

УДК 556.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564

Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Химический состав природных вод восточного обрамления Сибирской платформы (Предверхоанский прогиб)

Д.С. Малков¹✉, А.И. Сурнин², Н.В. Гусева¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики
и минерального сырья», Россия, г. Новосибирск

✉MalkovDS@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Предгорные (краевые, перикратонные) прогибы играют весомую роль в процессах генерации и локализации скоплений углеводородов и являются перспективными нефтегазопромысловыми объектами. Многочисленные исследования подобного рода структур сфокусированы главным образом на геологическом строении, процессах формирования и перспективах нефтегазоносности этих территорий. Вопросы, связанные с геохимией природных вод, либо вовсе не освещены, либо приводятся в крайне ограниченном виде. Изучение на современном аналитическом уровне химического состава природных вод Предверхоанского прогиба позволит оценить гидрогеохимический фон и выявить особенности поведения основных компонентов водной среды в условиях резкой смены тектонической обстановки. **Цель:** изучение и выявление особенностей химического состава природных вод в условиях резкой смены тектонической обстановки на примере восточного обрамления Сибирской платформы в зоне ее сочленения с чешуйчато-надвиговыми дислокациями Верхояно-Колымской складчатой зоны. **Методы.** Измерения быстроизменяющихся параметров природных вод (рН, Eh, температура) проводились непосредственно в месте отбора проб портативным анализатором HQ-40D фирмы Hach Lange (США). Анализ химического состава вод проводился в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета с использованием методов ионной хроматографии на двухканальном безреагентном ионохроматографическом комплексе ICS-5000 с кондуктометрическим детектированием производства компании Dionex-Thermo Scientific (США). Содержание в исследуемых водах анионов CO_3^{2-} и HCO_3^- определялось традиционным для этих показателей методом титриметрии. Определение концентрации Si выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе NeXION 300D, Perkin Elmer (США). **Результаты.** Приводится обширный фактический материал о химическом составе природных вод бассейнов рек Томпо, Ляписке, Соболох-Маян (Собопол) во внутренней части Предверхоанского прогиба перед фронтом передовых надвигов западного склона Верхоянского антиклинария. Показаны закономерности распределения основных ионов, выявлены общие черты и различия между исследуемыми участками.

Ключевые слова: Предверхоанский прогиб, химический состав природных вод, гидрогеохимические особенности, главные ионы, Сибирская платформа

Благодарности: Обработка данных выполнена в рамках Государственного Задания РФ «Наука». Проект FSWW-2023-0008.

Для цитирования: Малков Д.С., Сурнин А.И., Гусева Н.В. Химический состав природных вод восточного обрамления Сибирской платформы (Предверхоанский прогиб) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564

UDC 556.31

DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564

Chemical composition of natural waters of the eastern rim of the Siberian platform (Predverkhoyansk foredeep)

D.S. Malkov¹✉, A.I. Surnin², N.V. Guseva¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Joint Stock Company Siberian Scientific Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russian Federation

✉MalkovDS@tpu.ru

Abstract. Relevance. Foothill (foredeep, pericratonic) deflections play a significant role generation and localization of hydrocarbon accumulations and are promising objects of oil and gas exploration. Numerous studies of such structures are focused mainly on the geological structure, formation and prospects of oil and gas potential of these territories. Issues related to the geochemistry of natural waters are either not covered at all, or are presented in an extremely limited form. Studying the chemical composition of the natural waters of the Predverkhoyansk foredeep at the modern analytical level will make it possible to assess the hydrogeochemical background and emphasize the peculiarities of the behavior of the main components of the aquatic environment in conditions of a sharp change in the tectonic situation. **Aim.** To study and identify the hydrogeochemical features of the composition of natural waters in the area of the eastern framing of the Siberian platform in the region of its junction with the scaly-thrust dislocations of the Verkhoyano-Kolyma folded zone. **Methods.** Measurements of rapidly changing parameters of natural waters (pH, Eh, temperature) were carried out directly at the sampling site with a portable HQ-40D analyzer from Hach Lange (USA). The analysis of the chemical composition of waters was carried out in the Problematic Research Laboratory of Hydrogeochemistry of Tomsk Polytechnic University using ion chromatography methods on a two-channel reagentless ionochromatographic complex ICS-5000 with conductometric detection manufactured by Dionex-Thermo Scientific (USA). The content of CO_3^{2-} and HCO_3^- anions in the studied waters was determined by the traditional titrimetry method for these indicators. The Si concentration was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry on a NeXION 300D device, Perkin Elmer (USA). **Results.** The paper presents the data on the chemical composition of the natural waters of the Tompo, Lyapiske, Sobolokh-Mayan (Sobopol) river basins in the inner part of the Predverkhoyansk foredeep in front of the cutting edge of the advanced thrust of the western slope of the Verkhoyansk anticlinorium. The patterns of the distribution of basic ions are shown, common features and differences between the studied sites are revealed.

Keywords: Predverkhoyansk foredeep, chemical composition of natural waters, hydrogeochemical features, major ions, Siberian platform

Acknowledgements: Data processing was carried out within the State Task of the RF "Nauka". Project FSWW-2023-0008.

For citation: Malkov D.S., Surnin A.I., Guseva N.V. Chemical composition of natural waters of the eastern rim of the Siberian platform (Predverkhoyansk foredeep). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 197–209. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4564

Введение

Первые обобщающие научные работы, посвященные геологическому строению краевых прогибов, появились в 40–50 гг. прошлого века [1, 2]. Тогда же были оформлены и приведены их основные признаки: характерная форма (протяженные, узкие синклиналильные прогибы), асимметричное строение (крутое внутреннее крыло, примыкающее к складчатой зоне и пологое внешнее – к платформе), специфичный характер разрывных нарушений (сложные и резкие дислокации распространены преимущественно в зоне примыкания к складчатой области) и особенности состава вмещающих пород (в значительной мере это терригенные толщи с максимальной мощностью во

внутренних частях прогиба). Проблемы нефтегазоносности краевых прогибов освещены в трудах [3, 4]. Изучению прогибов Сибирской платформы посвящены работы геологических институтов СНИИГГиМС и ВНИГРИ 1970–1980-х гг., публикации [5–9]. Из более поздних исследований следует выделить работы [10–17].

Все исследования перикратонных прогибов главным образом сфокусированы на их геологическом строении, процессах формирования и перспективах нефтегазоносности этих территорий. Вопросы, связанные с геохимией природных вод данных структур, либо вовсе не освещены, либо приводятся в крайне ограниченном виде.

Ранее проведенными исследованиями на примере конкретных объектов показана эффективность применения геохимических данных для прогноза нефтегазоносности различных геологических структур [18–20]. При проведении геохимических поисков встает вопрос о корректном определении фоновых концентраций химических элементов, соответствующих естественному обогащению компонентов природной среды [21–25], особенно это актуально при проведении гидрогеохимических работ в условиях распространения многолетней мерзлоты [26–29]. Кроме этого, в последнее время в практику геохимических исследований активно внедряются технологии обработки данных с использованием искусственного интеллекта [30–33], применение которых для построения достоверных прогнозов потребует значительного наращивания объемов открытых геохимических данных по районам с различными природно-климатическими и геолого-структурными условиями.

Целью данного исследования является изучение химического состава природных вод Предверхоанского прогиба и выявление геохимических особенностей гидросферы в районах резкой смены геолого-тектонических условий в пределах восточного обрамления Сибирской платформы.

Объект и методы исследования

Предверхоанский прогиб представляет собой отрицательную структуру, в строении которой принимает участие комплекс каменноугольных, пермских, триасовых, юрских и меловых отложений. Прогиб вытянут вдоль складчатых обрамлений Западного Верхоянья в субмеридиональном направлении более чем на 1300 км, изгибаясь вдоль долины рек Лены и Алдана. Как и все краевые прогибы, он имеет асимметричное строение. В нем выделяются внешняя приплатформенная и внутренняя зона, примыкающая к складчатым сооружениям Верхоянских гор.

