коагулирующими ионами  $H^+$ , располагающимися в межпакетном пространстве глин, в дисперсионной среде находятся пептизирующие бикарбонат-ионы  $HCO_3^-$ , процессы ингибирования и пептизации глины идут одновременно. Вид преобладающего процесса зависит, соответственно, от концентрации угольной кислоты и растворенных бикарбонат-ионов, находящихся в воде в равновесии с другими катионами, отличными от  $H^+$ . Следовательно, при повышении pH системы количество растворенных бикарбонат-ионов будет увеличиваться и это будет приводить к пептизации глины.

Таким образом, взаимодействие между глинистыми частицами в присутствии  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$  при полном отсутствии ионов  $Ca^{2+}$  в дисперсионной среде бурового раствора будет идти в соответствии со схемой, представленной на рис. 2.



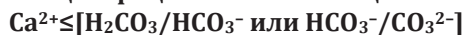
**Fig. 1.** Dynamics of change in the height of a clay sample when it is in waters, containing various forms of carbonic acid, without  $\text{Ca}^{2+}$  ions  
**Fig. 1.** Curves of changes in a clay sample height when it is in waters, containing various forms of carbonic acid, without  $\text{Ca}^{2+}$  ions



**ионы обменного комплекса глины (красного цвета) / ions of clay exchange complex (red)**  
**ионы дисперсионной среды (черного цвета) / ions of dispersion medium (black)**

**Fig. 2.** Scheme of interaction of clay particles in the presence of  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (left),  $\text{HCO}_3^-$  (in the center) and  $\text{CO}_3^{2-}$  (right) without  $\text{Ca}^{2+}$  ions in the dispersion medium  
**Fig. 2.** Representation of interaction of clay particles in the presence of  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (left),  $\text{HCO}_3^-$  (in the center) and  $\text{CO}_3^{2-}$  (right) without  $\text{Ca}^{2+}$  ions in the dispersion medium

**Влияние на глину вод, содержащих угольную кислоту, бикарбонатные или карбонатные ионы, с низкой эквивалентной концентрацией ионов кальция:**

