

ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

12+

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том  
Vol. 44 № 1 2021

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

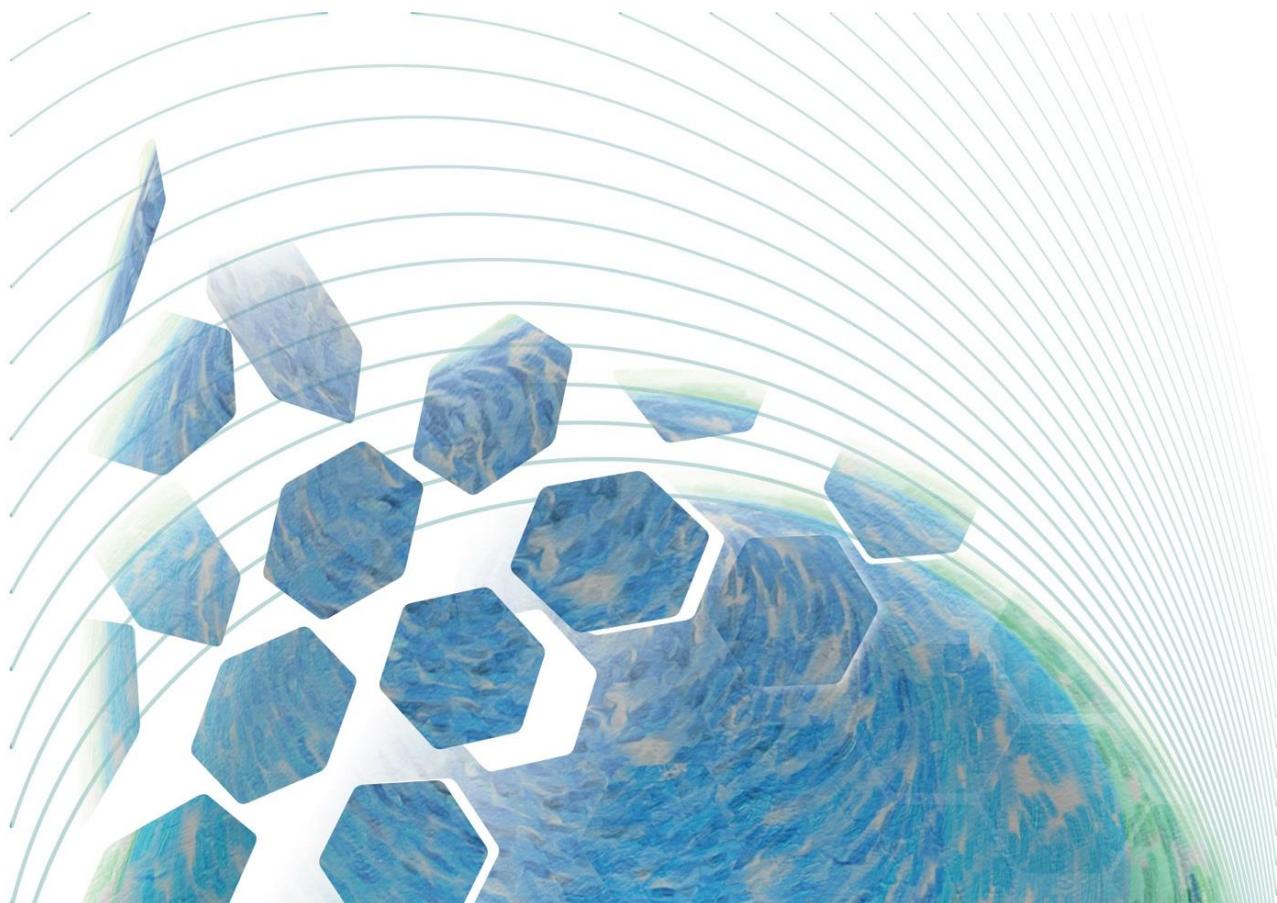
ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 44 № 1 2021  
Vol. 44 № 1 2021

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE  
I NEDROPOL'ZOVANIE



## Редакционный совет

**Кузьмин М.И.**, академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Гладкоуб Д.П.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Скляров Е.В.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Гордиенко И.В.**, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)  
**Корольков А.Т.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)  
**Макаров В.А.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)  
**Очир Гэрэл**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)  
**Тальгамер Б.Л.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Ши Гуаньхай**, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)  
**Чжао Цзюньмэн**, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)  
**Чжан Юнчжань**, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)  
**Шигин А.О.**, д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)  
**Семинский К.Ж.**, д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**Корняков М.В.**, д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Тимофеева С.С.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Зелинская Е.В.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Морин А.С.**, д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

## Председатель редакционного совета:

**Семинский Ж.В.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

## Редакционная коллегия

### Главный редактор:

**Лобацкая Р.М.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

### Заместители главного редактора:

**Аузина Л.И.**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)  
**Красноштанов С.Ю.**, канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

### Ответственный секретарь:

**Храмовских В.А.**, канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAII, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог Прессы России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору в сфере  
связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации журнала:  
ПИ № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2021

## Editorial Council

**Kuzmin M.I.**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geochemistry, SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**Gladkochub D.P.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**Sklyarov E.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**Gordienko I.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)  
**Korolkov A.T.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)  
**Makarov V.A.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)  
**Ochir Gerel**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)  
**Talgamer B.L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**Shi Guanghai**, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)  
**Zhao Junmeng**, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)  
**Zhang Yongzhan**, Professor, Nanjing University (Nanjing, China)  
**Shigin A.O.**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)  
**Seminsky K.Zh.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**Konyakov M.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**Timofeeva S.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**Zelinskaya E.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**Morin A.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

## Chairman of the Editorial Council

**Seminsky Zh.V.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

**Lobatskaya R.M.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### Deputy Editors-in-Chief

**Auzina L.I.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Krasnoshtanov S.Yu.**, Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### Executive secretary

**Khramovskikh V.A.**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAII (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

Periodicity: 4 times a year

Founder:  
Federal State Budget Educational  
Institution of Higher Education  
'Irkutsk National Research Technical University'

The journal is registered  
by the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media (Roskomnadzor)

Journal Registration Certificate  
PI no. FS77-76110 of June 24, 2019

Editorial Office Address: Federal State Budget  
Educational Institution of Higher Education  
'Irkutsk National Research Technical University',  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

© Federal State Budget Educational  
Institution of Higher Education  
'Irkutsk National Research  
Technical University', 2021



## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	4
Колонка главного редактора.....	6

### Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

Чжао Цзюньмэн, Сяо Вэнъцяо, Чэн Синьфа, Ван Сяоцзюнь, Сун Юн, Бянь Баоли, Чжан Сянъкан, Стрельченко И.П., Сюй Цян, Чжан Хэн, Чжэн Инцай, Лю Хунбин, Нэупане Бхупати, Ма Чжунцзинь. Смешанный кристаллический фундамент Джунгарской котловины, выявленный методом широкоугольной сейсморазведки.....	8
Уренко Р.С., Вахромеев А.Г. Выделение органогенных построек осинского горизонта по данным 2D- и 3D-сейсморазведки в северо-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы.....	30
Радомский С.М., Радомская В.И. Структура поверхности высокопробного самородного золота Приамурья.....	39
Анисимова А.А. Геммологическое и минералого-петрографическое исследование серпентинитов Восточного Саяна.....	48

### Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых

Чебан А.Ю. Совершенствование конструкции и способа применения экскаваторов с сортировочными ковшами.....	56
--	----

### Геоэкология

Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ.....	63
--	----

### Гидрogeология и инженерная геология

Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири.....	73
---	----

К сведению авторов.....	85
-------------------------	----



## CONTENTS

Contents.....	5
Chief Editor's Column.....	7

### Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Zhao Junmeng, Xiao Wenjiao, Chen Xinf, Wang Xiaojun, Song Yong, Bian Baoli, Zhang Xiankang, Strelchenko I.P., Xu Qiang, Zhang Heng, Zheng Yingcai, Liu Hongbing, Neupane Bhupati, Ma Zongjin. Mixed crystalline basement of Junggar basin revealed by wide-angle seismic evidence.....	8
Urenko R.S., Vakhromeev A.G. Identification of Osinsky horizon organogenic structures by 2D and 3D seismic survey data in the north-eastern part of the Nepa-Botuoba anteclide.....	30
Radomskiy S.M., Radomskaya V.I. Surface structure of Amur region high grade native gold.....	39
Anisimova A.A. Gemological and mineralogical-petrographic study of the Eastern Sayan serpentinites.....	48

### Exploration and Development of Mineral Deposits

Cheban A.Yu. Improving design and application method of screening bucket excavators.....	56
--	----

### Geocology

Sharipov D.Sh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability.....	63
---	----

### Hydrogeology and Engineering Geology

Auzina L.I. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities.....	73
---	----

Information for the Authors.....	85
----------------------------------	----



## Дорогие коллеги, добрый день!



Перед Вами первый номер журнала, который мы подготовили в наступившем 2021 году. Ровно год мы с Вами прожили в непривычном ритме, навязанном нам пандемией. Она существенно изменила жизнь, скорректировала рабочие планы буквально каждого. Что-то оказалось в итоге вполне удачным, что-то потребовало коренной ломки. В соответствии с пока еще не отмененным форс-мажором живет и наш журнал. К концу минувшего года заметно снизилась публикационная активность наших постоянных авторов, но мы уже начали преодолевать эту кризисную ситуацию за счет свежих заявок и в июне планируем выйти как минимум на прежний уровень.

За прошедший 2020 год редакция предприняла немало организационно-технических шагов по укреплению качества публикуемых материалов, по привлечению новых, в том числе и зарубежных авторов. Мы продолжали работать над включением журнала в перечень Высшей аттестационной комиссии с обновленным названием, и наши усилия, несмотря на долгий карантин, увенчались успехом. Теперь уже не нужно больше указывать и прежнее, и новое название в ваших отчетных документах, поскольку в перечне ВАК значится наименование «Науки о Земле и недропользование». Мы поменяли сайт и на новую платформу перенесли архив прошлых номеров. Теперь любой из авторов может загружать свои статьи непосредственно с главной страницы журнала, следить за рейтингом своих статей, опубликованных ранее. Стало удобнее и быстрее знакомиться с содержанием как свежих, так и архивных номеров.

Мы по-прежнему публикуем статьи на русском и английском языках и предлагаем Вам воспользоваться возможностью представлять результаты ваших исследований на языке международного общения для того, чтобы с ними знакомился более широкий круг ваших зарубежных коллег. Это увеличит цитируемость ваших работ и вашу собственную известность в профессиональной научной среде. В свою очередь редакция журнала работает над повышением его качества, тщательно подбирая рецензентов и скрупулезно вычитывая присылаемые нам статьи. Мы постоянно обновляем состав рецензентов и будем благодарны за ваше желание участвовать в этом важнейшем публикационном процессе, быстро и доброжелательно рассмотрим ваши предложения. Квалифицированное научное редактирование поднимает престиж ученого и является одновременно наиболее эффективным путем к совершенствованию нашего журнала. Будем рады пройти его вместе с Вами, дорогие авторы.

**Лобацкая Раиса Моисеевна,  
главный редактор**



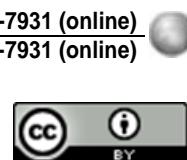
Dear colleagues,

We are glad to present you the first issue of the magazine prepared in 2021. A year has passed since all of us began to live in an unusual rhythm forced by the pandemic, which significantly changed our life and amended the working schedules of almost everyone. As a result some things turned out to be quite successful, others had to be annihilated. Our journal also lives in the conditions of still continuing force majeure. The publication activity of our regular contributors had noticeably dropped by the end of the previous year, but now we are beginning to overcome the crisis due to fresh applications, and expect to catch up with the same level in June.

The past 2020 was marked by quite a number of organizational and technical steps taken by the editorial board aimed at improving the quality of published materials and attracting of new contributors including foreign authors. We pursued our efforts on our journal to be included in the list of the Higher Attestation Commission with an updated title, and despite the lasting lockdown we succeeded. From now on you don't have to indicate both the old and the new title in your reporting documents, since the title "Earth sciences and subsoil use" has appeared in the list of the Higher Attestation Commission. We changed the site and transferred the archive of previous issues to the new platform. Now the authors can upload their articles directly from the main page of the journal and monitor the rating of their articles published earlier. Viewing the content of both fresh and archived issues has become more convenient and fast.

We continue to publish articles in the Russian and English languages and invite you to present your research results in the language of international communication in order to facilitate a wider range of your foreign colleagues to get acquainted with them. This way you will increase the citation index of your works as well as improve your own prominence in the professional scientific community. In our turn, the editorial board of the journal works on the improvement of journal's quality carefully selecting reviewers and scrupulously reading the articles submitted. The list of reviewers is constantly updated and we will be grateful if you volunteered to participate in this important publication process. Your suggestions will be given prompt and friendly consideration. Qualified scientific editing raises the prestige of a scientist at the same time it is the most effective way to improve our journal. Dear authors, we will be glad to make this journey together!

**Raisa Moiseevna Lobatskaya,  
The Editor-in-Chief**



Original article / Оригинальная статья

УДК 551.242

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-8-29>

## Mixed crystalline basement of Junggar basin revealed by wide-angle seismic evidence\*

© Junmeng Zhao<sup>a</sup>, Wenjiao Xiao<sup>b</sup>, Xinfu Chen<sup>c</sup>, Xiaojun Wang<sup>d</sup>, Yong Song<sup>e</sup>, Baoli Bian<sup>f</sup>, Xiankang Zhang<sup>g</sup>, Irina P. Strelchenko<sup>h</sup>, Qiang Xu<sup>i</sup>, Heng Zhang<sup>j</sup>, Yingcai Zheng<sup>k</sup>, Hongbing Liu<sup>l</sup>, Bhupati Neupane<sup>m</sup>, Zongjin Ma<sup>n</sup>

<sup>a,i,j,l</sup>Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>a,h,i,j,l,m</sup>Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>a,b,h,m</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>b</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>c,d,e,f</sup>Xinjiang Oilfield Company, Karamay, China

<sup>g</sup>Center for Geophysical Exploration, China Earthquake Administration, Zhengzhou, China

<sup>k</sup>Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States of America

<sup>n</sup>Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, China

<sup>h</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** A wide-angle seismic reflection / refraction survey along a ~ 600 km long transect through the Junggar basin from Emin to Qitai allows to receive several images near N-S trending blind faults, which are located at the lower part of the upper crust, the middle crust and the lower crust within the basin and cut up the Moho. These faults, with high seismic velocity and without obvious dislocation, are considered as "extensional faults" formed by north-south compression and east-west extension. These deeply rooted faults provide channels via which basic to ultra-basic materials from upper mantle migrate into the crust and mix up with the crustal material causing thin thickness, high seismic velocity, high density and high magnetic intensity after cooling in the crust of the basin.

**Keywords:** Junggar Basin, seismic wide-angle reflection / refraction profiling, velocity structure, density structure, magnetic intensity structure, geological interpretation

**Acknowledgements:** This research was jointly supported by "Major National Science and Technology Projects for the Development of Large Oil and Gas Fields and Coalbed Methane (2011ZX05003-005)", "National Science Foundation of China (41888101)", "Strategic Priority Research Program (A) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA20070302)", "Joint Research Projects between Pakistan Science Foundation and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41661144026)", and "Exploration and Research on Continental Subduction in Western Himalayan Syntaxis (Grant No. 41490611)". We are grateful to researchers in the Center for Geophysical Exploration CEA for their hard work in acquiring the wide-angle reflection/refraction data. We also thank Dr. Zhang Guoqing for the gravitational and geomagnetic data.

**For citation:** Zhao Junmeng, Xiao Wenjiao, Chen Xinfu, Wang Xiaojun, Song Yong, Bian Baoli, et al. Mixed crystalline basement of Junggar basin revealed by wide-angle seismic evidence. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):8-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-8-29>

\*The article was provided by the Earth Science Frontiers journal within the framework of the agreement between the editorial boards of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and China University of Geosciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific papers.



# Смешанный кристаллический фундамент Джунгарской котловины, выявленный методом широкоугольной сейсморазведки\*

© Цюньмэн Чжао<sup>a</sup>, Вэнъцяо Сяо<sup>b</sup>, Синьфа Чэн<sup>c</sup>, Сяоцюнь Ван<sup>d</sup>, Юн Сун<sup>e</sup>, Баоли Бянь<sup>f</sup>,  
Синькан Чжан<sup>g</sup>, И.П. Стрельченко<sup>h</sup>, Цян Сюй<sup>i</sup>, Хэн Чжан<sup>j</sup>, Инцай Чжэн<sup>k</sup>,  
Хунбин Лю<sup>l</sup>, Бхупати Неупане<sup>m</sup>, Чжунцзинь Ма<sup>n</sup>

<sup>a,i,j,l</sup> Центр передового опыта наук о Земле Тибетского плато, Китайская академия наук, г. Пекин, Китай

<sup>a,h,i,j,l,m</sup> Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук, г. Пекин, Китай

<sup>a,b,h,m</sup> Университет Китайской академии наук, г. Пекин, Китай

<sup>b</sup> Институт геологии и геофизики, Китайская академия наук, г. Пекин, Китай

<sup>c,d,e,f</sup> Синьцзянская нефтяная компания, г. Карамай, Китай

<sup>g</sup> Центр геофизических исследований Сейсмологического управления Китая, г. Чжэнчжоу, Китай

<sup>h</sup> Массачусетский технологический институт, г. Кембридж, Соединенные Штаты Америки

<sup>i</sup> Институт геологии Сейсмологического управления Китая, г. Пекин, Китай

<sup>h</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Широкоугольная сейсморазведка методом отраженных / преломленных волн вдоль линии поперечного разреза протяженностью ~ 600 км через Джунгарский бассейн от Эминя до Цитая позволяет получить изображение нескольких слепых разломов с простиранием с севера на юг, которые расположены в нижней части верхней коры, в средней и нижней частях коры в пределах бассейна и разрезают Мохо. Эти разломы, обладающие высокой сейсмической скоростью и не имеющие явной дислокации пластов, считаются «разломами растяжения», образованными сжатием с севера на юг и растяжением с востока на запад. Эти глубоко залегающие разломы обеспечивают каналы для основных и ультраосновных материалов из верхней мантии, которые мигрируют в кору и смешиваются с материалом коры, в результате чего кора бассейна становится тонкой и приобретает высокую сейсмическую скорость, высокую плотность и высокую магнитную интенсивность после охлаждения.

**Ключевые слова:** Джунгарский бассейн, широкоугольное профилирование методом отраженных / преломленных волн, структура скорости, структура плотности, структура магнитной напряженности, геологическая интерпретация

**Благодарности:** Это исследование выполнено при совместной поддержке программы «Крупные национальные научно-технические проекты по разработке крупных месторождений нефти и газа, а также метана угольных пластов (2011ZX05003-005)», Национального научного фонда Китая (41888101), грантов «Программа стратегических приоритетных исследований (А) Китайской академии наук (грант № XDA20070302)», «Совместные исследовательские проекты Пакистанского научного фонда и Национального фонда естественных наук Китая (грант № 41661144026)» и «Разведка и исследование континентальной субдукции в Западных Гималах (грант № 41490611)». Мы благодарим исследователей Центра геофизических исследований СЕА за их усердную работу по получению данных широкоугольного отражения / преломления. Мы также благодарим доктора Гоцин Чжан за предоставление гравитационных и геомагнитных данных.

**Для цитирования:** Чжао Цюньмэн, Сяо Вэнъцяо, Чэн Синьфа, Ван Сяоцюнь, Сун Юн, Бянь Баоли [и др.]. Смешанный кристаллический фундамент Джунгарской котловины, выявленный методом широкоугольной сейсморазведки. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 8–29. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-8-29>

## Introduction

The Junggar Basin is a large-scale intracontinental superimposed basin in northern Xinjiang since Permian [1–3]. It is the most promising area for petroleum prospects in China. In the past decades, the researches on the Junggar basin have given profound results dealing with the tectonic background and the evidence for

existing theories [4–7]. Although a lot of geo-physical and geological studies have been carried out since the 1980s, there are still many divergences of view in basin's tectonic evolution and the basement structure.

Xiao et al. [8] divided the evolution of the Junggar basin into several stages: the early Paleozoic intra-oceanic arc evolution, the Early

\* Статья была предоставлена редакцией журнала *Earth Science Frontiers* в рамках соглашения между редакциями Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) и Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай) об обмене научными статьями открытого доступа.



Devonian and later Middle Devonian rifting evolution of the Junggar ocean, formed from the rifting of the early Paleozoic folded basement, the relic ocean from Later Devonian to late Carboniferous, and the final accretion orogeny in the late Carboniferous-early Permian. Wu [9] considered that it was a rift in Permian, a depression in Triassic-Old Tertiary, and a contraction and uplift stage after Neogene. You [10] divided the basin into rift stage in Carboniferous-Triassic, central uplift stage in Jurassic and piedmont depression stage after Cretaceous. Zhao [11] divided the basin into fault depression stage in Permian and Triassic, depression stage in Jurassic-Old Tertiary and shrinkage-uplift stage after Neogene. Xiao et al. [12] considered that the Late Carboniferous-Early Permian was a marine foreland basin. Yang et al. [13] also classified the Early Permian as marine foreland, the Late Permian and Neogene-Quaternary as continental foreland, and the Triassic-Paleogene as oscillating continental basin. The main differences in the above-mentioned division opinions lie in the understanding of whether the nature of the basin is tensional or compressive in the Early Permian and the nature of the depression basin in the Late Permian-Old Tertiary. These differences have not narrowed, but have widened in recent years. Sun [14] advocates that we should abandon the understanding that the early basin is collapse or tension and consider Junggar as a Carboniferous-Permian foreland basin based on the Triassic-Jurassic intracontinental further subsidence, since the Cretaceous is mainly the typical pre-revival period continental basin, which unified only in the late Cenozoic. On the contrary, Chen et al. considered that Junggar Basin was a rift basin in the early stage (P), a craton basin in the middle stage (T-E), and a compression basin in the late stage (N-Q).

The basin's basement composition is also a controversial topic in the international community. Some researchers proposed that the central part of the Junggar basin is composed of a conjectural craton nucleus [1, 15]. Some others interpreted the basin as a trapped oceanic lithosphere [4], a relict back-arc basin [16] or deformed Altai Paleozoic rocks [17].

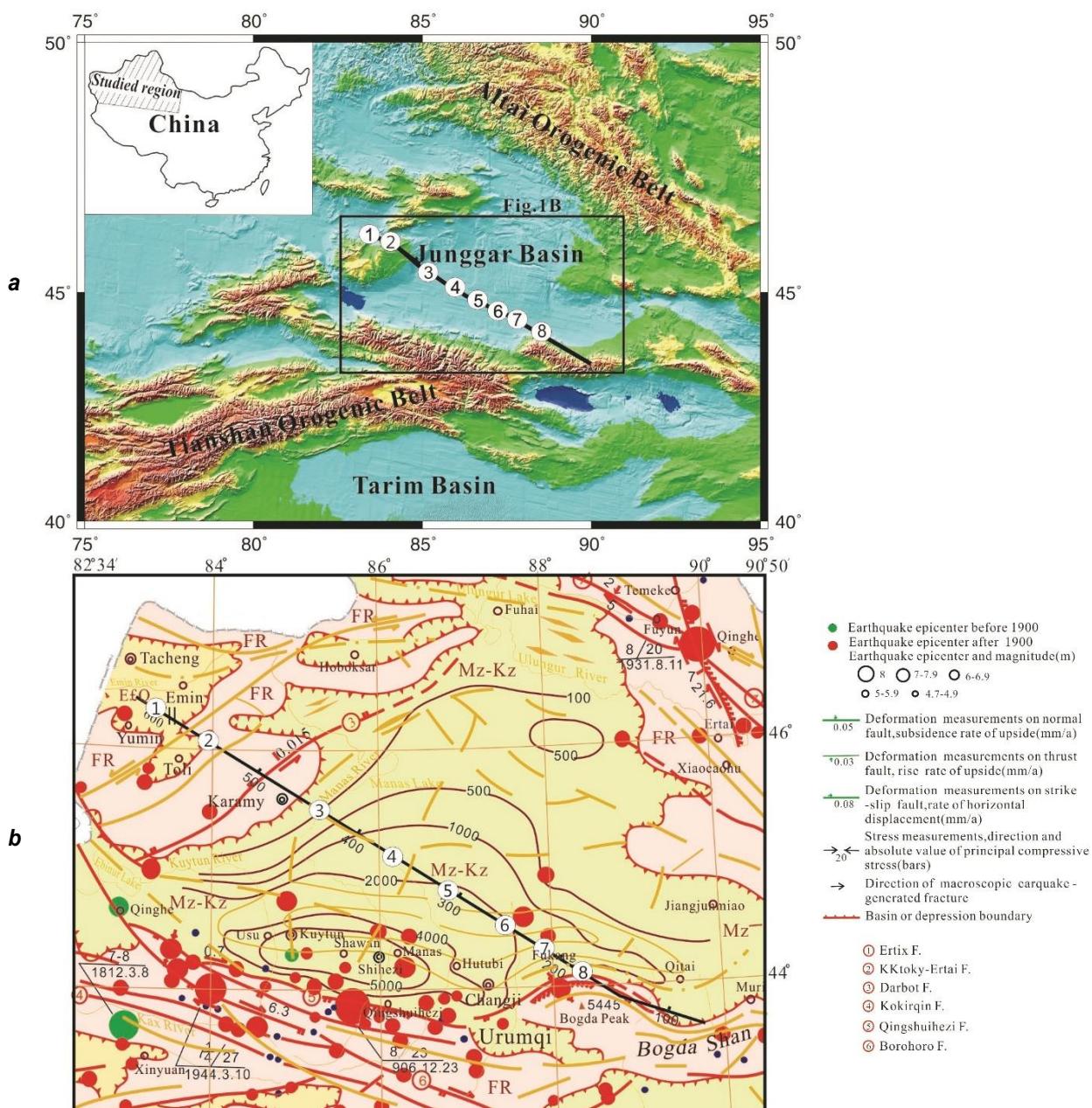
According to previous geophysical research in northwestern China, the average crustal

thickness of the Junggar basin is about 50 km, while those of the Tarim basin and the Qaidam basin are ~ 55 km [18, 19] and ~ 60 km [20], respectively. The average P-wave velocity is 6.3 km/s in the Junggar basin [21], about 6.0 km/s in the Tarim basin [19], and about 5.8 km/s in the Qaidam basin [20]. Therefore, the Junggar basin has a thinner crustal thickness and a higher average crustal velocity than the Tarim and Qaidam basins. The formation mechanism for such characteristics, as well as the high geomagnetic anomalies distributed in the central part of the basin, is not well understood.

Recently, a comprehensive geophysical survey along a ~ 600 km long transect through the Junggar basin from Emin to Qitai was carried out (Fig. 1). Along the profile, a wide-angle seismic reflection/refraction was carried out to obtain 2D velocity structure of the crust and upper most mantle. Based on the 2D velocity structure as evidence for designing the starting model of the 2D density structure and 2D magnetic intensity structure and constrained by gravitational and geomagnetic anomalies along the profile, the density and magnetic intensity structure were obtained. Finally, we proposed a comprehensive geological interpretation.

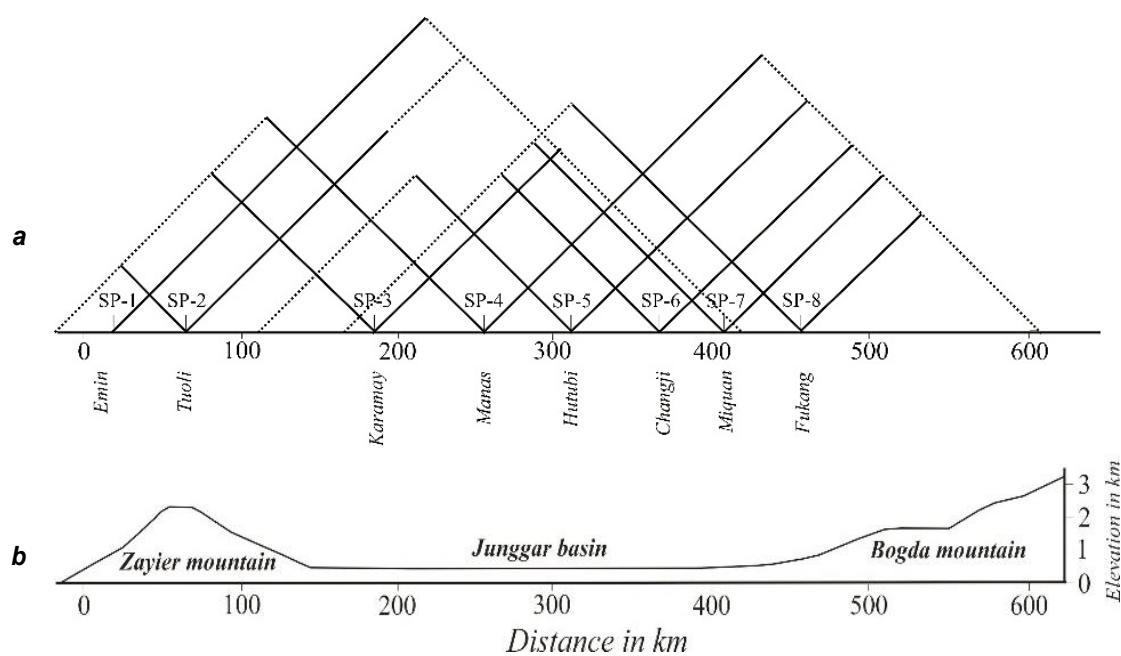
### Seismic data and processing

Recently, a seismic reflection/refraction profile as part of the ANTILOPE project was carried out to constrain the seismic velocity structure and physical properties of the crust and upper most mantle (Fig. 1). The profile crosses the Junggar basin from Emin in the northwest to Qitai in the southeast margins of the basin. The geometry of the profile was designed to optimize recording of refractions at near-critical distance and to provide velocity control for the near vertical reflection experiments, particularly at Moho depths to image the topography of the Moho. Along the profile, wide angle seismic reflection/refraction with 8 chemical explosions (2 tons of TNT for each) has been carried out, and 204 seismic receivers of DAS-1 & 2 models have been used to record the signals (Fig. 2). All receivers were positioned by GPS, with a station spacing of 1.5~3.0 km, depending on the topographic and tectonic complexity of the region. The acquisition system shown in Fig. 2 can



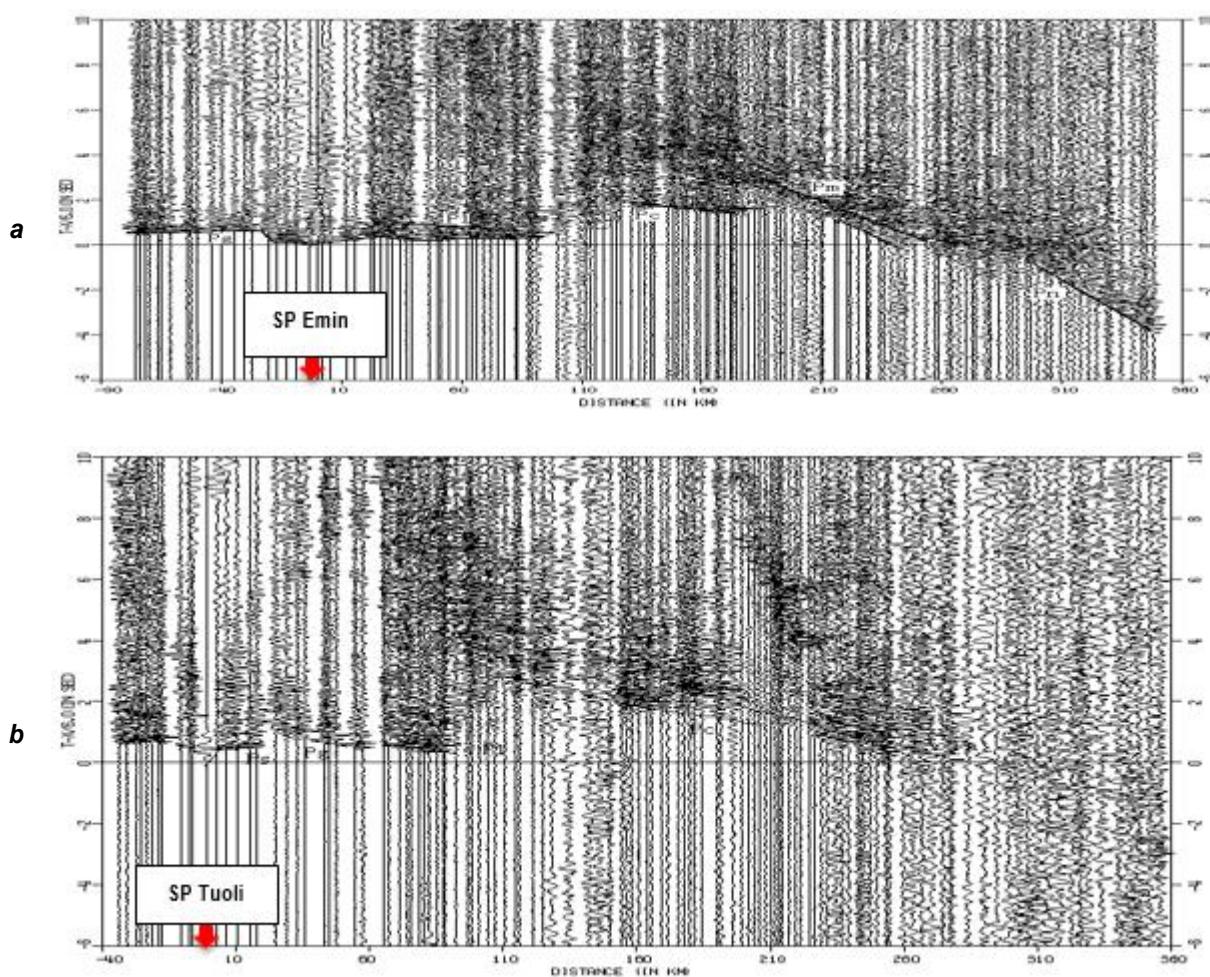
provide us with needed coverage and seismic illumination to study the structure and properties of the basement, the structure of the crust and uppermost mantle, and some deep faults particularly those cutting up the crust and controlling

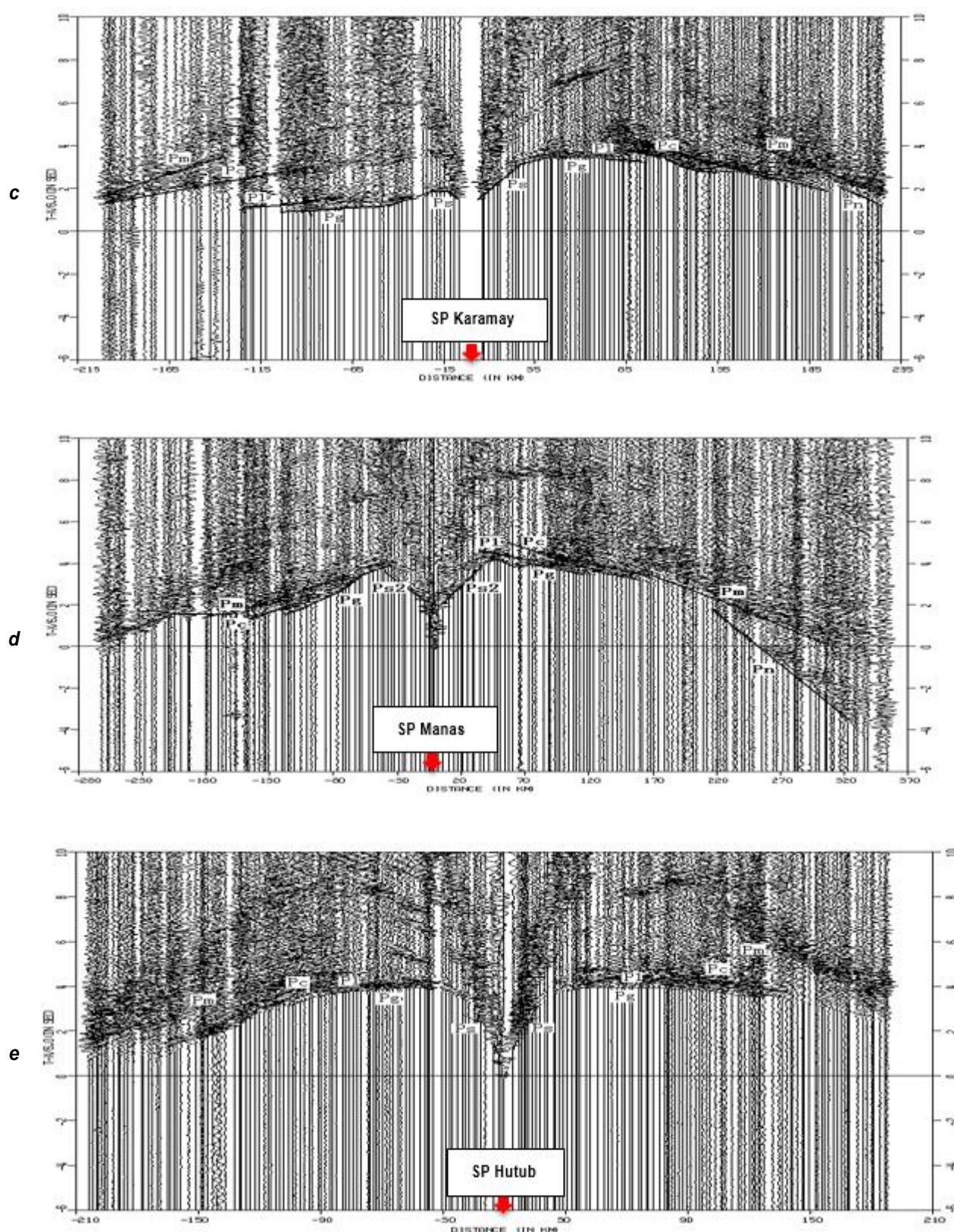
the tectonic evolution of the basin. The seismic records along the profile are shown in Fig. 3. The ray tracing and theoretic seismogram are shown in Fig. 4. The effective ray coverage is shown in Fig. 5.