В силу своего географического расположения Предверхоанский прогиб крайне труднодоступен и остается слабоизученным объектом, и в этой связи любой полученный фактический материал требует внимательного изучения и представляет собой ценную информацию.

В течение двух полевых сезонов 2014 и 2015 гг. сотрудниками отдела гидрогеологии нефтегазоносных провинций и геоэкологии Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья в схожих геолого-тектонических условиях были пройдены полевые маршруты по рекам (с юга на север) Томпо, Ляписке и Соболох-Маян (Собопол) (рис. 1). Все полевые маршруты последовательно по направлению от истока к устью пересекли три типовых участка – *горный*, где на дневную поверхность выходят более

древние, интенсивно дислоцированные отложения складчатого обрамления; *пограничный* – тектоническая зона форланда Верхоянского складчатого пояса (граница Сибирской платформы), и собственно сам *прогиб* с выходом в зону моноклиналичного погружения мезозойских отложений. Суммарная длина полевых маршрутов по трем рекам составила более 600 км.

Основные характеристики исследуемых водных объектов приведены в таб. 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых рек [34, 35]

Table 1. Main characteristics of the studied rivers [34, 35]

Река River	Площадь водосбора, км ² Water collecting area, km ²	Длина, км Length, km	Расход воды, м ³ /с River flow, m ³ /s
Томпо Tompo	42700	570	158,6 (279 км от устья km from mouth)
Ляписке Lapiske	10300	299	–
Собопол Sobopol	13300	411	82,1 (240 км от устья km from mouth)

Передвижение полевых отрядов по рекам и пробоотбор проходили в летний период (июль–август) с использованием надувных ПВХ-лодок, оснащенных подвесными моторами.

Пробы воды отбирались не только из основного русла рек и притоков, а также из заводей, стариц и протоков со слабым течением. В бассейнах рек Соболох-Маян и Ляписке были также опробованы пойменные озера. Шаг опробования в среднем составлял 1,5–2 км со сгущением до 1 км в зоне выхода в прогиб. Распределение отобранных проб по типам водопунктов представлено в табл. 2.

Пробы воды на полный химический анализ отбирались в одноразовые ПЭТ флаконы объемом 100 мл с соблюдением всех необходимых требований и рекомендаций.

Таблица 2. Объем опробования по типам водопунктов

Table 2. Volume of sampling by types of water points

Объект исследования Object of the study	Основное русло Main riverbed	Завоуди и протоки Backwaters and branches	Притоки Tributaries	Пойменные озера Floodplain lakes	Всего Total
бассейн р. Томпо Tompo river basin	36	33	12	–	81
бассейн р. Ляписке Lapiske river basin	40	29	54	7	130
бассейн р. Собопол Sobopol river basin	112	5	40	10	167
Итого проб воды Total water samples	188	67	106	17	378

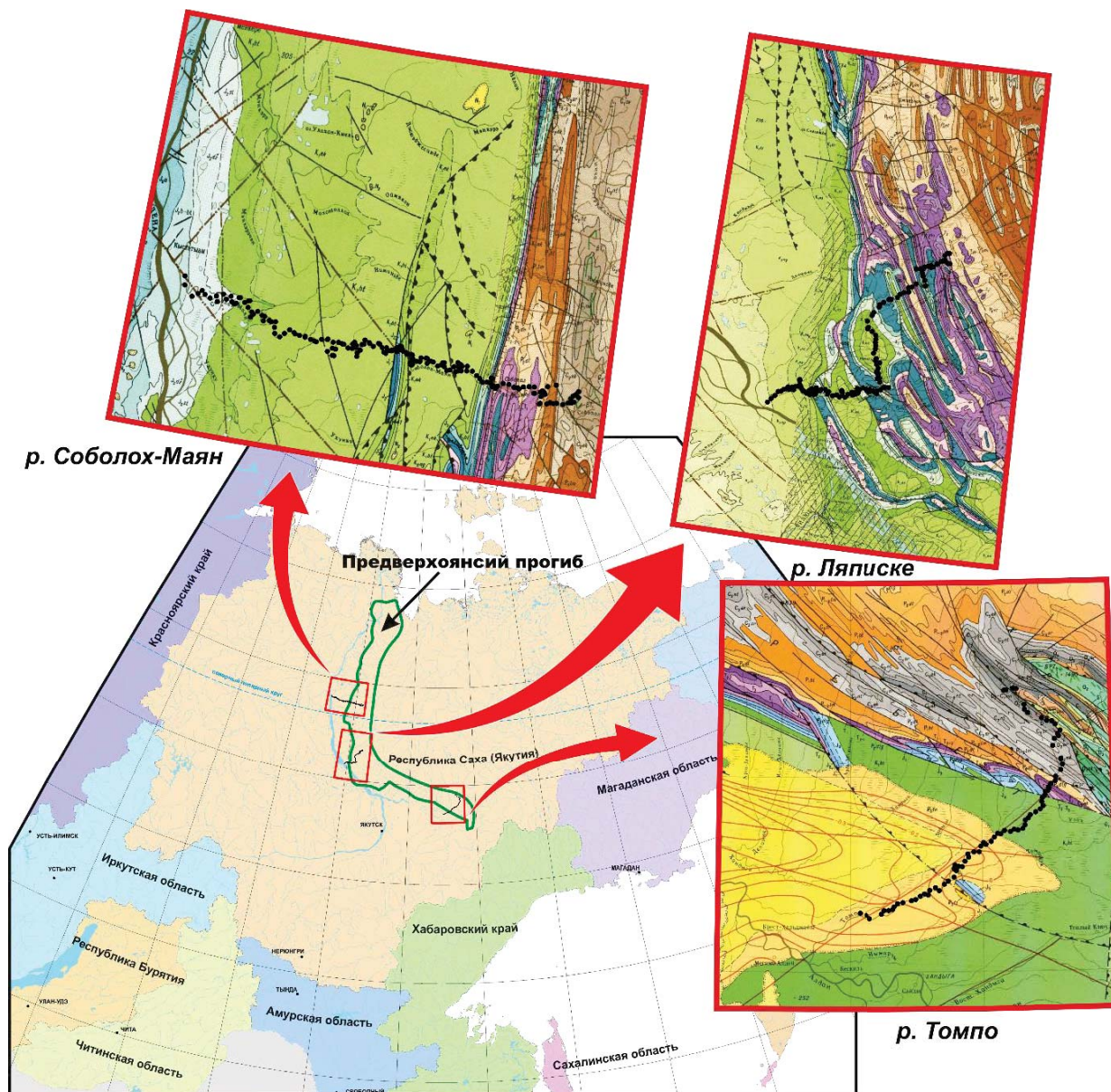


Рис. 1. Обзорная схема района исследования
Fig. 1. Overview scheme of the research area

Измерения быстроизменяющихся параметров природных вод (pH, Eh, температура) производились непосредственно в месте отбора проб портативным анализатором HQ-40D фирмы Hach Lange (США). Анализ химического состава вод проводился в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета с использованием методов ионной хроматографии на двухканальном безреагентном ионохроматографическом комплексе ICS-5000 с кондуктометрическим детектированием производства компании Dionex-Thermo Scientific (США). Содержание в исследуемых водах анионов CO_3^{2-} и HCO_3^- определялось традиционным для этих показателей методом титриметрии. Определе-

ние концентрации Si выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе NeXION 300D, Perkin Elmer (США).

Результаты исследования и их обсуждение

Природные воды изученной территории пресные и ультрапресные с минерализацией, как правило, не более 200 мг/л. Величина pH изменяется от 5,5 до 8,4 при среднем значении 7,2. Окислительно-восстановительный потенциал находится в пределах от 28 до 292 мВ. Среднее значения Eh 186 мВ.

По ионному составу все изученные природные воды Предверхоанского прогиба достаточно однородны, о чем свидетельствует кучное расположение точек на диаграмме Пайпера (рис. 2).