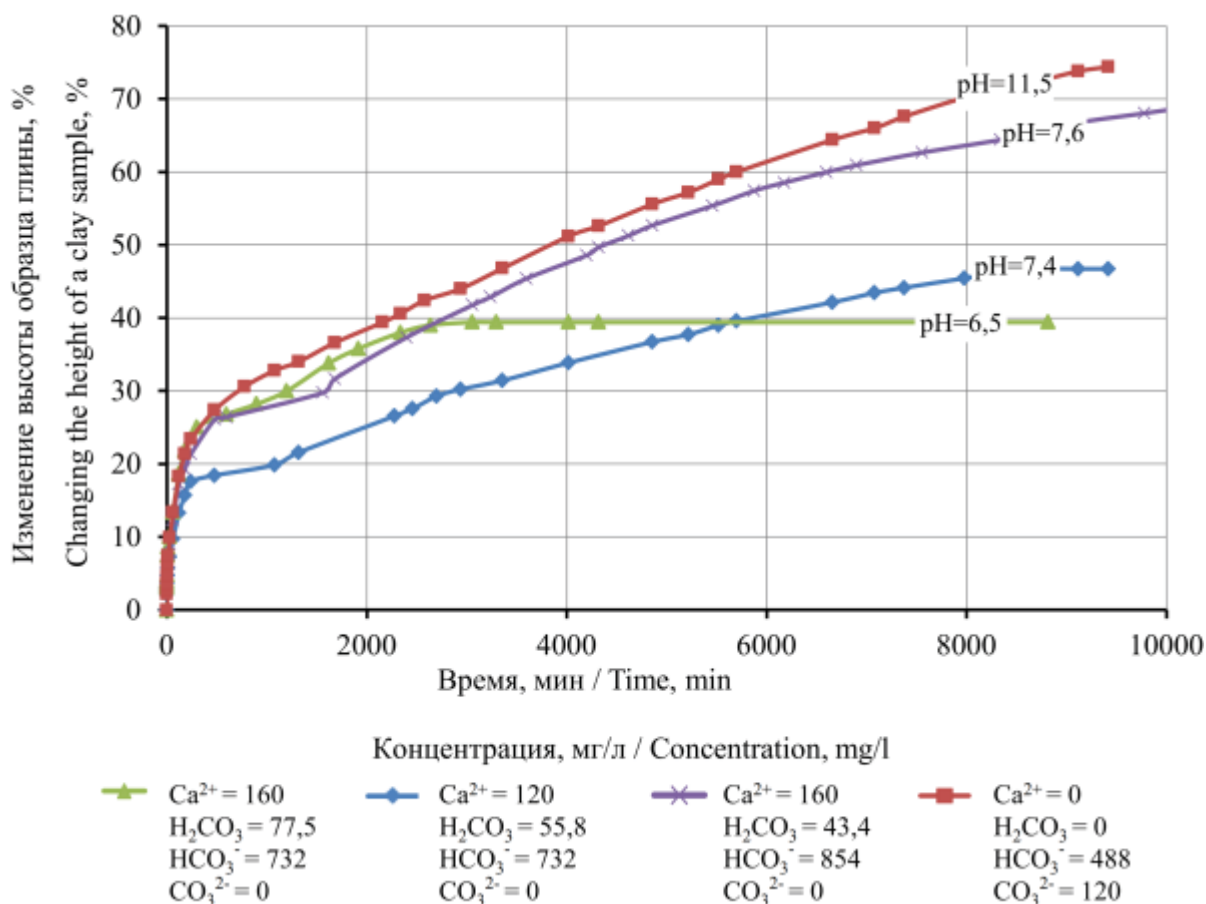


Из графических зависимостей, иллюстрирующих динамику набухания глинистого образца в водах, содержащих ионы  $Ca^{2+}$ , эквивалентная концентрация которых меньше концентрации угольной кислоты, бикарбонатов и карбонатов, видно, что в присутствии двухвалентных катионов возможно прогрессирующее набухание глины.

Сравнение кривых набухания глины при нахождении ее в образцах вод с одинаковым содержанием ионов  $Ca^{2+}$  (160 мг/л) показывает, что процесс набухания глины в лучшей степени подавляется в воде, содержащей больше угольной кислоты (77,5 против 43,4 мг/л) и меньше бикарбонат-ионов (732 против 854 мг/л). При нахождении глины в водах с разным содержанием ионов  $Ca^{2+}$  (120 и 160 мг/л) менее интенсивно идет ее пептизация в

воде с большим содержанием угольной кислоты (55,8 против 43,4 мг/л) и с меньшим содержанием бикарбонат-ионов (732 против 854 мг/л), несмотря на то, что содержание двухвалентных ионов  $Ca^{2+}$  в этой воде меньше. Следовательно, ингибирующая способность водной фазы в присутствии ионов  $Ca^{2+}$  в большей степени определяется не концентрацией двухвалентного катиона, а формой угольной кислоты и ее концентрацией: угольная кислота подавляет набухание глины; бикарбонат-ионы, наоборот, способствуют пептизации глины. С появлением в воде карбонат-ионов  $CO_3^{2-}$  прекращается процесс возможного перехода бикарбонат-ионов  $HCO_3^-$  в угольную кислоту  $H_2CO_3$ , а также связываются ионы  $Ca^{2+}$ , что в целом улучшает набухание глины.

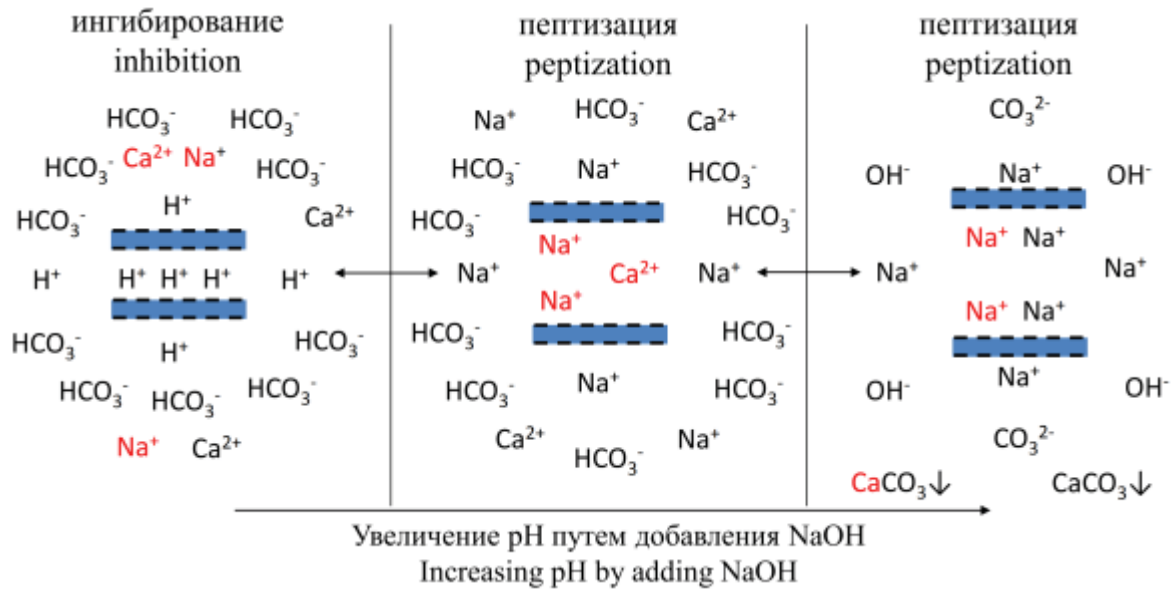
Схема взаимодействия между глинистыми частицами при низкой концентрации в дисперсионной среде ионов  $Ca^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$  представлена на рис. 4.