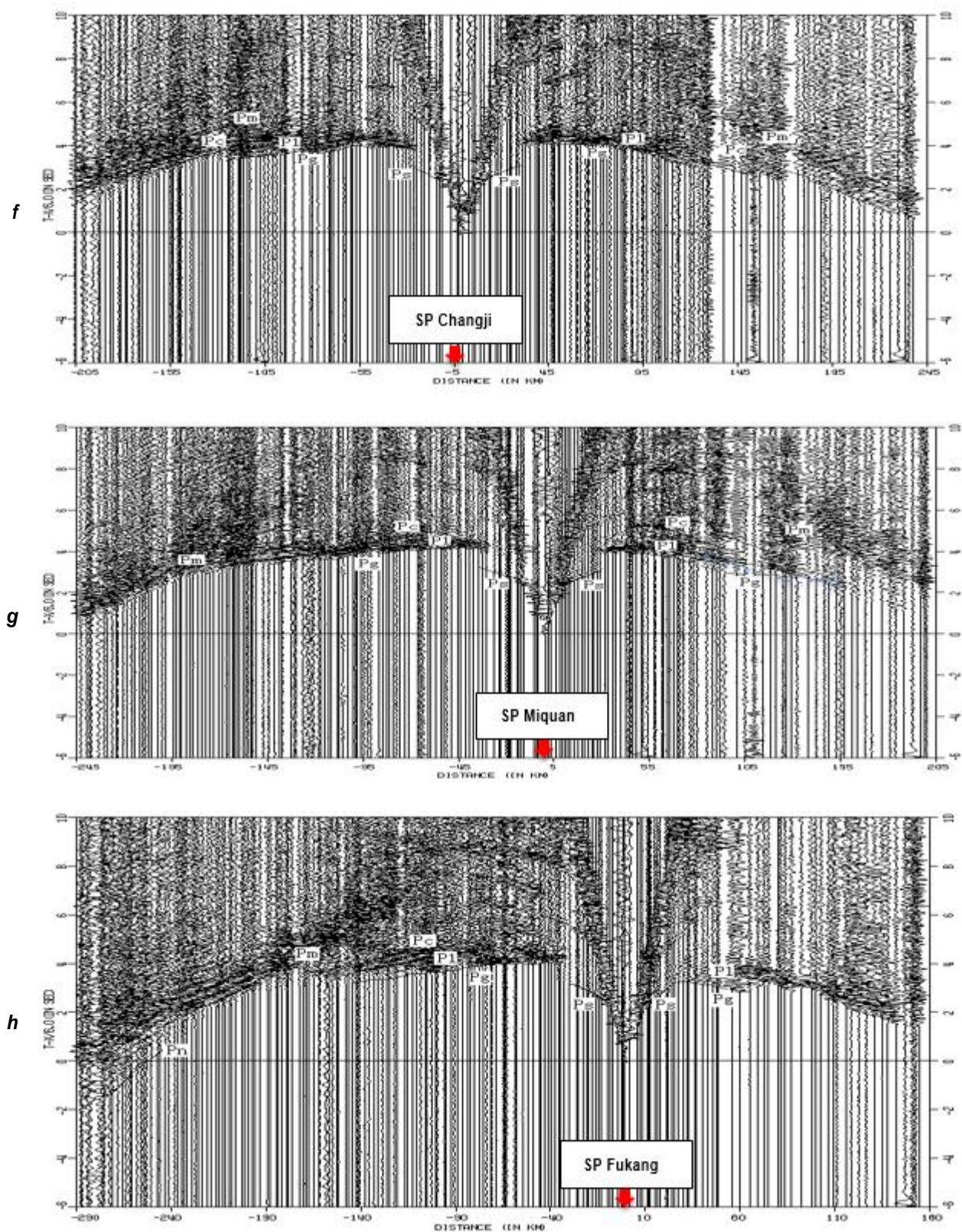


**Fig. 2. Observational system (a) and elevation (b) of the seismic reflection / refraction profile from Emin to Qitai**

**Рис. 2. Система наблюдений (а) и высота подъема (б) профиля сейсмического отражения / преломления от Эминя до Цитая**

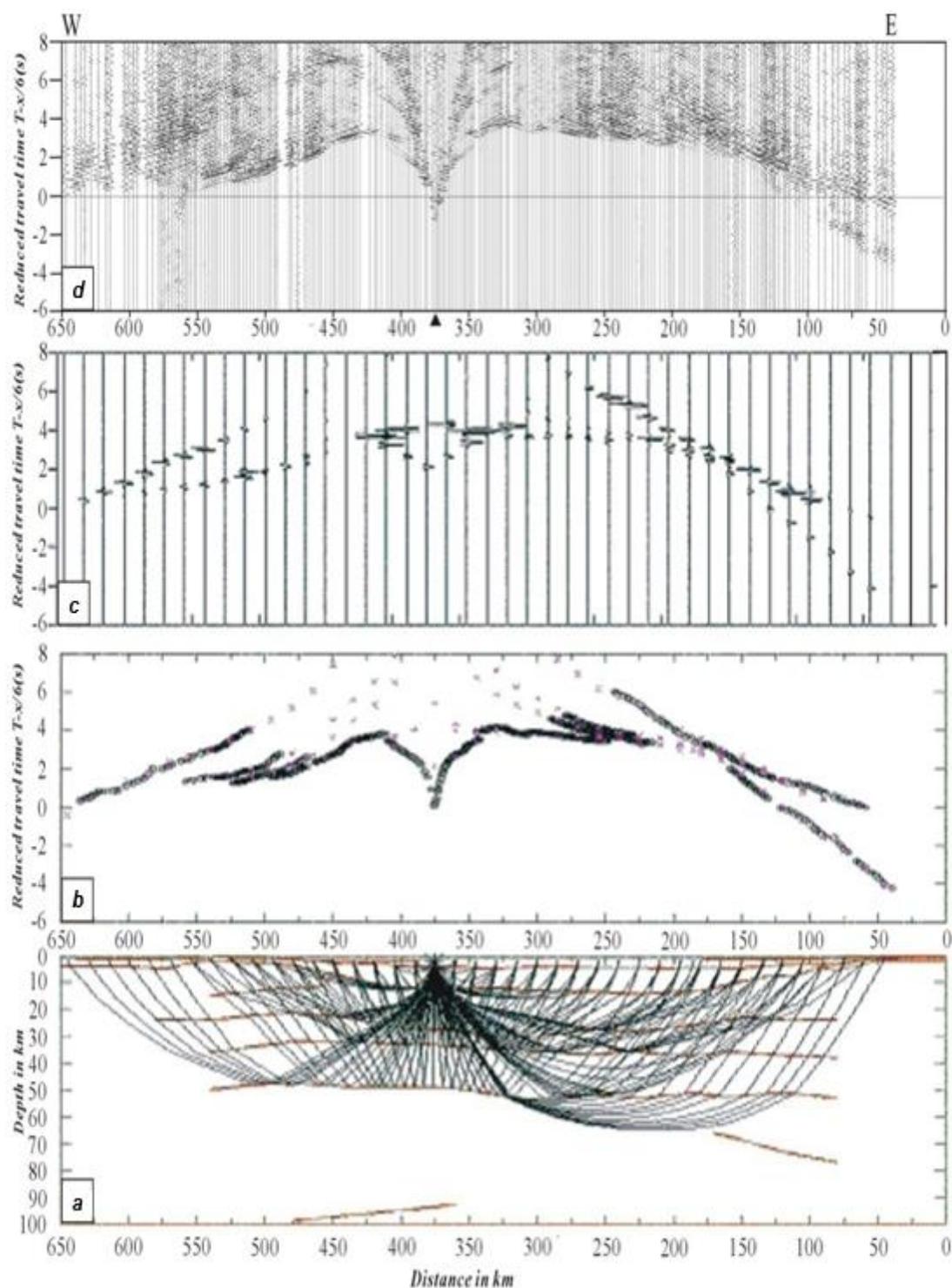




**Fig. 3. Reduced seismic records:**

a – at SP Emin; b – at SP Tuoli; c – at SP Karamay; d – at SP Manas;  
e – at SP Hutub; f – at SP Changji; g – at SP Miquan; h – at SP Fukang

**Рис. 3. Приведенные сейсмические записи**  
на сейсмических профилях: а – Эминь; б – Туоли; в – Карамай; г – Манас;  
е – Хутуб; ф – Чанцзи; г – Микван; г – Фуканг

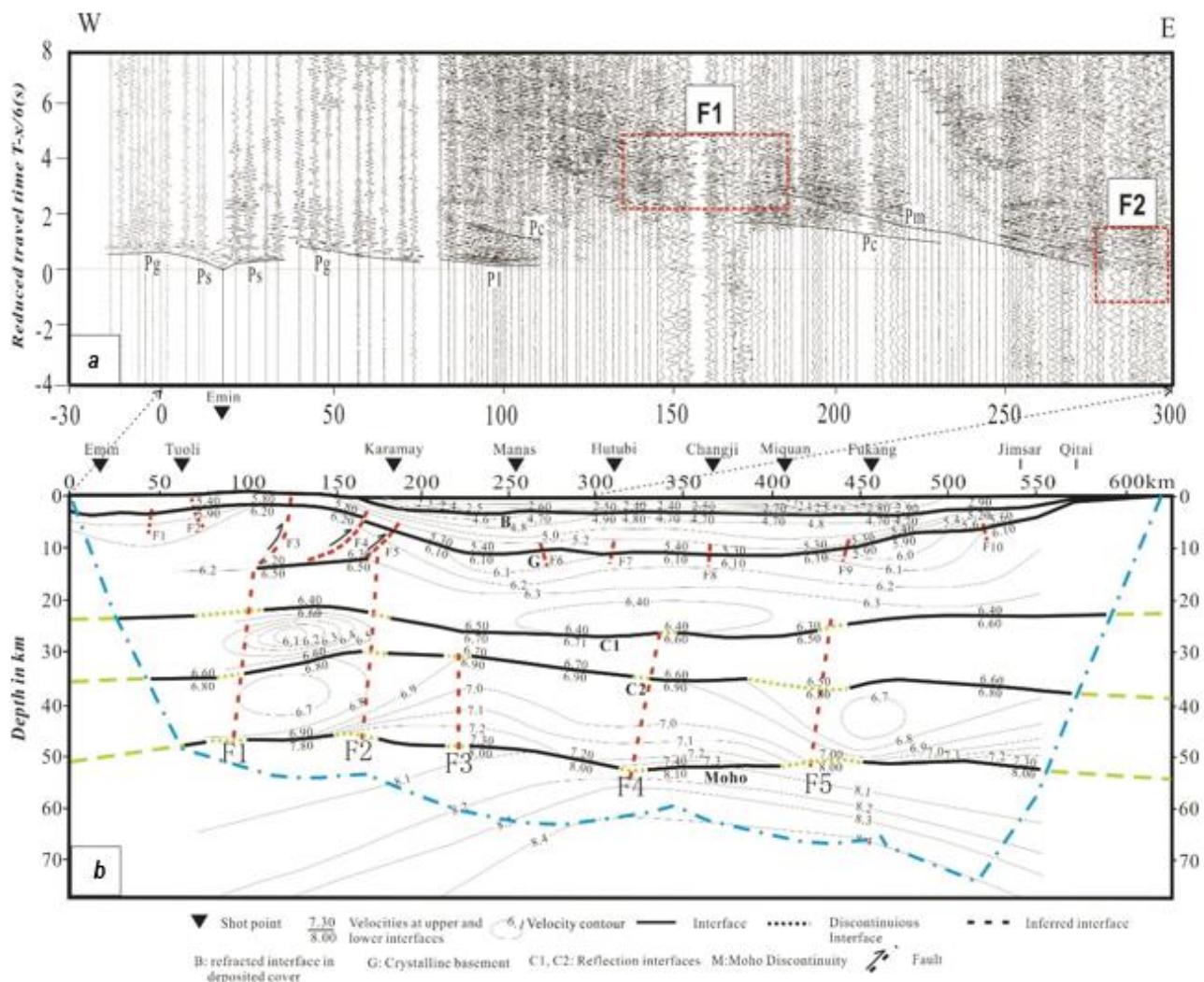


**Fig. 4. Example of the ray tracing and theoretic seismogram:**  
a – ray tracing; b – traveling time fitting; c – amplitude fitting; d – seismic records  
**Рис. 4. Пример трассировки лучей и теоретической сейсмограммы:**  
а – трассировка лучей; б – аппроксимация времени пробега волны;  
с – аппроксимация амплитуды; д – сейсмограммы

Identifying seismic phases is a key step in processing the seismic data. Due to relatively sparse shot and receiver spacing (compared with near vertical reflection), phase identification was combined with wave group (energy parcel)

identification to increase accuracy. Five criteria for phase picking are listed as follows:

- 1) Identified phases must have connecting sections and/or connecting waves with strong amplitudes;



**Fig. 5. The example of seismic recorders (a) and the 2D velocity structure of the crust and uppermost mantle (b) from Emin to Qitai:**

a – seismic signals from SP Emin

The vertical axis indicates reduced travel time by  $T-x/6$  in second and the horizontal axis is the distance in km from the shotpoint. The seismic recorders show strong Moho reflection along the profile but no seismic reflection from the Moho can be found at the two faults, F1 and F2, indicating that there is no wave-resistance interface at and nearby these two faults. These faults, with high seismic velocity and without obvious dislocation, are considered as the “extensional” faults, formed by north-south compression and east-west extension;

b – 2D velocity structure of the crust and uppermost mantle

The vertical axis is depth in km and the horizontal axis is distance in km. It was obtained by ray tracing and theoretical seismograms for each shot point with an improved SEIS83 program under the condition of 2D lateral inhomogeneous medium

**Рис. 5. Пример сейсмических регистраторов (а) и 2D структуры скорости коры и верхней части мантии (б) от Эмния до Цитая:**

a – сейсмические сигналы от СП Эмни

Вертикальная ось – это время пробега волн, уменьшенное на  $T-x/6$  в секунду, горизонтальная ось – расстояние от очага сейсмического взрыва, км. Сейсмические регистраторы показывают сильное отражение от Мохо вдоль профиля, но в разломах F1 и F2 сейсмическое отражение от Мохо не зарегистрировано, что указывает на отсутствие границы волнового сопротивления на данных разломах и рядом с ними.

Обладая высокой сейсмической скоростью и не имея явной дислокации, эти разломы рассматриваются как «разломы растяжения», образованные сжатием с севера на юг и растяжением с востока на запад;

b – 2D-структура скорости земной коры и верхней мантии

По вертикальной оси отложена глубина, км, по горизонтальной оси – расстояние, км.

Данные получены методом трассировки лучей и теоретических сейсмограмм для каждого очага сейсмического взрыва с использованием усовершенствованной программы SEIS83 в условиях двумерной боковой неоднородной среды



- 2) The amplitude of the wave must be greater than that of the noise;
- 3) The apparent velocity for a phase must be within a reasonable range;
- 4) The picked continuous travel-time curve must be greater than a minimum length;
- 5) Seismic reciprocity must hold for the complete observational system when we interchange the source and receiver positions.

Based on these criteria, we mainly identified the following seismic phases: Pg, P1, Pc, Pm and Pn.

(1) *Pg Wave*. Pg is a refracted wave that travels in the top part of the crystalline basement. The slope of its travelttime moveout curve yields precisely the P wave velocity in the basement. Generally, Pg can be traced to more than 130 km away from the shot point. Some significant differences in the reduced travel time for each shot point have been observed due to variations in the depth of the crystalline basement. In the Zayier Shan at the western end of the profile and Bogda Shan at the eastern end of the profile where the crystalline basements are almost exposed to the surface, the Pg wave appears much earlier (Fig. 3). However, in the middle segment of our survey line, the sediment is thick and Pg arrives much later. The apparent velocity of the Pg changes significantly at the two ends of the profile especially the transitional zones from basin to range, due to the undulation of the top surface of the crystalline basement, and changes little in the inner basin, showing that the top surface of the crystalline basement of the basin is flat. The apparent velocity of Pg is about 6.0–6.2 km/s.

(2) *P1 Wave*. The P1 wave is the reflected wave from an interface in the upper crust at a depth of 21.0–28.0 km. The amplitude and continuity of this wave changed significantly along the profile. Generally, the P1 wave is weak in energy and poor in continuity. The average velocity of the P1 wave is 5.8–6.1 km/s.

(3) *Pc Wave*. Pc is the reflected wave from the interface in the middle crust, at a depth of 36.0–40.0 km. In the Zayier Shan and the Bogda Shan, the Pc waves are weak and can be traced out to about only 40 km. In the Junggar basin, the Pc waves are relatively strong and have a good continuity. The Pc waves from Zayier Shan and Bogda Shan are different. The Pc

waves from Zayier Shan (western branch of SP Karamay) are relatively strong in energy and good in continuity. It can be traced as far as 110 km, while that from the Bogda Shan is weak and poor in continuity. The variation of the amplitude and differences in average velocity are related to geological structure and material properties of each tectonic unit, distinct from the depth of the crystalline basement and undulation of the interfaces. The average velocity determined for P2 is about 6.0–6.3 km/s.

(4) *Pm Wave*. Pm is the reflected wave from the Moho discontinuity. Based on seismic records, the Pm is characterized by its clear appearance, strong amplitude, good continuity, and far-distance tracing. The Pm wave, however, has different waveforms, amplitudes and travel-time curve patterns in different sections, which suggest the existence of lateral crustal heterogeneities in different tectonic units. However, the Pm waves in the sections between 150–185 km and 220–270 km are relatively strong. This indicates that the Moho is undulated. In the basin, the Pm waves from SP Manas, SP Hutub, SP Changji and SP Fukang (western branch) have strong amplitude, excellent continuity and longer traceable distance, suggesting that the Moho of the Junggar basin is highly reflective and sharp. The average velocity of Pm waves is 6.2–6.7 km/s. However, we did not obtain a clear Pm wave from the Bogda Shan.

Even though the seismic Pm wave from the Moho in the Junggar basin is strong in energy and good in continuity, there are some sections where no clear Moho reflections have been observed (i.e., the reflectivity is very poor).

(5) *Pn Wave*. Pn is the refracted wave from the top part of the upper mantle. It can be used to determine the velocity of the uppermost mantle. Furthermore, it can be used to determine the Pm wave according to the geometric relationship between the two. Pn waves have been recorded at SP Emin (eastern branch), SP Karamay (eastern branch), SP Manas (eastern branch), SP Hutub (eastern branch) and SP Fukang (western branch) (Fig. 3). The Pn wave arrives at a source-receiver distance of approximately 200 km, with a velocity of about 8.0 km/s.

Additional wave groups P1' and Pc' were recorded and discriminated in the eastern edges



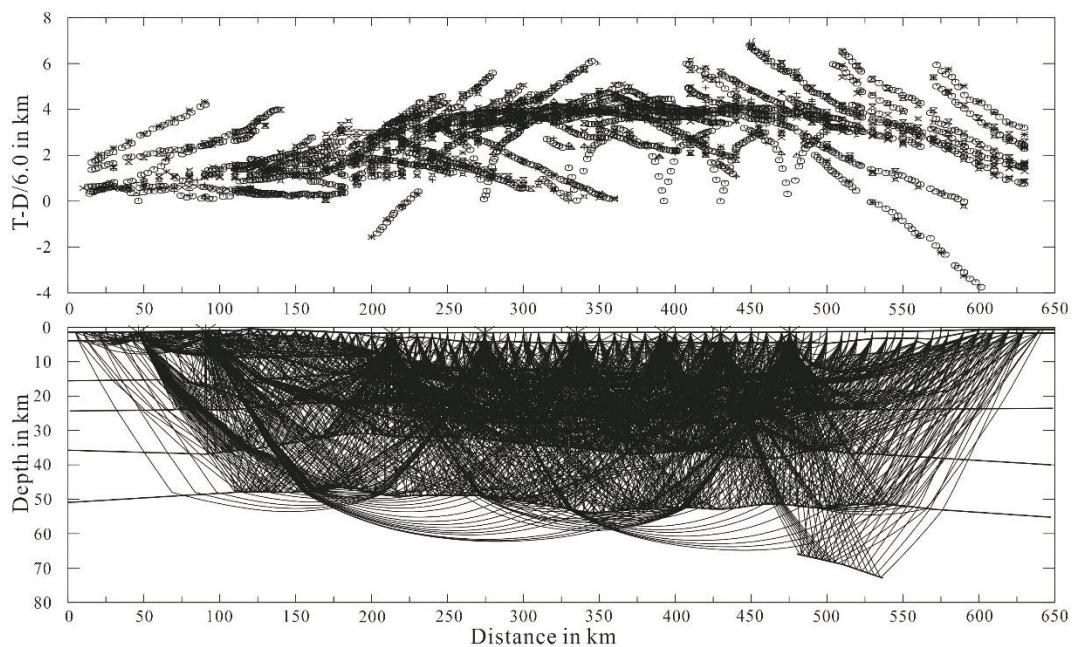
of the Zayer Shan (see SP Karamay and SP Manas) and western edge of the Bogda Shan (see SP Changji, SP Miquan and SP Fukang), indicating the existence of some additional lithologic interfaces ( $C1'$  and  $Cc'$ ) in these regions (in this notation,  $P_1$  and  $P_c$  are reflected waves from interfaces  $C1$  and  $Cc$  in the crust).  $P1'$  and  $Pc'$  waves were not observed in the Junggar basin. This suggests that the crust of the Zayer Shan and Bogda Shan is more complicated than previously assumed, and provides some evidence for mantle intrusion.

Reflected and refracted waves ( $Pg$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_m$  and  $P_n$ ) have been identified on different shot records and corrected from shot to shot (Fig. 3). These phases featured by high amplitudes provide a basis for dividing the crust into three velocity layers, the upper, middle and the lower crust. The first arrives at offsets of less than 70 km imply lateral variations in velocities at shallow depths (5.0 to 6.0 km/s) which can be correlated with the surface geology (Fig. 1, b). The velocity is estimated to be 6.2 to 6.5 km/s in the upper crust (depth of 22 to 27 km), about 6.6 to 6.7 km/s within the middle crust (~ 23 to

37 km), and 6.8 to 7.4 km/s in the lower crust (from 30 to 52 km down to the Moho). An increase in the average velocity throughout the crustal column within the crust along the profile is interpreted as an evidence for the increase in mafic content at upper crustal levels and metamorphic grade in the middle to lower crust [18, 19]. The proposed layered velocity model is non-unique but generates theoretical travel time branches that are in agree (to within  $\pm 0.1$  s) with the interpreted arrivals for all of the sections.

### Velocity structure of the crust and upper most mantle

Under the condition of 2D lateral inhomogeneous medium, we conducted ray tracing and constructed theoretical seismograms for each shot point with an improved SEIS83 program [22], which are presented in Fig. 4, and obtained the 2D velocity structure (Fig. 5, b). According to the effective ray coverage (Fig. 6), we have obtained not only the detailed velocity structure of the crust, but also that of the uppermost mantle (see the area within the blue dotted line in Fig. 5, b).



**Fig. 6. Seismic ray coverage of the Emin – Qitai profile**

The ray coverage of the transect is made by combining record sections of all shot points along the profile with the respective parts of the ray tracing of the corresponding shot points and deleting all calculated arrivals in the modeling which are not observed in the data

**Рис. 6. Покрытие сейсмическими лучами профиля Эмин – Цитай**

Покрытие поперечного разреза лучами производится путем объединения участков записи всех очагов сейсмического взрыва вдоль профиля с соответствующими частями трассировок лучей соответствующих очагов взрыва и удалением при моделировании всех вычисленных приходов волны, которые не наблюдаются в данных



## Density and geomagnetic structures

*Gravity and aeromagnetic data.* To constrain the density structure, we need some information about the gravity. Based on the 1:200000 Bouguer gravity anomaly map of Xinjiang (Fig. 7), there are two gravity gradient zones in the northern and southern margins of the Junggar basin, which clearly delineate the shape of the basin. This is in agreement with the landscape and geological framework. The rock magnetic strength is another important factor one can use to distinguish rock types, together with the P-wave velocity and density. The aeromagnetic anomaly map of the Junggar basin shows that the southern part of the basin (Manas terrain) has a stronger magnetism than the rest of the basin.

*Density and geomagnetic structures.* Based on the Bouguer anomaly and aero-magnetic anomaly maps (1:200,000 scale), the 2D P wave velocity structure, and the faults investigated at the surface of the transect from Emil to Qitai, we constructed a model for the density structure. The starting model for the density in each cell is given by the following velocity-density relationship [23]:

$$\rho = \begin{cases} 2.78 + 0.56(V_p - 6.0) & (6.0 \geq V_p \geq 5.5) \\ 3.07 + 0.29(V_p - 7.0) & (7.5 > V_p > 6.0) \\ 3.22 + 0.20(V_p - 7.5) & (8.5 \geq V_p \geq 7.5) \end{cases}$$

Finally, the 2D density structure (Fig. 8, a) and magnetic intensity structure (Fig. 8, b) were obtained according to the Syn-Source theory and through joint inversion of gravity with geomagnetism and constrained by gravitational and geomagnetic anomalies along the profile (Fig. 7) [24].

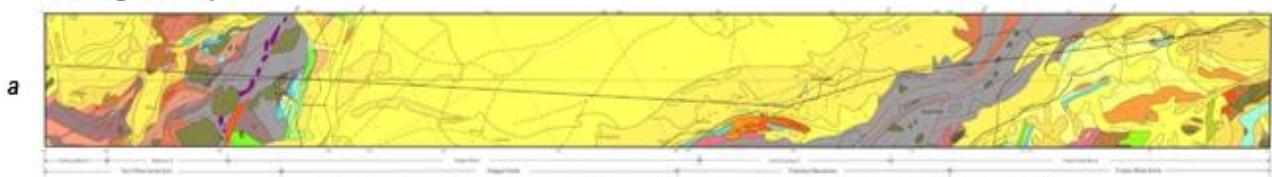
## Inference on the rock properties of the Junggar basin

According to relationships among the velocity, density and rock type (Fig. 9) [25], and based on the velocity distribution along the profile from Xayar to Burjing [21] and from Baicheng to Da Qaidam [19], basement rock types of the Junggar basin were identified and catalogued (Table).

The velocity is obtained from seismic data generated by artificial earthquakes, and the density and geomagnetic intensity are determined by joint inversion of gravity with geomagnetism along the same profile. The results suggest that the basement lithology of the Junggar basin is complicated especially towards its center. It is composed of mafic, ultra-mafic, and acidic rocks, such as granite, schist, granulite, gabbro.

Moreover, the Pb [23, 26, 27], Nd, and Sr [28] isotope compositions of post-collisional intermediate and acidic plutons in the Junggar basin show that these plutons originated from

Geological map



Aeromagnetic anomaly map ( $\Delta T_a$ )



Map of gradient of Bouguer gravitational anomaly

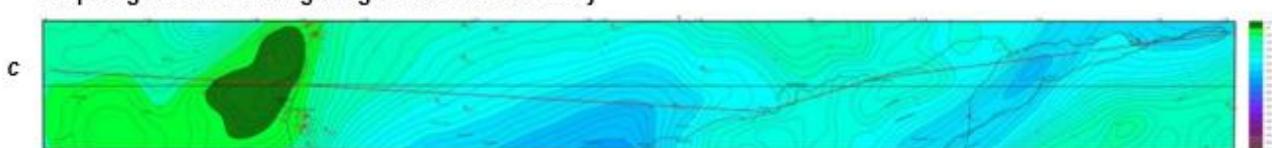
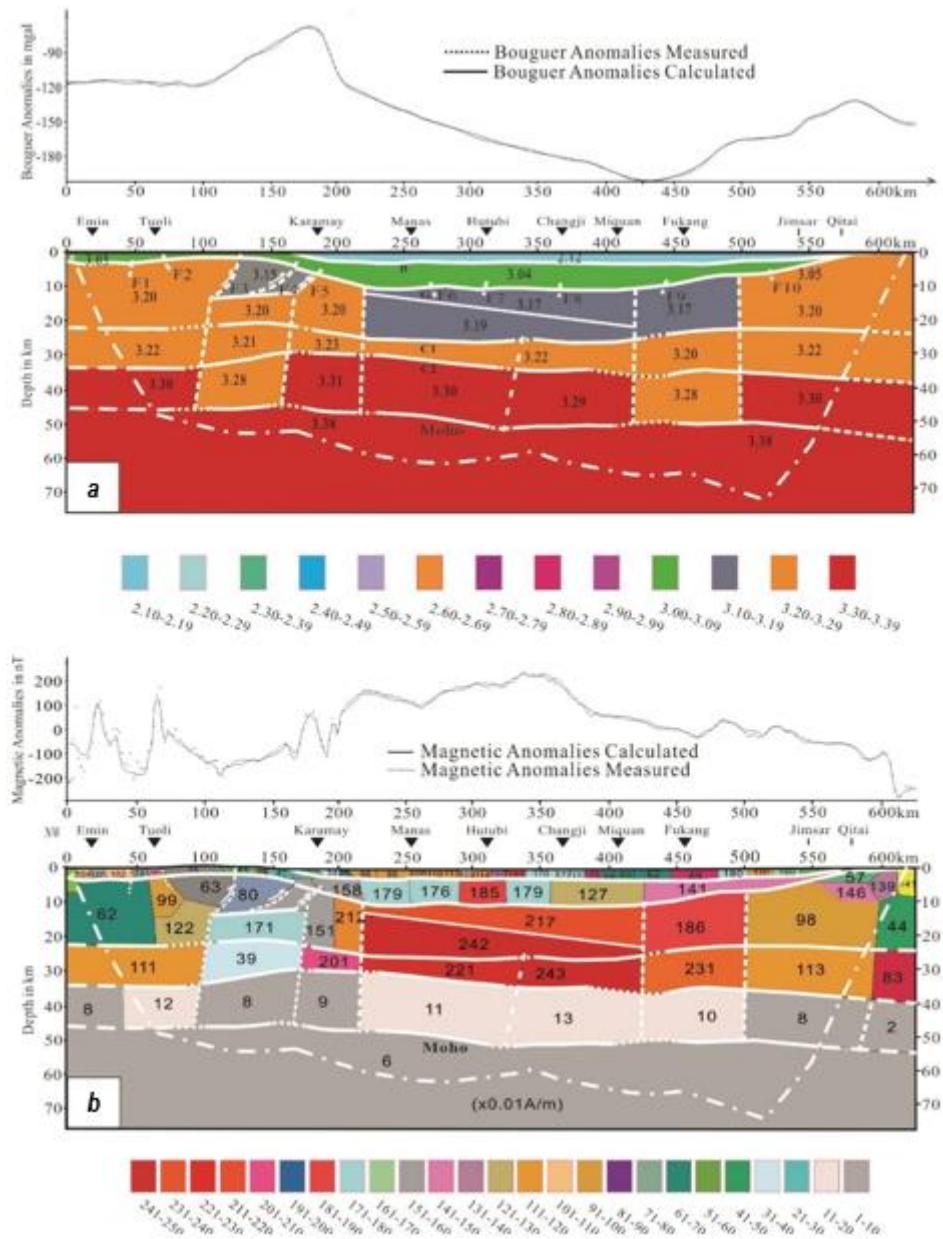


Fig. 7. The map showing geology (a), geomagnetism (b) and gravitation (c) along the profile  
Рис. 7. Карта геологии (а), геомагнетизма (б) и гравитации (с) вдоль разреза

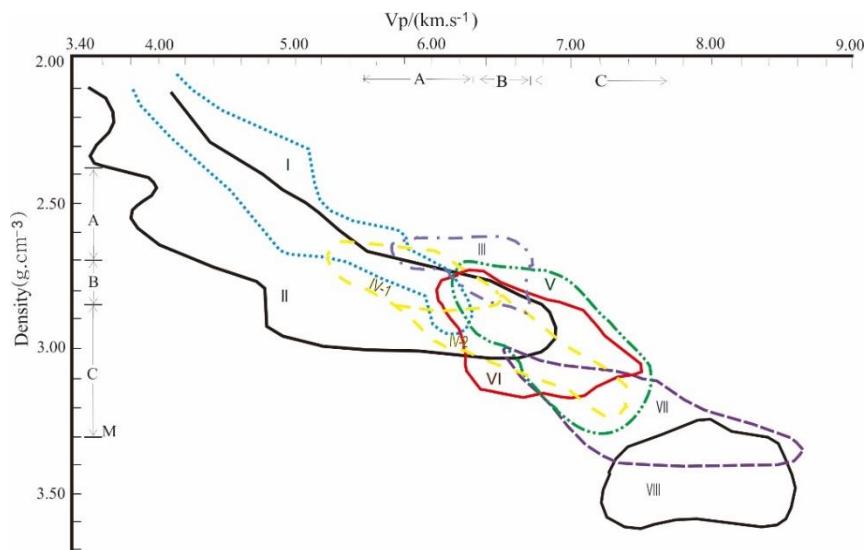


**Fig. 8. The density (a) and magnetic intensity (b) of the crust and upper most mantle along the profile from Emin to Qitai**

The initial density model was designed based on the relation between velocity and density. The density and magnetic intensity were obtained by joint inversion of the gravity and geomagnetic anomaly based on the Syn-Source principle of gravity and geomagnetism. The upper panel of the a is Bouguer's anomaly measured and calculated by fitting. The lower panel is the density in g/cm<sup>3</sup>. It was obtained by forward modeling under a same frame obtained by velocity structure for both the density and magnetic intensity. The upper panel of the b is magnetic anomaly measured and calculated by fitting. The lower panel is the magnetic intensity in 0.01·A/m obtained by the same way as the density modeling. For the detail description of the joint inversion, please see [24]

**Рис. 8. Плотность (а) и магнитная напряженность (б) коры и верхней части мантии по профилю от Эмдина до Читая**

Первоначальная модель плотности была разработана на основе соотношения между скоростью и плотностью. Плотность и магнитная интенсивность были получены совместной инверсией гравитационной и геомагнитной аномалии на основе принципа Syn-Source гравитации и геомагнетизма. В верхней части рис. а представлена аномалия Буге, измеренная и рассчитанная путем аппроксимации. Нижняя часть рис. а показывает плотность, г/см<sup>3</sup>. Данные были получены прямым моделированием в той же системе отсчета, полученной с помощью структуры скорости, как для плотности, так и для магнитной напряженности. Верхняя часть рис. б демонстрирует магнитную аномалию, измеренную и рассчитанную путем аппроксимации. Нижняя часть рис. б показывает магнитную напряженность, 0.01·A/m, полученную тем же способом, что и при моделировании плотности. Подробное описание совместной инверсии см. в [24]



**Fig. 9. Relationship among density, velocity and properties of various rocks at depth (after Liu et al. [25])**  
 I – sandstone; II – basalt; III – granite; IV-1 – neutral to acid schist or gneiss; IV-2 – neutral to basic schist or gneiss;  
 V – granulite; VI – gabbro; VII – peridotite; VIII – eclogite; A – upper crust; B – middle crust; C – lower crust

**Рис. 9. Взаимосвязь между плотностью, скоростью и свойствами**

**различных пород на глубине (по Лю и др. [25])**

I – песчаник; II – базальт; III – гранит; IV-1 – от нейтрального до кислого сланца или гнейса;  
 IV-2 – от нейтрального до основного сланца или гнейса; V – гранулит; VI – габбро; VII – перидотит;  
 VIII – эклогит; A – верхняя кора; Б – средняя кора; С – нижняя кора

### Basement parameters along the Emin – Qitai profile Параметры фундамента по профилю Эминь – Цитай

Range	0–135	135–160	160–210	210–250	250–355	355–405	405–445	445–540	540–610
Velocity	6.10	6.15	6.25	6.30	6.17	6.30	6.30	6.17	6.15
Density	2.65	2.65	2.65	2.74	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Mag-intensity	62–120	62–72	75–122	80–135	151–179	176	180	127	141
Rock	Granite	Granite	Granite	Granite, schist, granulite, gabbro	Granite	Granite	Granite	Granite	Granite

the sub-oceanic mantle and not from a craton continental basement. No known Precambrian strata have yet been discovered around the basin. However, Paleozoic oceanic rocks and relic oceanic sediments of the middle Paleozoic age are widely distributed. To the south of the Karayay fault the paleocurrent is directed to the north as shown by imbricated clasts and groove marks in turbidites of continental shelf facies from the Silurian age. This also suggests that the provenance of these strata were pre-Silurian continental blocks. Furthermore, the provenances were probably not the small blocks made up of mafic volcanic rocks that date to the Ordovician or Cambrian ages [12].

The aeromagnetic anomaly of the Junggar basin shows that the southern part of the basin

(Manas terrane) has much stronger magnetism, which is in agree with the magnetization of Precambrian schist, migmatites, granites, and hornblende schist. However, the results of joint inversion of gravity with aeromagnetism show that these high aeromagnetic anomalies may be produced by ancient blocks or the NNE trending faults resulting from modern north-south compression. These faults potentially provide channels for deep material to move up into the crust, and subsequently intrude laterally into different sub-layers of crust. This would change the contents of the Junggar basement, resulting in the higher average velocity, density, and magnetism observed in the crust of the basin. These intrusions may have originated as oceanic basalt and tholeiite. Based on the 1:200000 gravity



anomaly map of Xinjiang [29], there are two gravity gradient zones in the northern and southern margins of the Junggar basin, which clearly delineate the shape of basin. This is in agreement with the landscape and geological framework. The 2-D velocity and density structures along the Xayar-Burjing profile indicate that the crustal thickness is about 47 km in the Junggar basin. This thickness however, includes the 15 km thick sediments that have accumulated since the Devonian era. The thickness of the Mesozoic and Cenozoic sediments alone is greater than 11 km. Not taking into account the sediments, the crustal thickness of the crystalline basement of the Junggar basin is only 32 km. The 2-D density structure of the Xayar-Burjing profile [21] shows that the density of the basement roof of the Junggar basin is different in the Wulungu and Manasi terrains; the density and velocity of the former is  $2.87 \text{ g/cm}^3$  and 5.9 km/s, while that of the latter is about  $2.85 \text{ g/cm}^3$  and 5.8 km/s.

### Geological Interpretation

Based on the 2D velocity (Fig. 5, b), 2D density (Fig. 8, a) and 2D magnetic intensity (Fig. 8, b), and combined with geological and geochemical analysis [8] we developed a final model as Fig. 10.

Vertically, the crust is composed of three layers: the upper, middle and lower crust, bottomed by the C1, C2 and Moho interfaces, respectively. The upper layer of the upper crust consists the deposited cover bottomed by the interface G, and the lower layer bottomed by the interface C1. The sedimentary cover ranges in thickness from 1 km to 12 km and reaches a maximum depth of 12 km, while the crystalline basement ranges in thickness from approximately 12 km to 20 km and reaches a maximum depth of  $\sim 30$  km. The velocity in the deposited cover undergoes large lateral variations, especially near Karamay, Hutub and Fukang (Fig. 5). In addition, the density and the magnetic intensity also change greatly (Fig. 8). The crystalline basement exhibits high velocity zones, including a region near Hutub, at  $\sim 20$  km depth, where velocities are 0.1~0.2 km/s higher than sur-

rounding medium, and so as the density and geomagnetic intensity.