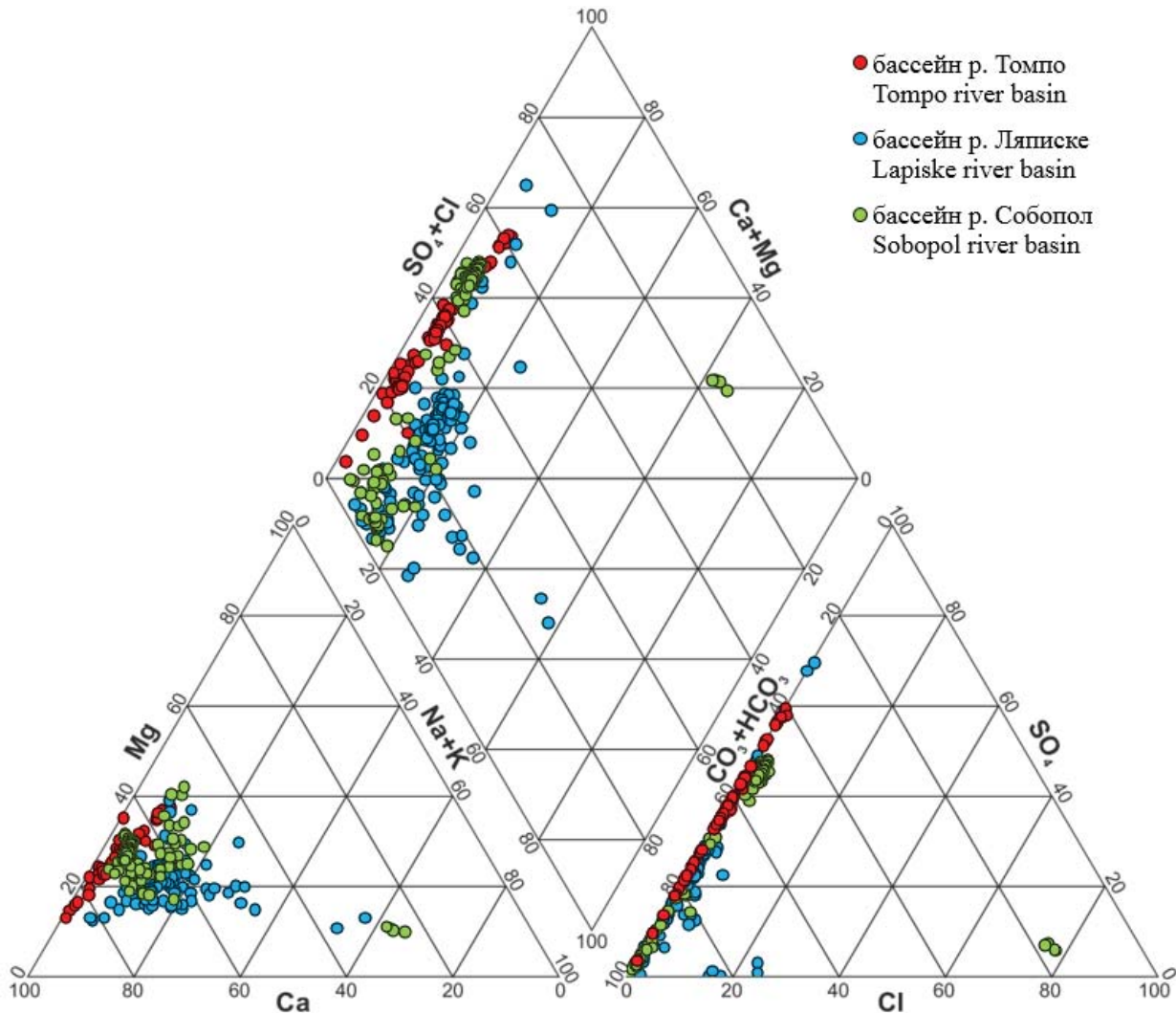


Рис. 2. Диаграмма Пайпера природных вод Предверхоанского прогиба
Fig. 2. Piper's plot of natural waters of the Predverkhoyansk foredeep

Среди катионов доминируют Ca^{2+} и Mg^{2+} , а среди анионов – HCO_3^- и SO_4^{2-} . Однако в бассейнах рек Ляписке и Соболах-Маян (Собопол) встречены единичные водопункты с преобладанием хлорида (до 78,3 %-экв) и иона натрия (до 65,7 %-экв). Данные пробы имеют нетипичный состав и сильно выбиваются из общей выборки, в связи с чем они были исключены из статистических расчетов.

В целом состав вод Предверхоанского прогиба по ряду показателей, таких как общая минерализация, содержание ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , близок к кларку речных вод [25]. Однако содержания таких ионов, как Na^+ и Cl^- , в исследуемых водах заметно ниже, а ионов SO_4^{2-} , напротив, существенно выше, что может являться отражением особенностей состава подстилающих горных пород (табл. 3).

Общие характеристики химического состава изученных объектов, а также их специфику хорошо иллюстрирует диаграмма размаха «ящик с усами»

(box and whiskers chart), представленная на рис. 3. При сопоставлении химического состава рассматриваемых рек выявлено, что, несмотря на схожие условия формирования, они различаются по своему химическому составу. Эти различия на первый взгляд могут показаться не столь значительными, однако для маломинерализованных вод это может являться отражением специфики процессов формирования их химического состава.

Характеристика природных вод бассейна р. Томпо

Маршрут по р. Томпо был выполнен в летний период 2014 г. и прошел от р. Ольчан (Уольчан) – левого притока р. Томпо, до приустьевой части. Это самая крупная и полноводная из всех изученных, в рамках данной работы, рек с площадью водосбора более 40 тыс. км². Химический состав воды разных элементов речной системы р. Томпо представлен в табл. 4.

Таблица 3. Данные по химическому составу природных вод Предверхожанского прогиба, мг/л

Table 3. Chemical composition of natural waters of the Predverkhoyansk foredeep, mg/l

Компоненты Components	Природные воды/Natural waters				Кларк подземных вод зоны вечной мерзлоты Average for ground waters permafrost zone [36]	Кларк речной воды Average for river waters [37]
	бассейн р. Томпо Tompo river basin	бассейн р. Ляписке Lapiske river basin	бассейн р. Собопол Sobopol river basin	Среднее содержание для Предверхожанского прогиба Predverkhoyansk foredeep		
pH	<u>6,7–8,4</u> 7,4	<u>5,5–7,5</u> 7,0	<u>6,0–7,9</u> 7,2	<u>5,5–8,4</u> 7,2	6,5	–
Eh	<u>129–268</u> 228	<u>37–250</u> 161	<u>28–292</u> 184	<u>28–292</u> 186	–	–
Ca ²⁺	<u>6,0–54,1</u> 22,2	<u>1,0–29,7</u> 11,0	<u>2,1–33,6</u> 22,1	<u>1,0–54,1</u> 18,4	16,8	14,7
Mg ²⁺	<u>1,7–13,7</u> 5,0	<u>0,4–6,9</u> 2,1	<u>0,7–9,6</u> 5,5	<u>0,4–13,7</u> 4,2	5,65	3,65
Na ⁺	<u>0,2–1,4</u> 1,0	<u>0,4–12,0</u> 2,5	<u>0,2–3,5</u> 1,9	<u>0,2–12,0</u> 1,9	6,64	8,6
K ⁺	<u>0,18–0,53</u> 0,39	<u><0,1–2,50</u> 0,51	<u><0,1–2,45</u> 0,43	<u><0,1–2,50</u> 0,45	0,83	
HCO ₃ ⁻	<u>19,5–172,0</u> 65,8	<u>7,3–105,0</u> 39,4	<u>8,5–79,3</u> 55,3	<u>7,3–172,0</u> 52,3	82,8	53,0
SO ₄ ²⁻	<u>4,2–41,7</u> 23,5	<u><0,05–52,3</u> 8,5	<u>0,1–54,8</u> 30,8	<u><0,05–54,8</u> 21,7	4,05	11,5
Cl ⁻	<u><0,1–0,52</u> 0,11	<u><0,1–3,17</u> 0,33	<u><0,1–2,90</u> 1,24	<u><0,1–3,17</u> 0,68	4,67	8,25
Si	<u>1,2–2,7</u> 1,9	<u>0,8–4,6</u> 2,2	<u>0,3–4,3</u> 1,9	<u>0,3–4,6</u> 2,0	–	–
NO ₃	<u><0,1–1,72</u> 0,44	<u><0,1–2,70</u> 0,28	<u><0,1–1,40</u> 0,33	<u><0,1–2,70</u> 0,34	0,31	–
М _{общ} /TDS	<u>37,6–254,6</u> 118,0	<u>9,7–147,0</u> 64,3	<u>14,2–177,9</u> 117,2	<u>9,7–254,6</u> 99,6	–	99,7
Количество проб Quantity of samples	81	124	163	368	–	–

Примечание: здесь и далее, в числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.
 Note: here and elsewhere, in the numerator – the minimum and maximum values, in the denominator – the average.