**Рис. 3.** Динамика изменения высоты образца глины при нахождении ее в водах, в которых эквивалентная концентрация ионов  $Ca^{2+}$  меньше концентрации угольной кислоты, бикарбонатов и карбонатов

**Fig. 3.** Curves of changes in a clay sample height in waters, where the equivalent concentration of  $Ca^{2+}$  ions is less than the concentration of carbonic acid, bicarbonates and carbonates





ионы обменного комплекса глины (красного цвета) / ions of clay exchange complex (red)  
 ионы дисперсионной среды (черного цвета) / ions of dispersion medium (black)

**Рис. 4.** Схема взаимодействия глинистых частиц при низкой концентрации в дисперсионной среде ионов  $\text{Ca}^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (слева),  $\text{HCO}_3^-$  (в центре) и  $\text{CO}_3^{2-}$  (справа)  
**Fig. 4.** Representation of interaction of clay particles at low concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  ions in a dispersion medium relative to the equivalent content of  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (left),  $\text{HCO}_3^-$  (in the center) and  $\text{CO}_3^{2-}$  (right)

**Влияние на глину вод, содержащих угольную кислоту, бикарбонатные или карбонатные ионы, с высокой эквивалентной концентрацией ионов кальция:  $\text{Ca}^{2+} > [\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^- \text{ или } \text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}]$**

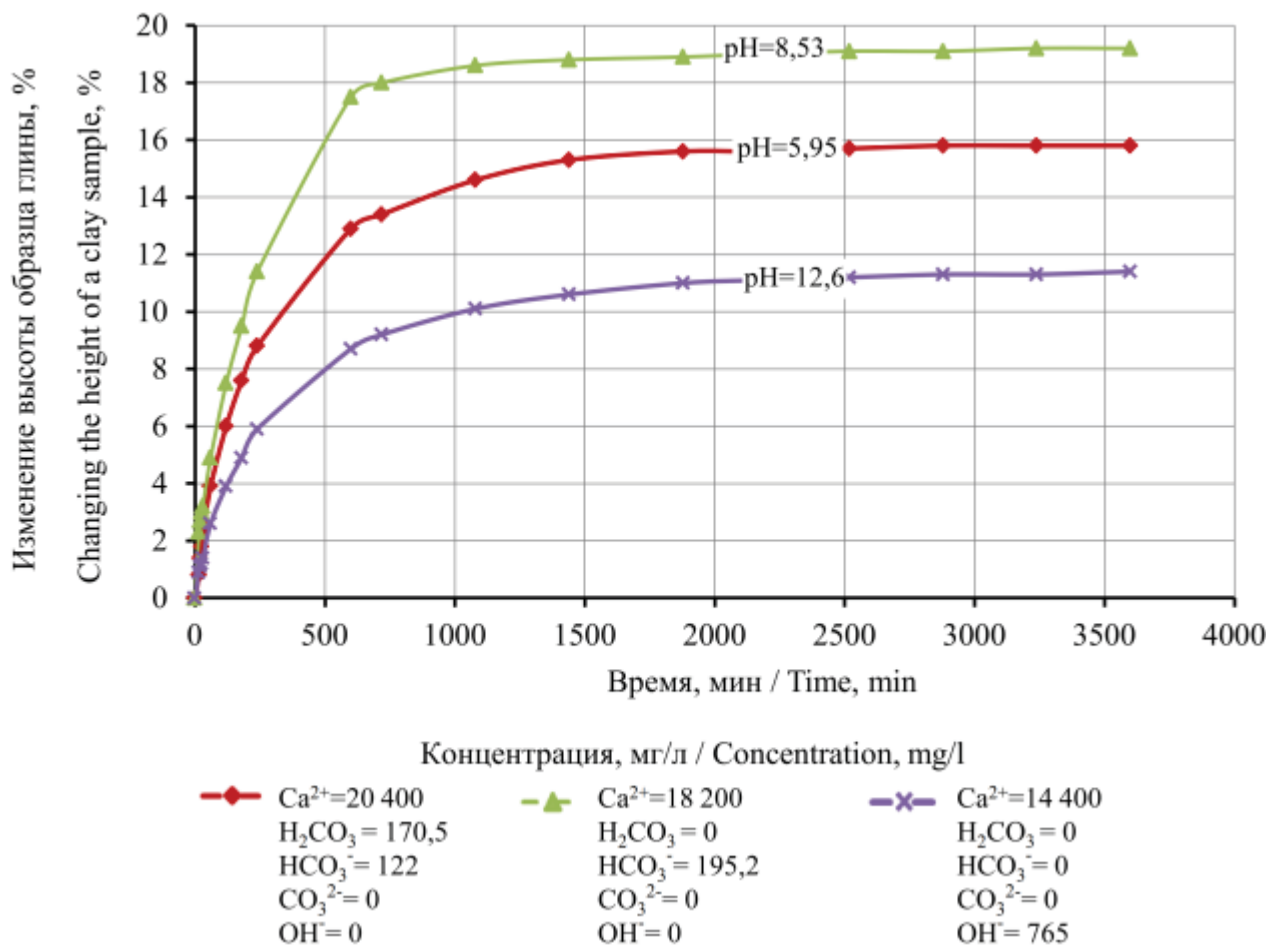
Исследования по ингибирующей способности высокоминерализованной пластовой воды, в которой эквивалентная концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  выше концентрации угольной кислоты, бикарбонат- и карбонат-ионов, показали, что процент набухания глинистых образцов намного меньше, чем в предыдущих двух случаях, и на кривых набухания имеются плато (рис. 5). Прежде всего, это связано с высоким содержанием электролитов в воде, которые препятствуют увеличению ДЭС и предотвращают пептизацию глины. Но при этом из рис. 5 видно, что в зависимости от pH и преобладающей формы угольной кислоты существует разница в степени набухания глины.