The middle crust, defined by the interfaces C1 and C2, is comparatively thin, with thicknesses ranging from 4 km to 15 km and a maximum depth of 37 km. Slight variation occurs on velocity, except for a low velocity zone beneath Karamay and Fukang, where the corresponding density is low. The middle crust has a dumbbell shape, i.e. thin in the middle and thick at the two ends of the profile.

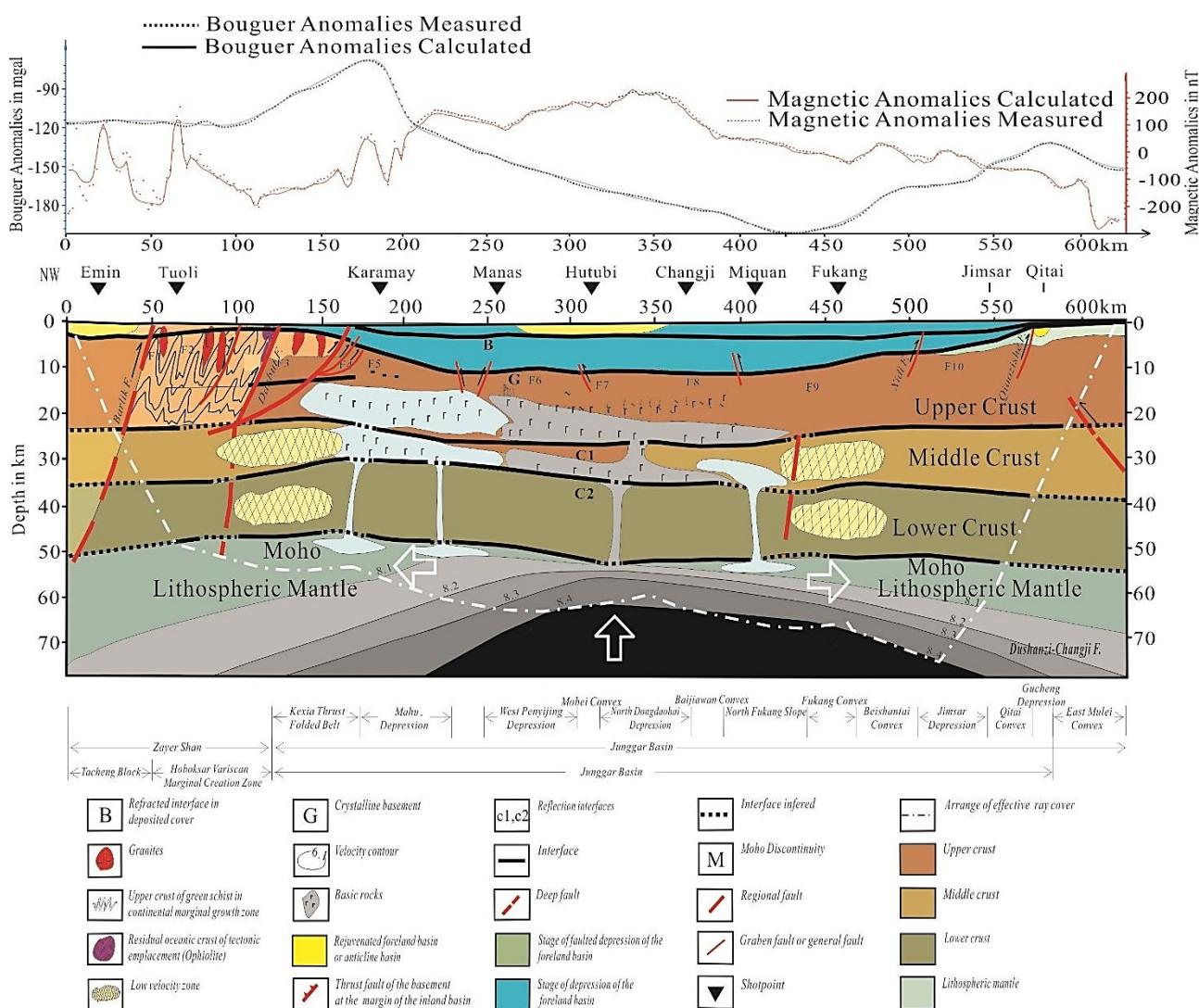
Obvious lateral variations are obtained in the lower crustal velocity. The most complex regions lay beneath the Karamay and Fukang, which are two active tectonic zones in the Junggar basin<sup>1</sup>. Here, two low velocity zones with low densities have developed, near which developed several faults cutting up the crust. The lower crust is further characterized by uniform thickness of roughly 15 km, despite having heterogeneous composition [21]. The crustal thickness of the Junggar basin ranges from 46 to 56 km.

Below the Moho interface, the uppermost mantle of the Junggar basin varies in shape of the velocity contours. The contours at the uppermost mantle are convex, indicating that the velocity is higher at the center of the basin than that at its either side [30]. It may further suggest that the upper mantle material may inject into the crust of the Junggar basin, because of the similar rock distribution along the profile (Fig. 10, Table). The Earth's topography at short wavelengths results from active tectonic processes, whereas at long wavelengths it is largely determined by isostatic adjustment for the density and thickness of the crust [30].

On these interfaces, we found several sections from which the seismic waves are very weak, indicating a lower reflection coefficient (Fig. 3). This may reflect the presence of deep faults, which could be confirmed by the combined results of seismic velocity (wide angle reflection/refraction profiling, (Fig. 5), density, geomagnetic intensity (joint inversion of gravity with aeromagnetism (Fig. 8), P-wave imaging<sup>2</sup> and seismic converted wave profile crossing the northern part of the basin [24]. All these faults, with little reflectivity and no obvious dislocation,

<sup>1</sup> Xu Y. Seismic tomography for northwestern China and its tectonic implication: Ph.D dissertation. Institute of Geophysics, CAS, 1999.

<sup>2</sup> Ibid.



**Fig. 10. The geological interpretation of the profile from Emin to Qitai**

The upper panel shows the gravitational and geomagnetic anomalies measured and calculated by fitting. The lower panel with the geological background and the legend below it shows the geological interpretation of the profile from Emin to Qitai, based on the 2D velocity structure, 2D density structure and 2D magnetic intensity structure, and combined with geological and geochemical analysis. The black triangles indicate shot points. Along a ~ 600 km long transect from Emin to Qitai developed several N-S trending blind faults, which are located at the lower part of the upper crust, the middle crust and the lower crust and cut up the Moho. These faults, with high seismic velocity and without obvious dislocation, are considered as "extensional" faults, formed by north-south compression and east-west extension. These deeply rooted faults provide channels for basic to ultra-basic rocks from upper mantle migrating into the crust and mixed up with the crustal material, causing the crust of the basin with thin thickness, high seismic velocities, high densities and high magnetic intensities

**Рис. 10. Геологическая интерпретация профиля от Эминя до Цитая**

В верхней части рисунка показаны гравитационные и геомагнитные аномалии, измеренные и рассчитанные при помощи аппроксимации. В нижней части, где показан геологический фон и даны условные обозначения, дается геологическая интерпретация профиля от Эминя до Цитая на основе 2D-структурь скорости, 2D-структурь плотности и 2D-структурь магнитной напряженности в сочетании с геологическим и геохимическим анализом. Черные треугольники обозначают очаги сейсмического взрыва. Вдоль поперечно-го разреза длиной ~ 600 км от Эминя до Цитая сформировалось несколько слепых разломов простиранием с севера на юг, которые расположены в нижней части верхней коры, в средней части коры и в нижней коре и разрезают Мохо. Обладая высокой сейсмической скоростью и не имея видимых дислокаций, эти разломы рассматриваются как «разломы растяжения», образованные сжатием с севера на юг и растяжением с востока на запад. Эти глубокие разломы обеспечивают каналы для миграции основных и ультраосновных пород из верхней мантии в кору, где они смешиваются с материалом земной коры, в результате чего кора бассейна становится тонкой, приобретает высокие сейсмические скорости, высокую плотность и высокую магнитную напряженность



are considered as "extension" faults. They developed with a high angle in the middle and lower crust and extended upwards into the lower parts of upper crust. They were formed probably by the collision of the Junggar basin with the Tarim basin at the end of Permian [21].

Horizontally, the southern Junggar basin along the profile can be divided into three sections, which are the western section (0–150 km), the central section (150–420 km) and the eastern section (420–600 km), based on the velocity, the density and geomagnetic structures (Fig. 8). In the western section, i.e. the western mountain area, the tectonic activities are more active, where developed many faults. The velocity distribution is complicated with several low velocity zones formed in the middle crust and lower crust, respectively. The densities in the low velocity zone are lower, but the magnetic intensities are complex, featured by high frequency of geomagnetic anomalies. In the central section, mostly the Junggar basin, the velocity, the density and geomagnetic intensity are consistently high, especially in the lower part of the upper crust and the middle crust. In this section, the Moho interface sinks down and the uppermost mantle uplifted. In the eastern part of our profile, the velocity, the density and geomagnetic intensity are relatively low at the eastern margin of the basin, with two lower velocity zones developed in the middle and lower crust, respectively.

Geologically, the evolution of the Tianshan Orogen and Junggar basin can be divided into several stages: the early Paleozoic intra-oceanic

arc evolution, the Early Devonian and later Middle Devonian rifting evolution of the Junggar ocean, formed from the rifting of the early Paleozoic folded basement, the relic ocean from Later Devonian to late Carboniferous, and the final accretion orogeny in the late Carboniferous-early Permian [8]. We infer that this final accretion orogeny in the late Carboniferous-early Permian was so strong that some deep faults with S-N direction were formed by S-N compression and E-W extension. In such process, the hot materials from upper mantle migrated to the crust through the deep faults and mixed up with the crustal materials in the central basin, which could be further approved by the high velocity, high density and high geomagnetic intensity beneath the basin. The two low velocity zones at both sides of the basin may be attributed to the heat from upper mantle.

The exchange of the materials or energy of the uppermost mantle with those in the crust is manifested by the heat evolution of the basin. Based on the heat flow variations of the basins in northwestern China since Paleozoic time [31], the heat flow of the Junggar basin since Carboniferous-Permian reduced gradually from  $120\text{--}150\text{ mW.m}^{-2}$  to  $52\text{ mW.m}^{-2}$  at present, while that of the Tarim basin, the Qaidam basin and the Sichuan basin almost keep the same value of  $45\text{ mW.m}^{-2}$ , even with a tendency of increase. Therefore, we infer that the high heat value of the Junggar basin may have been caused by the hot materials from the upper mantle mixing the crystalline basement of the Junggar basin.

## References

1. Kamen-Kaye M, Meyerhoff AA, Taner I. Junggar basin: a Permian to Cenozoic intermontane complex in northwestern China. *Senckenbergiana Lethaea*. 1988;69(3-4):289–313.
2. Li D, He D, Lian Y, Lu Y, Yi Z. Structural evolution and late Carboniferous magmatism of the Zhongguai arc in the western Junggar Basin, Northwest China: implications for tectonic evolution of the Junggar Ocean. *International Geology Review*. 2017;59(10):1234–1255. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1160801>
3. Yan W, Wang G, Li L, Zhang L, Yu J, Yang G, et al. Deformation analyses and their geological implications of Carboniferous-Permian tectonic transition period in northwest margin of Junggar basin. *Earth Science*. 2015;40(3):504–520. (In Chinese) <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.040>
4. Carroll AR, Liang Y, Graham SA, Xiao X, Hendrix MS, Chu J, et al. Junggar basin, northwest China: trapped Late Paleozoic ocean. *Tectonophysics*. 1990;181(1-4):1–14.
5. Wang Y, Mooney WD, Yuan X, Coleman RG. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault, northwest China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003;108(B6):1–16. <https://doi.org/10.1029/2001JB000552>
6. Wu S, Huang R, Xu Y, Yang Y, Jiang X, Zhu L. Seismological evidence for a remnant oceanic slab in the western Junggar, Northwest China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018;123(5):4157–4170. <https://doi.org/10.1029/2017JB015332>
7. Zhang S, Xu Y, Jiang L, Yang B, Liu Y, Griffin WL, et al. Electrical structures in the northwest margin of the Junggar basin: Implications for its late Paleozoic



- geodynamics. *Tectonophysics*. 2017;717:473–483. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.031>
8. Xiao W, Windley BF, Sun S, Li J, Huang B, Han C, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic Collage systems in Central Asia: oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2015;43:477–507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105254>
9. Wu Q. Structural evolution and oil prospecting in Wuqingfu-1 Junggar Basin. *Geology of Xinjiang*. 1986;4(3):1–9.
10. You Q. Geotectonic unit division and hydrocarbon-bearing property of each tectonic stage in Junggar Basin of Youqimei. In: Wang Y. (ed.). *Petroleum geology of Junggar Basin comprehensive research*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Publishing House, 1992. p.114–221.
11. Zhao B. Formation and evolution of Zhaobai 1 Junggar Basin. *Petroleum Geology of Xinjiang*. 1992;13(3):191–196.
12. Xiao X, Tang Y, Feng Y, Zhu B, Li J, Zhao M. *Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions*. Beijing: Geological Publishing House; 1992. 169 p. (In Chinese)
13. Yang W, Kuang J, Xu C. Formation conditions and prediction of large oilfields in Junggar Basin. *Petroleum Geology of Xinjiang*. 1995;16(3):2101–2111.
14. Sun Z. Mesozoic-Cenozoic foreland basins in central and Western China and their hydrocarbon potential. *Gas Geology*. 1998;4(3):16–301.
15. Zhang Z, Liou J, Coleman RG. An outline of the plate tectonics of China. *Geological Society of America Bulletin*. 1984;95(3):295–312. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<295:AOOTPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<295:AOOTPT>2.0.CO;2)
16. Hsü KJ. Relict back-arc basins: principles of recognition and possible new examples from China. In: Kleinspehn KL, Paola C (eds.). *New perspectives in basin analysis*. New York: Springer; 1988. p.245–263.
17. Argand E. La tectonique de l'Asie. *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Geol. Congr.* 1924;1(5):170–372.
18. Mooney WD, Prodehl C, Pavlenkova NI. Seismic velocity structure of the continental lithosphere from controlled source data (Chapter 54). In: Lee WHK, Kanamori H, Jennings PC, Kisslinger C (eds.). *International handbook of earthquake & engineering seismology*. Part A. International Geophysics Series. Vol. 81A. Amsterdam – Boston – London – New York: Academic Press; 2002. p.887–910.
19. Zhao J, Mooney WD, Zhang X, Li Z, Jin Z, Okaya N. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006;241(3-4):804–814. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.003>
20. Zhao J, Jin Z, Mooney WD, Okaya N, Wang S, Gao X, et al. Crustal structure of the central Qaidam basin imaged by seismic wide-angle reflection / refraction profiling. *Tectonophysics*. 2013;584:174–190. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.005>
21. Zhao J, Liu G, Lu Z, Zhang X, Zhao G. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. *Tectonophysics*. 2003;376(3-4):199–239. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.07.001>
22. Červený V, Molotkov IA, Pšenčík I. *Ray method in seismology*. Prague: University Karlova; 1977. 214 p.
23. Feng R, Yan H, Zhang R. The method of quick inversion for 3D potential field and program designing. *Journal of Geology*. 1986;4:390–402.
24. Zhao J. *Geodynamic conditions for northern margin of Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 2012.
25. Liu Y, Wu X. Wave velocity in rocks under high temperature and pressure and composition of the deep crust. *Chinese Journal of Geophysics*. 1997;40(3):211–220. (In Chinese)
26. Tilton GR, Kwon ST, Coleman RG, et al. Isotopic studies from the west Junggar Mts, NW China. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*. 1986;18.
27. Xiao X, Tang Y, Li J, Jhu B. On the tectonic evolution of the northern Xinjiang, Northwest China. *Xinjiang Geological Science*. 1990;1:47–68. (In Chinese)
28. Hopson C, Wen J, Tilton G, Tang Y, Zhu B, Zhao M. Paleozoic plutonism in east Junggar, Bogdashan, and eastern Tianshan, NW China. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1989;70:1403–1404.
29. Zhao J, Li Z, Cheng H, Yao C, Li Y. Structure of lithospheric density and geomagnetism beneath the Tianshan orogenic belt and their geodynamic implications. *Chinese Journal of Geophysics*. 2004;47(6):1061–1067.
30. Mooney WD, Vidale JE. Thermal and chemical variations in subcrustal cratonic lithosphere: evidence from crustal isostasy. *Lithos*. 2003;71(2-4):185–193. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.07.004>
31. Wang F, Yang M, Zheng J. Geochemical evidence of the basement assembled by island arc volcanic terranes in Junggar basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*. 2002;21(1):1–10. (In Chinese)

### Список литературы

1. Kamen-Kaye M., Meyerhoff A.A., Taner I. Junggar basin: a Permian to Cenozoic intermontane complex in northwestern China // *Senckenbergiana Lethaea*. 1988. Vol. 69. Iss. 3-4. P. 289–313.
2. Li D., He D., Lian Y., Lu Y., Yi Z. Structural evolution and late Carboniferous magmatism of the Zhongguai arc in the western Junggar Basin, Northwest China: implications for tectonic evolution of the Junggar Ocean // *International Geology Review*. 2017. Vol. 59. Iss. 10. P. 1234–1255. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1160801>
3. Yan W., Wang G., Li L., Zhang L., Yu J., Yang G., et al. Deformation analyses and their geological implications of Carboniferous-Permian tectonic transition period in northwest margin of Junggar basin // *Earth Science*. 2015. Vol. 40. Iss. 3. P. 504–520. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.040>



4. Carroll A.R., Liang Y., Graham S.A., Xiao X., Hendrix M.S., Chu J., et al. Junggar basin, northwest China: trapped Late Paleozoic ocean // *Tectonophysics*. 1990. Vol. 181. Iss. 1-4. P. 1-14.
5. Wang Y., Mooney W.D., Yuan X., Coleman R.G. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault, northwest China // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. Vol. 108. Iss. B6. P. 1-16. <https://doi.org/10.1029/2001JB000552>
6. Wu S., Huang R., Xu Y., Yang Y., Jiang X., Zhu L. Seismological evidence for a remnant oceanic slab in the western Junggar, Northwest China // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018. Vol. 123. Iss. 5. P. 4157-4170. <https://doi.org/10.1029/2017JB015332>
7. Zhang S., Xu Y., Jiang L., Yang B., Liu Y., Griffin W.L., et al. Electrical structures in the northwest margin of the Junggar basin: Implications for its late Paleozoic geodynamics // *Tectonophysics*. 2017. Vol. 717. P. 473-483. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.031>
8. Xiao W., Windley B.F., Sun S., Li J., Huang B., Han C., et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic Collage systems in Central Asia: oroclines, sutures, and terminal accretion // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2015. Vol. 43. P. 477-507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105254>
9. Wu Q. Structural evolution and oil prospecting in Wuqingfu-1 Junggar Basin // *Geology of Xinjiang*. 1986. Vol. 4. Iss. 3. P. 1-9.
10. You Q. Geotectonic unit division and hydrocarbon-bearing property of each tectonic stage in Junggar Basin of Youqimei // *Petroleum geology of Junggar Basin comprehensive research* / ed. Y. Wang. Lanzhou: Gansu Science and Technology Publishing House, 1992. P. 114-221.
11. Zhao B. Formation and evolution of Zhaobai 1 Junggar Basin // *Petroleum Geology of Xinjiang*. 1992. Vol. 13. Iss. 3. P. 191-196.
12. Xiao X., Tang Y., Feng Y., Zhu B., Li J., Zhao M. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 169 p.
13. Yang W., Kuang J., Xu C. Formation conditions and prediction of large oilfields in Junggar Basin // *Petroleum Geology of Xinjiang*. 1995. Vol. 16. Iss. 3. P. 2101-2111.
14. Sun Z. Mesozoic-Cenozoic foreland basins in central and Western China and their hydrocarbon potential // *Gas Geology*. 1998. Vol. 4. Iss. 3. P. 16-301.
15. Zhang Z., Liou J., Coleman R.G. An outline of the plate tectonics of China // *Geological Society of America Bulletin*. 1984. Vol. 95. Iss. 3. P. 295-312. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95<295:AOOTPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<295:AOOTPT>2.0.CO;2)
16. Hsü K.J. Relict back-arc basins: principles of recognition and possible new examples from China // *New perspectives in basin analysis* / eds. K.L. Kleinspehn, C. Paola. New York: Springer, 1988. P. 245-263.
17. Argand E. La tectonique de l'Asie // *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Geol. Congr.* 1924. Vol. 1. Iss. 5. P. 170-372.
18. Mooney W.D., Prodehl C., Pavlenkova N.I. Seismic velocity structure of the continental lithosphere from controlled source data (Chapter 54) // *International handbook of earthquake & engineering seismology* / eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger. Part A. *International Geophysics Series*. Vol. 81A. Amsterdam – Boston – London – New York: Academic Press, 2002. P. 887-910.
19. Zhao J., Mooney W.D., Zhang X., Li Z., Jin Z., Okaya N. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 241. Iss. 3-4. P. 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.003>
20. Zhao J., Jin Z., Mooney W.D., Okaya N., Wang S., Gao X., et al. Crustal structure of the central Qaidam basin imaged by seismic wide-angle reflection/refraction profiling // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 584. P. 174-190. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.005>
21. Zhao J., Liu G., Lu Z., Zhang X., Zhao G. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin // *Tectonophysics*. 2003. Vol. 376. Iss. 3-4. P. 199-239. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.07.001>
22. Červený V., Molotkov I.A., Pšenčík I. *Ray method in seismology*. Prague: University Karllova, 1977. 214 p.
23. Feng R., Yan H., Zhang R. The method of quick inversion for 3D potential field and program designing // *Journal of Geology*. 1986. Vol. 4. P. 390-402.
24. Zhao J. *Geodynamic conditions for northern margin of Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 2012.
25. Liu Y., Wu X. Wave velocity in rocks under high temperature and pressure and composition of the deep crust // *Chinese Journal of Geophysics*. 1997. Vol. 40. Iss. 3. P. 211-220.
26. Tilton G.R., Kwon S.T., Coleman R.G., et al. Isotopic studies from the west Junggar Mts, NW China // *Geological Society of America, Abstracts with Programs*. 1986. Vol. 18.
27. Xiao X., Tang Y., Li J., Jhu B. On the tectonic evolution of the northern Xinjiang, Northwest China // *Xinjiang Geological Science*. 1990. Vol. 1. P. 47-68.
28. Hopson C., Wen J., Tilton G., Tang Y., Zhu B., Zhao M. Paleozoic plutonism in east Junggar, Bogdashan, and eastern Tianshan, NW China // *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 1989. Vol. 70. P. 1403-1404.
29. Zhao J., Li Z., Cheng H., Yao C., Li Y. Structure of lithospheric density and geomagnetism beneath the Tianshan orogenic belt and their geodynamic implications // *Chinese Journal of Geophysics*. 2004. Vol. 47. Iss. 6. P. 1061-1067.
30. Mooney W.D., Vidale J.E. Thermal and chemical variations in subcrustal cratonic lithosphere: evidence from crustal isostasy // *Lithos*. 2003. Vol. 71. Iss. 2-4. P. 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.07.004>
31. Wang F., Yang M., Zheng J. Geochemical evidence of the basement assembled by island arc volcanic terranes in Junggar basin // *Acta Petrologica et Mineralogica*. 2002. Vol. 21. Iss. 1. P. 1-10.



### Information about the authors / Сведения об авторах



#### **Junmeng Zhao,**

Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China,  
✉ e-mail: zhaojm@itpcas.ac.cn

#### **Чжао Цзюньмэн,**

Центр передового опыта наук о Земле Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Университет Китайской академии наук,  
100049, г. Пекин, Китай,  
✉ e-mail: zhaojm@itpcas.ac.cn

#### **Wenjiao Xiao,**

University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China,  
Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100029, China

#### **Сяо Вэнъцзяо,**

Университет Китайской академии наук,  
100049, г. Пекин, Китай,  
Институт геологии и геофизики, Китайская академия наук,  
100029, г. Пекин, Китай

#### **Xinfa Chen,**

Xinjiang Oilfield Company,  
Karamay 834000, China

#### **Чэнь Синъфа,**

Синьцзянская нефтяная компания,  
834000, г. Карамай, Китай

#### **Xiaojun Wang,**

Xinjiang Oilfield Company,  
Karamay 834000, China

#### **Ван Сяоцзюнь,**

Синьцзянская нефтяная компания,  
834000, г. Карамай, Китай

#### **Yong Song,**

Xinjiang Oilfield Company,  
Karamay 834000, China

#### **Сун Юн,**

Синьцзянская нефтяная компания,  
834000, г. Карамай, Китай

#### **Baoli Bian,**

Xinjiang Oilfield Company,  
Karamay 834000, China

#### **Бянь Баоли,**

Синьцзянская нефтяная компания,  
834000, г. Карамай, Китай

**Xiankang Zhang,**Center for Geophysical Exploration, China Earthquake Administration,  
Zhengzhou 450000, China**Чжан Сянькань,**Центр геофизических исследований Сейсмологического управления Китая,  
450000, г. Чжэнчжоу, Китай**Irina P. Strelchenko,**Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia**Стрельченко Ирина Петровна,**Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Университет Китайской академии наук,  
100049, г. Пекин, Китай,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, Россия**Qiang Xu,**Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China**Сюй Цянь,**Центр передового опыта наук о Земле Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай**Heng Zhang,**Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China**Чжан Хэн,**Центр передового опыта наук о Земле Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай**Yingcai Zheng,**Massachusetts Institute of Technology,  
Cambridge 02139-4307, United States of America**Чжэн Инцай,**Массачусетский технологический институт,  
02139-4307, г. Кембридж, Соединенные Штаты Америки



**Hongbing Liu,**

Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China

**Лю Хунбин,**

Центр передового опыта наук о Земле Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай

**Bhupati Neupane,**

Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift,  
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100101, China,  
University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China

**Неупане Бхупати,**

Главная лаборатория коллизии континентов и подъема плато,  
Институт изучения Тибетского плато, Китайская академия наук,  
100101, г. Пекин, Китай,  
Университет Китайской академии наук,  
100049, г. Пекин, Китай

**Zongjin Ma,**

Institute of Geology, China Earthquake Administration,  
Beijing 100029, China

**Ма Чжунцзинь,**

Институт геологии Сейсмологического управления Китая,  
100029, г. Пекин, Китай

#### Contribution of the authors / Заявленный вклад авторов

The authors contributed equally to this article.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflict of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

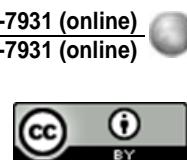
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Information about the article / Информация о статье

The article was submitted December 22, 2020; approved after reviewing January 1, 2021; accepted for publication February 26, 2021.

Статья поступила в редакцию 22.12.2020; одобрена после рецензирования 20.01.2021; принята к публикации 26.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.8(571.1)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-30-38>

## Выделение органогенных построек осинского горизонта по данным 2D- и 3D-сейсморазведки в северо-восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы

© Р.С. Уренко<sup>a</sup>, А.Г. Вахромеев<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Месторождения Восточной Сибири являются одним из основных центров добычи углеводородов восточной части России. Большая часть углеводородных запасов располагается на данной территории в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы, где важнейшими продуктивными объектами разработки являются отложения нижнего кембрия. Главная цель данного исследования заключалась в более подробном изучении внутреннего пространства и отличительных характеристик органогенных построек кембрийского времени, а также в определении методик обнаружения рифогенных построек методами сейсмических исследований. Статистическая обработка имеющегося фактического материала по коллекторским свойствам показала очень неравномерное распределение пустотности (пористости). Было выявлено, что поры возникли в результате выщелачивания форменных образований в местах рыхлой упаковки зерен эпигенетического доломита, по цементирующему веществу в межзерновых пространствах, по трещинам и стилолитовым швам. Дополнительно для выявления органогенных построек в осинском горизонте на территории Непско-Ботуобинской антеклизы на основании сейсмических исследований выделен ряд методик. Выделение единичных рифогенных построек в осинском горизонте нижнего кембрия на основании анализа сейсмоамплитуд осуществлялось при помощи 2D- и 3D-сейсморазведки. По данным сейсмических исследований на территории Непско-Ботуобинской антеклизы выявлены зоны развития как линейных, так и одиночных карбонатных построек. Дополнительно было выявлено, что в скважинах, находящихся в кольцевой аномалии, происходит повышение эффективных толщин. Подводя итоги и анализируя сопоставленные материалы, можно сделать вывод о том, что основным методом для выделения зон колец по скважинам является метод измерения интервального времени пробега продольной волны. Комплексный анализ материалов 2D- и 3D-сейсморазведки методом общей глубинной точки, а также рядом других методов по определенному алгоритму позволил выделить в карбонатном разрезе северо-восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы отдельные образования органогенных (рифогенных) построек.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, карбонатные образования, рифогенные постройки, рифообразование

**Для цитирования:** Уренко Р.С., Вахромеев А.Г. Выделение органогенных построек осинского горизонта по данным 2D- и 3D-сейсморазведки в северо-восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 30–38. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-30-38>

## Identification of Osinsky horizon organogenic structures by 2D and 3D seismic survey data in the north-eastern part of the Nepa-Botuoba antecline

© Roman S. Urenko<sup>a</sup>, Andrey G. Vakhromeev<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The fields of Eastern Siberia belong to the one of the main centers of hydrocarbon production in the eastern part of Russia. The main part of hydrocarbon reserves is located in the area within the Nepa-Botuoba antecline, where the Lower Cambrian deposits are major production objects. The main purpose of this research is to provide a detailed study of the inner space and features of organogenic structures of the Cambrian period, as well as to determine the procedures for detecting reef structures by seismic research methods. Statistical processing of the available factual material on reservoir properties has shown a very uneven distribution of cavernosity (porosity). It is found that pores were formed as a result of leaching of shaped formations in loose packing locations of epigenetic dolomite grains, along the cementing substance in the intergranular spaces, along cracks and stylolite seams. To identify organogenic structures in the Osinsky horizon of the Nepa-Botuoba antecline on the basis of seismic studies some additional methodologies have been selected. Identification of single reef structures in the Osinsky horizon of the Lower Cambrian based on the analysis of seismic amplitudes was carried out by means of a 2D and 3D seismic survey. According to the data of seismic studies, the Nepa-Botuoba



anteclise features the development zones of both linear and single carbonate structures. It is also revealed that there is an increase in effective thicknesses in wells located in the annular anomaly. Summing up the results and analyzing the compared materials, it can be concluded that the main identification method of ring zones in wells is the method of longitudinal wave slowness measurement. A comprehensive analysis of 2D and 3D seismic survey data by the common depth point method as well as by a number of other methods using a specific algorithm allowed us to identify individual formations of organogenic (riphogenic) structures in the carbonate section of the north-eastern part of the Nepa-Botuoba anteclise.

**Keywords:** Siberian platform, carbonate formations, reef structures, reef formation

**For citation:** Urenko RS, Vakhromeev AG. Identification of Osinsky horizon organogenic structures by 2D and 3D seismic survey data in the north-eastern part of the Nepa-Botuoba anteclise. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):30–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-30-38>

## Введение

На территории Сибирской платформы значительные запасы и ресурсы углеводородов сконцентрированы в карбонатных отложениях венда и нижнего кембрия [1]. Основные проблемы, возникающие при поиске залежей углеводородов и при разведке, оценке и последующей разработке месторождений, связаны с чрезвычайно сложным пространственным строением пустот вендско-нижнекембрийского карбонатного слоя [2]. Сложное строение карбонатного пласта определяет необходимость создания трехмерной геологической модели продуктивного пласта. Инфраструктура всех детальных моделей нефтегазоперспективного объекта заключается в интеграции данных, полученных в результате анализа керновых материалов, материалов геофизических исследований скважин (ГИС) и результатов наземных геофизических исследований, в первую очередь сейсморазведки методом общей глубинной точки. Каждый набор данных имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому результаты исследования керна скважины дают наиболее полную и достоверную информацию о строении, составе и литологических и петрофизических характеристиках пород, составляющих продуктивный пласт. Однако эти данные обычно являются дискретными частями и областями [3].

Материалы ГИС практически непрерывно характеризуют разрез анализируемых интервалов разреза в точках скважин, но их применимость к исследованиям трещинных систем крайне дискуссионна. Данные ГИС также дискретны по площади. Сейсмические данные (особенно в случае 3D-сейсморазведки) непрерывны по площади и по разрезу, но имеют ограничения по разрешающей способности. Их использование позволяет прогнозировать

строительство горизонтов в межскважинном пространстве.

## Материалы

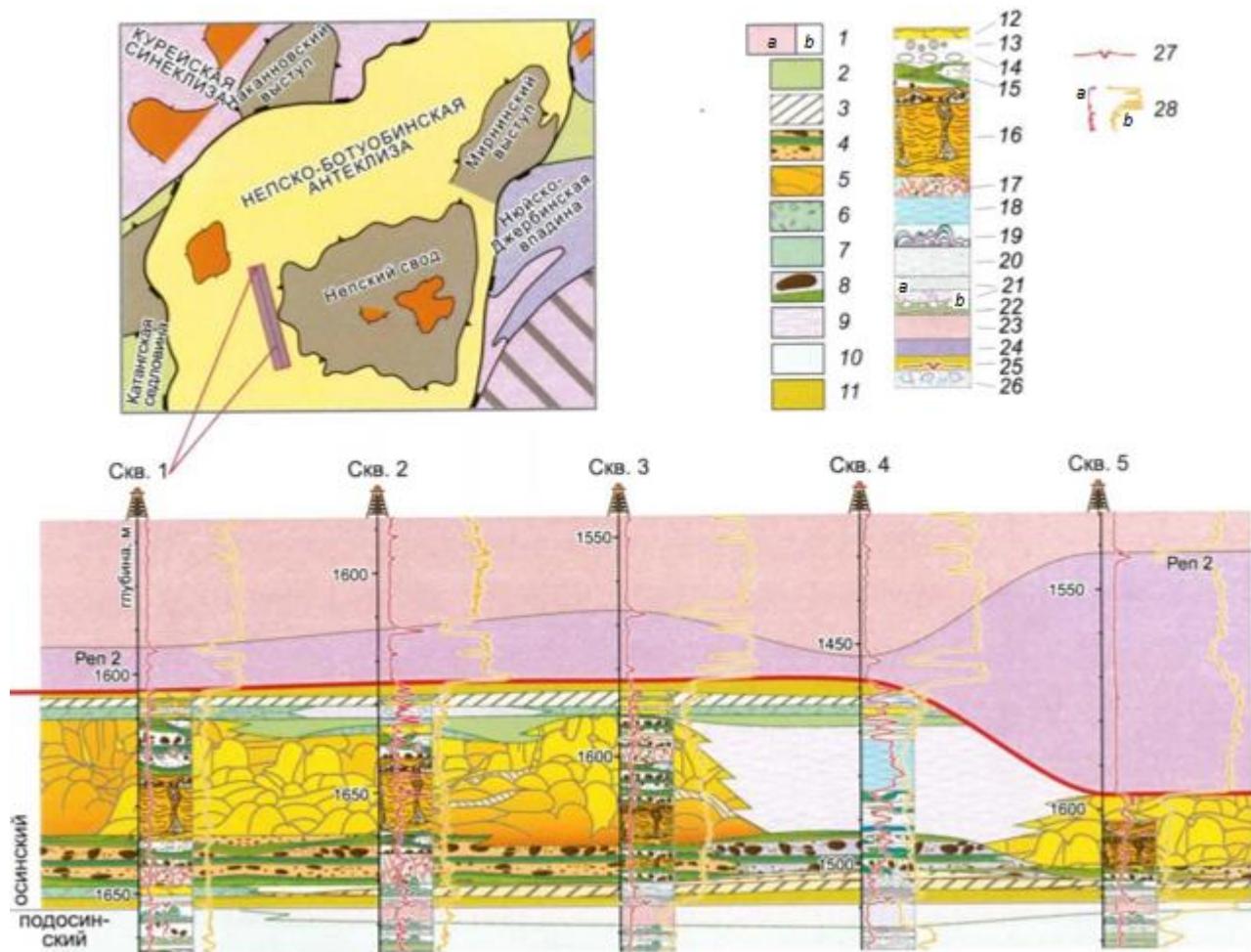
### и методы исследования

В ходе исследования были рассмотрены методы прогнозирования карбонатных построек в осинском горизонте в северо-восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы. Данные методики имеют практическое применение для выделения карбонатных построек в интервале осинского горизонта. При написании статьи были использованы материалы сейсмических исследований ряда месторождений Восточной Сибири.

## Результаты исследования и их обсуждение

**Рифогенные отложения Непско-Ботуобинской антеклизы.** Проблема поисков и разработки карбонатных коллекторов нефти и газа в последние годы приобрела актуальное значение. Важность данной проблемы обусловливается тем, что с каждым годом увеличивается удельный вес месторождений, связанных с карбонатными коллекторами.

Непско-Ботуобинская антеклиза более полувека является основным объектом нефтепоисковых работ на юге Сибирской платформы и входит в состав одноименной нефтегазоносной области [1]. Рассматриваемый в статье район включает в себя юго-западную часть антеклизы. Его тектоническое развитие оказало значительное влияние на условия нефтегазонакопления и формирование залежей углеводородов. Существование здесь в течение длительного геологического периода относительно приподнятой области привело к формированию крупной зоны нефтегазонакопления (рис. 1).