Таблица 4. Химический состав поверхностных вод бассейна р. Томпо, мг/л

Table 4. Chemical composition of natural waters of the Tompo river basin, mg/l

Компоненты Components	Основное русло Main riverbed	Заводы и протоки Backwaters and branches	Притоки Tributaries
pH	<u>6,7–7,5</u> 7,3	<u>6,8–7,9</u> 7,5	<u>7,0–8,4</u> 7,6
Eh	<u>188–267</u> 234	<u>129–268</u> 224	<u>188–260</u> 223
Ca ²⁺	<u>8,7–21,2</u> 16,8	<u>9,7–54,1</u> 25,9	<u>6,0–49,6</u> 28,5
Mg ²⁺	<u>3,5–5,0</u> 4,5	<u>3,1–8,4</u> 5,2	<u>1,7–13,7</u> 5,8
Na ⁺	<u>1,0–1,4</u> 1,1	<u>0,4–1,4</u> 1,0	<u>0,2–1,3</u> 0,6
K ⁺	<u>0,36–0,51</u> 0,40	<u>0,25–0,53</u> 0,41	<u>0,18–0,40</u> 0,29
HCO ₃ ⁻	<u>19,5–61,0</u> 46,1	<u>21,9–172,0</u> 78,9	<u>24,4–168,4</u> 88,8
SO ₄ ²⁻	<u>21,2–26,9</u> 24,2	<u>12,3–35,1</u> 23,1	<u>4,2–41,7</u> 22,6
Cl ⁻	<u><0,1–0,52</u> 0,11	<u><0,1–0,44</u> 0,12	<u><0,1–0,14</u> 0,08
Si	<u>1,5–2,3</u> 1,8	<u>1,4–2,5</u> 1,9	<u>1,2–2,7</u> 1,8
NO ₃	<u>0,20–1,72</u> 0,39	<u><0,1–1,18</u> 0,39	<u><0,1–1,47</u> 0,75
М _{общ} /TDS	<u>55,8–113,6</u> 93,3	<u>60,4–254,6</u> 134,7	<u>37,6–242,2</u> 146,7
Количество проб Quantity of samples	36	33	12

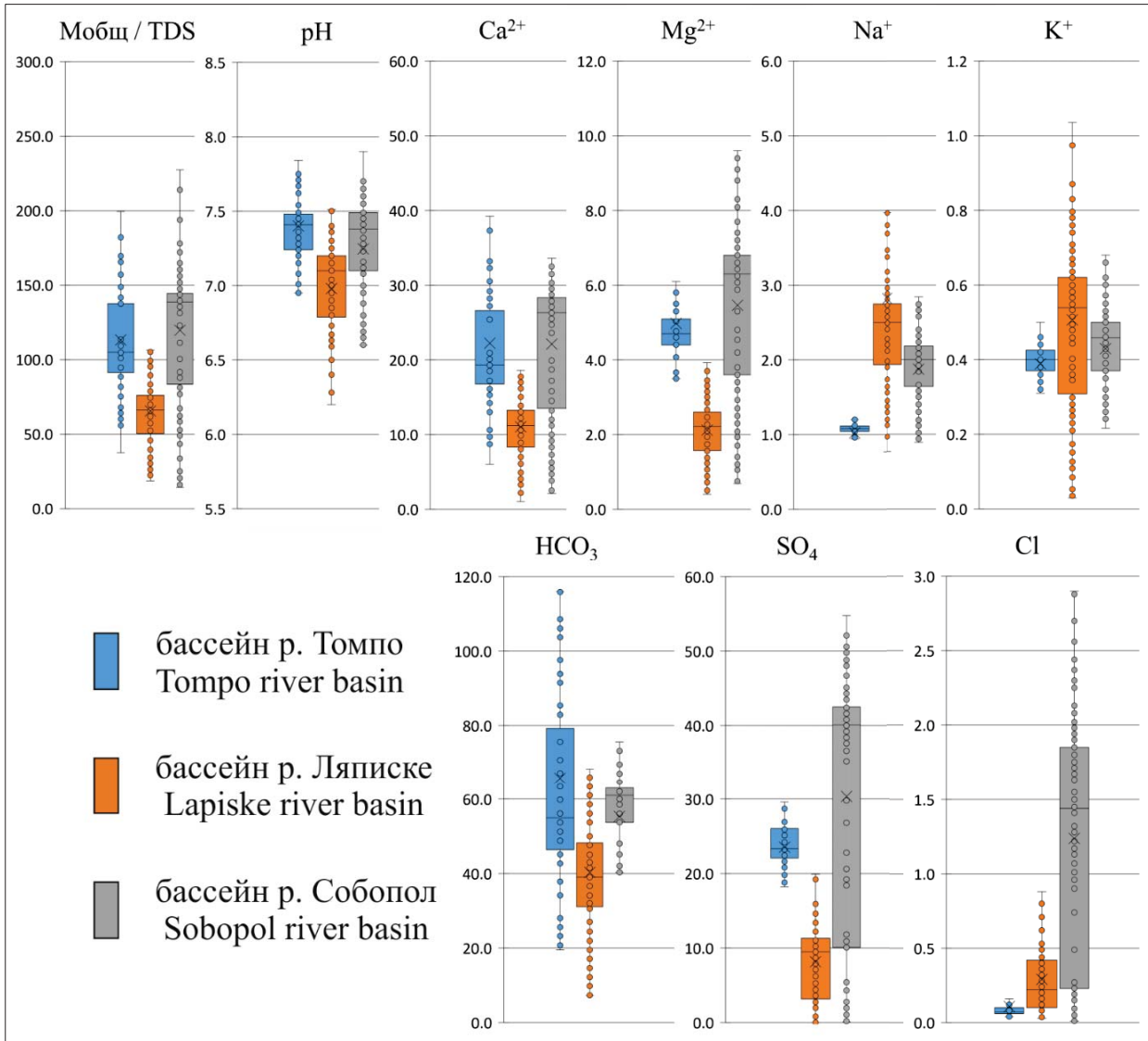


Рис. 3. Диаграмма «ящик с усами», отражающая гидрогеохимические особенности изученных объектов. Крестик посередине – это среднее арифметическое; линия чуть выше или ниже крестика – медиана; нижняя и верхняя грань прямоугольника (типа ящика) соответствует первому и третьему квартилю; горизонтальные черточки на конце «усов» – максимальное и минимальное значение

Fig. 3. Box and whiskers chart reflecting the hydrogeochemical specificity of the studied objects. The cross in the middle is the arithmetic mean; the line just above or below the cross is the median; the lower and upper sides of the rectangle (box type) correspond to the first and third quartile; horizontal dashes at the end of the "whiskers" are the maximum and minimum values

Наиболее однородный состав характерен для вод основного русла реки. Это ультрапресные сульфатно-гидрокарбонатные или же гидрокарбонатно-сульфатные, магниево-кальциевые воды с минерализацией 55,8–113,6 мг/л (табл. 4). Столь низкая минерализация связана, вероятнее всего, с фактором разубоживания, так как маршрут по реке Томпо проходил в условиях «высокой воды» при частых, интенсивных осадках. Значения показателей pH и Eh характерны для поверхностных вод и изменяются незначительно.

