Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.7 + 553.04 (470.1)

DOI: 10.19110/geov.2021.8.3

Промышленные воды Хорейверской впадины Печорской плиты

Т. П. Митюшева, О. Е. Амосова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
mityusheva@geo.komisc.ru, kramosova@geo.komisc.ru

Исследовано распространение по площади Хорейверской впадины и в гидрогеологическом разрезе йодобромных и йодоборных вод, обогащенных металлами: стронцием и литием. Показаны возможности территории для практического использования промышленных хлоридных натриевых и кальциево-натриевых подземных рассолов: построены карты распространения брома, йода, бора и промышленных стронциево-литиевых йодобромных и йодоборных рассолов в пределах трех карбонатных водоносных комплексов палеозоя (O_2-S-D_1 ; D_3-C_1 ; $C-P_1$); обозначены отдельные площади поликомпонентных кондиционных рассолов.

Ключевые слова: промышленные рассолы, бром, йод, бор, литий, стронций, водоносный комплекс, Хорейверская впадина.

Industrial brines of the Khoreyver depression of the Pechora plate

T. P. Mityusheva, O. Ye. Amosova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktывkar

We studied areal distribution of the Khoreyver depression and strontium and lithium-rich iodine-bromine and iodine-boron industrial brines in the hydrogeological section. We presented the potential of the territory for practical use of industrial sodium chloride and calcium-sodium underground brines in the maps of distribution of bromine, iodine, boron and strontium-lithium iodine-bromine and iodine-boric industrial brines within three Paleozoic calcareous aquifers (O_2-S-D_1 ; D_3-C_1 ; $C-P_1$). Separate areas with lithium-strontium iodine - bromine and iodine-boric standard quality brines are designated.

Keywords: industrial brines, bromine, iodine, boron, lithium, strontium, aquifers, Khoreyver depression.

Введение

Подземные воды глубоких горизонтов артезианских бассейнов платформ могут служить одним из источников получения ценных компонентов: бора, брома, йода, лития, стронция и других, которые как в чистом виде, так и в виде соединений с другими элементами широко используются в различных отраслях промышленности. Природные рассолы относятся к промышленным [2] при содержании полезных компонентов в количествах, превышающих условные предельные значения концентраций (мг/л): $Br \geq 250$, $I \geq 18$, $B \geq 250$, при одновременном извлечении: $Br \geq 200$, $I \geq 10$ и $B \geq 75$, а также $Li \geq 10$, $Sr \geq 300$, $Rb \geq 3$, $Cs \geq 0.5$.

Целенаправленные исследования распространения ценных компонентов в подземных водах Тимано-Печорского седиментационного бассейна начиная с 60-х годов XX в. А. Ф. Горбачева, Ю. И. Зытнера, Р. И. Иовчева, О. И. Леухиной, Н. Г. Линок, Г. П. Лысенина, Л. В. Мигунова, В. М. Милькова, Ю. Ф. Мячина, В. М. Попова, С. Б. Руфова, Н. В. Смирнова и др. показали, что пластовые воды зон затрудненного и весьма за-

трудненного водообмена могут служить кондиционным минеральным сырьем для добычи полезных компонентов: Br, I, B, Sr, Li, Rb, солей Ca, Na, K, Mg. Изучение макро- и микрокомпонентного состава подземных вод нефтяных и газовых месторождений севера европейской части России [13, 14, 17] позволило выделить рассолы нижнего палеозоя Хорейверской впадины — составной части провинции подземных промышленных вод Русской платформы — как один из наиболее перспективных комплексных источников гидроминерального сырья в регионе.

Месторождения промышленных вод в Тимано-Печорском бассейне не были разведаны, несмотря на то, что для отдельных площадей Печоро-Колвинского авлакогена (Мишвань-Командиршорская) и Хорейверской впадины (Баганская, Сандивейская и Мусюшорская) [14, 17], а также для южного купола Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения [3] была выполнена прогнозная оценка эксплуатационных запасов промышленных йодобромных вод. Совместными работами института «ПечорНИПИнефть», МГАТХТ

Для цитирования: Митюшева Т. П., Амосова О. Е. Промышленные воды Хорейверской впадины Печорской плиты // Вестник геонаук. 2021. 8(320). С. 27–45. DOI: 10.19110/geov.2021.8.3.