В исходной пластовой воде с  $\text{pH}=5,95$ , в которой содержатся угольная кислота (170,5 мг/л) и бикарбонат-ионы (122 мг/л), степень набухания глины достигает 16 %; после повышения pH до 8,53 ингибирующие свойства воды ухудшаются – степень набухания глины составляет около 19 %. Это объясняется тем, что в исходной пластовой воде параллельно с пептизирующими бикарбонат-ионами  $\text{HCO}_3^-$  содержатся ионы водорода  $\text{H}^+$  угольной кислоты, которые ингибируют глину; при повышении pH содержание бикарбонат-ионов

$\text{HCO}_3^-$  увеличивается и исчезают ингибирующие ионы  $\text{H}^+$ , вследствие чего глина набухает лучше. Таким образом, ионы  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии бикарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$  не способны предотвратить набухание глины. Этот вывод хорошо согласуется с результатами исследований, проведенных канадскими учеными [20], которые фиксировали увеличение  $\xi$ -потенциала в кальцийсодержащей суспензии каолинита при добавлении к ней бикарбоната натрия  $\text{NaHCO}_3$ .

Снижение концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  по мере повышения pH обусловлено образованием гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с последующим взаимодействием его с карбонат-ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ , в которые переходят бикарбонаты  $\text{HCO}_3^-$  при добавлении щелочи (табл. 1). По этой же причине уже при  $\text{pH}=12,6$  карбонат-ионы  $\text{CO}_3^{2-}$  отсутствуют и появляются свободные гидроксильные ионы  $\text{OH}^-$ .

Сравнивая содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в воде с  $\text{pH}=8,53$  и  $\text{pH}=12,6$ , видно, что концентрация двухвалентных ионов во втором случае меньше, при этом ингибирующие свойства системы намного лучше. Отсюда следует, что ионы  $\text{Ca}^{2+}$  обладают ингибирующим действием только в присутствии гидроксид-ионов или при отсутствии всех трех форм угольной кислоты. Также мы можем утверждать, что в присутствии гидроксид-ионов и в отсутствии всех трех форм угольной кислоты ионы  $\text{Ca}^{2+}$  обладают лучшей ингибирующей способностью, чем ионы  $\text{H}^+$  угольной кислоты.



**Рис. 5.** Динамика изменения высоты образца глины при нахождении ее в высокоминерализованных пластовых водах, в которых эквивалентная концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  выше концентрации угольной кислоты, бикарбонатов и карбонатов

**Fig. 5.** Curves of changes in a clay sample height in waters, where the equivalent concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  ions is higher than the concentration of carbonic acid, bicarbonates and carbonates

При добавлении щелочи  $\text{NaOH}$  к воде с высоким содержанием ионов  $\text{Ca}^{2+}$  образуется малорастворимый гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . На сегодняшний день нет общепринятой теории, объясняющей взаимодействие  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с поверхностью глинистых минералов, в том числе монтмориллонита. Но при этом многие исследователи отмечают, что вместе с ионами  $\text{Ca}^{2+}$  идет адсорбция гидроксильных ионов  $\text{OH}^-$  и расход  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  превышает обменную емкость глин [21, 22]. Некоторые зарубежные исследователи предполагают, что в межслоевое пространство глинистых частиц встраивается не ион  $\text{Ca}^{2+}$ , а идет специфическая адсорбция гидролизированных ионов  $(\text{CaOH})^+$  [23–25]. Такой вывод ими был сделан по количеству адсорбированных ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$  на поверхности глины, а также на основании результатов измерения  $\zeta$ -потенциала глинистых суспензий, содержащих  $\text{Ca}^{2+}$  – при изменении водородного показателя с увеличением pH наблюдалось падение электроки-

нетического потенциала и при  $\text{pH} > 10$  происходило изменение его знака. Ученые это объясняют тем, что из-за сильных электростатических взаимодействий положительно заряженные ионы  $(\text{CaOH})^+$  втягиваются в адсорбционный слой в таком количестве, что не только нейтрализуют отрицательный заряд поверхности дисперсной фазы, но и перезаряжают ее частицы. Однако специфическая адсорбция гидролизированных ионов  $(\text{CaOH})^+$  была обнаружена исследователями на каолиновой глине, имеющей структуру 1:1 (октаэдр:тетраэдр); адсорбция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  на монтмориллонитовой глине со структурой 2:1 (тетраэдр:октаэдр:тетраэдр) изучалась в присутствии  $\text{KNO}_3$ , поэтому выводы, сделанные авторами о возможной специфической адсорбции гидролизированных ионов  $(\text{CaOH})^+$  на данном типе глины, могут быть не совсем корректны.