В ионном составе преобладание сульфат-иона наблюдается в «горной» части, где на поверхности

и близко к ней залегают гипсоносодержащие горные породы. Ниже по течению соотношение двух главных анионов изменяется и составляет 65 %-экв. для HCO₃⁻ и 35 %-экв. для SO₄²⁻ (рис. 4), при этом отмечается закономерный рост минерализации.

Формулы ионно-солевого состава для верхней (1) и нижней (2) части маршрута представлен ниже:

$$M \ 0,05 \ \frac{SO_4 55 \ HCO_3 45}{Ca \ 58 \ Mg \ 35}, \quad (1)$$

$$M \ 0,08 \ \frac{HCO_3 63 \ SO_4 37}{Ca \ 68 \ Mg \ 28}. \quad (2)$$

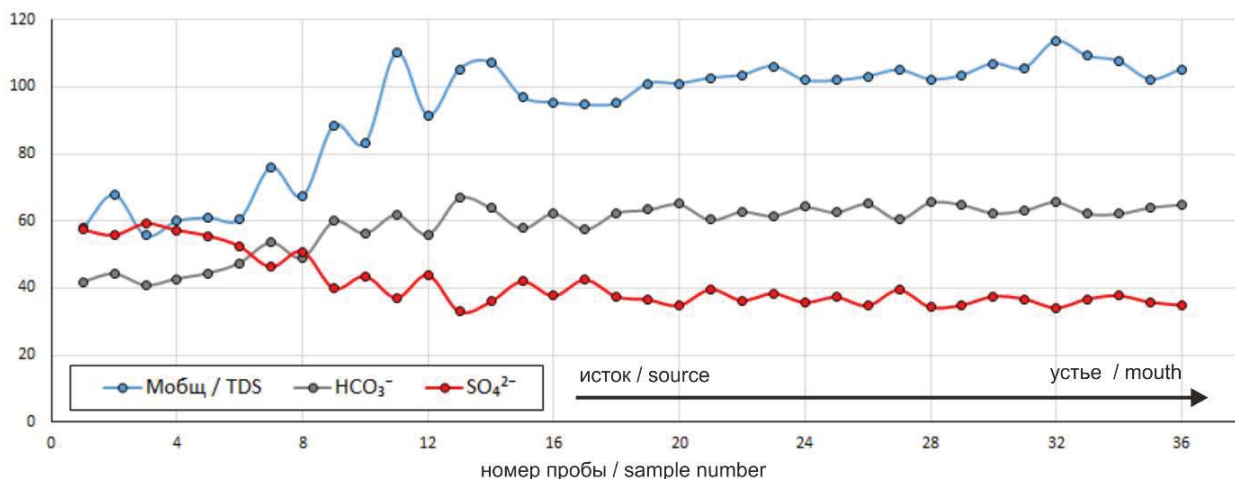


Рис. 4. Общая минерализация (мг/л) и содержание ионов HCO_3^- и SO_4^{2-} (%-экв) в пробах воды из основного русла р. Томпо

Fig. 4. Total mineralization (mg/l) and content of HCO_3^- and SO_4^{2-} ions (%-Eq) in water samples from the main channel of the Tompo river

Химический состав притоков наиболее разнообразен. В сравнении с основным руслом они характеризуются более щелочными условиями среды и повышением минерализации вод. Разброс значений минерализации – от 37,6 до 242,2 мг/л. Содержания макроэлементов в этих пробах также варьируется в весьма широких пределах. Как правило, это сульфатно-гидрокарбонатные воды с минерализацией в среднем 147 мг/л. Воды заводов имеют преимущественно гидрокарбонатный кальциево-магниевый, магниевый-кальциевый состав.

Характеристика природных вод бассейна р. Ляписке

Маршрут по р. Ляписке был выполнен в летний период 2015 г. и прошел от ручья Дотитчан – правого притока Ляписке, до устья. Большая часть маршрута приходится на горный участок, на протяжении которого река пересекает с востока на запад несколько горных хребтов: Тагындынский, Малыкай-Хая, Муосучанский, Быгинский, Кутургинский и Усть-Вилойский. Горный характер реки нашел отражение и в химическом составе вод (табл. 5).

Природные воды бассейна р. Ляписке характеризуются более низкой минерализацией, пониженными значениями pH и более высокими концентрациями ионов Na^+ и K^+ , в сравнении с вышерассмотренным объектом, что может свидетельствовать о преобладании атмосферного фактора при формировании их состава и более активном водообмене. В составе вод притоков в отдельных точках отмечается повышенные концентрации сульфат-иона и пониженная величина pH, что может косвенно указывать на возможность растворения сульфидных минералов, наблюдаемых в горной части.

Таблица 5. Химический состав поверхностных вод бассейна р. Ляписке, мг/л

Table 5. Chemical composition of natural waters of the Lapiske river basin, mg/l

Компоненты Components	Основное русло Main riverbed	Заводы и протоки Backwaters and branches	Притоки Tributaries	Пойменные озера Floodplain lakes
pH	6,5–7,5 7,1	5,5–7,5 7,1	5,5–7,4 6,9	5,6–7,1 6,4
Eh	69–240 162	37–239 155	51–250 156	160–242 194
Ca^{2+}	9,2–15,5 12,0	4,1–22,2 13,3	2,2–29,7 9,5	1,0–15,7 6,8
Mg^{2+}	1,7–3,3 2,3	1,6–4,2 2,5	0,5–3,9 1,6	0,4–6,9 2,3
Na^+	2,2–3,4 2,6	1,0–11,0 3,2	0,4–12,0 2,2	0,4–2,7 1,4
K^+	0,48–0,83 0,60	0,29–2,50 0,69	<0,1–0,80 0,36	0,15–1,59 0,48
HCO_3^-	34,1–51,2 41,0	22,0–105,0 51,9	7,3–97,6 33,2	7,3–80,5 33,3
SO_4^{2-}	6,4–14,6 10,9	<0,05–15,9 9,1	<0,05–52,3 7,2	<0,05–2,8 1,2
Cl ⁻	0,10–1,00 0,35	<0,1–3,17 1,42	<0,1–2,20 0,26	<0,1–0,45 0,15
Si	1,7–2,5 2,1	2,0–3,3 2,5	0,8–4,6 2,3	0,9–3,3 1,8
NO_3^-	<0,1–2,70 0,29	<0,1–1,40 0,27	<0,1–1,60 0,29	<0,1–1,02 0,21
Мобщ./TDS	55,9–84,3 69,8	29,4–147,0 80,4	10,9–136,4 54,4	9,7–106,3 45,6
Количество проб Quantity of samples	40	29	54	7

Характеристика природных вод бассейна р. Соболах-Маян

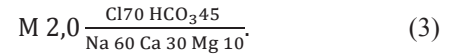
Маршрут по р. Соболах-Маян (Собопол) был выполнен в летний период 2015 г. и прошел от оз. Куоланда-Кюель, расположенного в пойменной части крупного правого притока (р. Куоланда), до приустьевой части.

По сравнению с другими изученными объектами, природные воды бассейна р. Соболах-Маян наиболее минерализованы и богаты ионами Mg^{2+} , SO_4^{2-} и Cl^- (табл. 6).

Воды с самой высокой минерализацией 200–250 мг/л отмечаются в горном озере Куоланда-Кюель, расположенном в тектонической зоне вертикальных разломов Собопольского сдвига. Они отличаются хлоридным (>75 %-экв) кальциево-натриевым составом. Абсолютные содержания хлорид-иона достигают 85–110 мг/л, в то время как его фоновые концентрации в бассейне р. Соболах-Маян (Собопол) не превышают 3 мг/л.