For citation: Mityusheva T. P., Amosova O. Ye. Industrial brines of the Khoreyver depression of the Pechora plate. Vestnik of Geosciences, 2021, 8(320). С. 27–45. DOI: 10.19110/geov.2021.8.3.

им. М. В. Ломоносова, КНПО «Йодобром» и ВСЕГИНГЕО была разработана комплексная технология извлечения йода, брома, окиси магния, карбонатов лития и стронция из попутных вод нефтяных месторождений Ижма-Печорской синеклизы (Западно-Тэбукское, Пашнинское, Джьерское, Мичаюское, Северо-Савиноборское, Нижнеомринское) и Печоро-Колвинского авлакогена (Усинское, Баганское и Возейское) [12].

Следует отметить, что пластовые воды Тимано-Печорского бассейна промышленных вод в целом сопоставимы по концентрациям ценных элементов в пределах провинции подземных промышленных вод Русской платформы. Для сравнения, в рассолах Краснокамского месторождения йодобромных вод при минерализации 252–265 г/л концентрации йода изменяются в пределах 9–15 мг/л, брома — 577–880 мг/л, бора — 47–78 мг/л [22]. В промышленных водах Астраханского и Леонидовского участка месторождений йодных вод в Прикаспийской впадине содержание йода варьирует в пределах 9–35 мг/л при минерализации воды 29–32 г/л [18]. Значительно меньшие концентрации — в водах нашего региона в сравнении с рассолами солеродных бассейнов Сибирской платформы: бром до 13.6 г/л, стронций — до 8 г/л, литий — до 900 мг/л при минерализации концентрированных рассолов до 600–700 г/л [1, 5, 7, 16].

Целью проведенных исследований было выявление закономерностей распространения промышленных рассолов, оценка перспектив отдельных водоносных комплексов палеозоя Хорейверской впадины на поликомпонентные литие- и стронциеносные йодобромные и йодобромные промышленные воды с помощью статистического анализа гидрохимических параметров.

Характеристика района исследований

Хорейверская впадина размерами 280 × 120 км является структурой первого порядка Хорейверско-Печороморской синеклизы (ранее, по [20] — Печорской синеклизы) Печорской плиты (рис. 1) в соответствии со схемой тектонического районирования, выполненной по кровле карбонатов карбона — нижней перми [15]. С запада Хорейверская впадина ограничена Колвинским мегавалом Печоро-Колвинского авлакогена, с востока — валом Сорокина Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны и поднятием Чернышёва Предуральского краевого прогиба. На юге Хорейверская впадина сужается и сочленяется с Большесынинской впадиной Предуральского прогиба.

Наличие погребенного Большеземельского палеосвода фундамента в значительной степени предопределило особенности строения и мощности (4–7 км) осадочного выполнения Хорейверской впадины. В истории развития отмечены длительные перерывы в осадконакоплении, сопровождаемые глубокими размывами отложений до полного их отсутствия: на части ее территории отсутствуют нижнеордовикские, верхнесилурийские, нижнее- и верхнедевонские, нижнекаменноугольные, нижнепермские осадки, размыты терригенные среднедевонско-нижнефранские толщи [20, 21].

По мезозойскому и верхнепалеозойскому комплексам отложений впадина является отрицательной структурой, открывается в сторону акватории Печорского моря и объединяется с Русской моноклиной

в Хорейверско-Печороморскую синеклизу [15]. Это вызвано сменой в предсреднеюрскую эпоху регионального наклона слоев с восточного на северный [20, 21]. В этом же направлении изменился и наклон многих структур Хорейверской впадины. В современном структурном плане она представляет собой моноклираль, наклоненную к северо-западу, осложненную тектоническими нарушениями субмеридионального простирания, разбивающими ее на отдельные блоки. Структуры второго порядка в пределах впадины выделены на рисунке 1.