Другие исследователи при изучении взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с гидрослюдистой глиной, имеющей структуру 2:1, пришли к выводу, что гидратиро-

ванный шестью молекулами воды ион  $\text{Ca}^{2+}$  адсорбируется на кремнекислородной решетке через две молекулы воды, которые протонируют атомы кислорода; протоны  $\text{H}^+$  впоследствии вытесняются с атомов кислорода ионом  $\text{Ca}^{2+}$ , нейтрализуя два иона  $\text{OH}^-$  [26]. Данные исследования проводились в отсутствие каких-либо посторонних веществ, поэтому сделанные выводы авторами о механизме взаимодействия  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с глиной, имеющей структуру 2:1, нами приняты как механизм ингибирования набухания монтмориллонитовой глины гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

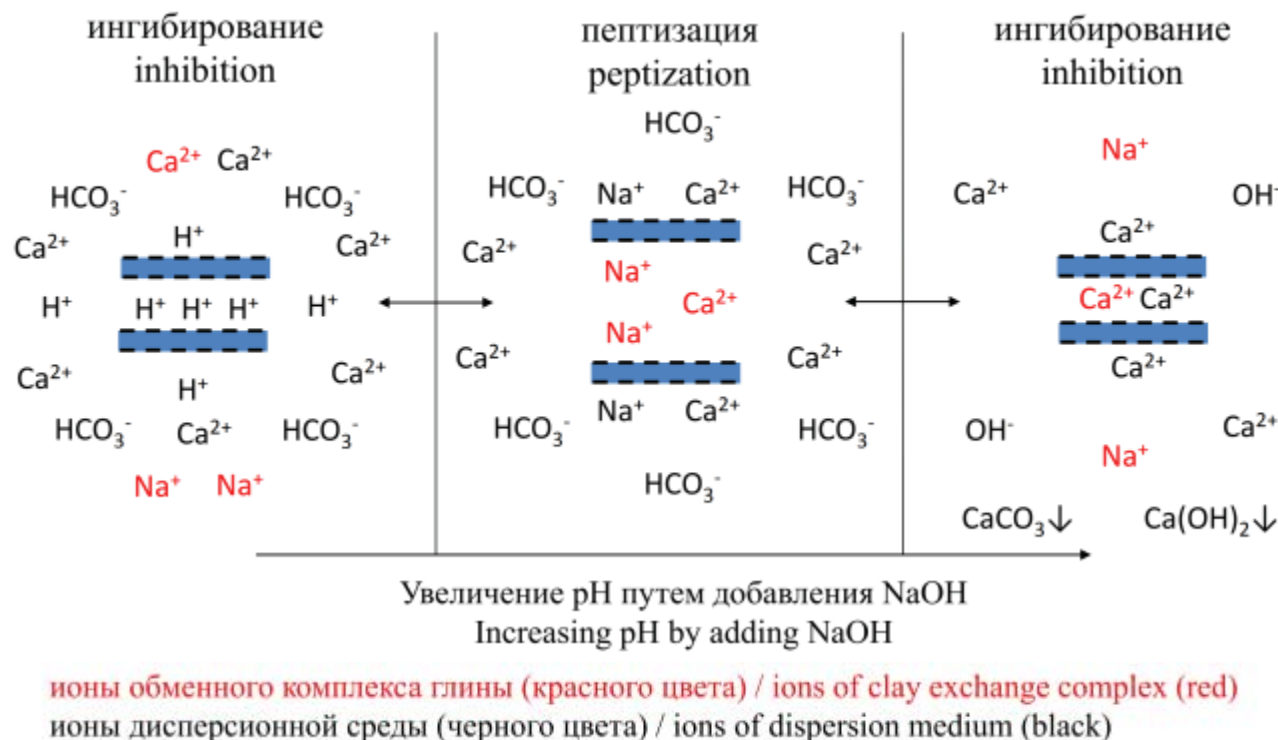
Таким образом, при высокой концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $\text{H}_2\text{CO}_3$  или  $\text{HCO}_3^-$ , или  $\text{CO}_3^{2-}$  взаимодействие между глинистыми частицами при каждой форме угольной кислоты следующее:

- ионы  $\text{H}^+$  угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ингибируют глину, вытесняя при этом из межслоевого пространства обменные катионы;
- бикарбонат-ионы  $\text{HCO}_3^-$  способствуют пептизации глины – оттягивая с ее поверхности обменные катионы, в том числе ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , они увеличивают толщину ДЭС;
- при повышении pH бикарбонат-ионы переходят в карбонат-ионы, а поскольку эквивалентная концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  больше концентрации

карбонат-ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ , часть образующегося гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  взаимодействует с карбонат-ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ , полностью нейтрализуя их, с образованием водонерастворимого осадка  $\text{CaCO}_3$ ; оставшаяся часть гидроксида кальция ингибирует глину за счет встраивания в межслоевое пространство ионов  $\text{Ca}^{2+}$  через предварительное протонирование атомов кислорода кремнекислородной решетки двумя молекулами воды из шести, изначально гидратирующих ион  $\text{Ca}^{2+}$ .

Схема взаимодействий между глинистыми частицами при *высокой* концентрации в дисперсионной среде ионов  $\text{Ca}^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  представлена на рис. 6.

Проведенный анализ исследований взаимодействия глинистых частиц друг с другом в условиях уголекислой, бикарбонатной и карбонатной агрессии позволяет нам сформулировать следующие условия для пептизации глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] \geq 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $\text{Ca}^{2+} = 0$ ,  $\text{pH} > 11,5$ ; для ингибирования глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] > 0$  и  $\text{pH} > 11,5$ . Поэтому в зависимости от преследуемой цели выбор средств обработки ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) должен сводиться к тому, чтобы эти условия были получены.