**Рис. 1. Распространение рифогенных зон на территории Непско-Ботуобинской антеклизы [4]:**  
зоны: 1 – соли (а – солеродного бассейна, б – прибрежных лагун), 2 – тонко переслаивающиеся неравномерно глинистые и ангидритовые микритеевые доломиты и известняки супралиторали, 3 – доломиты, известковые доломиты литорали и прилегающей мелкой сублиторали, 4 – доломиты, редко известковые доломиты биостромных построек, 5 – доломиты, редко известковые доломиты биогермных построек, 6 – оолитовые и литокластовые доломиты отмелей (или песков верхней литорали), 7 – водорослевые «фенестровые» доломиты литорали, 8 – доломиты с линзами и включениями ангидритов и солей биостромных построек, 9 – доломиты, известковые доломиты и доломитовые известняки межбиогермных лагун, 10 – циклично построенная толща осадочных комплексов сублиторали с маломощными строматолитами литорали и супралиторали, 11 – субаэральная экспозиция; литотипы: 12 – косослоистые грейнстоуны, 13 – оолитовые пак-, грейнстоуны, 14 – литокластовые пак-, грейнстоуны, 15 – байндстоуны, 16 – фреймстоуны, 17 – бафлстоуны, 18 – слабо глинистые мад-, вакстоуны, 19 – строматолиты, 20 – водорослевые ламиниты с фенестрами, 21 – мадстоуны массивные (а), линзовиднослойственные (б), 22 – обломки пород, 23 – соли, 24 – ангидриты, 25 – субаэральная экспозиция, 26 – брекции растворения ангидритов; 27 – поверхности субаэрального размыва; 28 – криевые ГИС: гамма-каротаж (а), нейтронный гамма-каротаж (б)

**Fig. 1. Reef zone distribution in the Nepa-Botuoba antecline [4]:**

zones: 1 – salts (a – salt basin, b – coastal lagoons), 2 – finely interbedded unevenly clayey and anhydrite micritic dolomites and limestones of the supralittoral, 3 – littoral and adjacent shallow sublittoral dolomites and calcareous dolomites, 4 – dolomites and sparsely calcareous dolomites of biostromic buildups, 5 – dolomites, sparsely calcareous dolomites of bioherm buildups, 6 – oolitic and lithoclastic dolomites of shoals (or sands of the upper littoral), 7 – algal ‘fenestral’ littoral dolomites, 8 – dolomites with lenses and inclusions of biostromic buildup anhydrites and salts, 9 – dolomites, calcareous dolomites and dolomite limestones of interbiohermal lagoons, 10 – cyclically built stratum of sublittoral sedimentary complexes with thin littoral and supralittoral stromatolites, 11 – subaerial exposure; lithotypes: 12 – cross-bedded grainstones, 13 – oolitic pack-, grainstones, 14 – lithoclastic pack-, grainstones, 15 – bindstones, 16 – framestones, 17 – bafflestones, 18 – weakly clayey mud-, wackstones, 19 – stromatolites, 20 – algal laminites with fenestres, 21 – massive mudstones (a), lenticular-bedded mudstones(b), 22 – rock fragments, 23 – salts, 24 – anhydrites, 25 – subaerial exposure, 26 – breccias of dissolved anhydrites; 27 – subaerial erosion surfaces; 28 – logging curves: gamma ray logging (a), neutron gamma ray logging (b)



Формирование кембрийских рифов связано с расцветом цианобактериальных сообществ (*Renalcis*, *Girvanella*, *Epiphyton* и др.), а также с появлением археоциат. В раннем кембрии Восточной Сибири созданная ими рифовая система пересекала всю платформу с северо-запада на юго-восток и представляла собой широкую отмельную зону, которую образовывали мощные рифовые комплексы, последовательно смещавшиеся к северо-востоку [5]. Фрагмент этой рифовой системы захватывает восточный борт современной Непско-Ботуобинской антеклизы. На большей же части антеклизы в формировании томмотского яруса нижнего кембрия (он выделяется как осинский продуктивный горизонт) основную роль играют небольшие по мощности микробиальные холмы, рост которых контролировался сообществами цианобактерий [6]. Как правило, основание этих холмов слагают самые «глубоководные» кустистые и слоистые формы колоний, способные развиваться ниже базиса действия волн [7]. Вверх по разрезу они сменяются массивными или сферическими формами колоний [8]. Вероятно, «уплощение» формы постройки приводило к росту ее устойчивости в условиях повышения динамической активности водной среды, вызванной уменьшением глубины акватории [9]. Микробиальные холмы создавали подводный ландшафт, осуществляя биогенную изоляцию лагун в пространстве [4].

В кровле отложения интенсивно преобразованы за счет субаэрального растворения и повсеместно перекрываются глинисто-карбонатными брекчиями, содержащими многочисленные обломки известняков, доломитов и ангидритов, заключенных в карбонатно-глинистую основную массу [10]. Иногда на месте построек образуются карстовые воронки, заполненные перекрывающими солями. Рифогенные образования имеют весьма специфическое поровое пространство [11]. К первичным относятся пустоты в органических остатках и межгранулярные. Определяющая роль в оценке емкостной характеристики пород принадлежит вторичным пустотам [12]. Последние связаны с интенсивными процессами перекристаллизации, доломитизации и выщелачивания. Биогенные доломиты были более

подвержены этим процессам, чем хемогенные. Они подверглись сплошной перекристаллизации, иногда с реликтами форменных образований [13].

В хемогенных доломитах преобладает рассеянная перекристаллизация, иногда прожилковая. Активное выщелачивание в зоне свободного водообмена вело к возникновению каверн различной величины [14].

Статистическая обработка имеющегося фактического материала (керна) по коллекционным свойствам показала очень неравномерное распределение пустотности (пористости). Поры возникли в результате выщелачивания форменных образований в местах рыхлой упаковки зерен эпигенетического доломита, по цементирующему веществу в межзерновых пространствах, по трещинам и стилолитовым швам. Размеры их самые различные: от пор 0,05 мм до каверн 2,5×3 см [15]. Наиболее интенсивное проявление глубинного карста отмечено в центральной части и на отдельных участках юго-западного периклинального окончания рассматриваемого региона, где экологические условия благоприятствовали максимальному развитию органического мира. Средние значения открытой пористости здесь составляют 5,6–10,2 %, а пределы, в которых колеблется этот параметр – 0,8–19 %.

Рифообразование в нижнем кембрии происходило в условиях регressiveного цикла осадконакопления [1]. Это обстоятельство не позволило постройкам длительно развиваться вверх и способствовало латеральному распространению органогенных карбонатных горизонтов. Максимальный рост построек, скорее всего, происходил на обращенной к более глубокой части моря стороне [16].

*Выделение единичных рифогенных построек в осинском горизонте нижнего кембрия на основании анализа сейсмоамплитуд.* Одним из основных методов выделения и картирования рифогенных построек нижнекембрийского возраста является 2D- и 3D-сейсморазведка методом общей глубинной точки. По данным сейсмических исследований на территории Непско-Ботуобинской антеклизы выявляются зоны развития как линейных, так и одиночных карбонатных



построек. Впервые вопросы локального прогноза органогенных построек юго-восточного склона Непско-Ботубинской антеклизы (Игнелинский риф) по данным интерпретации 2D-сейсморазведочных работ были детально рассмотрены в работе Н.В. Мышевского [17]. Следующим важным этапом в развитии проблем локального прогноза органогенных построек на территории Непско-Ботубинской антеклизы стали работы геологов компании «РН-Эксплорейшн» [18].

Основные особенности, выявленные при анализе данных сейсмических исследований, заключаются в разнообразии рифогенных построек, а именно в различии их размеров, форм, волновых характеристик, а также строения и состава. Основным характерным кри-

терием для выделения одиночной рифогенной постройки является различие пластовых скоростей в рифогенных постройках, которые варьируют в пределах от 7500 до 9500 м/с. Также отмечается уменьшение акустической жесткости в районе «кольцевых аномалий» (рис. 2).

На рис. 3 отображен пример выделения карбонатных построек по данным 2D- и 3D-съемки. По таким признакам, как увеличение амплитуды положительного отражения кольцевой формы и уменьшение акустической жесткости, появляется возможность интерпретировать сейсмические данные 2D- и 3D-съемки и обнаруживать одиночные рифогенные постройки в карбонатном коллекторе осинского горизонта.

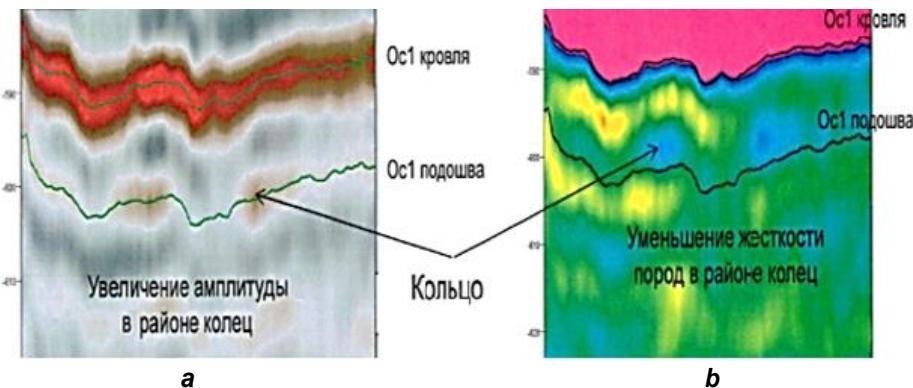


Рис. 2. Данные 3D-съемки с выделением рифогенных построек в осинском горизонте [19]:

а – разрез по кубу амплитуд; б – разрез по кубу акустического импеданса

Fig. 2. 3D survey data with reef structures identification in the Osinsky horizon [19]:  
a – section along the cube of amplitudes; b – section along the cube of acoustic impedance

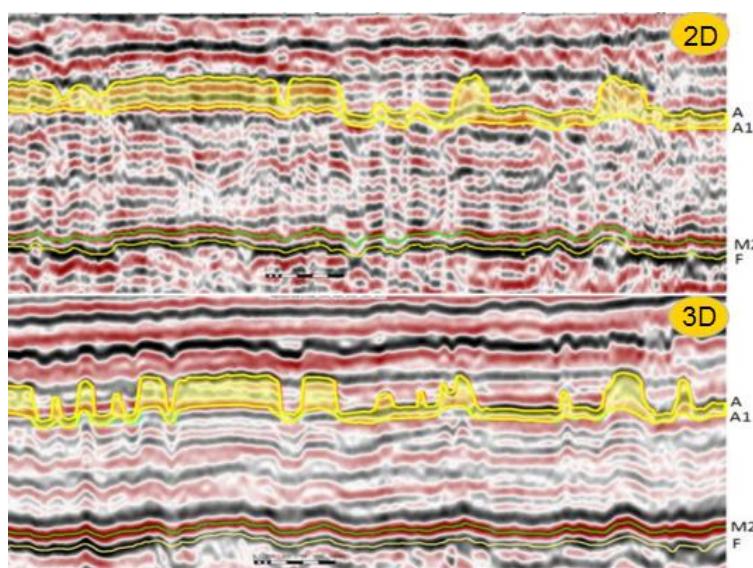


Рис. 3. Сравнение данных 2D- и 3D-сейсморазведки через рифовые постройки осинского горизонта [11]  
Fig. 3. Comparison of 2D and 3D seismic data through the reef structures of the Osinsky horizon [11]



Из анализа временных толщин надосинских солей следует, что центральные части колец приурочены к зонам увеличения толщины солевой пачки. Это говорит о вероятном уплотнении внутренней части. Данный факт подтверждает соответствие выделенных объектов одиночным патч-рифам, где внутренней частью являются лагунные отложения с пониженными фильтрационно-емкостными

свойствами (рис. 4). На рис. 4 области замкнутых аномалий отображены зелеными линиями контура.

По изменению амплитуды в пределах «кольца» выделяются различные фациальные зоны (рис. 5). По скважинным данным эти фациальные зоны характеризуются различными коллекторскими свойствами.

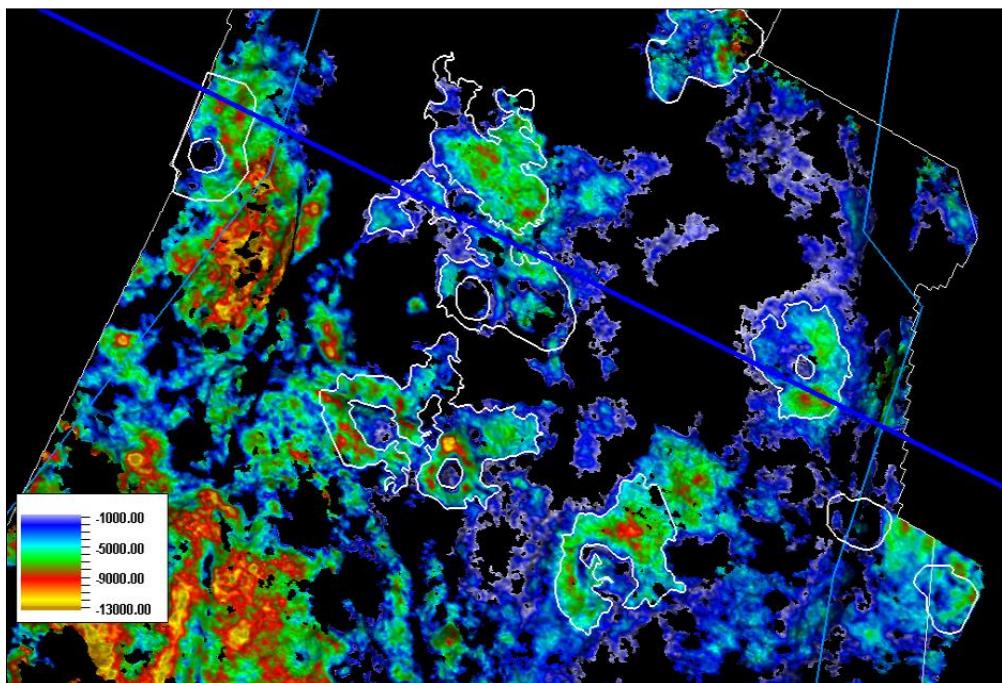


Рис. 4. Рифогенные постройки, выделенные в интервале осинского горизонта в пределах Непско-Ботубинской антеклизы [20]

Fig. 4. Reef structures identified in the interval of the Osinsky horizon within the Nepa-Botuoba antecline [20]

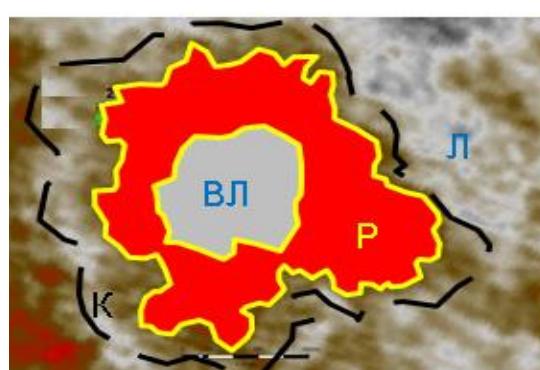


Рис. 5. Фациальная зональность колец:  
ВЛ – внутририфовая лагуна в центре кольца; Р – рифовый гребень, представленный органогенными постройками; К – краевая зона рифа, переходная от рифовых отложений к лагунным; Л – внерифовая лагуна

Fig. 5. Facial zoning of rings:  
ВЛ – intra-reef lagoon in the center of the ring; Р – reef ridge represented by organogenic structures; К – marginal reef zone, transitional from reef to lagoon deposits; Л – off-reef lagoon



По скважинным данным исследуемое сейсмическое отражение приурочено к средней части пласта ОС<sub>1</sub>, где происходит наиболее существенное изменение коллекторских свойств. В скважинах, находящихся в кольцевой аномалии (красная зона), происходит повышение эффективных толщин. Основными методами для выделения зон колец по скважинам являются метод нейтронного гамма-каротажа и метод измерения интервального времени пробега продольной волны.

### Заключение

Комплексный анализ материалов 2D- и 3D-сейсморазведки методами общей глубинной точки, нейтронного гамма-каротажа,

а также измерения интервального времени пробега продольной волны позволил по определенному алгоритму выделить в карбонатном разрезе северо-восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы отдельные образования органогенных (рифогенных) построек. На основе разработок и подходов, которые помогают выявить органогенные постройки как аномалиеобразующие объекты геологоразведочных работ по совокупности признаков в волновом поле, автором было исследовано несколько перспективных участков. По результатам данного исследования были подготовлены рекомендации по изучению новых объектов, наиболее значимых по комплексу признаков.

### Список литературы

1. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботуобинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина): монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 467 с.
2. Twenhofel W.H. Pre-Cambrian and Carboniferous algal with deposits // American Journal of Science. 1919. Vol. 48. Iss. 3. P. 339–352.
3. Rigby J.K. Reefs and reefs environments // Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. 1969. Vol. 53. Iss. 3. P. 738.
4. Жемчугова В.А., Федотов С.Л. Прогнозирование природных резервуаров в разрезе верхнекаменно-угольно-нижнепермской карбонатной толщи Тимано-Печорской провинции // Геология горючих ископаемых европейского северо-востока России: труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Вып. 92. Сыктывкар, 1998. С. 63–67.
5. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы: монография. В 2 т. Т. 1: Стратиграфия / ред. Ю.Я. Шабанов. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2016. 497 с.
6. Хабаров Е.М. Сравнительная характеристика позднедокембрейских рифогенных формаций. Новосибирск: Наука, 1985. 125 с.
7. Ильин В.Д., Фортунатова Н.К. Методы прогнозирования и поисков нефтегазоносных рифовых комплексов. М.: Недра, 1988. 199 с.
8. Задорожная Н.М. Некоторые аспекты эволюции ископаемых органогенных построек // Тезисы докладов 30-й сессии Всесоюзного палеонтологического общества. Львов, 1984. С. 34–36.
9. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: ГЕОС, 2003. 260 с.
10. Петров П.Ю., Семихатов М.А. Верхнерифейский строматолитовый рифовый комплекс: свита буровой Туруханского района Сибири // Литология и полезные ископаемые. 1998. № 6. С. 604–628.
11. Фомин А.Е., Батищева А.М., Гайдук А.В., Филичев А.В. Выделение перспективных в нефтегазовом отношении объектов в подсолевом карбонатном интервале разреза Непского свода Непско-Ботуобинской антеклизы по данным сейсморазведки 2D и 3D // ГеоБайкал-2016: материалы конф. Иркутск, 2016. С. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601689>
12. Fenton C.L., Fenton M.A. Algae and algal beds in the belt series of Glacier National Park // The Journal of Geology. 1931. Vol. 39. Iss. 7. P. 670–686.
13. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории / пер. с англ. М.: Недра, 1980. 463 с.
14. Nelson H.F., Brown C.W., Brineman J.H. Skeletal limestone classification // Classification of carbonate rocks: a symposium. Mem. American Association of Petroleum Geologists. 1962. Vol. 1. P. 224–253.
15. Задорожная Н.М. Типизация и классификации рифогенных формаций // Биота как фактор геоморфологии и геохимии. Рифогенные формации и рифы в эволюции биосфера: материалы конф. М.: Изд-во ПИН РАН, 2009. С. 36–39.
16. Калинкина Л.И., Шутов Г.Я. Рифогенные отложения среднемотской подсвиты Непского свода юга Сибирской платформы // Советская геология. 1981. № 1. С. 68–72.
17. Мышевский Н.В. Игнялинский барьерный риф – новый перспективный объект на Непском своде // Геология и геофизика. 1991. № 11. С. 99–107.
18. Гайдук А.В., Митюков А.В., Филичев А.В., Мордвинцев М.В. Выявление перспективных и высокопродуктивных залежей углеводородов в древнем вендреннекембрейском осадочном чехле Непско-Ботуобинской антеклизы на основании интерпретации современных геофизических данных // ГеоБайкал-2016: материалы конф. Иркутск, 2016. С. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601731>



19. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьева Л.В., Постибаева В.В., Коновалцева Е.С. Природные резервуары рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга Сибирской платформы: особенности строения и закономерности размещения // Геология нефти и газа. 2010. № 6. С. 54–64.

20. Гайдук А.В., Альмендингер О.А. Условия формирования и критерии прогноза зон улучшенных коллекторских свойств древних венд-кембрийских резервуаров (на примере Даниловского лицензионного участка (Восточная Сибирь)) // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2013. № 1. С. 10–13.

### References

1. Shemin GG. *Geology and prospects of oil and gas potential of the Vendian and Lower Cambrian central regions of the Siberian platform (Nepa-Botuoba, Baykitskaya antecline and Katanga saddle)*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 467 p. (In Russ.)
2. Twenhofel WH. Pre-Cambrian and Carboniferous algal with deposits. *American Journal of Science*. 1919;48(3):339–352.
3. Rigby JK. Reefs and reefs environments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1969;53(3):738.
4. Zhemchugova VA, Fedotov SL. Forecasting of natural reservoirs in the section of the Upper-carboniferous Lower Permian carbonate strata of the Timan-Pechora province. *Geologiya goryuchikh iskopaemykh evropeiskogo severo-vostoka Rossii: trudy Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk = Geology of fossil fuels in the European North-East of Russia: Proceedings of the Institute of Geology of Komi Science centre of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. Iss. 92. Syktyvkar; 1998. p.63–67. (In Russ.)
5. Shabanov YuYa. *Stratigraphy of Siberian oil and gas basins. Cambrian of the Siberian Platform*. In 2 vol. Vol. 1: *Stratigraphy*. Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2016. 497 p. (In Russ.)
6. Khabarov EM. *Comparative characteristics of Late Precambrian rift formations*. Novosibirsk: Nauka; 1985. 125 p. (In Russ.)
7. Il'in VD, Fortunatova NK. *Forecasting and searching methods of oil and gas-bearing reef complexes*. Moscow: Nedra; 1988. 199 p. (In Russ.)
8. Zadorozhnaya NM. Some evolution aspects of fossil organogenic structures. *Tezisy dokladov 30-i sessii Vsesoyuznogo paleontologicheskogo obshchestva = Abstracts of the 30<sup>th</sup> session of the All-Union Paleontological Society*. Lvov; 1984. p.34–36. (In Russ.)
9. Kuznetsov VG. *Evolution of the carbonate formation in the Earth's history*. Moscow: GEOS; 2003. 260 p. (In Russ.)
10. Petrov PYu, Semikhatov MA. Upper Riphean stromatolite reef complex: drillsite formation in the Turukhansk region of Siberia. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 1998;6:604–628. (In Russ.)
11. Fomin AE, Batishcheva AM, Gaiduk AV, Filichev AV. Identification of petroleum prospects in subsalt carbonate section of Nepa-Botuoba antecline by 2D and 3D seismic data. *GeoBaikal-2016*. Irkutsk; 2016. p.1–6. (In Russ.) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601689>
12. Fenton CL, Fenton MA. Algae and algal beds in the belt series of Glacier National Park. *The Journal of Geology*. 1931;39(7):670–686.
13. Wilson JL. Carbonate facies in geologic history; 1975. 471 p. (Russ. ed.: *Karbonatnye fatsii v geologicheskoi istorii*. Moscow: Nedra; 1980. 463 p.).
14. Nelson HF, Brown CW, Brineman JH. Skeletal limestone classification. *Classification of carbonate rocks: a symposium. Mem. American Association of Petroleum Geologists*. 1962;1:224–253.
15. Zadorozhnaya NM. Typification and classification of reef formations. *Biota kak faktor geomorfologii i geokhimii. Rifogennye formatsii i rify v evolyutsii biosfery: materialy konferentsii = Biota as a factor of geomorphology and geochemistry. Reef formations and reefs in biosphere evolution: conference proceedings*. Moscow: Borissiak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences; 2009. p.36–39. (In Russ.)
16. Kalinkina LI, Shutov GYa. Rifogenic deposits of the Middle Mot subformation of the Nepa arch of the southern Siberian platform. *Sovetskaya geologiya*. 1981;1:68–72. (In Russ.)
17. Myshevskii NV. Ignalinsky barrier reef – a new promising object on the Nepa arch. *Geologiya i geofizika*. 1991;11: 99–107. (In Russ.)
18. Gaiduk AV, Mityukov AV, Filichev AV, Mordvintsev MV. Identification of prospective hydrocarbon deposits in the Vendian-Cambrian sedimentary cover Nepa-Botuoba antecline. *GeoBaikal-2016*. Irkutsk; 2016. p.1–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201601731>
19. Postnikova OV, Fomicheva LN, Solovieva LV, Poshibayev VV, Konovaltseva ES. Natural reservoirs of Riphean-Vendian-Cambrian sedimentary basin of south of Siberian platform: features of structure and distribution regularities. *Geologiya nefti i gaza = Oil and Gas Geology*. 2010;6:54–64. (In Russ.)
20. Gaiduk AV, Almendinger OA. Formation conditions and criteria for prediction of areas of improved reservoir properties ancient Vendian-Cambrian reservoirs (for example, Danilovskiy license area (East Siberia)). *Nauchno-tehnicheskii vestnik OAO «NK 'Rosneft'*. 2013;1:10–13. (In Russ.)

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Уренко Роман Сергеевич,**  
аспирант,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
✉ e-mail: urenko240196@mail.ru

**Roman S. Urenko,**  
Postgraduate Student,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
✉ e-mail: urenko240196@mail.ru



**Вахромеев Андрей Гелиевич,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий Лабораторией геологии нефти и газа,  
Институт земной коры СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,  
e-mail: andrey\_igp@mail.ru  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Oil and Gas Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: andrey\_igp@mail.ru

**Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 05.10.2020; одобрена после рецензирования 20.01.2021; принятa к публикации 24.02.2021.

The article was submitted 05.10.2020; approved after reviewing 20.01.2021; accepted for publication 24.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.423

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>



## Структура поверхности высокопробного самородного золота Приамурья

© С.М. Радомский<sup>a</sup>, В.И. Радомская<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск, Россия

**Резюме:** Целью данного исследования являлось изучение структуры поверхности высокопробного золота. Предметом исследования служили золоторудные месторождения Приамурья, объектом исследования стали образцы самородных высокопробных золотин с этих месторождений. В ходе работы были использованы методы термодинамики и рентгеновской электронной микроскопии. В результате была установлена многослойная структура поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья со следующими уровнями: пограничный слой с нулевой степенью окисления Au<sup>0</sup> в форме металлического золота желтого цвета; оксидный слой со степенью окисления Au<sup>+1</sup> в форме Au<sub>2</sub>O фиолетового цвета; оксидный слой со степенью окисления Au<sup>+3</sup> в форме Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> желто-коричневого цвета; гидратированный оксидный слой со степенью окисления Au<sup>+3</sup> в форме Au(OH)<sub>3</sub> красно-желто-коричневого цвета. Методами электронной микроскопии выделяются внешние структуры поверхности – плотные оксидные слои формы Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и рыхлые гидратированные слои формы Au(OH)<sub>3</sub>, тогда как внутренние слои металлического и одновалентного золота не просматриваются. Важными термодинамическими характеристиками представленных уровней являются значения стандартных окислительно-восстановительных потенциалов  $E^\circ$ , определяющих их физико-химические свойства: для металлического золота  $E^\circ = +1,68$  В; для оксидного слоя со степенью окисления Au<sup>+1</sup> в форме Au<sub>2</sub>O  $E^\circ = +0,32$  В; для оксидного слоя со степенью окисления Au<sup>+3</sup> в форме Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $E^\circ = +1,36$  В; для гидратированного оксидного слоя со степенью окисления Au<sup>+3</sup> в форме Au(OH)<sub>3</sub>  $E^\circ = +0,7$  В. Результаты проведенных авторами исследований свидетельствуют о том, что структура поверхности имеет несколько понижающих окислительно-восстановительный потенциал слоев, что объясняет генерирование и образование мигрирующих форм золота в увлажненных гипергенных условиях окружающей природной среды.

**Ключевые слова:** геохимия, золото, структура поверхности, Приамурье

**Для цитирования:** Радомский С.М., Радомская В.И. Структура поверхности высокопробного самородного золота Приамурья. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>

## Surface structure of Amur region high grade native gold

© Sergey M. Radomskiy<sup>a</sup>, Valentina I. Radomska<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveschensk, Russia

**Abstract:** The purpose of the research is to study the surface structure of high grade gold. The subject of research is gold ore fields in the Amur region. The object of the study is samples of native high grade gold grains from these fields. The study uses the methods of thermodynamics and X-ray electron microscopy. The study results in revealing a multilayer structure of the surface of high grade minerals of the Amur region native gold with the following levels: a boundary layer with zero oxidation degree Au<sup>0</sup> in the form of yellow metallic gold; an oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+1</sup> in the form of purple Au<sub>2</sub>O; an oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+3</sup> in the form of a yellow-brown Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; a hydrated oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+3</sup> in the form of a red-yellow-brown Au(OH)<sub>3</sub>. The methods of electron microscopy have allowed to identify external surface structures – dense oxide layers of the form of Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and loose hydrated layers of the form of Au(OH)<sub>3</sub>, whereas the inner layers of metallic and monovalent gold are not visible. Important thermodynamic characteristics of the presented levels are the values of standard oxidation-reduction potentials ( $E^\circ$ ), which determine their physicochemical properties: for metallic gold  $E^\circ = +1.68$  V; for the oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+1</sup> in the form of Au<sub>2</sub>O –  $E^\circ = +0.32$  V; for the oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+3</sup> in the form of Au<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  $E^\circ = +1.36$  V; for the hydrated oxide layer with the oxidation degree Au<sup>+3</sup> in the form of Au(OH)<sub>3</sub> –  $E^\circ = +0.7$  V. The results of the conducted studies indicate that the surface structure has several layers that lower the oxidation-reduction potential, which explains the generation and formation of migratory forms of gold in humid hypergene conditions of natural environment.

**Keywords:** geochemistry, gold, surface structure, Amur region

**For citation:** Radomskiy SM, Radomskaya VI. Surface structure of Amur region high grade native gold. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):39–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-39-47>



## Введение

Золото среди химических элементов имеет самый высокий окислительно-восстановительный потенциал, поэтому обычно встречается в виде минералов самородного золота. При этом оно обладает геохимической двойственностью проявляемых свойств: с одной стороны, накапливается в виде минералов самородной формы, с другой – активно мигрирует в природной среде [1], что дало основание В.И. Вернадскому считать его «всюдным элементом». Поверхность минералов самородного золота разграничивает эти крайние формы проявляемых свойств и определяет его поведение в природной среде. Целью данной работы является изучение структуры поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья методами термодинамики и растровой электронной микроскопии, поэтому представляется актуальным исследовать закономерности процесса природной самоорганизации выделений минералов высокопробного самородного золота.

Количество атомов золота, обладающих избыточной «связанной» энергией  $T\Delta S$  более 30 Дж/моль, характеризует поверхностные оксидные слои ионов золота, а количество атомов, обладающих минимальной энергией  $\Delta H$  менее 15 Дж/моль, – внутренние металлические слои атомов золота при абсолютной температуре  $T$ , К, изменении энтропии  $\Delta S$ , Дж/моль·К, и изменении энталпии  $\Delta H$ , кДж/моль [2]. Критерием направления протекания химических реакций было выбрано значение изобарно-изотермического потенциала (свободной энергии Гиббса)  $\Delta G^\circ = -E^\circ zF$ , кДж/моль, которое определяют: значения стандартных электродных окислительных потенциалов  $E^\circ$ , В; количество электронов  $z$ ; число Фарадея  $F$ , равное 96500 Кл/моль. Для водных растворов благородных металлов при стандартных термодинамических условиях (давлении  $P = 105$  Па и температуре  $T = 298,15$  К) значения  $E^\circ$  составляют  $+(0,45\text{--}1,85)$  В, а для случаев, отличающихся от стандартных, потенциал реакции окисления принято записывать по имени уравнению Нернста. Отрицательное значение  $\Delta G^\circ$  характеризует термодинамически возможное и самопроизвольное протекание реакций [3].

## Материалы и методы исследования

Материалом для данного исследования послужили образцы высокопробного самородного золота месторождений Приамурья, а инструментами – методы и методики электронной микроскопии, реализованные на растровом электронном микроскопе РЭМ JSM-6390LV (JEOL, Япония), интегрированном с микрорентгеноспектральным энергодисперсионным анализатором Oxford INCAEnergy (Oxford Instrument, Англия) с режимами высокого (HV) и низкого (LV) вакуума и детекторами вторичных (SEI) и обратно рассеянных (BEI) электронов при аппаратном разрешении 3 нм и пошаговом увеличении до 300000 раз [4]. Анализы были выполнены в Аналитическом центре минералого-геохимических исследований Института геологии и природопользования ДВО РАН оператором Т.Б. Макеевой.

## Результаты исследования

На рис. 1. представлен рентгенографический снимок природного высокопробного самородного золота с месторождений Приамурья с сеткой геометрических размеров исследуемой золотины. Качественный энергодисперсионный спектр золотины представлен на рис. 2.

«Неопределяемый» элемент водород в форме молекул воды  $\text{H}_2\text{O}$  и гидроксила  $[\text{OH}]^-$  характеризует первый пик слева от начала со значением в максимуме 0,1 кэВ [5]. Гипотетическую возможность того, что это может быть пиком бериллия, мы не поддерживаем вследствие кларковых количеств последнего 0,01 %, что намного – на три порядка единиц концентраций – ниже порога обнаружения рентгеновскими методами.

Следующий пик со значением 0,4 кэВ принадлежит атому кислорода для всех форм – радикальной, оксидной и гидроксидной [6]. Стандартных программ для определения количеств водорода и кислорода нет, хотя массовая доля кислорода может быть определена по разности 100 % и количества известных компонентов. Массовые доли золота характеризуются пиком 2,2 кэВ и отмечены программой на рис. 2. На рис. 3 изображена поверхность высокопробной золотины  $\text{Au}_2\text{O}_3$ , представленная оксидной пленкой. При этом

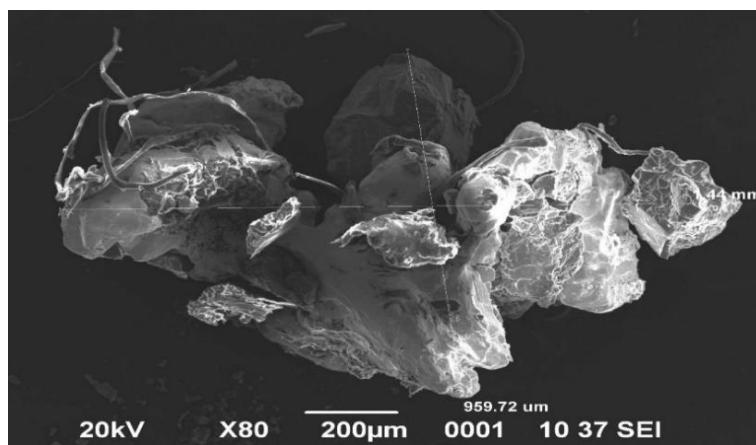


Рис. 1. Высокопробная золотина  
Fig. 1. A high grade gold grain

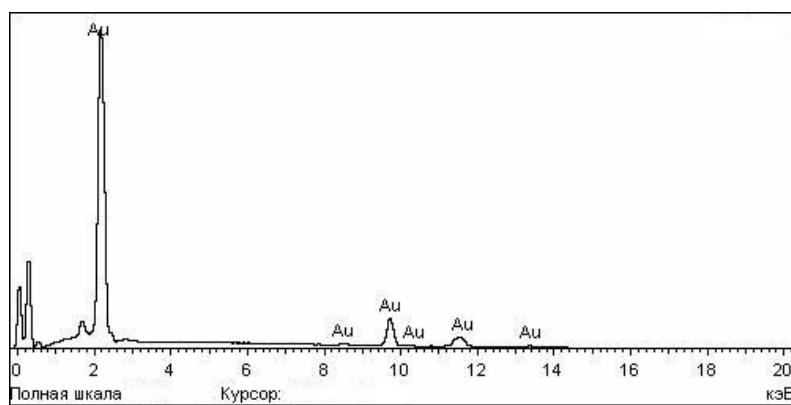


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр высокопробной золотины  
Fig. 2. Energy dispersive spectrum of a high grade gold grain

границы на фотографии получаются резкими и четкими вследствие плотнейшей упаковки атомов, а сама свободная поверхность стремится к минимальным значениям. На рис. 4 поверхность образована гидратированными оксидными формами  $\text{Au}(\text{OH})_3$ , которые испы-

тывают более дальнодействующие силы отталкивания по сравнению с силами взаимного притяжения. В этом случае свободная поверхность увеличивается, становится рыхлой, а атомы расталкивают друг друга, поэтому фотография получается размытой и нечеткой.

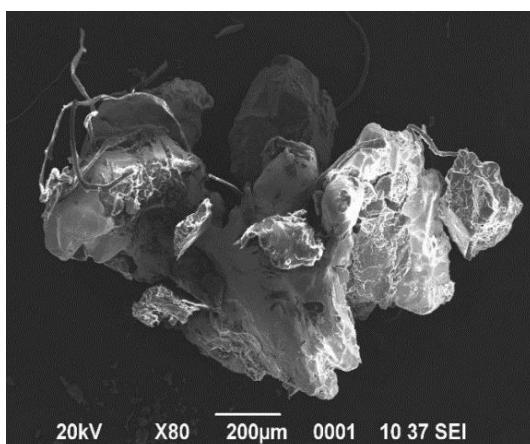


Рис. 3. Высокопробная золотина  
твердых оксидных форм  
Fig. 3. A high grade gold grain  
of solid oxide forms

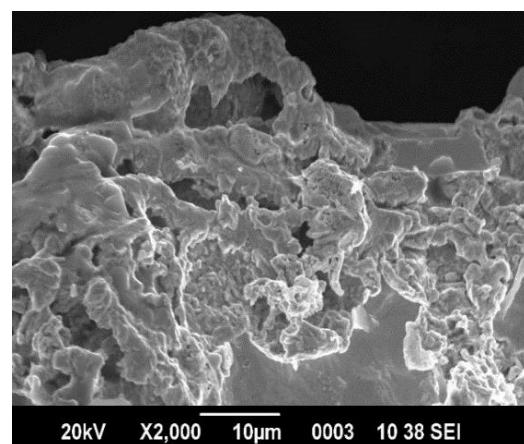


Рис. 4. Высокопробная золотина  
рыхлых гидроксидных форм  
Fig. 4. A high grade gold grain  
of loose hydroxide forms



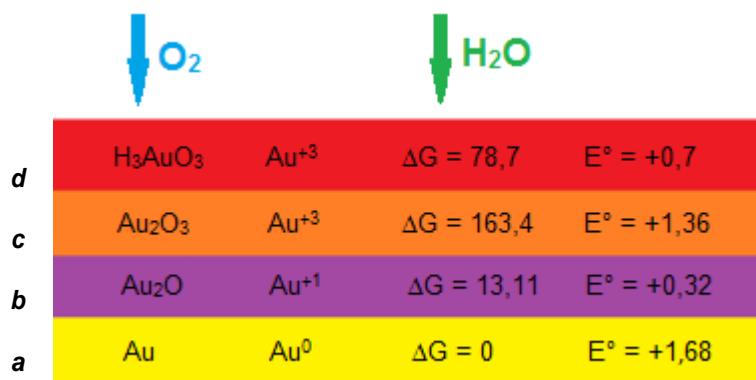
## Обсуждение результатов

Известно, что золото является самым инертным химическим элементом и замыкает электрохимический ряд напряжений индивидуальных веществ со значением стандартного окислительно-восстановительного потенциала  $E^\circ = +1,68$  В. Однако поверхностные атомы золота обладают повышенными энергиями, что дает им возможность взаимодействовать с другими элементами, образуя пленки оксидов и гидроксидов [6]. Толщина этих пленок может достигать значений порядка нескольких нанометров, и химический состав их является различным, тогда как толщина пленок пропорциональна массовой доле растворенного кислорода в окружающей жидкой или газообразной среде [7]. В общем виде предлагаемая структура строения поверхности высокопробного золота представлена на рис. 5 [7, 8].