Гидрогеологический разрез Хорейверской впадины изучен до глубины 4.9 км. При исследовании подземных вод, сопутствующих месторождениям углеводородов, в ходе структурно-поисковых и разведочных работ за период 1971–2016 гг. были опробованы воды осадочных отложений широкого стратиграфического диапазона — от ордовикских до четвертичных. Пластовые рассолы приурочены к следующим водоносным комплексам (ВК): кембрийских и нижнеордовикских отложений (Є–О₁); среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских карбонатных отложений (О₂–S–D₁); верхнедевонско-нижнекаменноугольных (семилукско-турнейских) карбонатных отложений (D₃–C₁); каменноугольно-нижнепермских (верхневизейско-нижнепермских) карбонатных отложений (C–P₁); терригенных пермских (P_{1–2}) и триасовых (Т) отложений (рис. 2). В разрезе также выделяются тиманско-саргаевский (D₃tm–sr) региональный флюидоупор, представленный глинисто-карбонатными породами мощностью до 300 м, отделяющий карбонатные О₂–S–D₁ и D₃–C₁ ВК, и флюидоупорные терригенные толщи — нижнекаменноугольные (C₁v+C₁s) и нижнепермские (P₁ar–P₁k). На севере впадины верхняя часть триасового терригенного комплекса и вышезалегающие толщи юрского — четвертичного возраста расположены в зоне многолетнемерзлых пород.

Материалы и методы

Для характеристики промышленных поликомпонентных литие- и стронциеносных йодобромных и йодобромных вод, анализа их распространения использованы данные фондовых и опубликованных работ об исследованиях пластовых вод, выполненных различными организациями: ПГО «Ухтанефтегазгеология», ВНИИГАЗ, ТПО ВНИГРИ (ТП НИЦ), ВСЕГИНГЕО, ПечорНИПИнефть и др. Вся имеющаяся информация по параметрам подземных вод ВК была собрана в единый электронный банк гидрогеохимических данных для последующего проведения их статистической обработки, проведена тщательная разбивка фактического аналитического материала. Всего по подземным водам Хорейверской впадины Тимано-Печорского бассейна имеются результаты химических анализов по 379 точкам опробования, охватывающим гидрогеологический разрез от ордовикского до юрского возраста. Для статистического анализа в данной работе были выбраны 357 точек наблюдения пластовых рассолов с минерализацией более 35 г/л (табл. 1), в которых определены основные анионы и катионы (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃[–], SO₄^{2–}, Cl[–]), полезные компоненты (Br, I, B, Li, Sr) и имеется информация по глубине опробования ВК. Распределение точек опробо-

Рис. 1. Структурно-тектоническая карта Хорейверской впадины и перспективные площади для комплексного извлечения ценных компонентов из рассолов. 1–3 — границы тектонических структур: 1 — надпорядковые, 2 — первого порядка, 3 — второго порядка; 4–6 — перспективные площади (скважины) поликомпонентных промышленных вод, их наименование (индекс геологического возраста водоносного комплекса): 4 — йодобромные ($I \geq 10$ мг/л, $Br \geq 200$ мг/л) и йодоборные ($I \geq 10$ мг/л, $B \geq 75$ мг/л), 5 — стронциеносные ($Sr \geq 300$ мг/л), 6 — литиеносные ($Li \geq 10$ мг/л). Элементы тектонического районирования по [15]: Ж — Печоро-Колвинский авлакоген; 3 — Хорейверско-Печороморская синеклиза (3_2 — Хорейверская впадина; 3_2^1 — Кошкинская котловина; 3_2^2 — Чернореченская ступень; 3_2^3 — Паханчская терраса; 3_2^4 — Садаятинская ступень; 3_2^5 — Центрально-Хорейверский уступ; 3_2^6 — Коллависовская ступень; 3_2^7 — Сандивейское поднятие; 3_2^8 — Сынянырдская депрессия, 3_2^9 — Макариха-Салюкинская антиклинальная зона; 3_2^{10} — Цильегорская депрессия; К — Варандей-Адзвинская структурно-тектоническая зона; Л — Припайхойско-Приюжноновоземельский мегапрогиб; М — Предуральский краевой прогиб