**Рис. 6.** Схема взаимодействия глинистых частиц при высокой концентрации в дисперсионной среде ионов  $\text{Ca}^{2+}$  относительно эквивалентного содержания  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (слева),  $\text{HCO}_3^-$  (в центре) и  $\text{CO}_3^{2-}$  (справа)

**Fig. 6.** Representation of interaction of clay particles at a high concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  ions in a dispersion medium relative to the equivalent content of  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (left),  $\text{HCO}_3^-$  (in the center) and  $\text{CO}_3^{2-}$  (right)

## Выводы

1. Пептизирующие и ингибирующие свойства буровой промывочной жидкости значительно зависят от присутствующей в дисперсионной среде формы угольной кислоты: угольная кислота  $\text{H}_2\text{CO}_3$  способствует ингибированию набухания (коагуляции) глины, бикарбонат-ионы  $\text{HCO}_3^-$  и карбонат-ионы  $\text{CO}_3^{2-}$  – пептизации глины.
2. Установлено, что ион  $\text{Ca}^{2+}$  не обладает ингибирующим действием в присутствии угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  – ионы  $\text{H}^+$  вытесняют обменные катионы из межслоевого пространства глин и за счет малого диаметра самостоятельно ингибируют набухание глины; ион  $\text{Ca}^{2+}$  не обладает ингибирующим действием в присутствии бикарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$  – бикарбонатные ионы, находясь в дисперсионной среде, оттягивают его от поверхности глины, увеличивая толщину ДЭС; ион  $\text{Ca}^{2+}$  выпадает в осадок при наличии карбонат-ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  и эффективно предотвращает пептизацию глин только в присутствии гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$  или при отсутствии всех трех форм угольной кислоты.
3. Выявлено, что ион  $\text{Ca}^{2+}$  в присутствии гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$  обладает лучшей ингибирующей способностью, чем ион  $\text{H}^+$  диссоциированной угольной кислоты.
4. Сформулированы условия, необходимые для эффективной пептизации глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] \geq 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] = 0$ ,  $\text{pH} > 11,5$ ; для ингибирования глины:  $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ ;  $[\text{OH}^-] > 0$ ,  $[\text{Ca}^{2+}] > 0$  и  $\text{pH} > 11,5$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Selection of drilling fluid system for wells with high  $\text{CO}_2$  content in Song Hong basin / Н.Н. Ngo, Т.Т. Nguyen, Т.В. Nguyen, V.T. Truong // Petrovietnam Journal. – 2022. – Vol. 5. – P. 10–18. DOI: 10.47800/PVJ.2022.05-02.
2. Вязниковцев С.Ф., Мамаева О.Г., Чуктуров Г.К. Изучение поведения в пристволенной зоне скважины продуктов ферментативной деструкции полисахаридных реагентов // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2021. – № 3. – С. 44–47.
3. Рассказов Н.М. Основные особенности химического состава болотных вод (на примере Юго-Восточной части Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 55–58.
4. Буровые растворы на основе морской воды для бурения скважин на шельфе Вьетнама / Б.М. Стешин, Н.В. Ты, Г.И. Аникеенко, А.В. Овчаренко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 11. – С. 25–28.
5. Термостойкий биополимерный буровой раствор: пат. Рос. Федерация, № 2711222, заявл. 15.11.2018; опубл. 15.01.2020. Бюл. № 2. – 5 с.
6. Исследование биополимерных буровых растворов на основе высокоминерализованных пластовых вод Восточной Сибири / Н.А. Буглов, Е.В. Аверкина, А.О. Устюжанин, А.С. Красинская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 210–218. DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3116.
7. Ланина Т.Д. Использование пластовых вод в качестве технологической жидкости для приготовления буровых растворов и консервации скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2007. – № 12. – С. 29–32.
8. Rezaei A., Shadizadeh S.R. State-of-the-art drilling fluid made of produced formation water for prevention of clay swelling: experimental investigation // Chemical Engineering Research and Design. – 2021. – Vol. 170. – № 6. – P. 350–365. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.04.012.
9. Ахметзянов Р.Р., Таланов И.А. Моделирование влияния пластовой воды на вязкостные свойства полимерных реагентов для буровых растворов // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 1. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-1-54-57.
10. Аверкина Е.В., Шакирова Э.В. Особенности приготовления буровых растворов на основе пластовой воды Знаменского месторождения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 120. – № 4. – С. 38–46. DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-38-46.
11. Скоков В.В. Генезис и химический состав рассолов Астраханского газоконденсатного месторождения, факторы возникновения и методы борьбы с рапопроявлением // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 44–49.
12. Dickson A.G. The carbon dioxide system in seawater: Equilibrium chemistry and measurements // Article. January 2010. URL: <https://www.researchgate.net/publication/284774361> (дата обращения 15.07.2022).
13. Левченко Д.Н., Бергштейн Н.В., Николаева Н.М. Технология обессоливания нефтей на нефтеперерабатывающих предприятиях. – М.: Химия, 1985. – 168 с.
14. Chemistry of carbonic acid in water // Technical Documents in Hydrology. 2000. URL: [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global\\_cycle/vol%20I/cht\\_i\\_09.pdf](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global_cycle/vol%20I/cht_i_09.pdf) (дата обращения 01.05.2023)
15. Effects in the solubility of  $\text{CaCO}_3$ : Experimental study and model description / B. Cotoa, C. Martos, J.L. Pena, R. Rodríguez, G. Pastor // Fluid Phase Equilibria. – 2012. – Vol. 324. – P. 1–7.
16. Баранов Д.А., Набиев Т.М., Мамаева О.Г. Влияние углекислой/бикарбонатной/ карбонатной агрессии на пептизацию и ингибирование глин // Материалы 47-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием. – Октябрьский, 24 апреля 2020. – Октябрьский: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – С. 35–38.
17. ЦВ 1.01.17-2004. Качество воды. Методика выполнения измерений содержания свободной углекислоты в пробах питьевых и природных вод. Титриметрический метод. – СПб, 2005. – 10 с.
18. ГОСТ 33213–2014 (ISO 10414–1:2008). Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе. – М.: Стандартинформ, 2015. – 75 с.