В условиях гипергенеза поверхность самородного золота контактирует с кислородом и окисляется воздухом в присутствии молекул воды с образованием оксидных слоев, состоящих из  $\text{Au}_2\text{O}$ . Количество оксидов пропорционально активности кислорода и окислительно-восстановительному потенциалу вмещающей среды  $Eh$ . Наиболее неустойчивый метастабильный фиолетовый оксид  $\text{Au}_2\text{O}$  ( $\Delta G^\circ = 13,11$  кДж/моль) образуется из  $\text{AuOH}$  при дегидратации и диспропорционирует по схеме  $3\text{Au}^{+1} \leftrightarrow 2\text{Au}^0 + \text{Au}^{+3}$  с образованием металлического золота  $\text{Au}^0$  и  $\text{Au}_2\text{O}_3$  [9].

Далее следует желто-бурый оксид  $\text{Au}_2\text{O}_3$ , который образуется как при диспропорционировании  $\text{Au}^{+1}$ , так и при более глубокой дегидратации, возникающей на поверхности  $\text{Au}(\text{OH})_3$ . Устойчивые малорастворимые оксиды  $\text{Au}_2\text{O}_3$  предохраняют минералы самородного золота от дальнейшего окисления, пассивируют их поверхность, делая ее инертной для реакций, протекающих в земной коре, в результате чего природное золото не реагирует с большинством химических веществ, находящихся в зоне химической эрозии земной коры. Пленка  $\text{Au}_2\text{O}_3$  обладает следующими термодинамическими параметрами:  $\Delta G = 78,7$  кДж/моль,  $\Delta S = 134,3$  Дж/моль·К [8–10]. Наибольшей устойчивостью из оксидов обладают закристаллизовавшиеся слои  $\text{Au}_2\text{O}_3$ (кр.), имеющие стандартный потенциал образования Гиббса ( $\Delta G^\circ \text{ Au}_2\text{O}_3$ (кр.) = 163,4 кДж/моль) и  $E^\circ = +1,36$  В. Наличие слоя оксидов на самородном золоте подтверждается электрохимическими и химическими методами исследования веществ по проявляемым ими свойствам [7].

При взаимодействии с водой или увлажненным воздухом оксиды  $\text{Au}_2\text{O}_3$  гидратируются, вследствие чего их внутренняя энергия понижается до значений  $\Delta G^\circ = 78,7$  кДж/моль и образуются рыхлые амфотерные гидроксиды красно-желто-коричневого цвета, имеющие формулы  $\text{Au}(\text{OH})_3$  или  $\text{H}_3[\text{AuO}_3]$ . При этом стандартный окислительно-восстановительный потенциал также снижается до значений



**Рис. 5. Структура поверхностного слоя природных высокопробных золотин самородного золота по направлению к внешнему слою:**

*a* – желтое металлическое золото со степенью окисления  $\text{Au}^0$ ; *b* – фиолетовый оксид  $\text{Au}_2\text{O}$  окисленной формы  $\text{Au}^{+1}$ ; *c* – желто-коричневый оксид  $\text{Au}_2\text{O}_3$  окисленной формы  $\text{Au}^{+3}$ ;

*d* – красно-желто-коричневый гидратированный оксид  $\text{Au}(\text{OH})_3$  или  $\text{H}_3[\text{AuO}_3]$  окисленной формы  $\text{Au}^{+3}$

**Fig. 5. Structure of the surface layer of natural high grade gold grains of native gold towards the outer layer:**

*a* – yellow metallic gold  $\text{Au}^0$ ; *b* – violet oxide  $\text{Au}_2\text{O}$  of the oxidized form  $\text{Au}^{+1}$ ; *c* – yellow-brown oxide  $\text{Au}_2\text{O}_3$  of the oxidized form  $\text{Au}^{+3}$ ; *d* – red-yellow-brown hydrated oxide  $\text{Au}(\text{OH})_3$  or  $\text{H}_3[\text{AuO}_3]$  of the oxidized form  $\text{Au}^{+3}$



$E^\circ = +0,7$  В и поверхность становится более химически активной, открывая возможные варианты для реакций – присоединения, замещения и растворения [8].

В зоне гипергенеза при значениях  $E^\circ < +0,7$  В происходят реакции присоединения и образуются пленки высокопробного золота, которые авторы работ [11–13] наблюдали при осаждении золота из растворов, поэтому для зоны окисленных руд характерна проба выше средней по месторождению и даже выше средней его пробы для самих окисленных руд. Образование на золотинках пленки высокопробного золота данные авторы связывают с процессом электрохимической коррозии при наличии в водном потоке окислителей и комплексообразователей. Однако представление Ю.П. Ивенсена и В.И. Левина о росте золотинок не имеет практического значения вследствие воздействия малых концентраций золота в пресных поверхностных водах Приамурья порядка  $2,5 \cdot 10^{-10}$  моль/дм<sup>3</sup>, которые частично образуются из отработанных гидротермальных растворов [14].

Также при значениях окислительно-восстановительных свойств среды  $Eh < +0,7$  В возможны реакции укрупнения золота, когда взаимодействуют оксидные слои поверхности золотин, золото-кислородные связи заменяются металлическими и при этом выделяются атомарный кислород и тепловая энергия, поскольку внутренняя энергия связи «золото – золото» обращается в ноль. Процессы минералообразования осуществляются на окисленных формах зародышевых кристаллов минералов золота и протекают с заметными скоростями при повышенных концентрациях. Кинетика минералообразования описывается теорией бинарных столкновений, и скорость реакции пропорциональна вероятности столкновений атомов золота, отнесенных к общему количеству столкновений всех атомов химических элементов в системе [14, 15].

Реакции замещения протекают в широком интервале окислительно-восстановительного потенциала среды  $Eh > +0,36$  В зоны гипергенеза для многочисленных ионов, геометрические и энергетические характеристики которых близки к ионам золота. В первую очередь это благородные металлы, среди которых

наиболее распространенным является серебро  $Ag^+$ , а также ионы меди  $Cu^{2+}$ , цинка  $Zn^{2+}$ , стронция  $Sr^{2+}$  и ряд других элементов [16, 17].

При значениях достигаемого окислительно-восстановительного потенциала внешней среды  $Eh > +0,7$  В начинается область реакций растворения гидратированных оксидных слоев золота, которые происходят как в подземных, так и в поверхностных водах. Так, дождевая вода имеет реальный окислительно-восстановительный потенциал  $Eh + (0,6–0,8)$  В, скапливаясь на земной поверхности, в зависимости от подстилающих пород она приобретает слабокислый характер с  $pH = 5–7$  или слабоосновной характер с  $pH = 7–9$  [15, 18]. Растворяясь в ней, атмосферный кислород повышает окислительно-восстановительный потенциал для слабоосновной среды до  $Eh + 1,24$  В, для слабокислой среды – до  $Eh + 1,23$  В. Значение максимально возможного насыщения атмосферным кислородом таких вод составляет +2,07 В за счет концентрации растворенного кислорода 10 мг  $O_2/dm^3$  и концентрации растворенного озона 0,8 мг  $O_3/dm^3$  [15, 19]. Растворенные формы золота образуют комплексные соединения с координационным числом 4 для концентрированных растворов и координационным числом 6 для разбавленных растворов. Комплексное состояние растворенных форм  $Au^{+3}$  и  $Au^{+1}$  стабилизируется в природных водотоках за счет понижения стандартных значений  $E^\circ$  при образовании этих соединений и может длительно существовать в гидросфере при постоянных значениях физико-химических величин  $Eh$  и  $pH$  [20].

## Заключение

Установившееся термодинамическое равновесие растворенных и минеральных форм золота для Приамурья имеет постоянные значения: самородные минеральные формы золота занимают 95,5 %, 4,5 % приходится на сумму окисленных форм 2,5 и 2 %-х растворенных мигрирующих форм золота в Приамурской геохимической провинции. Физико-химические параметры вмещающей природной среды благоприятны для процессов восстановления, минералообразования, где



скорости реакции восстановления превышают скорости реакции окисления:  $C_{ок.} / C_{вос.} < 1$  [19, 21].

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что поверхностный слой природных золотин состоит из атомов и химических соединений золота, обладающих повышенными значениями внутренней энергии, которые полностью определяют как структуру, так и проявляемые химические свойства этих природных минералов. При этом существует определенная закономерность в чередовании структурных поверхностных слоев: инертный слой металлического золота покрывает промежуточная метастабильная группа атомов  $Au^{+1}$ , которая диспропорционирует на более окисленное  $Au^{+3}$  и металлическое  $Au^0$ . Слой оксида  $Au_2O_3$  может закристаллизовываться и образовывать прочную пленку, предохраняющую от взаимодействий с химическими элементами, а также выступать в виде затравки для роста минерала из растворенных ионов золота или для укрупнения золотин при взаимодействии оксидных слоев  $Au_2O_3$  различных частиц. Гидратируясь в зоне гипергенеза, оксидный слой образует рыхлые фрагменты амфотерных гидроксидов  $Au(OH)_3$  или  $H_3[AuO_3]$ , которые, растворяясь, служат источником миграционных форм комплексных соединений золота [19, 22].

Образовавшиеся структурные слои оксидов и гидроксидов могут быть легко удалены с поверхности золота механическими, электрохимическими и химическими методами [23, 24].

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установлена многослойная структура поверхности высокопробных минералов самородного золота Приамурья со следующими уровнями:

- пограничный слой с нулевой степенью окисления  $Au^0$  в форме металлического золота желтого цвета;
- оксидный слой со степенью окисления  $Au^{+1}$  в форме  $Au_2O$  фиолетового цвета;
- оксидный слой со степенью окисления  $Au^{+3}$  в форме  $Au_2O_3$  желто-коричневого цвета;
- гидратированный оксидный слой со степенью окисления  $Au^{+3}$  в форме  $Au(OH)_3$  красно-желто-коричневого цвета.

2. Методом электронной микроскопии выделены внешние структуры поверхности – плотные оксидные слои формы  $Au_2O_3$  и рыхлые гидратированные слои формы  $Au(OH)_3$ , тогда как внутренние слои металлического и одновалентного золота не просматриваются.

3. Методом термодинамики определены значения стандартных окислительно-восстановительных потенциалов  $E^\circ$ , определяющих их физико-химические свойства:

- для металлического золота  $E^\circ = +1,68$  В;
- для оксидного слоя со степенью окисления  $Au^{+1}$  в форме  $Au_2O$   $E^\circ = +0,32$  В;
- для оксидного слоя со степенью окисления  $Au^{+3}$  в форме  $Au_2O_3$   $E^\circ = +1,36$  В;
- для гидратированного оксидного слоя со степенью окисления  $Au^{+3}$  в форме  $Au(OH)_3$   $E^\circ = +0,7$  В.

4. Структура поверхности с понижающимися значениями уровней окислительно-восстановительного барьера объясняет генерирование и образование мигрирующих форм золота в увлажненных гипергенных условиях окружающей природной среды.

### Список литературы

1. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G. The geochemistry of acid mine drainage // Environmental geochemistry / eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Vol. 9. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. P. 149–204.
2. Sato M. Persistency-field Eh-pH diagrams for sulfides and their application to supergene oxidation and enrichment of sulfide ore bodies // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. Vol. 56. Iss. 8. P. 3133–3156.
3. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия / пер. с англ. М.: Мир, 1968. 368 с.
4. DiCenzo S.B., Berry S.D., Hartford Jr E.H. Photoelectron spectroscopy of single-size Au clusters on a substrate // Physical Review B. 1988. Vol. 38. Iss. 12. P. 8465–8468. <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.8465>
5. Brown P.A., Gill S.A., Allen S.J. Metal removal from wastewater using peat // Water Research. 2000. Vol. 34. Iss. 16. P. 3907–3916. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00152-4)
6. Jambor J.L. Mineralogy of sulfide rich tailings and their oxidation products // Environmental geochemistry of sulfide mine-waters / eds. J.L. Jambor, D.W. Blowes. Vol. 22. Waterloo: Mineralogical Association of Canada, 1994. P. 59–102.



7. Радомский С.М., Радомская В.И. Механизм образования сростков минералов самородного золота // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 392. С. 209–214. <https://doi.org/10.17223/15617793/392/35>
8. Паддефет Р. Химия золота / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 264 с.
9. Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. Surface structural ion adsorption modeling of competitive binding of oxyanions by metal (hydr)oxides // Journal of Colloid and Interface Science. 1999. Vol. 210. Iss. 1. P. 182–193. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5904>
10. Barrow N.J., Bowden J.W. A comparison of models for describing the adsorption of anions A on a variable charge mineral surface // Journal of Colloid Interface Science. 1987. Vol. 119. Iss. 1. P. 236–250. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90263-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90263-3)
11. Альбов М.Н., Быбочкин А.М. Рудничная геология. М.: Недра, 1973. 430 с.
12. Ивенсен Ю.П., Левин В.И. Генетические золото-руденения и золоторудные формации // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Чукотской складчатой области / отв. ред. Ю.П. Ивенсен. М.: Наука, 1975. С. 5–120.
13. Шнейдерхен Г. Рудные месторождения / пер. с нем. М.: Иностранная литература, 1958. 501 с.
14. Радомский С.М. Естественный миграционный потенциал благородных металлов Монголо-Охотского золотоносного пояса // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 29–38.
15. Радомский С.М., Радомская В.И. Равновесные параметры процесса окисления благородных металлов // Естественные и технические науки. 2010. № 4. С. 166–170.
16. Радомский С.М., Радомская В.И., Моисеенко Н.В., Моисеенко В.Г. Благородные металлы в ландшафтах Амуро-Зейской равнины Приамурья // Доклады Академии наук. 2008. Т. 422. № 5. С. 665–667.
17. Rietra R.P.J.J., Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. The relationship between molecular structure and ion adsorption on variable charge minerals // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. Vol. 63. Iss. 19-20. P. 3009–3015. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00228-8)
18. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G., Paktunc D., Gould W.D., et al. The geochemistry of acid mine drainage // Treatise on geochemistry / eds. H.D. Holland, K.K. Turekian. Vol. 9. Oxford: Elsevier, 2003. P. 149–204.
19. Радомский С.М., Радомская В.И. Соотношение ионных и металлических форм благородных металлов на золотосеребряном месторождении Покровское (Верхнее Приамурье) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 1. С. 128–134.
20. Davis J.A., Leckie J.O. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface II: Surface properties of amorphous iron oxyhydroxide and adsorption of metal ions // Journal of Colloid and Interface Science. 1978. Vol. 67. Iss. 1. P. 90–107. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90217-5)
21. Dutrizac J.E., Jambor J.L. Jarosites and their application in hydrometallurgy // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 405–452. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.8>
22. Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. A surface structural approach to ion adsorption: the charge distribution (CD) model // Journal of Colloid Interface Science. 1996. Vol. 179. Iss. 2. P. 488–508. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0242>
23. Scaini M.J., Bancroft G.M., Knipe S.W. Reactions of aqueous  $\text{Au}^{1+}$  sulfide species with pyrite as a function of pH and temperature // American Mineralogist. 1998. Vol. 83. P. 316–322.
24. Widler A.M., Seward T.M. The adsorption of gold (I) hydrosulfide complexes by iron sulfide surface // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66. Iss. 3. P. 383–402.

## References

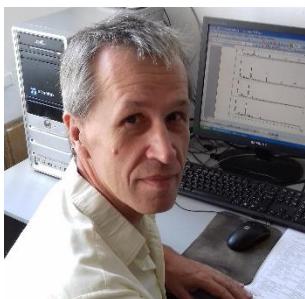
1. Blowes DW, Ptacek CJ, Jambor JL, Weisener CG. The geochemistry of acid mine drainage. In: Holland HD, Turekian KK (eds.). *Environmental geochemistry*. Vol. 9. Oxford: Elsevier-Pergamon; 2003. p.149–204.
2. Sato M. Persistency-field Eh-pH diagrams for sulfides and their application to supergene oxidation and enrichment of sulfide ore bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992;56(8):3133–3156.
3. Garrels RM, Christ CL. Solutions, minerals and equilibria; 1965. 450 p. (Russ. ed.: *Rastvory, mineraly, ravnovesiya*. Moscow: Mir; 1968. 368 p.).
4. DiCenzo SB, Berry SD, Hartford Jr EH. Photoelectron spectroscopy of single-size Au clusters on a substrate. *Physical Review B*. 1988;38(12):8465–8468. <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.8465>
5. Brown PA, Gill SA, Allen SJ. Metal removal from wastewater using peat. *Water Research*. 2000;34(16):3907–3916. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00152-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00152-4)
6. Jambor JL. Mineralogy of sulfide rich tailings and their oxidation products. In: Jambor JL, Blowes DW (eds.). *Environmental geochemistry of sulfide mine-waters*. Vol. 22. Waterloo: Mineralogical Association of Canada; 1994. p.59–102.
7. Radomskiy SM, Radomskaya VI. The mechanism of native gold mineral aggregate formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2015;392:209–214. <https://doi.org/10.17223/15617793/392/35>
8. Puddephatt RJ. The chemistry of gold; 1987. 284 p. (Russ. ed.: Paddefet R. *Khimiya zolota*. Moscow: Mir; 1982. 264 p.).
9. Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. Surface structural ion adsorption modeling of competitive binding of oxyanions by metal (hydr)oxides. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1999;210(1):182–193. <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5904>
10. Barrow NJ, Bowden JW. A comparison of models for describing the adsorption of anions A on a variable charge mineral surface. *Journal of Colloid Interface Science*. 1987;119(1):236–250. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(87\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(87)90217-5)



9797(87)90263-3

11. Al'bov MN, Bybochkin AM. *Mining geology*. Moscow: Nedra; 1973. 430 p. (In Russ.)
12. Ivensen YuP, Levin VI. Genetic gold mineralization and gold ore formations. In: Ivensen YuP (ed.). *Zolotorudnye formatssii i geokhimiya zolota Verkhoyano-Chukotskoi skladchatoi oblasti = Gold ore formations and geochemistry of gold in the Verkhoyansk-Chukotka folded region*. Moscow: Nauka; 1975. p.5–120. (In Russ.)
13. Schneiderhohn H. *Erzlagerstatten. Kurzvorlesungen zur einfuhrung und zur wiederholung*; 1944. 290 s. (Russ. ed.: Schneiderkhen G. *Rudnye mestorozhdeniya*. Moscow: Inostrannaya literatura; 1958. 501 p.).
14. Radomskii SM. Natural migration potential of noble metals of Mongol-Okhotsk gold belt. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(1):29–38. (In Russ.)
15. Radomskii SM, Radomskaya VI. Equilibrium operation factors of noble metals in oxidation process. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and technical sciences*. 2010;4:166–170. (In Russ.)
16. Radomskii SM, Radomskaya VI, Moiseenko NV, Moiseenko VG. Noble metals in landscapes of the Amur-Zeya plain in Priamurye. *Doklady Akademii nauk*. 2008;422(5):665–667. (In Russ.)
17. Rietra RPJJ, Hiemstra T, van Riemsdijk WH. The relationship between molecular structure and ion adsorption on variable charge minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999;63(19-20):3009–3015. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00228-8)
18. Blowes DW, Ptacek CJ, Jambor JL, Weisener CG, Paktunc D, Gould WD, et al. The geochemistry of acid mine drainage. In: Holland HD, Turekian KK (eds.). *Treatise on geochemistry*. Vol. 9. Oxford: Elsevier; 2003. p.149–204.
19. Radomskii SM, Radomskaya VI. The ratio of ion and metal forms of noble metals at gold-silver layer Pokrovskoe (Upper Amur region). *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;1:128–134. (In Russ.)
20. Davis JA, Leckie JO. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface II: Surface properties of amorphous iron oxyhydroxide and adsorption of metal ions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1978;67(1):90–107. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(78\)90217-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(78)90217-5)
21. Dutrizac JE, Jambor JL. Jarosites and their application in hydrometallurgy. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2000;40(1):405–452. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.8>
22. Hiemstra T, van Riemsdijk WH. A surface structural approach to ion adsorption: the charge distribution (CD) model. *Journal of Colloid Interface Science*. 1996;179(2):488–508. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0242>
23. Scaini MJ, Bancroft GM, Knipe SW. Reactions of aqueous  $\text{Au}^{1+}$  sulfide species with pyrite as a function of pH and temperature. *American Mineralogist*. 1998;83:316–322.
24. Widler AM, Seward TM. The adsorption of gold (I) hydrosulfide complexes by iron sulfide surface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002;66(3):383–402.

### Сведения об авторах / Information about the authors



**Радомский Сергей Михайлович,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
научный сотрудник Лаборатории рудогенеза,  
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
675000, г. Благовещенск, Рёлочный пер., 1, Россия,  
✉ e-mail: rsm@ascnet.ru

**Sergey M. Radomskiy,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Researcher of the Ore Genesis Laboratory,  
Institute of Geology and Nature Management,  
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science,  
1 Relochy Lane, Blagoveschensk 675000, Russia,  
✉ e-mail: rsm@ascnet.ru



**Радомская Валентина Ивановна,**  
кандидат химических наук,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеохимии,  
Институт геологии и природопользования ДВО РАН,  
675000, г. Благовещенск, Рёлочный пер., 1, Россия,  
✉ e-mail: radomskaya@ascnet.ru

**Valentina I. Radomskaya,**  
Cand. Sci. (Chemistry),  
Leading Researcher of the Laboratory of Biogeochemistry,  
Institute of Geology and Nature Management,  
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1 Relochy Lane, Blagoveschensk 675000, Russia,  
✉ e-mail: radomskaya@ascnet.ru



### Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
The authors contributed equally to this article.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

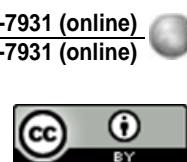
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.12.2020; одобрена после рецензирования 13.01.2021; принятa к публикации 17.02.2021.

The article was submitted 08.12.2020; approved after reviewing 13.01.2021; accepted for publication 17.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 552.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-48-55>

## Геммологическое и минералого-петрографическое исследование серпентинитов Восточного Саяна

© А.А. Анисимова<sup>a</sup><sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель данного исследования заключалась в изучении минералого-петрографических характеристик серпентинитов Восточного Саяна для выявления их наиболее декоративных разновидностей. Объектами исследования являлись образцы серпентинитов Улан-Ходинского и Хохуртовского месторождений Восточного Саяна. Образцы в количестве шести штук изучались макроскопически, затем из них были сделаны полированные пластины для геммологического изучения и шлифы для микроскопического исследования. Все исследования проводились в Научно-исследовательской лаборатории геммологии Иркутского национального исследовательского технического университета с использованием стандартных геммологических методов. Петрографическое изучение шлифов проводилось с помощью микроскопа Axio Lab A1. Макроскопически были выделены две основные декоративные разновидности серпентинитов: пятнистый серпентинит голубовато-зеленого цвета и массивный серпентинит цвета от темно-зеленого до черного. Пятнистая текстура серпентинита обусловлена многочисленными включениями рудных минералов – магнетита и оксидов железа. Твердость его – 4,5 по шкале Мооса, блеск – матовый. Также были получены данные об основных геммологических характеристиках образцов, соответствующие результатам уже опубликованных исследований серпентинитов ювелирного качества из других месторождений. На основе анализа микроструктуры и минерального состава серпентинитов Восточного Саяна было выявлено их соответствие пятнистым и массивным декоративным разновидностям серпентинитов других месторождений России. В данный момент этот материал не оценен по достоинству, хотя вполне может применяться в качестве скульптурного и ювелирно-поделочного декоративного камня.

**Ключевые слова:** серпентинит, антигорит, хризотил, лизардит, метаморфизм, месторождения Восточного Саяна

**Для цитирования:** Анисимова А.А. Геммологическое и минералого-петрографическое исследование серпентинитов Восточного Саяна. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 48–55. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-48-55>

## Gemological and mineralogical-petrographic study of the Eastern Sayan serpentinites

© Aleksandra A. Anisimova<sup>a</sup><sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the research is to study the mineralogical and petrographic characteristics of the Eastern Sayan serpentinites in order to identify their most decorative varieties. The objects of the study are the samples of serpentinites from the Ulan-Khodinskoye and Khokhurtovskoye deposits of the Eastern Sayan. Six samples were studied macroscopically then polished plates were made from them for gemological examination and thin sections for microscopic examination. All studies were carried out using standard gemological methods at the Gemmology Research Laboratory of the Irkutsk National Research Technical University. The petrographic study of thin sections was carried out using an Axio Lab A1 microscope. Macroscopically, two main ornamental varieties of serpentinite were identified: spotted bluish-green serpentinite and massive serpentinite of the color from dark green to black. The spotted structure of serpentinite is determined by numerous inclusions of ore minerals including magnetite and iron oxides. Its hardness is 4.5 on the Moh's scale, its gloss is matte. The data on the main gemological characteristics of the samples corresponding to the results of already published studies of gem-quality serpentinites from other deposits were also obtained. Having analyzed the microstructure and mineral composition of the Eastern Sayan serpentinites, their correspondence to the spotty and massive decorative varieties of serpentinites from other Russian deposits was revealed. At the moment, this material is not duly appreciated, although it may well be used as a sculptural and jewelry-ornamental decorative stone.

**Keywords:** serpentinite, antigorite, chrysotile, lizardite, metamorphism, Eastern Sayan deposits

**For citation:** Anisimova AA. Gemological and mineralogical-petrographic study of the Eastern Sayan serpentinites. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):48–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-48-55>



## Введение

Серпентинитами называются горные породы, представляющие собой продукт регионального или контактового метаморфизма богатых магнием ультраосновных или карбонатных пород<sup>1</sup>. В основном они состоят из минералов группы слоистого силиката магния – серпентина: хризотила, антигорита, лизардита и др. [1]. Хризотил и лизардит имеют идеальную слоистую структуру. В антигорите слои построены из групп тетраэдров, развернутых то вверх, то вниз от плоскости слоя. В хризотиле слои свернуты в трубку. Эти минералы представляют собой скрытоизоморфные аморфные массы белого, желтого, зеленого цвета или пестрой окраски. При перекристаллизации образуются волокнистые асбестовидные агрегаты хризотила. Морфологическая разновидность серпентина, представленная соотношением антигорита и лизардита, обуславливает структурные особенности серпентинитов, а также влияет на некоторые физико-механические свойства, такие как пористость [2]. В состав серпентинитов кроме минералов серпентиновой группы могут также входить магнетит, tremolит, гематит, эпидот, карбонат, тальк и другие. Разнообразная окраска серпентинитов обусловлена примесями гарниерита, ревдинскита, каолинита и других глинистых минералов.

Для большинства исследователей основной интерес серпентинит представляет как источник нефрита [3–6]. Однако и сам серпентинит широко используется в качестве декоративного материала. Поделочная разновидность серпентинита имеет название змеевика (от лат. *serpens* – «змея»). Также существуют другие названия камня в зависимости от его разновидностей, такие как моховик, корейский жад, серпентиновый жад и пр. [7, 8]. Минералы группы серпентина наряду с кальцитом, серицитом, тальком и кварцем могут входить в состав нефритоподобной породы, названной зарубежными исследователями «псевдо-жад» [9]. Окраска змеевика чаще является зеленой и имеет различные оттенки, но может

быть и желтой, голубоватой. Бовенит – просвечивающий бледно-зеленый, желто-зеленый до голубовато-зеленого тонкозернистый массивный материал, иногда просвечивающий. Вильямсит – светлый и темный голубовато-зеленый минерал, нередко просвечивающий, встречается в ассоциации с хромитом, обычно содержит включения этого минерала и белого брусила. Риколит – полосатый серпентин бледно- и темно-зеленого цвета, массивный. Порцеллофит – непрозрачный фарфоровидный серпентин зеленых оттенков. Ретинолит имеет темно-желтую со смолистым блеском окраску. Сателит – волокнистый серпентин с эффектом кошачьего глаза. Вердантик – серпентинитовая порода темно-зеленого цвета с прожилками кальцита<sup>2</sup>.

Серпентинит обрабатывается легко и мягко за счет небольшой твердости (2,5–3,5 по шкале Мооса). Он достаточно вязок, нечувствителен к нагреванию. Наиболее просвечивающие разновидности змеевика можно гравитировать. Благодаря своим выраженным декоративным свойствам этот камень идеально подходит для резьбы, а также используется как поделочный и декоративно-облицовочный материал. Так, например, в Европе из серпентина изготавливали столешницы, вазы, сосуды. В России этот камень применялся при изготовлении камнерезных изделий и во флорентийской мозаике для облицовки интерьеров во дворцах в сочетании с другими минералами и металлом. Уральские серпентиниты использовались для облицовки колонн, архитектурных сооружений и внутренней отделки зданий (Дворец съездов, станции метро в Москве), а также в качестве поделочного материала для сувенирных камнерезных изделий [10].

Разнообразие текстуры, окраски и рисунка серпентинов напрямую зависит от их состава и строения. По текстурно-декоративным признакам Л.С. Путолова и др. выделяют четыре типовых разновидности: крупнопятнистый, мелкопятнистый, пятнисто-полосчатый («струйчатый») и прожилково- пятнистый салатовый серпентин [11].

<sup>1</sup> Минералы: справочник. В 7 т. Т. 4. Вып. 1. Силикаты со структурой, переходной от цепочечной к слоистой. Слоистые силикаты (каолиновые минералы, серпентины, пирофиллит, тальк, слюды). М.: Наука, 1992. 599 с.

<sup>2</sup> Серпентин и серпентинит // Цветные камни Трансбайкальского региона [Электронный ресурс]. URL: <http://lavrovit.ru> (10.12.2020).



Крупнопятнистый серпентин обладает контрастной, пятнистой от светло-зеленой (серпентин) до темно-зеленой (хлорит) и почти черной (рудный минерал) окраской. Пятна его некрупные – 1–2 см. Главные минералы этой разновидности – серпентин, магнетит, хлорит, второстепенным является реликтовый оливин. За счет присутствия тонкодисперсных частиц рудного материала твердость змеевика – около 4 по шкале Мооса. Он слабо просвечивает в пластинах толщиной до 5 мм и тонких сколах. Структура его обусловлена апооливиновыми бластопорфировыми выделениями, представленными баститом, хлоритом и магнетитом. Микроструктура – неяснопетельчатая, неяснорешетчатая, волокнистая. Данная разновидность используется в качестве поделочного и декоративно-облицовочного высококачественного материала. Основные месторождения: Чусовское (Урал, Россия) и Куюльское (Камчатка, Россия).

Мелкопятнистый серпентин имеет темно-зеленую окраску с золотым оттенком. Просвечивает в пластинах толщиной 4–5 мм. К главным минералам данной разновидности относятся серпентин, хлорит, магнетит, хломит, брейнерит, к второстепенным минералам – пирит, гидроксиды железа, амфибол. Мелкопятнистый серпентин обладает петельчатой, ячеистой, решетчатой, поперечно-волокнистой микроструктурой. Излом его неровный, блеск – матовый до жирного. Твердость – 3–3,5 по шкале Мооса. На темно-зеленом фоне видны прожилки магнетита размером 8–10 мм. Камень применяется для декоративно-облицовочных работ, а также используется в качестве поделочного материала. Месторождение: Нагдалинское (Азербайджан).

Пятнисто-полосчатый «струйчатый» серпентин отличается неравномерной окраской в серовато-зеленных тонах. Главные его минералы – серпентин, карбонат, магнетит, тальк, хлорит, а второстепенные – иддингсит, цоизит, пренит. Не просвечивает. Микроструктура – бластопорфировая, гранобластовая, волокнистая, листовая. Излом – неровный до зазнозистого. Блеск – матовый до жирного, за счет карбоната иногда может быть стеклянным. На зеленом фоне наблюдаются мелкие пятна размерами до 8 мм светло-серого, желтого цвета или цвета от темно-зеленого до

черного. Рисунок дополняется светло-серыми или желтоватыми тонкими прожилками кальцита, а также включениями серебристо-серого магнетита. Этот камень – декоративно-облицовочный. Основное месторождение: Шабровское (Средний Урал, Россия).

Прожилково- пятнистый салатовый серпентин – бледно-зеленый с салатовым (фишташковым) фоном и более темными пятнами размером до 3 мм в поперечнике. Главные его минералы – кальцит, сидерит, хризотил, серпопфит, эпидот, второстепенные – хлорит, тальк, пренит, сфен, оливин, амфибол, гидроксиды железа и марганца. Не просвечивает. Имеет волокнистую мелколистоватую микроструктуру. Декоративность данного камня повышают дендриты марганца. Используется как поделочный и декоративно-облицовочный материал. Месторождение: Бирюзакан (Таджикистан) [11].

Месторождения серпентинита многочисленны и обычно приурочены к измененным массивам основного и ультраосновного состава [12, 13]. Особенno широко распространены они на Урале, Алтае, Восточном и Западном Саяне, Хамар-Дабане и в других местах [14]. Изучением серпентинитов Восточного Саяна занимались многие исследователи. Классическими в этой области являются работы В.Н. Лодочникова [15], М.Ф. Шестопалова [16], О.М. Глазунова [17, 18], Н.Л. Добрецова и др. [19].

В Восточных Саянах серпентиниты различного качества широко распространены на месторождениях нефрита (Улан-Ходинском, Хохортовском, Хамархудинском). На Улан-Ходинском месторождении известны проявления благородного серпентина в виде мало-мощных оторочек в краевых частях нефритовых залежей. Змеевики Хохортовского месторождения весьма однородны, хорошо принимают полировку, приобретая при этом прозрачность и приятный густо-зеленый тон. Змеевики разнообразны по строению и по тонам окраски.

В связи с актуальностью вышеизложенного материала целью данного исследования стало изучение минералого-петрографических характеристик серпентинитов Восточного Саяна для выявления наиболее декоративных их разновидностей.



## Объекты и методы исследования

Объектами проведенного исследования являлись образцы серпентинитов Улан-Ходинского и Хохортовского месторождений Восточного Саяна. Образцы в количестве шести штук изучались макроскопически, затем из них были сделаны полированные пластины для геммологического изучения и шлифы для микроскопического исследования. Все исследования проводились в Научно-исследовательской лаборатории геммологии Иркутского национального исследовательского технического университета с использованием стандартных геммологических методов. Петрографическое изучение шлифов проводилось с помощью микроскопа Axio Lab A1.

## Результаты исследования и их обсуждение

Макроскопически автором данной статьи выделены две основные декоративные разновидности серпентинитов: пятнистый голубо-

вато-зеленый серпентинит и массивный серпентинит цвета от темно-зеленого до черного. Пятнистая текстура серпентинита обусловлена многочисленными включениями темно-окрашенных рудных минералов – магнетита и оксидов железа. Твердость его – 4,5 по шкале Мооса, блеск – матовый.

В ходе работы были проведены геммологические исследования полированных образцов. Результаты представлены в табл. 1. При сравнении полученных данных с уже опубликованными ранее характеристиками ювелирного серпентинита из месторождения Вал Маленко (Италия) [20] отмечается ряд различий. Можно предположить, что различия в окраске, оптических свойствах и удельном весе образцов обусловлены различием минерального состава и непосредственно структурным типом породообразующего серпентина.

Также автором были проведены петрографические исследования шлифов серпентинитов Восточного Саяна. Результаты данного исследования представлены в табл. 2.

**Таблица 1. Сравнительный анализ геммологических характеристик серпентинитов ювелирного качества**

**Table 1. Comparative analysis of gemological characteristics of gem quality serpentinites**

Характеристика	Серпентинит пятнистый (Восточный Саян, Россия)	Серпентинит массивный (Восточный Саян, Россия)	Серпентинит (Вал Маленко, Италия) [20]
Цвет	Светлый голубовато-зеленый	Темно-зеленый	Зеленовато-желтый
Прозрачность	Просвевающий на глубину 5–6 мм	Просвевающий на глубину 3–5 мм	Непрозрачный
Показатель преломления	1,561	1,561	1,55
Удельный вес	2,63	2,61	2,5–2,67
Ультрафиолетовая флюoresценция	Инертен	Инертен	Инертен

**Таблица 2. Результаты петрографических исследований серпентинита**

**Table 2. Results of serpentinite petrographic studies**

Образец	Минеральный состав		Описание
	Главные минералы	Второстепенные минералы	
Серпентинит пятнистый С2	Хризотил (90 %)	Магнетит (менее 10 %), окислы железа	Текстура: пятнистая Структура: порфиробластовая, чешуйчато-волокнистая Основная ткань породы представлена чешуйчато-волокнистым агрегатом серпентина хризотилом, в массе которого распределены зернисто-пятнистые скопления магнетита. Магнетит в сорбательной перекристаллизации образует порфиробласти размером до 2,5 мм в длину. В породе проходит тонкая сеть субпараллельных микротрешин, запеченные окислами железа



Серпентинит массивный C5	Хризотил (97 %)	Магнетит (менее 2 %), окислы железа	Текстура: массивная Структура: тонкочешуйчатая в комбинации с микросферолитовой и радиально-лучистой; порфиробластовая (за счет рудного минерала) Размеры микросферолитов: менее 0,3 мм Основная ткань породы представлена хризотилом, имеющим преимущественно чешуйчато-волокнистое строение, участками переходящее в микросферолитовое и радиально-лучистое. В массе серпентина встречаются единичные порфиробласти рудного минерала размером до 2 мм в длину. В породе присутствует точечное скопление окислов железа. Один из порфиробластов магнетитов рассекается тонкими трещинами, залеченными зернистым хризотилом
--------------------------	-----------------	-------------------------------------	--

Если сравнить полученные данные с литературными [11], становится очевидным, что минеральный состав и микроструктура части серпентинитов Восточного Саяна совпадает с микроструктурой и текстурой серпентинитов ранее рассмотренных регионов и их можно

причислить к пятнистым типовым разновидностям. Так, например, шлиф магнетит-содержащего серпентинита по крупнопятнистой текстуре и минеральному составу схож с крупнопятнистым темно-зелёным змеевиком из Чусовского месторождения (рис. 1).



a



b

**Рис. 1. Серпентинит крупнопятнистый темно-зеленый:**  
а – Хокхуртовское месторождение; б – Чусовское месторождение

Структура – чешуйчато-волокнистая и частично параллельно-волокнистая

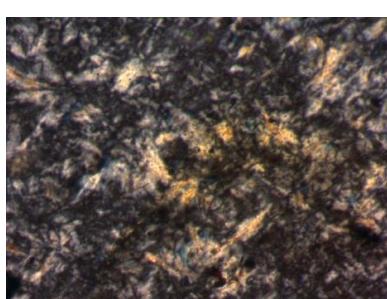
Минеральный состав: хризотил (90 %), магнетит (менее 10 %), хлорит, окислы железа, реликтовый оливин

**Fig. 1. Large-spotted dark green serpentinite:**

а – Khokhurtovskoye field; б – Chusovskoye field

Structure – lamellar-fibrous and partially parallel-fibrous

Mineral composition: chrysotile (90 %), magnetite (less than 10 %), chlorite, iron oxides, relict olivine



a



b

**Рис. 2. Серпентинит мелкопятнистый темно-зеленый:**

а – Хокхуртовское месторождение; б – Нагдалинское месторождение

Структура – тонкочешуйчатая в комбинации с микросферолитовой и радиально-лучистой

Минеральный состав: серпентин (98 %), магнетит, окислы железа, хлорит

**Fig. 2. Finely spotted dark green serpentinite:**

а – Khokhurtovskoye field; б – Nagdalinskoye field

Structure – fine-flaked in combination with microspherolite and divergent

Mineral composition: serpentine (98 %), magnetite, iron oxides, chlorite



Структура и минеральный состав остальных шлифов близки с характеристиками мелкопятнистого темно-зеленого змеевика из Нагдалинского месторождения (см. рис. 2). В ячейках решетки – криптокристаллический серпентин и реликтовый амфибол. Образцы представлены массивной текстурой, строение их – тонкочешуйчатое с микросферолитовой и радиально-лучистой структурой.