Наиболее близкие по составу подземные воды (3) изучены в Усть-Вилюском районе Якутии, где при опробовании субкриогенного мелового терригенного водоносного комплекса были встречены также гидрокарбонатно-хлоридные, кальциево-натриевые воды, но со значительно более высокой

минерализацией – от 1,7 до 4,0 г/л. (Усть-Вилюйская скважина № 6, 265 м) [38].



Формирование подобной аномалии хлоридных натриевых вод в ландшафтной обстановке Западно-Верхоянья интерпретируется однозначно как результат глубинной восходящей разгрузки поземных вод. Благоприятные условия для восходящей разгрузки глубинных флюидов создает вертикальная трещиноватость пород, сопровождающая сдвиговые разломы, широко распространенные в исследуемом регионе [11–13].

Заключение

Химический состав природных вод Предверхо-янского прогиба, изученный в пределах бассейнов рек Томпо, Ляписке и Соболах-Маян (Собопол), разнообразен. Общая минерализация изученных вод, как правило, не превышает 200 мг/л, а преобладающее значение имеют традиционные для поверхностных вод ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- и SO_4^{2-} . В долинах рек Ляписке и Соболах-Маян встречены и опробованы нетипичные для данной территории воды хлоридного натриевого и гидрокарбонатного натриевого состава.

Таблица 6. Химический состав поверхностных вод бассейна р. Собопол, мг/л

Table 6. Chemical composition of natural waters of the Sobopol river basin, mg/l

Компоненты Components	Основное русло Main riverbed	Заводы и протоки Backwaters and branches	Притоки Tributaries	Пойменные озера Floodplain lakes	оз. Куоланда-Кюель Lake Kuolanda-Kuel
pH	$\frac{7,0 - 7,9}{7,4}$	$\frac{6,4 - 7,3}{7,0}$	$\frac{6,2 - 7,3}{6,9}$	$\frac{6,0 - 7,0}{6,4}$	$\frac{7,0 - 7,1}{7,1}$
Eh	$\frac{87 - 289}{189}$	$\frac{150 - 209}{178}$	$\frac{28 - 292}{172}$	$\frac{150 - 215}{189}$	$\frac{113 - 149}{134}$
Ca ²⁺	$\frac{25,2 - 29,6}{27,5}$	$\frac{5,7 - 25,2}{15,8}$	$\frac{3,8 - 19,9}{9,7}$	$\frac{2,1 - 18,7}{7,8}$	$\frac{16,7 - 19,6}{18,1}$
Mg ²⁺	$\frac{5,9 - 9,6}{6,8}$	$\frac{1,4 - 6,7}{3,8}$	$\frac{0,8 - 5,3}{2,5}$	$\frac{0,7 - 4,8}{1,8}$	$\frac{4,1 - 4,8}{4,4}$
Na ⁺	$\frac{1,2 - 2,8}{2,0}$	$\frac{0,5 - 2,1}{1,5}$	$\frac{0,4 - 3,5}{1,7}$	$\frac{0,2 - 1,5}{0,6}$	$\frac{43,8 - 61,4}{51,2}$
K ⁺	$\frac{0,17 - 0,63}{0,47}$	$\frac{< 0,1 - 0,62}{0,41}$	$\frac{< 0,1 - 2,45}{0,29}$	$\frac{0,10 - 0,87}{0,50}$	$\frac{0,47 - 0,61}{0,50}$
HCO ₃ ⁻	$\frac{53,7 - 79,3}{63,1}$	$\frac{17,1 - 64,7}{48,8}$	$\frac{12,2 - 70,8}{38,6}$	$\frac{8,5 - 45,1}{25,2}$	$\frac{34,2 - 39,0}{36,9}$
SO ₄ ²⁻	$\frac{35,2 - 54,8}{42,3}$	$\frac{2,8 - 40,5}{18,2}$	$\frac{0,1 - 26,8}{3,9}$	$\frac{0,4 - 29,8}{5,9}$	$\frac{10,1 - 11,8}{10,7}$
Cl ⁻	$\frac{0,90 - 2,90}{1,70}$	$\frac{< 0,1 - 1,48}{0,74}$	$\frac{< 0,1 - 1,44}{0,15}$	$\frac{< 0,1 - 0,96}{0,24}$	$\frac{84,5 - 109,9}{98,5}$
Si	$\frac{1,4 - 3,2}{1,9}$	$\frac{1,5 - 3,0}{2,1}$	$\frac{0,4 - 4,3}{2,1}$	$\frac{0,3 - 1,7}{0,7}$	$\frac{0,3 - 0,4}{0,3}$
NO ₃	$\frac{< 0,1 - 1,40}{0,38}$	$\frac{< 0,1 - 0,55}{0,31}$	$\frac{< 0,1 - 0,56}{0,17}$	$\frac{< 0,1 - 0,98}{0,37}$	$\frac{< 0,1 - 0,25}{0,17}$
M _{общ} /TDS	$\frac{122,9 - 177,9}{144,0}$	$\frac{27,6 - 136,5}{89,3}$	$\frac{17,6 - 100,4}{56,9}$	$\frac{14,2 - 101,3}{42,0}$	$\frac{193,8 - 245,9}{220,3}$
Количество проб Quantity of samples	112	5	40	6	4

Наблюдаемые гидрохимические аномалии указывают на современные процессы восходящей разгрузки глубинных флюидов из толщ в основании осадочного чехла по проницаемым зонам, связанным со складчато-надвиговыми дислокациями сочленения Сибирской платформы с передовыми структурами Верхоянья.

При сопоставлении химического состава рек в горной и платформенной части выявлено, что роль сульфат-иона доминирует в верховьях, где отмечены выходы гипсосодержащих горных пород.

Представленные результаты отражают фоновые содержание основных химических элементов при-