19. Israelachvili J.N. Interactions involving polar molecules // *Intermolecular and Surface Forces*. – Elsevier Inc., 2011. – P. 71–90. DOI: 10.1016/B978-0-12-375182-9.10004-1.
20. Role of bicarbonate ions in oil sands extraction systems with a poor processing ore / H. Zhao, T. Dang-Vu, J. Long, Zh. Xu, J.H. Masliyah // *Journal of Dispersion Science and Technology*. – 2009. – Vol. 30. – № 6. – P. 809–822. DOI: 10.1080/01932690802643980.
21. Diamond S., Kinter E.B. Mechanisms of soil-lime stabilization // *Highway Research Record*. – 1965. – Iss. 92. – P. 83–102.
22. Diamond S., Kinter E.B. Adsorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1966. – Vol. 22. – Iss. 3. – P. 240–249.
23. Mpfu P., Addai-Mensah J., Ralston J. The influence of hydrolysable metal ions on the interfacial chemistry, particle interactions and dewatering behaviour of kaolinite dispersions // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2003. – Vol. 261. – № 2. – P. 349–359. DOI: 10.1016/s0021-9797(03)00113-9.
24. Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles / Y.C. Chemed, D. Deneele, G.E. Christidis, G. Ouvrard // *Applied Clay Science*. – 2015. – Vol. 107. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.clay.2015.01.019.
25. Mpfu P., Addai-Mensah J., Ralston J. Interfacial chemistry, particle interactions and improved dewatering behaviour of smectite clay dispersions // *International Journal of Mineral Processing*. – 2005. – Vol. 75. – № (3–4). – P. 155–171. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.01.008.
26. Surface properties of kaolin and illite suspensions in concentrated calcium hydroxide medium / K.L. Konan, C. Peyratout, J.P. Bonnet, A. Smith, A. Jacquet, P. Magnoux, P. Ayrault // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 307. – Iss. 1. – P. 101–108.

### Информация об авторах

**Дмитрий Александрович Баранов**, магистрант кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета. Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. [www-diman777@mail.ru](mailto:www-diman777@mail.ru)

**Сергей Федорович Вязниковцев**, научный сотрудник кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65. [kontakt-sintez@yandex.ru](mailto:kontakt-sintez@yandex.ru)

**Оксана Георгиевна Мамаева**, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета. Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1. [oxana.mamaeva2013@yandex.ru](mailto:oxana.mamaeva2013@yandex.ru)

Поступила в редакцию: 19.07.2023

Прошла рецензирование: 22.05.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

### REFERENCES

1. Ngo H.H., Nguyen T.T., Nguyen T.V., Truong V.T. Selection of drilling fluid system for wells with high CO<sub>2</sub> content in Song Hong basin. *Petrovietnam Journal*, 2022, vol. 5, pp. 10–18. DOI: 10.47800/PVJ.2022.05-02
2. Vyaznikovtsev S.F., Mamaeva O.G., Chukurov G.K. Study of the behavior of products of enzymative destruction of polysaccharide reagents in the near-wellbore zone. *Bulletin of The Association Of Drilling Contractors*, 2021, no. 3, pp. 44–47. (In Russ.)
3. Rasskazov N.M. Basic features of chemical composition of swamp waters (on the example of the South-Eastern part of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 55–58. (In Russ.)
4. Steshin B.M., Ty N.V., Anikeenko G.I., Ovcharenko A. V. Seawater based drilling fluids for offshore drilling in Vietnam. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2006, no. 11, pp. 25–28. (In Russ.)
5. Ishbaev G.G., Milejko A.A., Ishbaev R.R., Petrov D.V., Mamaeva O.G., Mirsayapova R.M. *Heat-resistant biopolymer drilling fluid*. Patent RF, no. 2711222, 2022. (In Russ.)
6. Buglov N.A., Averkina E.V., Ustyuzhanin A.O., Krasinskaya A.S. Research of biopolymer drilling fluids based on highly mineralized reservoir waters of Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 210–218. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3116.
7. Lanina T.D. The use of reservoir water as a process fluid for the preparation of drilling fluids and conservation of wells. *Construction of oil and gas wells on land and sea*, 2007, no. 12, pp. 29–32. (In Russ.)
8. Rezaei A., Shadizadeh S.R. State-of-the-art drilling fluid made of produced formation water for prevention of clay swelling: experimental investigation. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, vol. 170, no. 6, pp. 350–365. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.04.012.
9. Akhmetzyanov R.R., Talanov I.A. Modeling the effect of formation water on the viscosity properties of polymer reagents for drilling fluids. *Oil Industry Journal*, 2022, vol. 2022, Iss. 01, pp. 54–57. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2022-1-54-57.
10. Averkina E.V., Shakirova E.V. Peculiarities of borehole mud preparation on the basis of formation water of Znamenskoye oil field. *Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products*, 2019, vol. 120, no. 4, pp. 38–46. (In Russ.) DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-38-46.
11. Skokov V.V. Genesis and chemical composition of brines at Astrakhan GCF, origin factors and methods of controlling brine manifestation. *News of higher educational institutions. Mining magazine*, 2017, no. 2, pp. 44–49. (In Russ.)
12. Dickson A.G. *The carbon dioxide system in seawater: Equilibrium chemistry and measurements*. Article. January 2010. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/284774361> (accessed 15 July 2022).