### Заключение

В результате проведенных исследований автором были выделены две основные деко-

ративные разновидности серпентинитов Восточного Саяна. На основе анализа микроструктуры и минерального состава серпентинитов Восточного Саяна было выявлено их соответствие пятнистым и массивным декоративным разновидностям серпентинитов других месторождений России. В данный момент этот материал не оценен по достоинству, хотя вполне может применяться в качестве скульптурного и ювелирно-поделочного декоративного камня. В сочетании с другими видами цветных камней его можно применять также и для облицовки интерьеров.

### Список литературы

1. Evans B.W., Hattori K., Barronet A. Serpentinite: what, why, where? // *Elements*. 2013. Vol. 9. Iss. 2. P. 99–106. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.99>
2. Шадрина С.В., Азарапина У.Ю., Шадрин А.А., Крицкий И.Л. Формирование пустотного пространства в серпентинитах // Геология нефти и газа. 2019. № 6. С. 41–46. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-6-41-46>
3. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade: Occurrence and metasomatic origin – extended abstract from International Geological Congress 2000. // *The Australian Gemmologist*. 2001. Vol. 21. P. 7–10.
4. Harlow G.E., Sorensen S.S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections // *International Geology Review*. 2005. Vol. 47. P. 113–146. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.2.113>
5. Замалетдинов Р.С. Методика поисков и разведки месторождений нефрита // *Разведка и охрана недр*. 1975. № 7. С. 18–24.
6. Сутурин А.Н., Замалетдинов Р.С., Секерина Н.В. Месторождения нефритов / отв. ред. И.С. Ломоносов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2015. 377 с.
7. Kim W.-S., Ahn H.-J., Kim D.-H., Yoon S.-H. Mineralogy and genesis of gem-quality serpentine jade from Korea // *Geological Society of America. Abstract with Programs*. 2006. Vol. 38. Iss. 5. P. 93.
8. Lin Xinying, Lin Xianzhou, Shuyi Y. Research on serpentine jade in Jilin Province // *2012 International Conference on Solid State and Materials. Lecture Notes in Information Technology*. 2012. Vol. 22. P. 96–100.
9. Barnes G.L. Understanding Chinese jade in a world context // *Journal of the British Academy*. 2018. Vol. 6. <https://doi.org/10.5871/jba/006.001>
10. Ферсман А.Е. Очерки по истории камня: В 2 т. Т. 1. М.: ТЕРРА – Книжный клуб, 2003. 304 с.
11. Путолова Л.С., Менчинская Т.И., Баранова Т.Л.,
- Вдовенко А.П. Декоративные разновидности цветного камня СССР. М.: Недра, 1989. 272 с.
12. Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. 192 с.
13. Велинский В.В., Пинус Г.В. Некоторые общие вопросы генезиса альпинотипных гипербазитов // Проблемы магматической геологии: сб. стат. / отв. ред. В.С. Соболев. Новосибирск: Наука, 1973. С. 360–376.
14. Месторождения хризотил-асбеста СССР / ред. П.М. Татаринов, В.Р. Артемов. М.: Недра, 1967. 511 с.
15. Лодочников В.Н. Серпентины и серпентиниты ильчирские и другие и петрологические вопросы с ними связанные. Л. – М.: ОНТИ, 1936. 817 с.
16. Шестопалов М.Ф. Ультраосновной массив Китайских Альп Восточного Саяна и связанные с ними месторождения // Труды Центральной научно-исследовательской лаборатории камней и самоцветов Гостреста «Русские самоцветы». Сборник работ по камням-самоцветам. 1938. Вып. 4. С. 84–100.
17. Глазунов О.М. Лысанский габбро-пироксенито-перидотитовый комплекс в западной части Восточного Саяна // Геология и геофизика. 1961. № 3.
18. Глазунов О.М. О серпентине из ЮЗ отрогов Восточного Саяна // Известия Томского политехнического института. 1964. Т. 127. Вып. 1. С. 18–26.
19. Добрецов Н.Л., Конников Э.Г., Медведев В.Н., Скляров Е.В. Офиолиты и олистостромы Восточного Саяна // Рифейско-нижнепалеозойские офиолиты Северной Евразии: сб. стат. Новосибирск: Наука, 1985. С. 34–58.
20. Adamo I., Diella V., Bocchio R., Rinaudo C., Marianni N. Gem-quality serpentine from Val Malenco, Central Alps, Italy // *Gems & Gemology*. 2016. Vol. 52. Iss. 1. P. 38–49. <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.52.1.38>

### References

1. Evans BW, Hattori K, Barronet A. Serpentinite: what, why, where? *Elements*. 2013; 9(2):99–106. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.99>
2. Shadrina SV, Azarapina UYu, Shadrin AA, Kritskii IL. Formation of interstitial space in serpentinite. *Geologiya nefti i gaza*. 2019;6:41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-6-41-46>



3. Harlow GE, Sorensen SS. Jade: Occurrence and metasomatic origin – extended abstract from International Geological Congress 2000. *The Australian Gemmologist*. 2001;21:7–10.
4. Harlow GE, Sorensen SS. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections. *International Geology Review*. 2005;47:113–146. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.2.113>
5. Zamaletdinov RS. Methodology for jade deposit prospecting and exploration. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 1975;7:18–24. (In Russ.)
6. Suturin AN, Zamaletdinov RS, Sekerina NV. *Jade deposits*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2015. 377 p. (In Russ.)
7. Kim WS, Ahn HJ, Kim DH, Yoon SH. Mineralogy and genesis of gem-quality serpentine jade from Korea. *Geological Society of America. Abstract with Programs*. 2006;38(5):93.
8. Lin Xinying, Lin Xianzhou, Shuyi Y. Research on serpentine jade in Jilin Province. *2012 International Conference on Solid State and Materials. Lecture Notes in Information Technology*. 2012;22:96–100.
9. Barnes G.L. Understanding Chinese jade in a world context. *Journal of the British Academy*. 2018;6. <https://doi.org/10.5871/jba/006.001>
10. Fersman AE. *Essays on the history of stone*. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: TERRA – Knizhnyi klub; 2003. 304 p. (In Russ.)
11. Putolova LS, Menchinskaya TI, Baranova TL, Vdovenko AP. *Decorative varieties of colored stone in the USSR*. Moscow: Nedra; 1989. 272 p. (In Russ.)
12. Varlakov AS. *Petrology of hyperbasite serpentinitization in folded areas*. Sverdlovsk: Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences; 1986. 192 p. (In Russ.)
13. Velinskii VV, Pinus GV. *Some general issues of alpinotypic hyper-mafic rock genesis*. In: *Problemy magmaticheskoi geologii = Problems of magmatic geology*. Novosibirsk: Nauka; 1973. p.360–376. (In Russ.)
14. Tatarinov PM, Artemov VR. *Chrysotile asbestos fields in the USSR*. Moscow: Nedra; 1967. 511 p. (In Russ.)
15. Lodochnikov VN. *Ilchir serpentines, serpentinites and others and petrological issues associated with them*. Leningrad – Moscow: ONTI; 1936. 817 p. (In Russ.)
16. Shestopalov MF. Ultramafic massif of the Kitoi Alps of the Eastern Sayan and associated deposits. *Trudy Tsentral'noi nauchno-issledovatel'skoi laboratorii kamnei i samotsvetov Gostresta "Russkie samotsvetы". Sbornik rabot po kamnyam-samotsvetam = Proceedings of the Central Scientific Research Laboratory of Stones and Gems of the State Trust "Russian Gems". Collection of works on gemstones*. 1938;4:84–100. (In Russ.)
17. Glazunov OM. Lysan gabbro-pyroxenite-peridotite complex in the western part of the Eastern Sayan. *Geologiya i geofizika*. 1961;3. (In Russ.)
18. Glazunov OM. On serpentine from the southwestern spurs of the Eastern Sayan. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1964;127(1):18–26. (In Russ.)
19. Dobretsov NL, Konnikov EG, Medvedev VN, Sklyarov EV. Ophiolites and olistostromes of the Eastern Sayan. In: *Rifeisko-nizhnepaleozoiskie ofiolity Severnoi Evrazii = Riphean-Lower Paleozoic ophiolites of Northern Eurasia*. Novosibirsk: Nauka; 1985. p.34–58. (In Russ.)
20. Adamo I, Diella V, Bocchio R, Rinaudo C, Marinoni N. Gem-quality serpentine from Val Malenco, Central Alps, Italy. *Gems & Gemology*. 2016;52(1):38–49. <https://doi.org/10.5741/GEMS.52.1.38>

### Сведения об авторе / Information about the author



**Анисимова Александра Алексеевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры ювелирного дизайна и технологий,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: aleksanisimova@mail.ru

**Aleksandra A. Anisimova**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Jewelry Design and Technologies,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
✉ e-mail: aleksanisimova@mail.ru

### Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.



#### Конфликт интересов / Conflict of interests

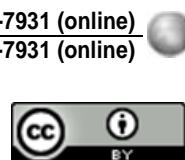
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by the author.

#### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.12.2020; одобрена после рецензирования 22.01.2021; принята к публикации 25.02.2021.

The article was submitted 18.12.2020; approved after reviewing 22.01.2021; accepted for publication 25.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.271

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-56-62>

## Совершенствование конструкции и способа применения экскаваторов с сортировочными ковшами

© А.Ю. Чебан<sup>a</sup><sup>a</sup>Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

**Резюме:** Целью данного исследования является повышение производительности и экономической эффективности ведения горных работ с применением экскаваторов с сортировочными ковшами на основе внедрения нового технико-технологического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования. В ходе исследования проводится анализ известных конструкций сортировочных ковшей, устанавливаемых на экскаваторы и обеспечивающих сортировку материала одновременно с ведением выемочно-погрузочного процесса. Заключается, что перспективным направлением развития сортировочных ковшей являются конструкции с рабочими барабанами. В данной публикации автором предлагается для рассмотрения экскаватор с модернизированным сортировочным ковшом, а также технология его использования, позволяющая начинать процесс сортировки горной массы в ковше во время поворота экскаватора к месту разгрузки. Модернизированный сортировочный ковш снабжен шарнирно закрепленным подвижным днищем, управляемым гидроцилиндрами, для аккумулирования просеянных через рабочие барабаны мелких фракций. Накопленные в подвижном днище мелкие фракции выгружаются в автосамосвал, после чего просеивание продолжается непосредственно в кузов автосамосвала. После окончания процесса сортировки подвижное днище закрывается и экскаватор разгружает в другое транспортное средство оставшиеся в ковше крупные фракции, разгрузка осуществляется путем поворота ковша. Совмещение процесса сортировки и поворота экскаватора позволяет сократить время рабочего цикла, что увеличивает производительность как выемочной машины, так и автотранспорта. Применение модернизированного сортировочного ковша с подвижным днищем исключает потери ценного мелкофракционного материала в результате просыпания при развороте экскаватора на разгрузку. Подвижное днище может устанавливаться на сортировочные ковши известных конструкций без их существенной переделки. Применение предлагаемого технико-технологического решения позволит сократить удельные издержки и повысить эффективность ведения работ.

**Ключевые слова:** экскаватор, ковш, рабочие барабаны, подвижное днище, горная масса, автосамосвал

**Для цитирования:** Чебан А.Ю. Совершенствование конструкции и способа применения экскаваторов с сортировочными ковшами. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 56–62. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-56-62>

## Improving design and application method of screening bucket excavators

© Anton Yu. Cheban<sup>a</sup><sup>a</sup>Mining Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the study is to increase the productivity and economic efficiency of mining operations using screening bucket excavators on the basis of the introduction of a new technical and technological solution that expands equipment functionality. The study involves the analysis of known designs of screening buckets installed on excavators that ensure material separation to be carried out simultaneously with excavation and loading works. It is noted that a promising development direction of screening buckets is a design with working drums. The article presents an excavator with a modernized screening bucket and its operation technology, which allows to start rock mass sorting in the bucket while the excavator is turning to the place of unloading. The improved screening bucket is equipped with a hinged movable bottom controlled by hydraulic cylinders to accumulate fine fractions screened through the working drums. Fine fractions accumulated in the moving bottom are unloaded into a dump truck, after which screening continues directly into the body of the dump truck. Screening finished, the movable bottom closes and the excavator unloads the coarse fractions remaining in the bucket into another vehicle. Unloading is carried out by bucket turning. The combination of screening and excavator turning reduces the operation cycle time, which increases the performance of both the excavator and dump trucks. The use of a modernized screening bucket with a moving bottom eliminates the loss of valuable fine material as a result of spilling when the excavator turns for unloading. The movable bottom can be installed on the screening buckets of known designs and does not require their significant alteration. Application of the proposed technical and technological solution will reduce unit costs and increase the efficiency of work.



**Keywords:** excavator, bucket, operating drums, moving bottom, rock mass, dump truck

**For citation:** Cheban A.Yu. Improving design and application method of screening bucket excavators. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2021;44(1):56–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-56-62>

## Введение

Существенно усложнившиеся в последние десятилетия условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых при возрастающих требованиях промышленной и экологической безопасности работ требуют совершенствования как технологий горного производства, так и горного оборудования с целью обеспечения приемлемого уровня рентабельности работ [1–5]. Повышение эффективности производства можно обеспечить путем учета при проектировании технико-технологических решений принципов малоотходности и ресурсосбережения, которые подразумевают обеспечение селекции при выемке горной массы, снижение энергоемкости производственных процессов и количества получаемых отходов [6–9]. Совершенствование горного оборудования и технологических схем его применения должно быть направлено на увеличение его производительности и повышение функциональности. Увеличение производительности оборудования может быть достигнуто за счет автоматизации управления рабочим циклом или его частью, а также снижения непроизводительных затрат времени [10–12]. Повышение функциональности подразумевает совмещение в одном агрегате функций, ранее выполнявшихся несколькими машинами.

## Состояние вопроса и постановка проблемы

На данный момент известны многочисленные конструктивные схемы выемочного горного оборудования, имеющие дополнительные функции сортировки и / или дробления. Так, фирмой TAKRAF (Германия) выпускаются роторные экскаваторы, оснащенные дробильным оборудованием. Например, роторный экскаватор SRs(k)-2000 производства TAKRAF со встроенной молотковой дробилкой используется на усреднительном складе разреза «Богатырь» (Экибастузский угольный бассейн) в качестве дробильно-усреднитель-

ного агрегата, доводящего добытый крупными одноковшовыми экскаваторами уголь до крупности 0–300 мм за счет его выемки из навала роторным колесом и последующего додробления молотковой дробилкой [13]. Дробление крупных отдельностей угольной массы обеспечивает возможность последующего применения поточной технологии транспортно-погрузочных работ.

В работе [14] предлагается конструкция добычного комплекса на базе гидравлического одноковшового экскаватора, обеспечивающая преобразование циклического процесса выемки взорванной горной массы в непрерывный процесс ее погрузки в транспортные средства. Добычной комплекс оснащен классификатором для выделения крупных отдельностей горной массы и дробилкой для разрушения крупных отдельностей до кондиционных размеров, необходимых для транспортировки вынутой горной массы конвейерным транспортом. Известна также конструктивная схема добычного комплекса для разработки сложноструктурных рудных месторождений [10]. Добычной комплекс оборудован ковшом, рукойтью и стрелой с гидроцилиндрами управления, классификатором с поворотными колосниками, дробилкой с регулируемым размером разгрузочной щели, виброгрохотом, разгрузочным конвейером и системой пневмотранспортирования. Комплекс ведет селективную выемку кондиционных и некондиционных руд, из ковша руда выгружается на классификатор, крупные отдельности руды от классификатора направляются на дробилку. При этом при работе с некондиционной рудой классификатор и дробилка настроены на получение рудной массы с размерами, кондиционными для перемещения разгрузочным конвейером, с выделением на виброгрохоте обогащенной полезным компонентом рудной мелочи. При работе с кондиционной рудой классификатор и дробилка настроены для получения более мелкой рудной массы с целью направления на последующее



первичное обогащение. Таким образом, добывчной комплекс может вести выемку, дробление и предварительную сортировку горной массы. Недостатками оборудования, представленного в работах [10, 14], являются сложность конструкции, громоздкость и высокая стоимость, что затрудняет его внедрение в горное производство.

Конструктивно существенно более простым оборудованием, позволяющим совмещать выемку с сортировкой и / или дроблением, являются экскаваторы со специальными ковшами. Наибольшее распространение получили сортировочные ковши. Подобное оборудование используется в горном деле и строительстве для разделения горной массы на различные фракции либо для выделения из материала крупных некондиционных (посторонних) отдельностей. При этом сортировка может осуществляться через подвижные и неподвижные просеивающие поверхности, а также посредством рабочих барабанов. Для интенсификации процесса некоторые ковши оборудованы вибраторами.

Известна конструкция ковша экскаватора-драглайна [15], предназначенного для разработки россыпных месторождений полезных ископаемых, содержащих в горной массе существенное количество валунов. Ковш включает боковые и заднюю стенки, откидное днище, а также сортировочную решетку. При черпании горная масса перед поступлением в ковш проходит через сортировочную решетку, на которой валуны задерживаются. При разгрузке первоначально путем поворота откидного днища из ковша разгружается кондиционная горная масса, а затем в отвал за счет поворота ковша выгружаются валуны. В работе [16] представлена конструкция ковша экскаватора с поворотным днищем и поворотной сортировочной решеткой со щелями квадратной формы. При черпании материала днище и решетка находятся в закрытом положении. Мелкие и средние фракции кубовидной формы проходят через квадратные щели решетки, а некондиционные крупные фракции пластинчатой и игловатой формы задерживаются на ней. Для разгрузки кондиционных фракций открывается поворотное днище ковша. Затем поворачивается сортировочная

решетка и выгружаются некондиционные фракции, при этом посредством ребер, расположенных внутри ковша, производится очистка сортировочной решетки от застрявших в ней включений. Главным недостатком конструкций с сортировочными решетками, установленными на входе в ковш, является то, что решетка может препятствовать проникновению в ковш горной массы, что существенно снижает коэффициент наполнения ковша и производительность экскаватора.

Известна конструкция ковша с просеивающим приспособлением в виде решетчатой пространственной конструкции с криволинейным днищем и боковыми стенками, повторяющими форму ковша [17]. Просеивающее приспособление шарнирно прикреплено к ковшу и управляется посредством гидроцилиндров, при черпании оно находится внутри ковша и прилегает к его внутренней поверхности. После наполнения ковша и разворота экскаватора к месту разгрузки просеивающее приспособление поворачивается наружу, в результате чего мелкие фракции через прутья просыпаются из ковша, крупные фракции остаются в ковше, а затем разгружаются в другое транспортное средство. Для повышения эффективности сортировки ковш может быть снабжен вибратором.

В работе [18] представлена конструкция ковша с днищем, состоящим из прутков, создающих просеивающую поверхность, прутки расположены в поперечном направлении к боковым поверхностям ковша и располагаются на расстоянии друг от друга с учетом величины сортируемой фракции. Для повышения эффективности сортировки часть прутков не имеет жесткого соединения с боковыми стенками ковша и взаимодействует с вибратором, за счет которого прутки совершают возвратно-поступательные движения в направляющих. Данный ковш предлагается устанавливать на экскаватор с рабочим оборудованием типа «обратная лопата». Наибольшее распространение для сортировки материалов получили ковши, оснащенные рабочими барабанами, размещенными между боковыми стенками ковша [19, 20]. Привод рабочих барабанов осуществляется через редуктор, установленный в боковой стенке ковша.



Набор рабочих барабанов образует подобие днища ковша. При черпании материала рабочие барабаны выключены, после поворота экскаватора к месту разгрузки рабочие барабаны приводятся в движение, что обеспечивает сортировку и частичное измельчение материала. Крупные фракции, оставшиеся внутри ковша, разгружаются отдельно. В случае попадания между рабочими барабанами крупных отдельностей, препятствующих их вращению, включается функция реверса привода, обеспечивающая удаление застрявших крупных отдельностей. Ковши данной конструкции используются при выемке некоторых видов руд, строительных горных пород, торфа [11, 19]. Так, при разработке некоторых никелевых месторождений ковши с рабочими барабанами используются для отделения никелевой руды (мелкие фракции) от пустых пород (крупные фракции). Недостатком сортировочных ковшей с прутками или рабочими барабанами является просыпание мелких фракций в процессе поворота экскаватора на разгрузку при работе с рыхлой горной массой.

Общим недостатком конструкций, представленных в работах [17–20], является увеличение времени рабочего цикла экскаватора в связи со значительными затратами времени на осуществление процесса сортировки.

## Материалы и методы исследования

В связи с тем, что уже существующие многочисленные конструктивные схемы выемочного горного оборудования имеют ряд недостатков, целью данного исследования стало повышение производительности и экономической эффективности ведения горных работ с применением экскаваторов с сортировочными ковшами. Для реализации поставленной цели автором были рассмотрены пути внедрения нового технико-технологического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования.

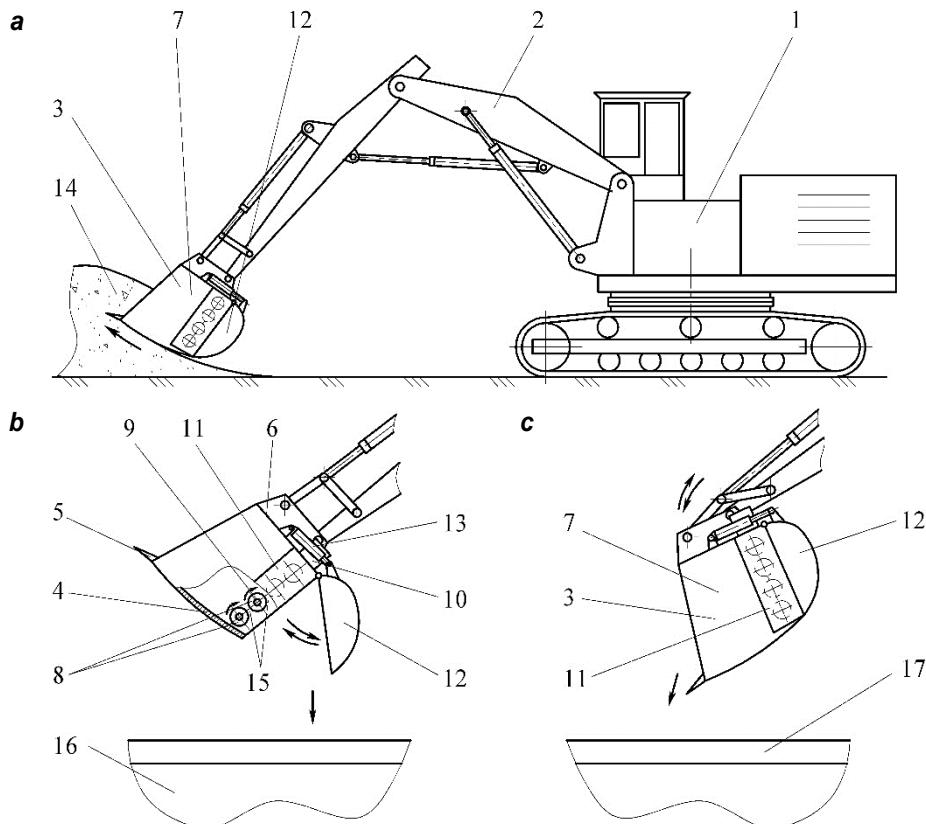
## Результаты исследования

Повышения производительности работы экскаватора с сортировочным ковшом можно достичь за счет совмещения процесса поворота экскаватора к месту разгрузки с

процессом сортировки горной массы в ковше. В данной статье предлагается конструкция, а также технологическая схема работы гидравлического экскаватора с модернизированным сортировочным ковшом. Прототипом модернизированного сортировочного ковша является конструкция, представленная в работах [19, 20]. Гидравлический экскаватор 1 оснащен рабочим оборудованием типа «прямая лопата» 2 (рисунок). Модернизированный сортировочный ковш 3 включает переднюю стенку 4 с режущими зубьями 5, заднюю 6 и боковые 7 стенки. В нижней части ковша находятся рабочие барабаны 8 с валами 9, опоры которых установлены в боковых стенках 7. Привод рабочих барабанов 8 осуществляется от гидравлического мотора 10 через редуктор 11, установленный на боковой стенке 7. К нижней части задней стенки 6 модернизированного сортировочного ковша 3 шарнирно прикреплено подвижное днище 12 для аккумулирования просеянных через рабочие барабаны 8 мелких фракций. Открывание и закрывание подвижного днища производится посредством гидроцилиндров 13.

Работа гидравлического экскаватора 1 с модернизированным сортировочным ковшом 3 осуществляется следующим образом. Рабочим оборудованием 2 ведется черпание из забоя 14 горной массы, требующей сортировки по крупности (рисунок, а). После заполнения модернизированного сортировочного ковша 3 включается привод рабочих барабанов 8, которые встраивают горную массу в ковше 3 для интенсификации процесса сортировки. Мелкие фракциисыпаются через промежутки 15 между рабочими барабанами 8 и аккумулируются на подвижном днище 12.

Вместимость подвижного днища 12 должна обеспечить прием мелких фракций в объеме, который просеивается через рабочие барабаны 8 за время поворота экскаватора 1 на разгрузку. При позиционировании ковша 3 над кузовом автосамосвала 16 гидроцилиндрами 13 производится открывание подвижного днища 12 и накопленные там мелкие фракции разгружаются, после чего просеивание материала производится непосредственно в кузов автосамосвала 16 (рисунок, б). Таким образом, часть процесса сортировки



#### Экскаватор с усовершенствованным сортировочным ковшом:

а – черпание горной массы экскаватором; б – сортировка горной массы и разгрузка мелких фракций в автосамосвал; в – разгрузка крупных фракций в автосамосвал

#### An excavator with upgraded screening bucket:

а – digging rock mass with an excavator; б – rock mass screening and unloading of fine fractions into a dump truck; в – unloading of large fractions into a dump truck

производится во время поворота рабочего оборудования 2 на разгрузку. После того, как просеивание мелких фракций заканчивается, вращение рабочих барабанов 8 прекращается, подвижное днище 12 закрывается, а экскаватор 1 позиционирует модернизированный сортировочный ковш 3 над автосамосвалом 17, в который производится разгрузка крупных фракций горной массы посредством поворота ковша 3 (рисунок, в). Для дополнительного сокращения времени рабочего цикла экскаватора целесообразно ближе к забою располагать автосамосвал 17, загружаемый крупными фракциями, поскольку более удаленное расположение автосамосвала 16, загружаемого мелкими фракциями, обеспечит увеличение времени совмещения процессов сортировки и поворота.

#### Заключение

Предлагаемое в статье технико-технологическое решение с применением экскаватора,

оснащенного модернизированным сортировочным ковшом, позволяет повысить производительность выемочно-сортировочных работ за счет начала процесса сортировки непосредственного во время поворота экскаватора к месту разгрузки. Применение подвижного днища исключает потери ценного мелкофракционного материала в результате просыпания из сортировочного ковша при развороте экскаватора на разгрузку. Подвижное днище может устанавливаться на сортировочные ковши известных конструкций без их существенной переделки, что позволит проводить модернизацию рабочего оборудования экскаватора без больших капитальных затрат. Уменьшение времени рабочего цикла экскаватора обеспечит снижение продолжительности загрузки автосамосвалов. Увеличение производительности горного и транспортного оборудования позволит сократить удельные издержки и повысить эффективность ведения работ.



### Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные горнотехнические системы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. 2016. № 5. С. 21–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.01>
2. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
3. Adams M.D. Gold ore processing: project development and operations. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
4. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges // Software & Systems Modeling. 2014. Vol. 13. Iss. 3. P. 941–962. <https://doi.org/10.1007/s10270-012-0273-9>
5. Чебан А.Ю. Технология разработки сложноструктурного месторождения апатитов и выемочно-сортировочный комплекс для ее осуществления // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 399–404. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.399>
6. Хопунов Э.А. Проблемы рудоподготовки в «четвертой промышленной революции» // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 5. С. 54–62. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-5-54-62>
7. Чебан А.Ю. Совершенствование геотехнологии выемки тонких рудных тел с применением стрелового комбайна // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 340–348. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-340-348>
8. Starke L. Breaking new ground: mining, minerals and sustainable development. London: IIEE, 2016. 480 p.
9. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining // Engineering and Mining Journal. 2012. Vol. 213. Iss. 1. P. 30–32.
10. Чебан А.Ю. Технология разработки сложноструктурного месторождения с применением усовершенствованного добычного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 209–219.
11. Увеличение продуктивности рудника экономи-чески эффективным методом с помощью ALLU // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 68–69.
12. Чебан А.Ю. Способ выемки взорванной горной массы экскаватором при разработке сложноструктурных месторождений // Маркшейдерский вестник. 2020. № 2. С. 66–70.
13. Бурцев С.В., Левченко Я.В., Таланин В.В., Воронилин К.С. Безвзрывные технологии подготовки скальных горных пород к перемещению конвейерным транспортом // Уголь. 2018. № 10. С. 8–17. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-8-17>
14. Чебан А.Ю. Добычной комплекс для открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3. С. 8–11.
15. Пат. № 2029031, Российская Федерация, МПК E02F 3/60, E02F 3/48. Ковш экскаватора-драглайна / Ю.В. Бокунов, В.С. Кочетков, Ф.В. Дудинский. Заявл. 28.07.1992; опубл. 20.02.1995. Бюл. № 4.
16. Пат. № 2204657, Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Ковш экскаватора / С.Н. Миркин, С.А. Левченко, А.А. Мещеряков. Заявл. 06.07.2001; опубл. 20.05.2003. Бюл. № 14.
17. Пат. № 2042015, Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Ковш с просеивающим приспособлением / К. Модиг. Заявл. 04.09.1992; опубл. 20.08.1995. Бюл. № 17.
18. Пат. № 2622058, Российская Федерация, МПК B07B 1/28, E02F 3/40. Ковш и способ его применения / Э. Паски. Заявл. 27.11.2016; опубл. 09.06.2017. Бюл. № 16.
19. Нагорнов Д.О., Кремчев Э.А., Михайлов А.В., Большунов А.В. Навесной модульный механизированный комплекс для добычи и первичной переработки торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 2. С. 243–248.
20. Пат. № 2530730, Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Просеивающий, дробильный или перемешивающий ковш / А. Мэннико. Заявл. 31.05.2010; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28.

### References

1. Trubetskoy KN, Vladimirov DYa, Pytalev IA, Popova TM. Robotic systems for open pit mineral mining. *Gornyi zhurnal*. 2016;5:21–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.01>
2. Jarvie-Eggart ME. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration; 2015. 804 p.
3. Adams MD. Gold ore processing: project development and operations. Amsterdam: Elsevier; 2016. 980 p.
4. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014;13(3):941–962. <https://doi.org/10.1007/s10270-012-0273-9>
5. Cheban AYu. Engineering of complex structure apatite deposits and excavating-sorting equipment for its implementation. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;238:399–404. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.399>
6. Khopunov EA. Problems of ore preparation in the “fourth industrial revolution”. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019;5:54–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-5-54-62>
7. Cheban AYu. Improvement of geotechnology of extraction of thin ore minerals with the use of the arrow combine. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Sciences*



- of Earth. 2020;1:340–348. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-340-348>
8. Starke L. *Breaking new ground: mining, minerals and sustainable development*. London: IIED; 2016. 480 p.
9. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Engineering and Mining Journal*. 2012;213(1):30–32.
10. Cheban AYu. Technology of development of complex structural deposit with application of improved mining aggregate. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020;3:209–219. (In Russ.)
11. Improving production performance of the mine using an economically efficient method with the help of ALLU. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry Journal*. 2020;1:68–69. (In Russ.)
12. Cheban AYu. Method for exploding exploded rock mass by excavator when developing complex deposits. *Marksheiderskii vestnik = Mine Surveying Bulletin*. 2020;2:66–70. (In Russ.)
13. Burtsev SV, Levchenko YaV, Talanin VV, Voroshilin KS. Blastless technologies for rock mass conditioning for conveyor transportation. *Ugol'*. 2018;10:8–17. (In Russ.)
14. Cheban AYu. Production complex for open-cast mining of solid minerals. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2017;3:8–11. (In Russ.)
15. Bokunov YuV, Kochetkov VS, Dudinskii FV. *Drag-line excavator bucket*. Patent RF, no. 2029031; 1995. (In Russ.)
16. Mirkin SN, Levchenko SA, Meshcheryakov AA. *Excavator bucket*. Patent RF, no. 2204657; 2003. (In Russ.)
17. Modig K. *A bucket with a sieving attachment*. Patent RF, no. 2042015; 1995. (In Russ.)
18. Paski E. *A ladle and its application method*. Patent RF, no. 2622058; 2017. (In Russ.)
19. Nagornov DO, Kremlcheev EA, Mikhaylov AV, Bol'shunov AV. The hinged modular mechanized complex for extraction and primary processing of peat. *Gornyi informacionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;2:243–248. (In Russ.)
20. Mennikko A. *Screening, crushing or mixing bucket*. Patent RF, no. 2530730; 2014. (In Russ.)

### Сведения об авторе / Information about the author



**Чебан Антон Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник Лаборатории геотехнологии и горной теплофизики,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51, Россия,  
✉ e-mail: chebanay@mail.ru

**Anton Yu. Cheban**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Leading Researcher of the Laboratory of Geotechnology and Mining Thermophysics,  
Mining Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,  
51 Turgenev St., Khabarovsk 680000, Russia,  
✉ e-mail: chebanay@mail.ru

### Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by the author.

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 16.12.2020; одобрена после рецензирования 13.01.2021; принятая к публикации 17.02.2021.

The article was submitted 16.12.2020; approved after reviewing 13.01.2021; accepted for publication 17.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.17:627.8.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>



## Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ

© Д.Ш. Шарипов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Снежинский физико-технический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», г. Снежинск, Россия

**Резюме:** Изучение процессов, происходящих в толще земной коры, всегда являлось актуальной темой для исследований. Результаты этих исследований позволили человеку разрабатывать и безопасно эксплуатировать месторождения полезных ископаемых в различных условиях. Рост потребления извлекаемого ресурса и увеличение масштабов горного производства вынуждают предприятия искать решения сложных инженерно-технических задач, одной из которых является проблема сдвижения горных масс и земной поверхности в области влияния промышленного производства, в том числе дамб хвостохранилищ. Целью данного исследования являлось повышение безопасности эксплуатации дамб хвостохранилищ. Объектом исследования стали ограждающие дамбы хвостохранилищ обогатительных фабрик, предметом исследования – деформационные процессы, происходящие в теле дамб и на поверхности откосов. Основными методами исследования, использованными в работе, были: изучение способов безопасной эксплуатации дамб хвостохранилищ на основе эксплуатационных условий хвостохранилища Учалинского месторождения с применением современных методов оценки устойчивости, анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта, а также изучение актуальных методов геомеханического мониторинга деформационных процессов – инженерно-геологических, геофизических, маркшейдерских и гидрогеологических. В статье описаны географические, гидрографические, климатические, геологические, горнотехнические условия эксплуатации хвостохранилища АО «Учалинский ГОК». Представлено обоснование влияния гидродинамических и гидростатических сил на устойчивость ограждающих дамб хвостохранилищ. На основе полученных данных и использованных методов исследования сделан вывод о том, что гидродинамические и гидростатические силы являются основополагающими разрушающими факторами, действующими на дамбы. Результаты данных исследований могут быть применены на стадии проектирования гидротехнических сооружений, так как они дополняют теоретические знания о влиянии жидких отходов на безопасность дамб хвостохранилищ и земляных плотин, а также позволяют обнаружить деформационные процессы на начальной стадии развития и принять решения по их устранению.

**Ключевые слова:** хвостохранилище, гидростатические и гидродинамические силы, дамба, отвалы, устойчивость, АО «Учалинский ГОК», фильтрационный поток, грунтовые воды, перелив, эрозия

**Для цитирования:** Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 63–72.  
<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

## Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability

© Dinar Sh. Sharipov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Snezhinsk Physics and Technology Institute, Branch of National Research Nuclear University  
“Moscow Engineering Physics Institute”, Snezhinsk, Russia

**Abstract:** The study of the processes occurring deep in the earth's crust has always been a relevant research topic. The results of these studies allowed development and safe mining of mineral deposits in various conditions. The growth in the consumption of extracted resource and the increase in the scale of mining are forcing enterprises to search for the solutions to complex engineering and technical problems, one of which is the problem of displacement of rock masses and the earth's surface in industrial production-affected areas including tailings dams. The purpose of this study is to improve the operation safety of tailing dams. The object of the study is embankment dams of dressing plant tailing dumps. The subject of the study is deformation processes occurring in dam bodies and slope surfaces. The main research methods used in the work are: the study of safe operation methods for tailing dams based on the operating conditions of Uchalinskoye tailing dump using the modern methods of stability assessment, analysis and generalization of domestic and foreign experience, as well as the study of current methods of geomechanical monitoring of deformation processes – engineering and geological, geophysical, mine surveying and hydrogeological ones. The article describes geographic, hydrographic, climatic, geological and mining operation conditions of the tailing dump of Uchalsky GOK (Ore Mining and Processing Plant) JSC. The influence of hydrodynamic and hydrostatic forces on embankment tailing dam stability is substantiated.