родных вод, распространенных в пределах Предверхоаянского прогиба. Показаны закономерности распределения основных ионов, выявлены общие черты и различия между исследуемыми участками. Полученный фактический материал может послужить фундаментом для более детальных исследований, направленных на изучение процессов формирования состава природных вод в условиях распространения многолетней мерзлоты, а также применяться для обоснования комплекса гидрогеологических критериев прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов восточного обрамления Сибирской платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатский Н.С. О структурных связях платформы со складчатыми геосинклинальными областями. Статья 3. // Известия Академии наук СССР, сер. геол. – 1947. – № 5.
2. Пушаровский Ю.М. Краевые прогибы, их тектоническое строение и развитие // Труды Геологического Института АН СССР. – 1959. – Вып. 28. – С. 154
3. Проблемы тектоники и нефтегазоносности краевых прогибов / М.И. Варенцов, С.М. Дорошко, И.К. Королюк, А.Д. Сидров. – М.: Недра, 1973. – 231 с.
4. Геологическое строение и нефтегазоносность краевых прогибов / под ред. Н.А. Еременко. – М.: Наука, 1980. – 233 с.
5. Натапов Л.М., Леонов Б.Н., Битерман И.М. Перспективы северо-восточной части Сибирской платформы и северной ветви Предверхоаянского прогиба на нефть и газ // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов. – М.: Недра, 1968. – С. 299–305.
6. Об условиях формирования залежей газа и нефти в Вилюйской синеклизе и Приверхоаянском прогибе / Г.Д. Лавров, В.В. Забалуев, Л.А. Грубов и др. // Труды ВНИГРИ. – 1976. – № 385. – С. 6–20.
7. Oil and gas potential of the Siberian Platform / A.E. Kontorovich, K.K. Makarov, N.V. Melnikov V.E. Savitsky, V.S. Staroseltsev, V.S. Surkov, K.R. Chepikov // World Petroleum Congress Proceedings 10. – Bucharest, 09–14 September 1979. – P. 183–189.
8. Сафронов А.Ф. Геология и перспективы нефтегазоносности северной части Предверхоаянского прогиба. – Новосибирск: Наука, 1974. – 112 с.
9. Данилов В.Н. Геологическое строение краевых прогибов. Общие черты и отличия // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2010. – № 2 (5). – С. 269–279.
10. Силантьев Ю.Б., Ившина Е.В. Особенности формирования углеводородных систем краевых прогибов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2010. – № 2 (5). – С. 288–292.
11. Мигурский Ф.А., Якупова Е.М. Обоснование региональных исследований нефтегазоносности Предверхоаянского перикратонного прогиба // Геология нефти и газа. – 2017. – № 3. – С. 18–25.
12. Якупова Е.М. Нефтегазоперспективность складчато-надвигового пояса северной части Предверхоаянского прогиба // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 3 (22). DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art4.
13. Ситников В.С., Погодаев А.В., Кушмар И.А. Новые данные о тектонике и перспективах нефтегазоносности территории сочленения Северо-Алданской, Вилюйской и Предверхоаянской НГО // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск, 18–20 апреля 2018. – Якутск: СВФУ, 2018. – С. 330–333.
14. Региональные геофизические исследования Предверхоаянского краевого прогиба и Вилюйской синеклизы - основа оптимизации дальнейших работ на нефть и газ в регионе / В.А. Трофимов, Ф.Ф. Закиров, В.И. Косовцев, Л.Ю. Колесниченко // ГеоЕвразия 2018. – М.: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. – С. 64–67.
15. Петров Д.М., Сивцев А.И. Перспективы нефтегазоносности верхней части разреза Предверхоаянского прогиба // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. – Иркутск, 14–15 октября 2019. – Иркутск: Институт земной коры Сибирского отделения РАН, 2019. – С. 127–129.
16. Геолого-геофизические особенности строения Предверхоаянского краевого прогиба и прилегающих территорий по данным нового сейсморазведочного речного профиля МОГТ-2D и переинтерпретации архивных материалов / М.Н. Шапорина, Е.В. Мосягин, О.Г. Садур, В.Н. Беспечный // Геология нефти и газа. – 2021. – № 5. – С. 55–73.
17. Щепелин М.А., Делиу Е.А., Хуснуллина Г.Р. Геологическое строение и перспективы открытия месторождения в южной части Предверхоаянской нефтегазоносной области (республика Саха (Якутия)) // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. – М., 17–19 октября 2022. – М.: ИПНГ РАН, 2022. – С. 380–383.
18. Exploring the prospects of deep natural gas resources from the geochemical parameters of the Shahejie Formation source rocks in the Banqiao depression / Q. Liua, L. Zhangb, Z. Chenc, G. Hand , X. Fua , J. Tengd, Y. Wange // Natural Gas Industry B. – 2024. – Vol. 11. – № 4. – P. 443–453.
19. Kharaka Y., Hitchon B, Hanor J. Groundwater and Petroleum. – Ontario: Groundwater project, 2024. – 372 p.
20. Potential petroleum prospects in the middle Benue trough, central Nigeria: inferences from integrated applications of geological, geophysical and geochemical studies / U.A. Lar, T. Bata, H. Dibal, S.N. Yusuf, I. Lekmanga, M. Goyit, E. Yennea // Scientific African. – 2022. – Vol. 19. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01436.

21. Galuszka A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland // *Environmental Geology*. – 2007. – Vol. 52. – P. 861–870.
22. Determination of the geochemical background and anomalies in areas with variable lithologies / L. Hao, X. Zhao, Y. Zhao, J. Lu, L. Sun // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – Vol. 139. – P. 177–182.
23. Reimann C., Garrett R.G. Geochemical background – concept and reality // *Science of The Total Environment*. – 2005. – Vol. 350. – № 1–3. – P. 12–27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047
24. Geochemical and statistical approach to evaluate background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn (case study: Eastern Poland) / W. Zglobicki, L. Lata, A. Plak, M. Reszka // *Environmental Earth Sciences*. – 2011. – Vol. 62. – P. 347–355.
25. Helsel D.R., Hirsch R.M. Statistical methods in water resources techniques of water resources investigations // *U.S. Geological Survey*. – 2002. – B. 4. – Ch. A3. DOI: 10.3133/tm4A3.
26. Guseva N. The origin of the natural water chemical composition in the permafrost region of the eastern slope of the Polar Urals // *Water*. – 2016. – Vol. 8. – № 12. – P. 594–614.
27. Krickov I., Lim A., Pokrovsky O. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – Vol. 269. – P. 429–450. DOI: 10.1016/j.gca.2019.11.005.
28. Wang X., Chen R., Song Y. Changes in river discharge in typical mountain permafrost catchments, northwestern China // *Quaternary International*. – 2019. – Vol. 519. – P. 32–41.
29. Li Z.J., Li Z.X., Song Y. Environment significance and hydrochemical characteristics of supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River // *Science of The Total Environment*. – 2018. – Vol. 644. – P. 1141–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.029.
30. Siamese network based prospecting prediction method: a case study from the Au deposit in the Chongli mineral concentrate area in Zhangjiakou, Hebei Province, China / K. Ding, L. Xue, X. Ran, J. Wang, Q. Yan // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 148. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105024.
31. Ahmmad B., Vesselinov V. Machine learning and shallow groundwater chemistry to identify geothermal prospects in the Great Basin, USA // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 197. – P. 1034–1048. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.024.
32. Machine learning based prospect targeting: a case of gold occurrence in central parts of Tanzania, East Africa / S. Gawusu, B.N. Mvile, M. Abu, J.D. Kalimenze // *Ore and Energy Resource Geology*. – 2024. – Vol. 17. DOI: 10.1016/j.oreoa.2024.100065.
33. Ahmadi M. Artificial intelligence for a more sustainable oil and gas industry and the energy transition // *Case Studies and Code Examples*. – 2024. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100041.
34. Ресурсы поверхностных вод СССР: гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индибирский район. Вып. 5. Нижняя Лена (бассейн р. Лены ниже устья р. Вилюй) / под ред. А.С. Шароглазова. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 120 с.
35. Ресурсы поверхностных вод СССР: гидрологическая изученность. Т. 17. Ленско-Индибирский район. Вып. 3. Бассейн р. Алдан / под ред. И.В. Осиповой. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 210 с.
36. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
37. Meybeck M. Concentration des eaux fluviales en elements majeurs et apports en solution aux oceans // *Revue de Geologie Dynamique et de Geographie Physique*. – 1979. – Vol. 21. – № 3. – P. 215–246.
38. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Лист Q-52 – Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2009. – 347 с.

Информация об авторах

Денис Сергеевич Малков, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; MalkovDS@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9614-7506>

Алексей Иванович Сурнин, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии нефтегазоносных провинций Акционерного общества «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 67; SurninAI@rusgeology.ru

Наталья Владимировна Гусева, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора по научно-образовательной деятельности Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; GusevaNV@tpu.ru

Поступила в редакцию: 03.04.2024

Поступила после рецензирования: 16.10.2024

Принята к публикации: 28.10.2024

REFERENCES

1. Shatsky N.S. On the structural connections of the platform with folded geosynclinal areas. *Bulletin of the USSR Academician of Sciences, geological series*, 1947, no. 5. (In Russ.)
2. Pushcharovskiy Yu.M. Foredeep deflections, their tectonic structure and development. *Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences*, 1959, vol. 28, 154 p. (In Russ.)
3. *Problems of tectonics and oil and gas potential of foredeep deflections*. Ed. by M.I. Varentsov. Moscow, Nedra Publ., 1973. 231 p. (In Russ.)