13. Levchenko D.N., Bergshtein N.V., Nikolaeva N.M. *Technology of oil desalination at oil refineries*. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 168 p. (In Russ.)
14. Chemistry of carbonic acid in water. *Technical Documents in Hydrology*. 2000. Available at: [http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global\\_cycle/vol%20I/cht\\_i\\_09.pdf](http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/global_cycle/vol%20I/cht_i_09.pdf) (accessed 1 May 2023).
15. Cotoa B., Martos C., Pena J.L., Rodríguez R., Pastor G. Effects in the solubility of CaCO<sub>3</sub>: experimental study and model description. *Fluid Phase Equilibria*, 2012, vol. 324, pp.1–7.
16. Baranov D.A., Nabiev T.M., Mamaeva O.G. Influence of carbon dioxide/bicarbonate/carbonate aggression on peptization and inhibition of clay. *Materials of the 47th All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students with International Participation*. Oktyabrsky, April 24, 2020. Oktyabrsky, Ufa State Oil Technical University Publ., 2020. pp. 35–38. (In Russ.)
17. *CV 1.01.17-2004. Water quality. Methodology for measuring the content of free carbon dioxide in samples of drinking and natural waters. Titrimetric method*. St. Petersburg, 2005. 10 p. (In Russ.)
18. *State Standard 33213-2014 (ISO 10414-1: 2008). Control of drilling fluid parameters in field conditions. Water based solutions*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 75 p. (In Russ.)
19. Israelachvili J.N. Interactions involving polar molecules. *Intermolecular and Surface Forces*. Elsevier Inc. Publ., 2011. pp. 71–90. DOI: 10.1016/B978-0-12-375182-9.10004-1.
20. Zhao H., Dang-Vu T., Long J., Xu Zh., Masliyah J.H. Role of bicarbonate ions in oil sands extraction systems with a poor processing ore. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2009, vol. 30, no. 6, pp. 809–822. DOI: 10.1080/01932690802643980.
21. Diamond S., Kinter E.B. Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway Research Record*, 1965, Iss. 92, pp. 83–102.
22. Diamond S., Kinter E.B. Adsorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1966, vol. 22, Iss. 3, pp. 240–249.
23. Mpofo P., Addai-Mensah J., Ralston J. The influence of hydrolysable metal ions on the interfacial chemistry, particle interactions and dewatering behaviour of kaolinite dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 261, no. 2, pp. 349–359. DOI: 10.1016/s0021-9797(03)00113-9.
24. Chemedi Y.C., Deneele D., Christidis G.E., Ouvrard G. Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 107, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.clay.2015.01.019.
25. Mpofo P., Addai-Mensah J., Ralston J. Interfacial chemistry, particle interactions and improved dewatering behaviour of smectite clay dispersions. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, vol. 75, no. (3–4), pp. 155–171. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.01.008.
26. Konan K.L., Peyratout C., Bonnet J.P., Smith A., Jacquet A., Magnoux P., Ayrault P. Surface properties of kaolin and illite suspensions in concentrated calcium hydroxide medium. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 307, Iss. 1, pp. 101–108.

#### Information about the authors

**Dmitriy A. Baranov**, Master's Student, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. [www-diman777@mail.ru](mailto:www-diman777@mail.ru)

**Sergey F. Vyaznikovtsev**, Researcher, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. [kontakt-sintez@yandex.ru](mailto:kontakt-sintez@yandex.ru)

**Oksana G. Mamaeva**, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russian Federation. [oxana.mamaeva2013@yandex.ru](mailto:oxana.mamaeva2013@yandex.ru)

Received: 19.07.2023

Revised: 22.05.2023

Accepted: 25.01.2024

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Корректурa и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 27.02.2024. Дата выхода журнала: 29.02.2024.  
Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 28,61. Уч.-изд. л. 25,88.  
Заказ 57-24. Тираж 500 экз. Цена свободная.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.