Based on the data obtained and the research methods used, it is concluded that hydrodynamic and hydrostatic forces are fundamental destructive factors affecting dams. The results of these studies can be applied at the design stage of hydraulic structures, since they will supplement theoretical knowledge about the impact of liquid waste on the safety of tailing dams and earth-filled dams, as well as allow detecting deformation processes at their initial development stage and making decisions on their elimination.

**Keywords:** tailing dump, hydrostatic and hydrodynamic forces, dam, dumps, stability, Uchalinsky GOK (Ore Mining and Processing Plant) JSC, filtration flow, groundwater, overflow, erosion

**For citation:** Sharipov DSh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting tailing dump stability. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):63–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-63-72>

## Введение

Успешное развитие экономики любой страны зависит от многих факторов, в том числе и от количества и богатства месторождений полезных ископаемых. Извлекаемый из них ресурс используется в ведущих промышленных отраслях и является источником ощущимого дохода [1–4].

Активное развитие промышленного производства, особенно после Великой Отечественной войны, значительно увеличило потребление добываемых полезных ископаемых. В послевоенное время для стабильного и ускоренного роста экономики страны требовалось расширение минерально-сырьевой базы, увеличение промышленных объемов производства полезных ископаемых, усовершенствование технологий переработки извлекаемого сырья и развитие межотраслевых отношений для использования ценных свойств извлекаемых ресурсов в смежных областях. В настоящее время общие принципы укрепления и роста экономики на основе минерально-сырьевой базы остаются прежними, в связи с этим данная тенденция актуальна и по сей день [5–7].

Все эти обстоятельства вынуждают горные предприятия искать новые месторождения, по возможности повышать объемы производства на существующих горнодобывающих предприятиях, что, в свою очередь, увеличивает количество отбиваемой горной массы и жидким отходов, полученных в результате обогащения. Ежегодно из недр Земли извлекаются около 100 млрд т полезных ископаемых, включая 20 млрд т горной массы горно-химического сырья [8]. Сложившаяся ситуация, а также экологические требо-

вания заставляют горнодобывающие предприятия искать больше подотвальных территорий и способов их размещения.

Самым распространенным способом решения данной проблемы является строительство специальных накопителей твердых и жидким отходов – хвостохранилищ. «Хвостохранилище – это комплекс сооружений, предназначенных для складирования твердых и жидким отходов горных предприятий цветной и черной металлургии, образующихся при обогащении полезных ископаемых»<sup>1</sup>.

Основными материалами при строительстве данного гидросооружения являются вскрышные породы (твердые отходы), которые используются при сооружении ограждающей дамбы. В свою очередь, возводимая дамба создает необходимый резервуар для хранения жидким отходов обогатительных фабрик и является главным сдерживающим элементом всего объекта. От состояния ограждающей дамбы зависит безопасная эксплуатация хвостохранилища, а также прилегающих к ней территорий.

Частичное или полное разрушение дамбы является наиболее распространенной причиной аварий при эксплуатации данных объектов, наиболее известные случаи таких аварий были зафиксированы на Качканарском горно-обогатительном комбинате (Россия), Карамкенском горно-металлургическом комбинате (Россия), руднике Эль-Кобра (Чили), шахте «Преставель» (Италия), хвостохранилище в Колонтаре (Венгрия), знаковыми случаями стали также прорыв плотин в Мариане и в Брумадинью (Бразилия) и другие [9–16]. В результате крупных аварий жертвами становится проживающее в низовьях дамбы

<sup>1</sup> Железняков Г.В, Ибад-заде Ю.А., Иванов П.Л. [и др.]. Гидротехнические сооружения: справочник / под общ. ред. В.П. Недриги. М.: Стройиздат, 1983. 543 с.



население, разрушаются вахтовые поселки, промышленные объекты, страдают и сельскохозяйственные угодья. В таких случаях основными разрушающими силами являются массивный скоростной поток прорванной жидкости и последующее химическое воздействие жидких отходов. По этой причине на всех этапах эксплуатации подобных гидро сооружений необходимо строго соблюдать требуемые технологические регламенты, нарушение которых приводит к катастрофическому экономическому и экологическому ущербу. В связи с этим целью данной работы является повышение безопасности эксплуатации дамб хвостохранилищ на основе исследований условий эксплуатации хвостохранилища АО «Учалинский ГОК» и современных методов оценки устойчивости дамб хвостохранилищ.

### Объект и методы исследования

На основе проектных и инженерно-изыскательских данных хвостохранилища АО «Учалинский ГОК» изучены применяемые на производственном объекте инструментальные наблюдения за деформационными процессами, происходящими на поверхности и в теле дамбы, а также методики по обработке и анализу результатов натурных наблюдений. Проведен анализ географических, гидрографических, климатических, геологических, горнотехнических условий эксплуатации Учалинского хвостохранилища. Особое внимание уделялось гидрографии и геологии района размещения объекта, географическому расположению ближайших населенных пунктов, рельефу местности и способу устройства хвостохранилища. Кроме перечисленного проведен анализ таких характеристик, как гранулометрический, минералогический и химический состав отвалов, плотность грунта, пористость и фильтрационные свойства пород ограждающей дамбы. Методы исследований включают также анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта.

### Результаты работ и их обсуждение

Хвостохранилище АО «Учалинский ГОК» расположено в 2,5 км от г. Учалы на восточном склоне Южного Урала южных отрогов хребта Ирендык, который является естествен-

ным водоразделом р. Белой и р. Уй. Ближайшие железнодорожные станции – г. Миасс в 100 км к северу и г. Магнитогорск в 120 км к югу от г. Учалы. Ближайшие населенные пункты на севере – с. Учалы и с. Ургуново, на западе – с. Кунакбаево и с. Ильтебаново.

В гидрографическом отношении район размещения горно-обогатительного комбината расположен в бассейне верхнего течения р. Урал, протекающей в 11 км к северо-западу. В непосредственной близости гидрографическая сеть представлена озерами и мелкими ручьями. В 3 км к северу от промплощадки находится оз. Большие Учалы, на северо-востоке на расстоянии 2,5 км – оз. Карагайлы. Водообильных источников, стекающих в озера, не имеется. Геоморфологически территория приурочена к юго-западному берегу оз. Малые Учалы.

Рельеф промплощадки неспокойный: наблюдаются резкие падения в восточном, юго-восточном, южном и юго-западном направлениях. Местность района холмистая. Рельеф имеет резко выраженный сопочный и мелкосопочный характер. В юго-восточной и юго-западной частях наблюдается заболоченность. Естественный рельеф сильно изменен техногенными процессами, связанными с разработкой месторождений полезных ископаемых.

Климатические условия района определяются его широтной зональностью, абсолютными отметками рельефа и расположением восточнее высокого горного хребта Уралтау. Климат района резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Абсолютные минимальные температуры воздуха характерны для зимних месяцев декабря и января (-47 °C). Отрицательные температуры отмечались и летом (-5 °C в июне, -1 °C в августе). Абсолютные максимальные температуры отмечены летом в июле (+38 °C) и зимой в январе (+7 °C).

Средняя скорость ветра колеблется от 2,2–2,3 м/с (январь, июль, август) до 3 м/с (октябрь). Максимальная скорость ветра – 14 м/с. Скорость напора ветра – 40 кг/м<sup>3</sup>. Преобладающими ветрами являются южный, юго-западный и западный в зимний период и западный и северо-западный в летний период.



Количество осадков определяется широтной и высотной зональностью, экспозицией склонов по отношению к направлению ветра. Средняя многолетняя величина суммы осадков – 356–459 мм. Средняя многолетняя величина испарения с поверхности суши и воды за год составляет около 0,613 м.

В геологическом отношении в основании хвостохранилища залегают: торфы мало-влажные, уплотненные (толщина слоя – 0,5–2 м в северо-западной части дамбы); суглинки и глины озерно-болотные в твердом и полутвердом состоянии; суглинки элювиальные твердые, полутвердые с включением дресвы и щебня от 15 до 40 %. Суглинки подстилаются порфиритами сильнотрециноватыми, малопрочными.

Сверху аллювиальные отложения прикрыты почвенно-растительным слоем. Толщина почвенно-растительного слоя – 0,5–1,1 м. Гранулометрический состав хвостов представлен в таблице.

В горнотехническом отношении действующее хвостохранилище АО «Учалинский ГОК» относится к намывному типу. Первичная емкость хвостохранилища организована из двух отсеков с разделительной дамбой между ними. Эксплуатация первого отсека хвостохранилища осуществляется с 1969 г., второго

отсека – с 1974 г. Первичная дамба хвостохранилища, примыкающая в восточной части к отвалу вскрытых скальных пород, отсыпана из скального грунта диабаза и порфиритов высотой 10–12 м с отметками гребня 530–534 м.

Хвостохранилище предназначено для складирования отвальных отходов технологического производства (хвостов) и технологического водоснабжения обогатительной фабрики. Абсолютный перепад отметок подошвы основания дамбы хвостохранилища изменяется от 520 до 525 м (и несколько выше у восточного крыла южной дамбы).

Хвостохранилище косогорного типа расположено на расстоянии ≈ 1,4 км к югу от главного корпуса фабрики. С восточной стороны хвостохранилище примыкает к центральному и восточному отвалам вскрытых пород. Центральный отвал в настоящее время разобран до проектных отметок и включается в состав замыкаемой емкости хвостохранилища. Грунты отвала использовались для отсыпки дамб обвалования и пригрузки низового откоса.

В соответствии с проектом реконструкции хвостохранилища с 2003 г. складирование осуществляется намывным способом в действующее хвостохранилище, представляющее

#### Характеристика отвальных хвостов обогащения Characteristics of final tailings

	Размер частиц $d$ , мм	Содержание, %
Гранулометрический состав хвостов	0,15+0,1	–
	0,1+0,074	19,47
	0,074+0,044	10,65
	0,044+0,02	31,34
	0,02+0,01	6,75
	0,01+0,005	15,12
	0,005	16,67
Средний диаметр частиц $d_{cp}$		0,036 мм
Удельная масса твердых частиц $\gamma_{mb}$		3,8 т/м <sup>3</sup>
Минералогический состав хвостов	Пирит – 60,56 %	
	Халькопирит – 0,55 %	
	Сфалерит – 1,05 %	
	Нерудные – 37,84 %	
Химический состав хвостов	Цинк – 0,71 %	
	Сера – 32,30 %	
	Золото – 1,27 г/г	
	Серебро – 15,97 г/г	
	Медь – 0,19 %	



единое поле. Заполнение емкости производится по схеме: от дамбы к пруду с образованием пляжа из хвостов. Наращивание ограждающей дамбы начиная с пятого яруса производится путем отсыпки дамб обвалования из крупноблочных щебенистых грунтов отвалов с суглинистым заполнителем.

Параметры дамб обвалования: ширина по гребню – 21 м, заложение откосов – 1:1. Генеральное заложение низового откоса ограждающей дамбы – 1:3,5. Дамбы отсыпаны с дренами длиной 30 м из скального грунта отвалов, расположенными через 250–300 м по периметру дамбы. Дрены предназначены для ускорения процессов консолидации хвостов пляжной зоны и отведения фильтрационных вод в дренажные канавы. На участке полки центрального отвала и на откосе восточного отвала выполнено устройство противофильтрационного экрана из геотекстиля и предусмотрен намыв экрана из хвостов. Принятая конструкция дамб обвалования позволяет улучшить деформационно-напряженное состояние намывной дамбы и увеличить возможность ее наращивания до проектной отметки 582 м.

Эксплуатация хвостохранилища предусмотрена до отметки 582 м, на котором площадь хвостохранилища составит 1,12 км<sup>2</sup>, проектная емкость хвостохранилища – 59 млн м<sup>3</sup>, протяженность напорного фронта – 3,8 км, максимальная высота намывной дамбы – 62 м.

На ограждающую дамбу хвостохранилища действуют две основные разрушающие силы: гидростатическое давление жидких отходов и гидродинамическое движение фильтрационного потока. Следует уточнить, что в рамках исследования факторов, влияющих на устойчивость хвостохранилищ, гидростатические и гидродинамические силы рассматриваются как источники механического влияния, проявляющиеся в виде физического давления, перемещения частиц горных масс, движения потоков внутри пор ограждающей дамбы и т. п. Процесс химической суффозии является отдельным направлением исследования и рассматривается как отдельный разрушающий фактор.

Главными источниками гидростатического давления является хранимая жидкость. В нашем

случае рассматриваются отходы обогащения полезных ископаемых. Для наглядного представления о влиянии данного фактора достаточно вспомнить закон Паскаля, который указывает на зависимость давления в жидкости от плотности жидкости, ускорения свободного падения и глубины, на которой определяется давление.

Понимание вышесказанного дает представление о том, что ограждающие дамбы хвостохранилищ и грунтовых плотин постоянно находятся под огромным гидростатическим давлением, величина которого растет по мере увеличения объема жидких отходов [16–19]. Также следует отметить, что при полном разрушении ограждающей дамбы от значения гидростатического давления зависит скорость потока, а соответственно, и разрушительная сила прорванной жидкости.

В свою очередь, гидростатическое давление является источником гидродинамических сил, выражющихся в виде фильтрации и перелива. Именно негативное действие фильтрационного потока является распространенной причиной полного или частичного разрушения дамб хвостохранилищ, которое проявляется в виде внутренней суффозии (движения жидкости в поровом пространстве грунтов) и эрозии (поверхностного размыва, отрыва и выпора грунтовых масс) [20–24].

Внутренняя суффозия представляет наиболее серьезную угрозу, и связана она с тем, что при повышении уровня жидких отходов увеличивается фильтрационный поток основания дамбы. Усугубляется ситуация тем фактом, что на начальном этапе строительства основания дамбы зоны повышенной фильтрации визуально и традиционными методами не обнаруживаются, что в дальнейшей эксплуатации объекта может повлечь за собой разрушение гидросооружения [25]. Проведенные исследования показывают, что в 40 % случаях причиной аварии грунтовых плотин является внутренняя суффозия тела ограждающей стенки или основания [26–34].

Кроме жидких отходов еще одним источником механической суффозии являются грунтовые воды. Особую опасность они представляют в период строительства основания дамбы. Именно фильтрационный поток



грунтовых вод приводит к образованию зон повышенной фильтрации в основании дамбы, интенсивность которых может привести к протечке и размыву, создавая угрозу обрушения всего объекта [35–38]. Вследствие этого при проектировании подобных сооружений особо тщательно изучаются гидрогеологические условия места будущего расположения объекта.

К гидродинамическим силам, влияющим на устойчивость дамб хвостохранилищ, также относится процесс перелива жидкости через гребень волны [39–41]. Особенность данного процесса заключается в быстром разрушении и эрозии верхней части дамбы. Время протекания процесса и последствия разрушения зависят от скорости перетекания жидких отходов и параметров ветровых волн. Аварии в структуре гидроузлов, несоблюдение технологического регламента режима работы системы водоотведения и несвойственные для района расположения объекта погодные условия, а именно сильные порывы ветра, служат основными причинами возникновения перелива [42]. Около 33 % аварий на грунтовых гидросооружениях связано с локальными или массовыми переливами хранимой жидкости через гребень волны [43, 44].

### Заключение

Строительство и эксплуатация хвостохранилищ требует решения сложных инженерно-технических задач. От результатов принятых

мер зависит целостность объекта и прилегающих территорий. Для обеспечения безопасной эксплуатации подобных гидросооружений необходим постоянный мониторинг и информативность напряженно-деформационного состояния ограждающей дамбы, поиск новых способов изучения деформационных процессов, пополнение и применение теоретических знаний в этой области.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод о том, что на долю влияния гидродинамических и гидростатических сил приходится 73 % (40 + 33 %) аварий грунтовых дамб и плотин. Из этого следует, что в рамках исследований факторов, влияющих на устойчивость хвостохранилищ, именно эти силы являются основными разрушающими факторами, проявляющимися в виде постоянного действия гидростатического давления, движения фильтрационных потоков в теле и в основании ограждающей дамбы, перелива и эрозии.

Результаты, представленные в данной научной работе, дополнят теоретические знания о влиянии жидких отходов и грунтовых вод с точки зрения действия гидродинамических и гидростатических сил на устойчивость дамб хвостохранилищ и земляных плотин. Практическое применение данных знаний на стадии проектирования гидротехнических сооружений позволит обнаружить процессы деформации на начальной стадии развития и принять меры по их устраниению.

### Список литературы

1. Клюев Н.Н. Природно-ресурсная сфера России и тенденции ее изменения // Вестник Российской академии наук. 2015. № 7. С. 579–592. <https://doi.org/10.7868/S0869587315050035>
2. Клюев Н.Н. Природно-ресурсный комплекс России: траектория «неустойчивого» развития // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 5. С. 7–22.
3. Межеловский Н.В., Монастырных О.С., Бучкин М.Н., Вилькович Р.В., Килипко В.А., Мишин С.А. Инвестиционный анализ воспроизводства минерально-сырьевой базы России // Разведка и охрана недр. 2012. № 2. С. 90–102.
4. Шелкунов Т.Г. Особенности реализации инновационных проектов в горнодобывающей промышленности России // Экономика в промышленности. 2015. № 4. С. 32–38.
5. Орлов В.П. Минерально-сырьевые ресурсы и геополитика // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 2. С. 23–26.
6. Толстых Н.И. Проблемы правового регулирования недропользования при разработке месторождений общераспространенных полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2007. № 6. С. 2–7.
7. Александрова В.И. Моделирование и ГИС-технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S6. С. 34–44.
8. Пигарева Т.А., Абакумов Е.В. Биологические параметры почв и техногенных субстратов хвостохранилищ предприятия по добыче железной руды // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 28–33.
9. Калашник Н.А. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототип ограждающей дамбы хвостохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 4. С. 54–55.



10. De Carvalho D.W. The ore tailings dam rupture disaster in Mariana, Brazil 2015: what we have to learn from anthropogenic disasters // *Natural Resources Journal*. 2019. Vol. 59. Iss. 2. P. 281–300.
11. De Carvalho D.W. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law // *Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 227–238. <https://doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04>
12. Stanwick P.A., Stanwick S.D. The vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster // *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019. Vol. 2. Iss. 6. P. 6–11.
13. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // *Applied Geochemistry*. 2014. Vol. 51. P. 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
14. Буренкова В.В., Буренков П.М. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязанных грунтов тела плотины и основания // *Природобустроство*. 2020. № 4. С. 84–91.
15. Саинов М.П., Чечеткин И.П. Оценка трещиностойкости ядра каменно-земляной плотины с учетом порового давления // *Вестник Евразийской науки*. 2020. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf> (11.11.2020).
16. Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 6. С. 93–98.
17. Потапов И.А., Шименкова А.А., Потапов А.Д. Зависимость супфазионной устойчивости песчаных грунтов различного генезиса от типа фильтрата // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2012. № 5. С. 79–86.
18. Кашарин Д.В., Тхай Тьи Тхи Ким. Повышение устойчивости основания мобильных дамб для инженерной защиты зданий от затопления // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 4. С. 51–59.
19. Максимов Д.А. Механизмы негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных гидротехнических сооружений // *Проблемы недропользования*. 2018. № 2. С. 90–97. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.090>
20. Юркевич Н.В., Юркевич Н.В., Гуреев В.Н., Мазов Н.А. Проблемы контроля фильтрации вод через гидротехнические сооружения в условиях вечной мерзлоты // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 4. С. 126–138.
21. Колесов М.А., Беляков П.В. Эрозия грунтовых насыпных плотин при подтоплении весенними паводками // 27-е пленарное Межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: материалы конф. Ижевск, 2012. С. 136–138.
22. Козионов А.П., Пят А.Л., Мохов И.И., Иванов Ю.П. Алгоритм на основе модели передаточной функции и одноклассовой классификации для обнаружения аномального состояния дамб // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 6. С. 10–18. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.6.10>
23. Косиченко Ю.М. Исследования в области борьбы с фильтрацией и эксплуатационной надежности грунтовых гидротехнических сооружений // *Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации*. 2012. № 2. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec574-field12.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec574-field12.pdf) (11.11.2020).
24. Шешуков Е.Г., Курцева К.П. Численное исследование краевых задач нелинейной фильтрации // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. № 9-10. С. 158–166.
25. Давлатшоев С.К. Гидрогеохимический мониторинг в основании плотины на водорастворимых породах // *Тинчуринские чтения: XIV Междунар. молод. науч. конф.* Казань, 2019. С. 203–207.
26. Попельски П., Дабска А. Численная модель супфазии // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. В.Е. Веденеева*. 2014. Т. 271. С. 23–33.
27. Васильева Е.В., Яковенко Е.А. Повышение безопасности плотин и дамб // *Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации*. 2017. № 4. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec340-field12.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec340-field12.pdf) (11.11.2020).
28. Бакланова Д.В. Расчет фильтрации через земляные дамбы на проницаемом основании // *Научный журнал Российской НИИ проблем мелиорации*. 2016. № 1. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec402-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec402-field6.pdf) (11.11.2020).
29. Бакланова Д.В. Расчетное обоснование вероятности разрушения потенциально опасных участков крупного канала от фильтрационных воздействий // *Природобустроство*. 2013. № 2. С. 43–48.
30. Калашник Н.А. Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 11. № 2. С. 69–74. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74>
31. Хайруллина Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с солесодержащими отходами на поверхностные и подземные воды // *Географический вестник*. 2018. № 2. С. 145–155. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-145-155>
32. Жиленков В.Н., Халенева М.Л. О некоторых средствах обеспечения фильтрационной прочности грунтовых плотин, подвергшихся внешнему промораживанию // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2013. Т. 269. С. 40–51.
33. Иванов Д.В., Давлетзянов И.И., Маланин В.В. Сравнительный анализ способов фильтрации при определении концентрации растворенных форм металлов в природных и сточных водах // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 3. С. 17–22.



34. Павлов С.Х., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Фильтрационные утечки из золошлакоотвала и их взаимодействия с геологической средой // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 7. С. 100–115.
35. Любимова Т.В., Латыш А.А. Динамика изменения уровня подземных вод в зоне грунтовых плотин // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 4. С. 84–88.
36. Бальзанников М.И., Родионов М.В. Грунтовые плотины с низовыми откосом, допускающим пропуск паводковых вод // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2012. Т. 15. С. 99–104.
37. Круглов Г.Г., Линкевич Н.Н., Немеровец О.В. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 3. С. 252–257. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>
38. Дьяконова Т.А., Писарев А.В., Хоперсков А.В., Храпов С.С. Математическая модель динамики поверхностных вод // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. 2014. № 1. С. 35–45. <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2014.1.4>
39. Кузнецов Д.В. Сценарий аварий грунтовых плотин при переливе воды через гребень плотины методом анализа дерева отказов // Вестник Московского государственного строительного университета. 2016. № 4. С. 94–107.
40. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Распутина В.А., Войнаровский А.Е. Физическое моделирование разрушение грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 2. С. 51–63. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>
41. Дьяченко К.Н., Зверев А.В. Причины образования дефектов в дамбах обвалования при их эксплуатации в условиях Дальнего Востока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 6. С. 96–105. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-6-8>
42. Стефанишин Д.В., Штильман В.Б. К оценке вероятности перелива воды через гребень плотины // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 70–78. <https://doi.org/10.5862/MCE.35.9>
43. Богославчик П.М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>
44. Богославчик П.М., Евдокимов В.А., Немеровец О.В. Условия разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень // Вода. Газ. Тепло 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2020. С. 257–260.

## References

1. Klyuev NN. Russia's natural-resource sphere and trends in its development. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. 2015;7:579–592. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869587315050035>
2. Klyuev NN. Russian natural-resource complex: the trajectory of unsustainable development. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2014;5:7–22. (In Russ.)
3. Mezhelovsky NV, Monastyrnyh OS, Buchkin MN, Vilkovich RV, Kilipko VA, Mishin SA. Investment analysis of a mineral-raw-material base reproduction of Russia. *Razvedka i okhrana nedor = Prospect and protection of mineral resources*. 2012;2:90–102. (In Russ.)
4. Shelkunova TG. Features of realization of innovative projects in the Russian mining industry. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*. 2015;4:32–38. (In Russ.)
5. Orlov VP. Mineral resources and geopolitics. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2011;2:23–26. (In Russ.)
6. Tolstykh NI. Issues of legal regulation of subsoil use when developing common mineral deposits. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2007;6:2–7. (In Russ.)
7. Aleksandrova VI. Modeling and GIS-technologies. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;S6:34–44. (In Russ.)
8. Pigareva TA, Abakumov EV. Biological parameters of soil and anthropogenic substrates of tailing dams of an iron ore mine. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2015;1:28–33. (In Russ.)
9. Kalashnik NA. Computer modeling of an earth-fill dam as a prototype of an embanking tailings dam. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2012;4:54–55. (In Russ.)
10. De Carvalho DW. The ore tailings dam rupture disaster in Mariana, Brazil 2015: what we have to learn from anthropogenic disasters. *Natural Resources Journal*. 2019;59(2):281–300.
11. De Carvalho DW. The brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law. *Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito*. 2020;12(2):227–238. <https://doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04>
12. Stanwick PA, Stanwick SD. The vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2019;2(6):6–11.
13. Kossoff D, Dubbin WE, Alfredsson M, Edwards SJ, Macklin MG, Hudson-Edwards KA. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*. 2014;51:229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
14. Burenkova VV, Burenkov PM. Domestic experience of assessing the filtration strength of non-cohesive soils of dam body and base. *Prirodoobustroistvo*. 2020;4:84–91. (In Russ.)
15. Sainov MP, Chechetkin IP. Crack resistance of embankment dam core with consideration of pore pressure. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*.



- 2020;4. Available from: <https://esj.today/PDF/09SAVN420.pdf> [Accessed 11<sup>th</sup> November 2020]. (In Russ.)
16. Kalashnik AI, Kalashnik NA, Zaporozhets DV. Evaluation of bulk earth structure on morainic foundation. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2014;6:93–98. (In Russ.)
17. Potapov IA, Shimenkova AA, Potapov AD. Dependence of suffusion stability of sandy soils of various geneses on the type of filtrate. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2012;5:79–86. (In Russ.)
18. Kasharin DV, Thai Thi Kim Chi. Increasing stability of flexible dam-foundations in engineering protection of buildings from flooding. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazing of Civil Engineering*. 2013;4:51–59. (In Russ.)
19. Maksimov D.A. Mechanisms of negative influence of local filtration stability disturbances on the made ground hydrotechnical facilities reliability. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2018;2:90–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.090>
20. Yurkevich NV, Yurkevich NV, Gureyev VN, Mazov NA. Problems of controlling water filtration in hydraulic structures in permafrost regions. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(4):126–138. (In Russ.)
21. Kolosov MA, Belyakov PV. Erosion of ground fill dams during spring floodings. *27-e plenarnoe Mezhevuzovskoe koordinatsionnoe soveshchanie po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov: materialy konferentsii = 27<sup>th</sup> plenary Interuniversity coordination meeting on the problem of erosion, channel and estuarine processes: conference proceedings*. Izhevsk; 2012. p.136–138. (In Russ.)
22. Kozionov AP, Pyat AL, Mokhov II, Ivanov UP. Algorithm for dike abnormal behavior detection based on transfer function model and one-class classification. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2015;6:10–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.6.10>
23. Kosichenko YM. Investigations of filtration control and operational reliability for earth hydraulic structures. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2012;2. Available from: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec574-field12.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec574-field12.pdf) [Accessed 11<sup>th</sup> November 2020]. (In Russ.)
24. Sheshukov EG, Kurtseva KP. Numerical study of boundary value problems of nonlinear filtration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2012;9-10:158–166. (In Russ.)
25. Davlatshoev SK. Hydrogeochemical monitoring at the dam base on water-soluble rocks. *Tinchurinskie chteniya: XIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konfe-rentsii = Tinchurin readings: 14<sup>th</sup> International youth scientific conference*. Kazan; 2019. p.203–207. (In Russ.)
26. Popelsky P, Dabska A. Numerical model of suffusion. *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. V.E. Vedeneeva*. 2014;271:23–33. (In Russ.)
27. Vasil'eva YeV, Yakovenko YeA. Improving dams and dikes safety. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2017;4. Available from: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb4-rec340-field12.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb4-rec340-field12.pdf) [Accessed 11<sup>th</sup> November 2020]. (In Russ.)
28. Baklanova DV. Calculating filtration through earth dams at permeable foundation. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta problem melioratsii = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems*. 2016;1. Available from: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec402-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec402-field6.pdf) [Accessed 11<sup>th</sup> November 2020]. (In Russ.)
29. Baklanova DV. The calculated substantiation of the destruction probability of potentially dangerous parts of a large canal resulted from filtration impacts. *Prirodoo-bustroistvo*. 2013;2:43–48. (In Russ.)
30. Kalashnik NA. Assessment of reliability of a bulk soil dam during formation of an increased filtration zone in its body. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2019;11(2):69–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.69-74>
31. Khayrulina EA. Influence of slurry storage facility with salt-bearing wastes on the surface and ground waters. *Geograficheskii vestnik = Geographical bulletin*. 2018;2:145–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-145-155>
32. Zhilenkov VN, Khalenova ML. On some means of seepage strength of embankment dams exposed to external freezing. *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2013;269:40–51. (In Russ.)
33. Ivanov DV, Davletyanov II, Malanin VV. Comparative analysis of filtration methods in determining the concentrations of dissolved forms of metals in natural and waste waters. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2020;3:17–22. (In Russ.)
34. Pavlov SKh, Orgilnov AI, Badminov PS, Krjukova IG. The filtration leakage from ash dumps and their interaction with the geological environment. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Nauki o zemle" = The bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2014;7:100–115. (In Russ.)
35. Lyubimova TV, Latysh AA. Dynamics of changes in the ground water level in the area of underground dams. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, geography and global energy*. 2020;4:84–88. (In Russ.)
36. Bal'zannikov MI, Rodionov MV. Downstream side soil dams allowing flood water flow. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. 2012;15:99–104. (In Russ.)
37. Kruglov GG, Linkevich NN, Nemirovets OV. Filtration bypassing retaining hydraulic structures. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*. 2020;19(3):252–257.



(In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-252-257>

38. Dyakonova TA, Pisarev AV, Khoperskov AV, Khrapov SS. Mathematical model of surface water dynamics. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Fizika* = *Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics*. 2014;1:35–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.15688/jvolsu1.2014.1.4>

39. Kuznetsov DV. Scenario of an accident of soil dams in case of water spill over a dam crest by using fault tree analysis. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2016;4:94–107. (In Russ.)

40. Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Rastputina V.A., Voinarovskii A.E. Physical modelling of the destruction of reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2019;151(2):51–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>

41. Dyachenko KN, Zverev AV. Causes of the Flaws Formation in Floodwalls in the Process of their Use in the

Conditions of the Far East. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* = *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2017;6:96–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-6-8>

42. Stefanyshyn DV, Shtilman VB. Towards assessing the probability of water overflow across the dam crest. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* = *Magazine of Civil Engineering*. 2012;9:70–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.35.9>

43. Bogoslavchik PM. Calculation model of soil dam wash-away due to overflow. *Nauka i tekhnika* = *Science & Technique*. 2018;17(4):292–296. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>

44. Bogoslavchik PM, Evdokimov VA, Nemerovets OV. Destruction conditions for earth-filled dam downstream side pavement during water overflow over the ridge. *Voda. Gaz. Teplo 2020: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* = *Water. Gas. Heat 2020: Proceedings of International scientific and technical conference*. Minsk; 2020. p.257–260. (In Russ.)

### Сведения об авторе / Information about the author



**Шарипов Динар Шамилевич**,  
аспирант,  
Снежинский физико-технический институт,  
филиал Национального исследовательского ядерного университета  
«Московский инженерно-физический институт»,  
456776, г. Снежинск, ул. Комсомольская, 8, Россия,  
✉ e-mail: Dinar.Shamilevich@yandex.ru

**Dinar Sh. Sharipov**,  
Postgraduate Student,  
Snezhinsk Physics and Technology Institute,  
Branch of National Research Nuclear University  
“Moscow Engineering Physics Institute”,  
8 Komsomolskaya St., Snezhinsk 456776, Russia,  
✉ e-mail: Dinar.Shamilevich@yandex.ru

### Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by the author.

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.12.2020; одобрена после рецензирования 22.01.2021; принятая к публикации 26.02.2021.

The article was submitted 02.12.2020; approved after reviewing 22.01.2021; accepted for publication 26.02.2021.



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3.06

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>



## Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири

© Л.И. Аузина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Целью исследования являлась разработка методики оперативного прогноза изменения гидродинамического режима грунтовых вод в результате барражного эффекта при строительстве сооружений с глубоким заложением фундаментов. Основным методом послужило создание аналитической модели в результате вариативных решений уравнения Лапласа. Решения разрабатывались в процессе исследований на территориях исторических центров Иркутска и других городов Восточной Сибири. В результате были построены прогнозные схемы глубин формирования уровня грунтовых вод и проведена оценка территорий по условиям подтопления. Разработана аналитическая модель для прогноза подпора подземных вод, представляющая собой простую и вполне универсальную структуру, которая может быть использована для прогнозных расчетов на территориях исторических городов, находящихся в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях. На основе анализа имеющегося материала сделан вывод о том, что значительную роль в формировании нового подпорного горизонта играют предварительная вертикальная планировка территории, правильный подход к выбору типа фундамента, а также сезонные колебания уровня подземных вод.

**Ключевые слова:** подпор, уровень грунтовых вод, аналитическая модель, прогноз, заглубленный фундамент

**Для цитирования:** Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод на территориях исторических центров городов Восточной Сибири. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 1. С. 73–84. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>

## Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities

© Larisa I. Auzina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the research work is to develop a procedure for on-line prediction of the groundwater hydrodynamic mode change caused by the barrage effect of deep foundation structure construction. The main method used is the development of an analytical model as a result of variant solutions of the Laplace equation. The solutions have been elaborated in the course of studies conducted in historical centers of Irkutsk and other cities of Eastern Siberia. As a result, diagrams predicting the formation depth of groundwater level have been created, and the territories have been assessed according to their flooding conditions. An analytical model has been developed for backwater prediction. The model is rather simple, universal and can be applied for predictive calculations on the territories of historical cities located in similar geological and hydrogeological conditions. The available material analyzed, it is concluded that preliminary vertical planning of the territory, correct approach to foundation type selection as well as seasonal rise of underground water play a significant role in the formation of a new headwater elevation.

**Keywords:** backwater, groundwater level, analytical model, prediction, deep foundation

**For citation:** Auzina LI. Predicting groundwater rise in historical centres of Eastern Siberian cities. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(1):73–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-1-73-84>

### Введение

Подтопление, вызванное различными причинами, отмечается во многих городах мира, в том числе в городах Соединенных Штатов Америки, Великобритании, Франции, Германии, Индии, Казахстана, Китая, Кореи и др. [1–

11]. В России подтопляются многие населенные пункты в европейской части страны, на Урале, на Дальнем Востоке, в Сибири [12, 13]. Крайне сложная ситуация в этом смысле сложилась на застроенных территориях юга Восточной Сибири. Причины разнообразны:



катастрофические паводковые ситуации, утечки из старых подземных коммуникаций, неработающая ливневая канализация, барражный эффект фундаментов глубокого заложения новых гражданских сооружений, часто имеющих подземные автостоянки [11, 14].

В 2002 г. Государственной думой Российской Федерации был принят закон «Об объектах культурного наследия народов России», в котором особо отмечается конституционная обязанность каждого гражданина Российской Федерации заботиться о сохранении исторического и культурного наследия страны. При этом только за период 2000–2010 гг. в России было уничтожено более 2500 памятников истории и культуры. Состояние половины памятников, находящихся под государственной охраной, неудовлетворительное, для большей части необходимо принятие срочных мер по спасению. По данным Министерства культуры, почти 65 % объектов культурно-исторического наследия в стране находится в предварийном или аварийном состоянии<sup>1</sup>. Большинство зданий, возраст которых составляет более 100 лет, подвергается негативному воздействию экологических факторов, в том числе подтоплению фундаментов. Для исторического города (или его исторической части) основным документом должен стать проект реконструкции города с выделением границ охранных зон, что позволит снять ряд градостроительных проблем, связанных с выделением земельных участков под новое строительство на территориях исторических центров. При этом должны учитываться риски подтопления исторических зданий при создании новых построек с глубоким заложением фундаментов.

В связи с актуальностью описанной выше проблемы целью исследования стала разработка методики оперативного прогноза изменения гидродинамического режима грунтовых вод в результате барражного эффекта, создаваемого сооружениями с фундаментами глубокого заложения, для принятия инженерных решений на начальных стадиях разработки архитектурно-строительных проектов.

## Методы исследования

На территориях с незначительной глубиной положения уровня грунтовых вод (УГВ) строительство зданий, имеющих фундаменты глубокого заложения, в результате барражного эффекта приводит к повышению риска подтопления смежных участков с находящимися на них сооружениями. Барражный эффект – это подъем УГВ перед преградой по потоку и его снижение за ней вследствие перекрытия фильтрационного потока подземных вод (ПВ). В зависимости от гидрогеологических характеристик перекрытого водоносного горизонта и габаритов инженерного сооружения величина подпора может изменяться от нескольких сантиметров до метров и приводить к деформациям грунтового массива, подтоплению территории и расположенных рядом зданий и сооружений, а также другим неблагоприятным последствиям.

Как уже отмечалось, подтопление, связанное с барражным эффектом, широко развито на территориях современных городов, где застраиваются не только окраинные площади, но и историко-культурные зоны, от чего страдают фундаменты старых зданий и часто разрушаются исторические постройки. Проведенные автором исследования были направлены на выделение основных причин изменения гидрогеологических условий городских территорий, а также факторов, определяющих формирование гидродинамического режима.

Основные причины изменения гидрогеологических условий разделяются на естественные и техногенные. Естественные причины – это в первую очередь сезонные колебания выпадения атмосферных осадков. К техногенным причинам можно отнести аварийные сбросы воды из водохранилищ Ангарского каскада, в том числе из Иркутского водохранилища, а также барраж, связанный со строительством и эксплуатацией проектируемого сооружений с глубоким заложением фундаментов.