4. *Geological structure and oil and gas potential of foredeep deflections* Ed. by N.A. Eremenko. Moscow, Nauka Publ., 1980. 233 p. (In Russ.)
5. Natapov L.M., Leonov B.N., Bikerman I.M. Prospects of the northeastern part of the Siberian platform and the northern branch of the Predverkhoyansk foredeep for oil and gas. *Geological structure and oil and gas potential of the eastern part of the Siberian Platform and adjacent areas*. Moscow, Nedra Publ., 1968. pp. 299–305. (In Russ.)
6. Lavrov G.D., Zabaluev V.V., Grubov L.A. On the conditions of formation of gas and oil deposits in the Vilyui syncline and the Priverkhoyansk foredeep. *Proceedings of VNIGRI*, 1976, no. 385, pp. 6–20. (In Russ.)
7. Kontorovich A.E., Makarov K.K., Melnikov N.V., Savitsky V.E., Staroseltsev V.S., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Chepikov K.R. Oil and gas potential of the Siberian Platform. *World Petroleum Congress Proceedings*. Bucharest, Romania, September 9–14, 1979. pp. 183–189.
8. Safronov A.F. *Geology and prospects of oil and gas potential of the northern part of the Predverkhoyansk foredeep*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 112 p. (In Russ.)
9. Danilov V.N. Geological structure of foredeep. Common features and differences. *Scientific and technical collection of News of Gas Science*, 2010, no. 2 (5), pp. 269–279. (In Russ.)
10. Silantyev Yu.B., Ivshina E.V. Features of formation of hydrocarbon systems of marginal deflections. *Scientific and technical collection of News of Gas Science*, 2010, no. 2 (5), pp. 288–292. (In Russ.)
11. Migursky F.A., Yakupova E.M. Feasibility of regional studies of oil and gas potential of the Predverkhoyansk pericratonic foredeep. *Geology of oil and gas*, 2017, no. 3, pp. 18–25. (In Russ.)
12. Yakupova E.M. Oil and gas prospects of the fold-over belt of the northern part of the predverkhoyansky foredeep. *Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, no. 3 (22). (In Russ.) DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art4.
13. Sitnikov V.S., Pogodaev A.V., Kushmar I.A. New data on tectonics and prospects of oil and gas potential of the territory of the junction of the Severo-Aldanskaya, Vilyuyskaya and Predverkhoyanskaya petroleum region. *Geology and mineral resources North-East of Russia*. Yakutsk, April 08–20, 2018. Yakutsk, NEFU Publ., 2018. pp. 330–333. (In Russ.)
14. Trofimov V.A., Zakirov F.F., Kosovtsev V.I., Kolesnichenko L.Y. Regional geophysical studies of the Predverkhoyansk foredeep and the Vilyui syncline are the basis for optimizing further work on oil and gas in the region. *Geo Eurasia 2018*. Moscow, February 5–8, 2018. Moscow, PolyPRESS Publ., 2018. pp. 64–67. (In Russ.)
15. Petrov D.M., Sivtsev A.I. Prospects of oil and gas potential of the upper part of the section of the Predverkhoyansk foredeep. *Rifting, orogenesis, and accompanied processes*. Irkutsk, October 14–15, 2019. Irkutsk, IEC SB RAS Publ., 2019. pp. 127–129. (In Russ.)
16. Shaporina M.N., Mosyagin E.V., Sadur O.G., Bespechnyi V.N. Geological and geophysical structural features of Predverkhoyansky Foreland Basin and neighbouring areas: data from new along-river 2D CDP seismic survey line and reinterpretation of legacy data. *Russian oil & gas geology*, 2021, no. 5, pp. 55–73. (In Russ.)
17. Shchepelin M.A., Deliu E.A., Khusnullina G.R. Geological structure and prospects of field discovery in the southern part of the Predverkhoyansk petroleum region (Republic of Sakha (Yakutia)). *The fundamental basis of innovative technologies in the oil and gas industry*. Moscow, October 17–19, 2022. Moscow, OGRI RAS Publ., 2022. pp. 380–383 (In Russ.)
18. Liua Q., Zhangb L., Chenc Z., Hand G., Fua X., Tengd J., Wange Y. Exploring the prospects of deep natural gas resources from the geochemical parameters of the Shahejie Formation source rocks in the Banqiao depression. *Natural Gas Industry B*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 443–453.
19. Kharaka Y., Hitchon B., Hanor J. *Groundwater and Petroleum*. Ontario, Groundwater project, 2024. 372 p.
20. Lar U.A., Bata T., Dibal H., Yusuf S.N., Lekmanga I., Goyit M., Yennea E. Potential petroleum prospects in the middle Benue trough, central Nigeria: inferences from integrated applications of geological, geophysical and geochemical studies. *Scientific African*, 2022, vol. 19. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01436.
21. Galuszka A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland. *Environmental Geology*, 2007, vol. 52, pp. 861–870.
22. Hao L., Zhao X., Zhao Y., Lu J., Sun L. Determination of the geochemical background and anomalies in areas with variable lithologies. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 139, pp. 177–182.
23. Reimann C., Garrett R.G. Geochemical background – concept and reality. *Science of The Total Environment*, 2005, vol. 350, no. 1–3, pp. 12–27. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047
24. Zglobicki W., Lata L., Plak A., Reszka M. Geochemical and statistical approach to evaluate background concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn (case study: Eastern Poland). *Environmental Earth Sciences*, 2011, vol. 62, pp. 347–355.
25. Helsel D.R., Hirsch R.M. Statistical methods in water resources techniques of water resources investigations. U.S. *Geological Survey*, 2002, B. 4, Ch. A3. DOI: 10.3133/tm4A3.
26. Guseva N. The origin of the natural water chemical composition in the permafrost region of the eastern slope of the Polar Urals. *Water*, 2016, vol. 8, no. 12, pp. 594–614.
27. Krickov I., Lim A., Pokrovsky O. Major and trace elements in suspended matter of western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 269, pp. 429–450. DOI: 10.1016/j.gca.2019.11.005.
28. Wang X., Chen R., Song Y. Changes in river discharge in typical mountain permafrost catchments, northwestern China. *Quaternary International*, 2019, vol. 519, pp. 32–41.
29. Li Z.J., Li Z.X., Song Y. Environment significance and hydrochemical characteristics of supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 644, pp. 1141–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.029.
30. Ding K., Xue L., Ran X., Wang J., Yan Q. Siamese network based prospecting prediction method: a case study from the Au deposit in the Chongli mineral concentrate area in Zhangjiakou, Hebei Province, China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 148. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105024.

31. Ahmmed B., Vesselinov V. Machine learning and shallow groundwater chemistry to identify geothermal prospects in the Great Basin, USA. *Renewable Energy*, 2022, vol. 197, pp. 1034–1048. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.024.
32. Gawusu S., Mvile B.N., Abu M., Kalimenze J.D. Machine learning based prospect targeting: A case of gold occurrence in central parts of Tanzania, East Africa. *Ore and Energy Resource Geology*, 2024, vol. 17. DOI: 10.1016/j.oreoa.2024.100065.
33. Ahmadi M. Artificial intelligence for a more sustainable oil and gas industry and the energy transition. *Case Studies and Code Examples*, 2024. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100041.
34. *Surface water resources of the USSR: hydrological studies. Vol. 17. Lensk-Indigirsky district. Iss. 5. Lower Lena (Lena river basin below the mouth of the Vilyui River)*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965. 120 p. (In Russ.)
35. *Surface water resources of the USSR: hydrological studies. Vol. 17. Lensk-Indigirsky district. Iss. 3. Aldan River basin*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1966. 210 p. (In Russ.)
36. Shvartsev S. L *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscow, Nedra Publ., 366 p. (In Russ.)
37. Meybeck M. Concentration of the fluvial waters in major elements and contributions in solution to the oceans. *Revue de Geologie Dynamique et de Geographie Physique*, 1979, vol. 21, no. 3, pp. 215–246. (In French)
38. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Sheet Q-52 – Verkhoyansk chains: explanatory note*. St. Petersburg, VSEGEI Publ. house, 2009. 347 p. (In Russ.)

Information about the author

Denis S. Malkov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. MalkovDS@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9614-7506>

Alexey I. Surnin, Cand. Sc., Head of Department, Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials, 67, Krasny avenue, Novosibirsk, 630091, Russian Federation. SurninAI@rusgeology.ru

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. GusevaNV@tpu.ru

Received: 03.04.2024

Revised: 16.10.2024

Accepted: 28.10.2024