Режимообразующие факторы подразделены на региональные и локальные. Региональные факторы включают подпор ПВ от

<sup>1</sup> III Парламентский форум «Историко-культурное наследие России» // Союз малых городов Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://smgrf.ru/3-parlamentskij-forum-istoriko-kul-turnoe-nasledie-rossii/> (07.12.2020).



каналов, рек и других водоемов, от утечек промышленных предприятий с большим потреблением воды, полей фильтрации, от инфильтрации утечек из крупных коллекторов и пр. К локальным факторам относятся подпор ПВ от эффекта барража подземных сооружений, от инфильтрации утечек из водонесущих коммуникаций и образование воронок депрессии от действия различных видов дренажей при строительстве и эксплуатации сооружений.

В данной работе акцент сделан на локальном техногенном факторе, обусловленном строительством современных зданий с подземными торговыми комплексами, подземными стоянками и другими объектами глубокого подземного заложения, вызывающими подпор ПВ за счет барражного эффекта.

Весьма сложная ситуация, связанная с подпором ПВ, сложилась в городах Восточной Сибири, в том числе в Иркутске, Черемхово, Усолье-Сибирском и других. Например, в Иркутске большая часть городского центра представлена зданиями конца XVIII – начала XIX в., уровень ПВ находится на глубине 1,2–5 м от поверхности земли [15]. Незначительная часть свободных от застроек площадей, как правило, предоставляется для сооружения крупных торговых комплексов или жилых домов с глубоким заложением фундаментов и подземными автостоянками, что сопровождается переформированием структуры фильтрационного потока ПВ.

Территория исследований находится в переходной зоне от платформенной равнины к Байкальской горной области. Рельеф территории умеренно расчленен долинами рек и распадками первого и второго порядков. Водораздельные пространства имеют плоские или округлые вершины с абсолютной отметкой 480–520 м, максимальная глубина расчленения достигает 160 м.

В гидрогеологическом отношении район приурочен к Иркутскому бассейну – наиболее крупной структуре Ангаро-Ленского артезианского бассейна первого порядка.

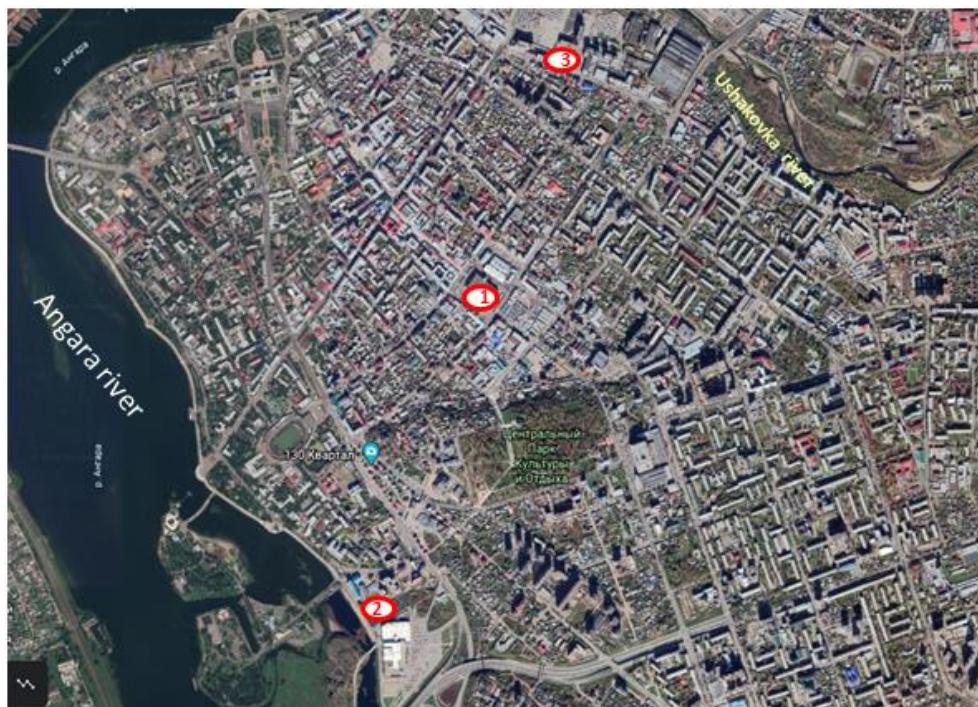
Основными водовмещающими отложениями являются породы четвертичного (гравийно-галечные, песчано-глинистые породы), юрского (песчаники, аргиллиты, алевролиты)

и кембрийского (доломиты, соленосные породы) возрастов. Осадочные отложения имеют блоковую структуру, унаследованную от кристаллического фундамента [16]. В пределах исследуемых территорий положение блоков горных пород обусловило формирование основных геоморфологических структур. В сочетании с системами тектонических разрывов и эрозионной сетью они оказали решающее влияние на формирование современных инженерно-гидрогеологических условий [15, 17, 18].

Типовой разрез центральной территории г. Иркутска имеет двухслойное строение: верхняя часть представлена рыхлыми отложениями четвертичного возраста, нижняя – скальными юрскими образованиями. При этом верхняя часть сложена гравийно-галечными и песчано-супесчаными отложениями четвертичного возраста, значительно отличающимися друг от друга не только строением, но и фильтрационными характеристиками. Первыми от поверхности залегают песчано-супесчаные породы с коэффициентом фильтрации  $K$  не более 5–6 м/сут., в этом слое и формируется зеркало грунтовых вод. Гравийно-галечные отложения имеют гораздо более высокие фильтрационные показатели  $K$  – до 100–300 м/сут. Уровень ПВ четвертичного водоносного горизонта расположен на глубине 1,2–5 м от поверхности земли. Горизонт подстилается песчаниками, алевролитами и углистыми сланцами юрского возраста,  $K$  которых в тектонически нарушенных зонах достигает 100 м/сут. при средних значениях 0,5–1,5 м/сут. Перекрыт водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений техногенными грунтами средней мощностью 1,5 м [11, 13, 15].

Моделирование таких ситуаций в ряде городов Иркутского района с прогнозом подъема УГВ на сопредельных территориях осуществлялось неоднократно [11–13, 15, 17, 19], на основании чего была выведена эмпирическая зависимость.

Последовательность и методика работы представлены в данной статье на примере нескольких объектов, выбор которых обусловлен типичными для данной территории геологическим строением и гидрогеологическими условиями (рис. 1).



**Рис. 1. Расположение ключевых (типовых) участков № 1, 2, 3, г. Иркутск**  
**Fig. 1. Location of key (standard) sites no. 1, 2, 3 in Irkutsk**

Участок № 1, расположенный в центральной зоне исторической застройки г. Иркутска, был предназначен для строительства 5–10-этажного здания с трехуровневой подземной автостоянкой и проектной глубиной заложения фундамента 8–12 м. По итогам анализа исходных материалов [10–13, 15, 17, 18, 20] была сформирована база данных, включающая 13 атрибутивных позиций по 96 точкам.

В результате схематизации природных условий, которая проводилась в соответствии с существующими российскими стандартами<sup>2</sup> и рекомендациями, разработанными в качестве приложений к ним<sup>3</sup>, была составлена гидродинамическая модель.

Вертикальное строение обводненной толщи аллювиальных отложений террасы принято двухслойным:

– верхняя часть разреза представлена плотным суглинком и супесью с незначительными прослойками песка суммарной средней мощностью 2,45 м и коэффициентом фильтрации  $K = 1\text{--}5 \text{ м/сут.}$ ;

– средняя и нижняя части разреза представлены гравийно-галечниковыми верхнечетвертичными отложениями мощностью от 2 до 5,1 м, являющимися основным коллектором ПВ и имеющими однородно-изотропное строение и  $K = 84,5 \text{ м/сут.}$ , при этом переформирование УГВ происходит в суглинисто-супесчаных породах верхней части разреза [17].

Гравийно-галечниковые породы практически на всей исследуемой территории подстилаются значительно менее проницаемыми элювиальными отложениями юрского возраста с  $K = 0,5\text{--}1,5 \text{ м/сут.}$

Гидравлический режим аллювиального горизонта рассматривается как безнапорный. При этом незначительная разница между появившимся и установившимся УГВ в ряде скважин, пробуренных на территории с 1966 по 2008 гг. (от 0,05 до 0,4 м), вероятнее всего, связана с влиянием напорных вод юрского водоносного горизонта, а также локальными линзами водоупорных пород в верхнечетвертичных отложениях.

<sup>2</sup> СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85 // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054204> (07.12.2020).

<sup>3</sup> Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. Справочное пособие к СНиП 2.06.15-85 // Библиотека нормативной документации [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/2/2697/> (07.12.2020).



Таким образом, гидродинамическая модель территории представляется в виде схемы, изображенной на рис. 2.

Уклон зеркала ПВ / имеет различные значения и зависит от положения основной дрены (в данном случае это р. Ангара), а также ряда купольных структур, сформировавшихся на территории в результате утечек из подземных коммуникаций. Основное движение потока направлено с юго-востока на северо-запад, при этом уклон потока / возрастает с 0,016 до 0,027.

Пласт моделируется в виде неограниченной расчетной схемы. Инфильтрационное питание принято равномерным по всей площади, его влияние на изменение УГВ  $\Delta h$  на данном этапе моделирования не учитывается, поскольку инфильтрационное питание в однородных пластах не влияет на характер стационарного подпора [21, 22]. В данном случае задача рассматривается как стационарная, детерминированная, то есть в рамках выделенных стадий развития подпора основные элементы потока ПВ остаются неизменными. Прогноз стационарного процесса заключается в построении депрессионных кривых на завершающей стадии определенного временного интервала, отвечающего принятым граничным условиям [23, 24].

Распределение уровней в одномерном однородно-изотропном безнапорном пласте при решении стационарной задачи без учета инфильтрационного питания описывается модификацией уравнения Лапласа [21, 22]:

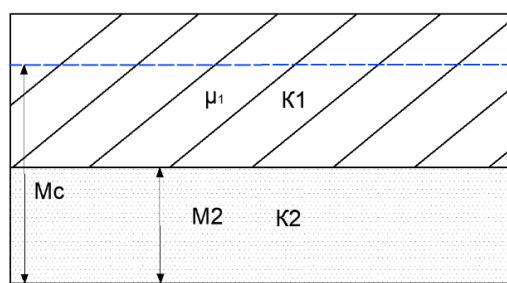


Рис. 2. Гидродинамическая модель участка исследования:

$M_1$  – мощность потока грунтовых вод (среднее значение – 5,02 м);  $\mu_1$  – коэффициент вodoнасыщения верхнего слоя (0,92);  $K_1$  – коэффициент фильтрации верхнего слоя (1–5 м/сут.);  $K_2$  – коэффициент фильтрации нижнего слоя (84,5 м/сут.);  $M_2$  – средняя мощность нижнего слоя (4,07 м)  
В обобщенной гидродинамической модели использованы усредненные значения параметров

Fig. 2. Hydrodynamic model of the site under investigation:

$M_1$  – groundwater flow rate (average value is 5.02 m);  $\mu_1$  – water saturation ratio of the upper layer (0.92);  $K_1$  – filtration coefficient of the upper layer (1–5 m/day);  $K_2$  – filtration coefficient of the lower layer (84.5 m/day);  $M_2$  – average flow rate of the lower layer (4.07 m)  
The generalized hydrogeological model uses average parameter values

$$\frac{\partial^2 (\Delta h^2/2)}{\partial x^2} = 0.$$

На первом этапе строилась актуальная модель (современные условия), на втором – прогнозная модель (условия, сформировавшиеся в результате подпора) [13, 25].

Анализ актуальной модели с использованием программного комплекса Surfer 10 позволил представить общую картину существующих гидродинамических условий, детализировать направление движения потока, определить значения гидравлических уклонов зеркала ПВ на различных участках исследуемой территории, а также среднюю глубину формирования УГВ, которая в данном случае составила 2,5 м.

Прогнозное моделирование показало, что максимальный подъем уровня на участке составит около 0,5 м, минимальная глубина от уровня воды до поверхности земли после строительства сооружения – 1,7 м (рис. 3). Таким образом, в соответствии с существующими российскими нормативными документами территория в основном оценивается как умеренно подтопленная. Общее направление движения потока ПВ не изменилось, локальное переформирование УГВ произошло вокруг проектируемого сооружения, что связано с развитием подпора ПВ, и охватило значительную часть площади, занятой историческими зданиями (рис. 4).

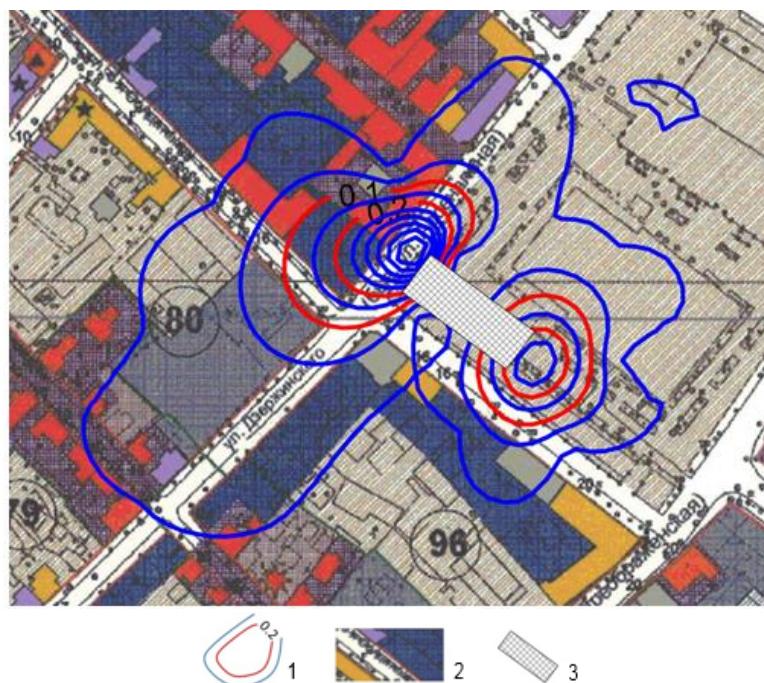


Рис. 3. Изолинии величины подъема уровня грунтовых вод  $\Delta h$ :

1 – изолинии величины подъема уровня грунтовых вод в результате подпора, шаг – 0,05 м; 2 – подложка со схемой расположения объектов историко-культурного наследия; 3 – проектируемое сооружение

Fig. 3. Isolines of the groundwater level rise  $\Delta h$ :

1 – isolines of the groundwater level rise due to backwater, iteration 0.05 m; 2 – underlay with the location diagram of historical and cultural heritage objects; 3 – project structure

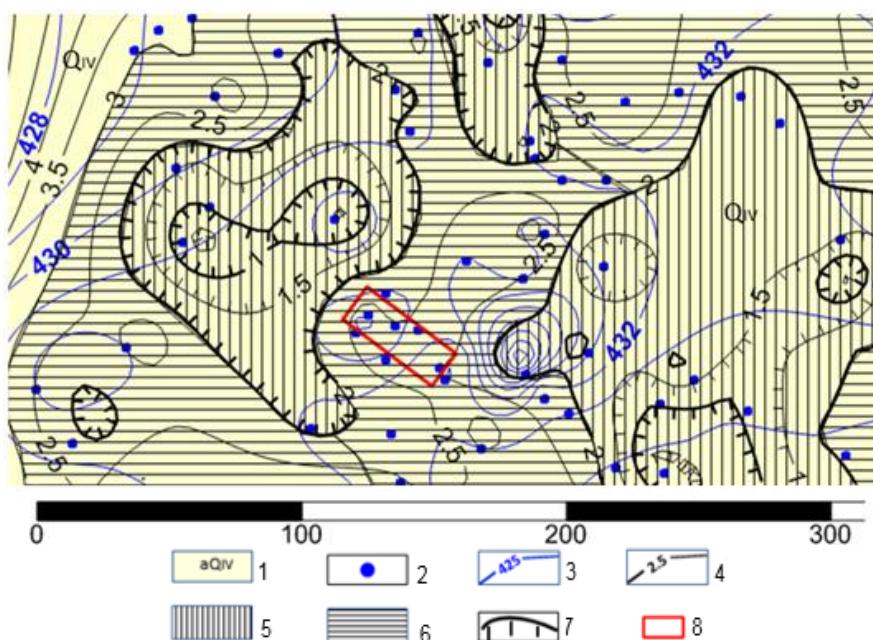


Рис. 4. Схема районирования территории участка № 1 по степени подтопления:

1 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 2 – горные выработки (скважины, колодцы, подвалы);  
3 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения);  
4 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м;  
5 – умеренно подтопленная территория; 6 – слабо подтопленная территория;  
7 – граница умеренно подтопленной территории; 8 – проектное сооружение

Fig. 4. Zoning scheme of the site no. 1 by the degree of water logging:

1 – quarternary alluvial sediments; 2 – mine openings (wells, shafts, pits); 3 – absolute mark of the underground water level after the groundwater rise (construction); 4 – depth of the underground water level formation after the groundwater rise (construction), m; 5 – moderately waterlogged territory; 6 – weakly waterlogged territory;  
7 – boundary of the moderately waterlogged territory; 8 – project structure



Описанный алгоритм применялся и на других исследуемых участках, где ситуация складывалась аналогичным образом и территория характеризовалась как подтопленная с различным процентным соотношением подзон сильного, умеренного и слабого подтопления.

Участок № 2 расположен в центральной части г. Иркутска, в русловой части р. Ангары. Здесь проектируется строительство жилого массива с заложением фундамента более 6 м. Подземная часть строения будет использоваться для парковки автомобилей. Свайный фундамент частично перекрывает поток грунтовых вод как по площади, так и в разрезе. Проектом предусмотрена вертикальная планировка территории путем грунтовой отсыпки мощностью более 2 м. В совокупности использование свайного фундамента и вертикальной планировки территории позволит избежать массового подтопления территории несмотря на подъем УГВ до 0,3 м (рис. 5).

Участок № 3 находится также в центре г. Иркутска, в русловой части р. Ушаковки, правого притока р. Ангары. Глубина заложения ленточного фундамента проектируемого здесь административно-делового центра составляет 4,5 м. Вертикальной планировки территории не предусмотрено. В результате при незначительном подъеме уровня ПВ до 0,2 м значительная часть территории окажется в подтопленном состоянии (рис. 6).

Полученные результаты показали, что наименьшее подтопление соответствует территории, на которой предусматривается предварительная планировка в виде отсыпки техногенным грунтом и использование свайного фундамента.

## Результаты исследования и их анализ

В результате проведенных исследований, направленных на прогноз изменения гидрологических условий, были выделены основные причины этого процесса и режимообразующие факторы.

В представленной работе наиболее детально рассмотрен вопрос прогноза локального техногенного фактора, обусловленного строительством современных зданий с подземными сооружениями глубокого заложения, вызывающими подпор ПВ за счет барражного эффекта.

Моделирование развития подпора на ряде участков Иркутска и других городов Иркутского района, а также результаты вариативного аналитического решения уравнения Лапласа для принятой расчетной схемы (см. рис. 1), включающего решение системы уравнений в частных производных параболического типа при заданных начальных и граничных условиях, показали, что наибольшее влияние на подпор имеют гидравлический уклон потока и ширина проектируемого сооружения (см. рис. 3). Сделанные выводы позволили составить и использовать следующее аналитическое решение для оценки повышения УГВ  $\Delta h$  [17]:

$$\Delta h = \frac{I \cdot B}{1,78},$$

где  $I$  – уклон зеркала ПВ;  $B$  – ширина подпорной стенки (барраж), м; 1,78 – коэффициент, полученный аналитическим путем.

Взятые для расчета значения градиентов соответствуют реально существующим в грунтовом потоке верхнего водоносного горизонта на исследуемых территориях. Расчетные значения ширины здания составили 15, 25, 50, 80, 110, 170, 200 м, что вполне соответствует размерам проектируемых в настоящее время зданий при глубине заложения фундаментов до 8 м (рис. 7).

Необходимо отметить ограничения при применении данной формулы:

- условно-однородная фильтрационная толща;
- перпендикулярность здания и потока;
- совершенный врез здания;
- постоянство или отсутствие инфильтрационного питания.

Переход к расчету подпора от несовершенного вреза проектируемых сооружений может быть осуществлен путем пересчета эмпирического коэффициента 1,78 в приведенной выше формуле в процентном соотношении с глубиной вреза, как это было сделано для объектов № 2 и 3.

## Обсуждение полученных результатов

Уровенная поверхность грунтовых вод принадлежит к числу весьма динамичных показателей. Так, за период 1984–1997 гг. среднегодовой уровень по ряду наблюдательных

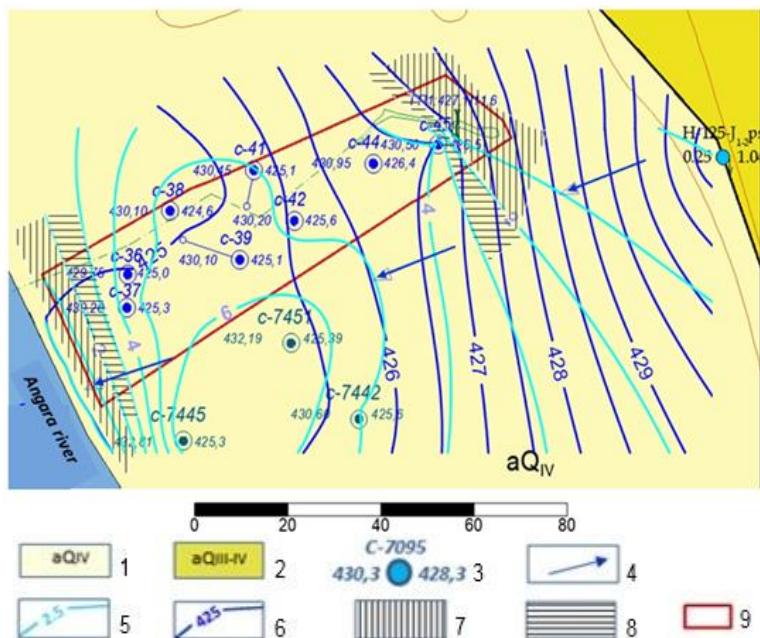


Рис. 5. Схема районирования территории участка № 2 по степени подтопления:

1, 2 – аллювиальные отложения четвертичного возраста; 3 – скважина: вверху – номер, слева – абсолютная отметка поверхности земли, справа – абсолютная отметка уровня подземных вод, м; 4 – направление движения потока подземных вод; 5 – глубина формирования уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 6 – абсолютная отметка уровня подземных вод после подпора (строительства сооружения), м; 7 – умеренно подтопленная территория; 8 – слабо подтопленная территория; 9 – проектное сооружение

Fig. 5. Zoning scheme of the site no. 2 by the degree of water logging:

1, 2 – quarternary alluvial sediments; 3 – well: at the top – number, on the left – absolute mark of the earth surface, on the right – absolute mark of the underground water level, m; 4 – underground water flow direction; 5 – depth of the underground water level formation after the groundwater rise (construction), m; 6 – absolute mark of the underground water level after the groundwater rise (construction), m; 7 – moderately waterlogged territory; 8 – weakly waterlogged territory; 9 – project structure

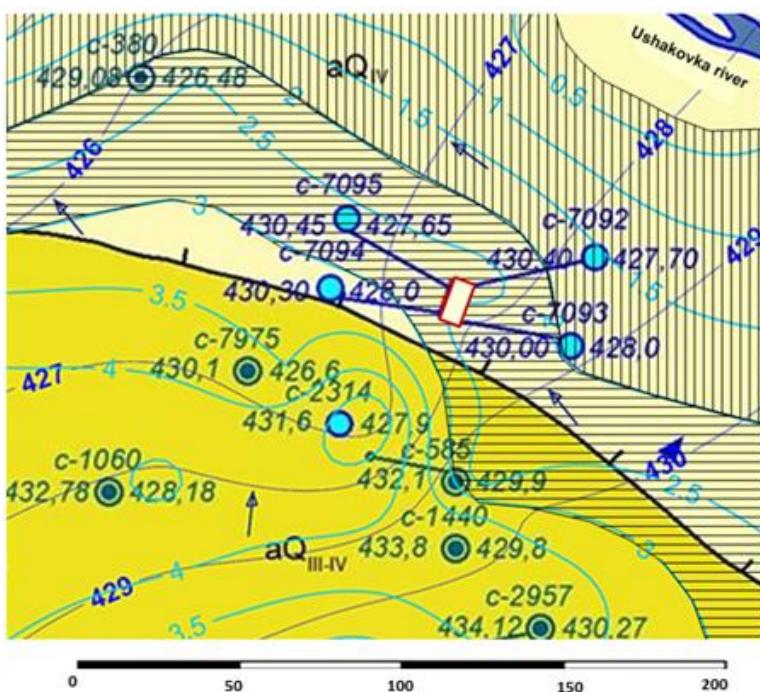


Рис. 6. Схема районирования территории участка № 3 по степени подтопления

Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. Zoning scheme of the site no. 3 by the degree of water logging  
See the legend on Fig. 5

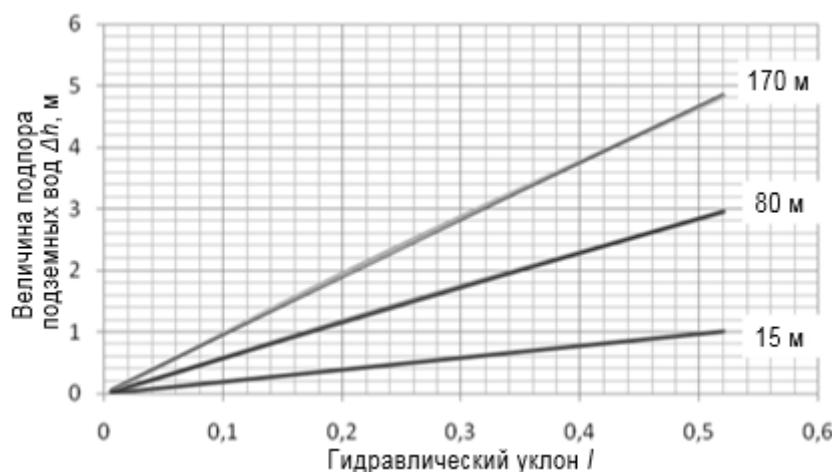


Рис. 7. Величина подпора подземных вод  $\Delta h$  при различных значениях гидравлического уклона  $I$  и ширине здания  $B$ , м

Fig. 7. Backwater value  $\Delta h$  for different values of the hydraulic gradient  $I$  and the building's width  $B$ , m

скважин, расположенных в центральной части г. Иркутска, изменился на 0,8–1 м. Ввиду данного факта при разработке технологических схем следует учитывать, что прогнозное положение УГВ может достичь значений 0,9–1,4 м от поверхности земли. В этом случае значительная часть территории будет классифицироваться как умеренно подтопленная [12]. Особенno такой прогноз важен для центральных частей городов, где кроме современных построек подтопляются архитектурные памятники, большая часть которых является национальным достоянием и находится в аварийном состоянии из-за быстро развивающихся деформаций подземных частей. В настоящее время для защиты фундаментов исторических зданий используется обмазочная гидроизоляция, лишь в незначительной степени защищающая их от разрушительного воздействия ПВ. При этом наиболее актуальными для городской среды являются предупредительные мероприятия в виде инженерной подготовки территорий, а также защитные дренажи, которые применяются в настоящее время в процессе строительства и эксплуатации сооружений, в том числе вертикальная планировка, то есть искусственное повышение планировочных отметок территории застройки, гидронамыв, пристенные дренажи и пр. [25–27].

Перечисленные аспекты предопределяют необходимость оперативного и при этом до-

стоверного прогноза изменения УГВ при строительстве сооружений с последующей инженерной подготовкой городской территории и разработкой действенных защитных мероприятий, что представляется крайне актуальной и важной проблемой, решение которой необходимо для сохранения историко-культурного наследия старинных городов Сибири.

### Заключение

Результаты представленных исследований и их анализ показали, что наиболее значительное влияние на величину подпора ПВ оказывают гидравлический уклон потока ПВ  $I$  и ширина проектируемого сооружения  $B$ . Вариативные решения позволили выбрать аналитическую модель для прогноза подпора ПВ. Следует отметить, что представленная аналитическая модель носит вполне универсальный характер и может использоваться для прогноза подпора ПВ на территориях многих исторических городов, находящихся в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях.

Значительную роль в формировании нового подпорного горизонта играет предварительная вертикальная планировка территории, а также использование свайного фундамента. Кроме того, при оценке глубины формирования уровня ПВ и последующей разработке профилактических и защитных мероприятий необходимо учитывать сезонные подъемы УГВ.

**Список литературы**

1. Davies J.A. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation // Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1987. Vol. 1. P. 139–144.
2. Abu-Rizaiza O.S., Sarikaya H.Z., Ali Khan M.Z. Urban groundwater rise control: case study // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1989. Vol. 115. Iss. 4. P. 588–607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588))
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering. 2004. Vol. 157. Iss. 4. P. 183–191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>
4. Preene M., Loots E. Optimisation of dewatering systems // Proceedings of the 16<sup>th</sup> ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015. P. 2841–2846.
5. Preene M., Roberts T.O.L. Groundwater control for construction in the Lambeth Group // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering. 2002. Vol. 155. Iss. 4. P. 221–227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>
6. Davis G.M., Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England // Engineering Geology. 2002. Vol. 66. Iss. 1-2. P. 1–18.
7. Long M., Murphy M., Roberts T.O.L., O'Brien J., Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork // Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology. 2015. Vol. 48. Iss. 2. P. 79–93.
8. Preene M., Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas // Proceedings of the 16<sup>th</sup> ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. 2015. P. 2847–2852.
9. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 21. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>
10. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 54–62.
11. Лоншаков Г.С., Аузина Л.И. Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территорий (на примере г. Иркутска) // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 11. С. 50–59.
12. Lonshakov G.S., Auzina L.I. Method of integral geoenvironmental evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city // Environmental and Engineering Aspects for Sustainable Living: International Symposium. Hannover: EWG e.V, 2017. P. 18–20.
13. Auzina L.I. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia // 8<sup>th</sup> International IAEG Congress. 2000. Vol. 6. P. 4521–4525.
14. Куранов Н.П., Муфтахов А.Ж. Проблема подтопления грунтовыми водами территории больших городов. М.: Промышленное строительство, 1986. 27 с.
15. Аузина Л.И., Серова Г.Е. Влияние техногенного подтопления на устойчивость грунтовых оснований и сооружений г. Иркутска // Город: прошлое, настоящее, будущее. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 124–128.
16. Лобацкая Р.М., Стрельченко И.П. Информационные технологии в оценке разломно-блоковых структур урбанизированных территорий (на примере г. Иркутска) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 76–88.
17. Аузина Л.И. Прогноз подпора подземных вод при освоении застроенных территорий с использованием аналитических зависимостей // Современные фундаментальные и прикладные исследования. 2013. Т. 1. № 1. С. 57–63.
18. Кламер М., Дружинина И.Е., Глебова Н.М. Особенности расположения реки Ушаковки в Иркутске и ее природный потенциал // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 2. С. 117–125.
19. Auzina L.I., Parshin A.V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
20. Большаков А., Суродина А., Максимова Э. Принцип ландшафтосообразности в градостроительном планировании // Проект Байкал. 2016. Т. 13. № 49. С. 54–59. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>
21. Гавич И.К., Зекцер И.С., Ковалевский В.С., Язвин Л.С., Пиннекер Е.В., Бондаренко С.С. [и др.]. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1984. 242 с.
22. Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование геофильтрации. М. Недра, 1976. 408 с.
23. Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
24. Бондаренко С.С., Боревский Л.В., Гавич И.К., Дзюба А.А., Зекцер И.С., Ковалевский В.С. [и др.]. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 242 с.
25. Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Дзекцер Е.С., Донской Г.В., Муфтахов А.В. Прогноз и предотвращение подтопления грунтовыми водами территорий при строительстве. М.: Стройиздат, 1978. 177 с.
26. Белов А.А., Кирюшин А.В., Маскайкин В.Н. Инженерная подготовка городской территории при подтоплении // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. 2017. № 1. С. 1–10.
27. Сологаев В.И. Фильтрационные расчеты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 416 с.



## References

1. Davies JA. Groundwater control in the design and construction of a deep excavation. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1987;1:139–144.
2. Abu-Rizaiza OS, Sarikaya HZ, Ali Khan MZ. Urban groundwater rise control: case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1989;115(4):588–607. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:4\(588\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:4(588))
3. Whitaker D. Groundwater control for the Stratford CTRL station box. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering*. 2004;157(4):183–191. <https://doi.org/10.1680/geng.2004.157.4.183>
4. Preene M, Loots E. Optimisation of dewatering systems. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015: 2841–2846.
5. Preene M, Roberts TOL. Groundwater control for construction in the Lambeth Group. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering*. 2002;155(4):221–227. <https://doi.org/10.1680/geng.2002.155.4.221>
6. Davis GM, Horswill P. Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England. *Engineering Geology*. 2002;66(1-2):1–18.
7. Long M, Murphy M, Roberts TOL, O'Brien J, Clancy N. Deep excavations in water-bearing gravels in Cork. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2015;48(2):79–93.
8. Preene M, Fisher S. Impacts from groundwater control in urban areas. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015:2847–2852.
9. Pokrovsky V, Pokrovsky D, Dutova E, Nikitenkov A, Nazarov A. Degree of areal drainage assessment using digital elevation models. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2014;21:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/21/1/012018>
10. Shenkman BM, Sholokhov PA, Shenkman IB. Underflooding of Irkutsk caused by phreatic rise. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2011;2:54–62. (In Russ.)
11. Lonshakov GS, Auzina LI. Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(11):50–59. (In Russ.)
12. Lonshakov GS, Auzina LI. Method of integral geo-ecological evaluation of the underground hydrosphere sustainability within the territory of Irkutsk city. *Environmental and Engineering Aspects for Sustainable Living: International Symposium*. Hannover: EWG e.V; 2017. p.18–20.
13. Auzina LI. Engineering geology and hydrogeology in an urban environment of East Siberia, Russia. *8<sup>th</sup> International IAEG Congress*. 2000;6:4521–4525.
14. Kuranov NP, Muftakhov AZh. *The problem of big cities underflooding by ground waters*. Moscow: Promyshlennoe stroitel'stvo; 1986. 27 p. (In Russ.)
15. Auzina LI, Serova GE. Influence of technogenic underflooding on stability of Irkutsk ground base and structures. In: *Gorod: proshloe, nastoyashchее, budushchее = City: past, present, future*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000. p.124–128. (In Russ.)
16. Lobatskaya RM, Strelchenko IP. Gis-based analysis of fault patterns in urban areas (a case study of Irkutsk city). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;11:76–88. (In Russ.)
17. Auzina LI. Analitic forecast of groundwater hydrostatic upthrust in built-up areas development. *Sovremennoye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya*. 2013;1(1):57–63. (In Russ.)
18. Klamer M, Druzhinina IE, Glebova NM. Arrangement peculiarities of Ushakovka river in Irkutsk and its natural potential. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2017;7(2):117–125. (In Russ.)
19. Auzina LI, Parshin AV. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
20. Bolshakov A, Surodina A, Maksimova E. The landscape congruity principle in urban planning. *Proekt Baikal*. 2016;13(49):54–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.49.1050>
21. Gavich IK, Zektser IS, Kovalevskii VS, Yazvin LS, Pinneker EV, Bondarenko SS, et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 242 p. (In Russ.)
22. Lukner L, Shestakov VM. *Geofiltration modeling*. Moscow: Nedra; 1976. 408 p. (In Russ.)
23. Lomize GM. *Filtration in fractured rocks*. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat; 1951. 127 p. (In Russ.)
24. Bondarenko SS, Borevskii LV, Gavich IK, Dzyuba AA, Zektser IS, Kovalevskii VS, et al. *Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics*. Novosibirsk: Nauka; 1983. 242 p. (In Russ.)
25. Abramov SK, Degtyarev BM, Dzektser ES, Donskoi GV, Muftakhov AV. *Prediction and prevention of territory underflooding by ground water in construction*. Moscow: Stroizdat; 1978. 177 s. (In Russ.)
26. Belov AA, Kiryushin AV, Maskaikin VN. Engineering preparation of urban area under flooding. *Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii zhurnal*. 2017;1:1–10. (In Russ.)
27. Sologaev VI. *Filtration calculations and computer modeling for protection against underflooding in urban construction*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University; 2002. 416 p. (In Russ.)

**Сведения об авторе / Information about the author**

**Аузина Лариса Ивановна,**  
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,  
доцент кафедры прикладной геологии,  
геофизики и геоинформационных систем,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: lauzina@mail.ru

**Larisa I. Auzina,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Applied Geology,  
Geophysics, and Geoinformation Systems,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
✉ e-mail: lauzina@mail.ru

**Заявленный вклад автора / Contribution of the author**

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

*Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by the author.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 09.12.2020; одобрена после рецензирования 12.01.2021; принята к публикации 10.02.2021.

The article was submitted 09.12.2020; approved after reviewing 12.01.2021; accepted for publication 10.02.2021.



## Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
- минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
- методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
- экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технология и техника горно-буровых работ;
- технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технология обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организаций.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе:  
авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;  
авторского договора;  
акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;  
сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате \*.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

*Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!*

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu). Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы:



отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке



литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

### **Внимание! Публикация статей является бесплатной.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.*

**По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редакция, ауд. Е-317.**

**Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com**

**Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru**

**Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo\_info@istu.edu**

**Статьи следует направлять через личный кабинет на сайте [www.nznj.ru](http://www.nznj.ru) или ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu); тел.: +7 (3952) 405069, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.**



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

© Е.М. Курчевская<sup>a</sup>, М.В. Яхно<sup>b</sup>, А.Е. Сенченко<sup>c</sup><sup>a,c</sup>НИИиПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия<sup>b</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серicitовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серicitизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

© Elena M. Kurchevskaya<sup>a</sup>, Marina V. Yakhno<sup>b</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>c</sup><sup>a,c</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia<sup>b</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract: Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are repre-



sented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список литературы** (references), **заявленный вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

**Сведения об авторах / Information about the authors**

Фото  
автора

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Фото  
автора

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: ymar@istu.edu

**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Фото  
автора

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,  
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 44 № 1 (74) 2021

Дизайнер А.А. Хохряков  
Редактор Ф.А. Посысоева  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 31.03.2021 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,75.  
Тираж 500 экз. Зак. 68. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83