Fig. 1. Structure-tectonic map of the Khoreyver depression and potential areas for complex extraction of valuable components from brines. 1–3 — boundaries of tectonic structures: 1 — supra-order, 2 — first order, 3 — second order; 4–6 — potential areas (boreholes) of multicomponent industrial brines, their name (index of the geological age aquifer): 4 — iodine-bromine ($I \geq 10$ mg/l, $Br \geq 200$ mg/l) and iodine-boron ($I \geq 10$ mg/l, $B \geq 75$ mg/l), 5 — strontium ($Sr \geq 300$ mg/l), 6 — lithium ($Li \geq 10$ mg/l). Elements of tectonic zonation according to [15]: — Pechora-Kolva aulacogen; 3 — Khoreyver-Pechoromorsk tectonic depression (3_2 — Khoreyver depression; 3_2^1 — Koshkin depression; 3_2^2 — Chernorechensk step; 3_2^3 — Pahanchesk terrace; 3_2^4 — Sadayaginsk step; 3_2^5 — Central-Khoreyver scarp; 3_2^6 — Kolvavisov step; 3_2^7 — Sandivey uplift; 3_2^8 — Synyanyrd depression, 3_2^9 — Makariha-Salukin anticlinal zone; 3_2^{10} — Tsilegorsk depression; K — Varandey-Adzva structure-tectonic zone; L — Pre-Paykhoy-Pre-Southern-Nonovozemelsk megadepression; M — Pre-Ural foredeep

вания (скважин) по водоносным комплексам (O_2-S-D_1 , D_3-C_1 , $C-P_1$) исследуемой площади приведено на рисунках 1, 3–5. Следует отметить, что определения ценных компонентов (B, I, Li, Sr, Rb) при опробовании пластовых вод были выполнены не во всех скважинах (табл. 1).

Для расчета статистических характеристик использовалась программа Statistica 6.0. Описательные статистики, приведенные в таблице 1, отражают большие вариации значений изученных параметров вод, что связано с их приуроченностью к различным по литолого-фациальным условиям водовмещающим породам (рис. 2), залегающим в широком интервале глубин 1.1–4.9 км. Не исключаются также ошибки в определении содержаний отдельных компонентов в процессе аналитических исследований. Большинство приведенных в таблице 1 параметров не подчиняются закону нормального распределения. Проверка осуществлялась статистическими критериями Колмогорова — Смирнова с поправкой Лиллиефорса, Шапиро — Уилка, оценкой величин асимметрии и эксцесса (табл. 2), а также с помощью визуальной оценки нормальных вероятностных графиков и частотных гисто-

грамм с кривыми нормального распределения. Поэтому для наиболее полного и правильного описания данных помимо средних арифметических значений и стандартных отклонений параметров в таблице 1 приведены значения медианы* и нижнего и верхнего квартилей** (25-го и 75-го процентилей). Медиана значительно меньше, чем среднее арифметическое и стандартное отклонение, подвержена влиянию крайних вариантов параметра (очень маленьких или очень больших значений). Нижний и верхний квартили, а также размах вариации используются в качестве мер рассеяния значений параметров.

* Медиана (Me) — значение, которое делит распределение пополам, т. е. слева и справа от медианного значения находится по 50 % значений.

** Нижний квартиль (Q_1) — значение, которое делит распределение в пропорции 1/4 от нижней точки к верхней, т. е. слева от Q_1 находится 25 % значений, справа от Q_1 — 75 % значений. Верхний квартиль (Q_3) — значение, которое делит распределение в пропорции 3/4 от нижней точки к верхней, т. е. слева от Q_3 находится 75 % значений, справа от Q_3 — 25 % значений. $Me = Q_2$.

Система	Отдел	Ярус	Литологический разрез	Гидрогеологический этап	Гидрогеологический комплекс (номер)	Флюидоупорная толща
Четвертичная	Q				Четвертичных отложений Q	
Меловая	K			Мелозойский MZ-Kz	Меловых отложений K (9)	
Юрская	J	Верхний - J ₃				J ₃ v-K, nk На севере бассейна
		Средний - J ₂				
		Нижний - J ₁				
Триасовая	T	Верхний - T ₃			Нижне-среднетриасовых отложений J ₁ -J ₂ (8)	
		Средний - T ₂			Триасовых отложений T (7)	
		Нижний - T ₁				
Пермская	P	Верхний (Татарский) - P ₃	Татарский - P ₃ t		Нижне-верхнепермских отложений P ₃ (6)	
		Средний (Биярмийский) - P ₂	Уржумский - P ₂ ur Казанский - P ₂ kz			
		Нижний (Приуральский) - P ₁	Уфимский - P ₁ u			
			Кунгурский - P ₁ k			
			Артинский - P ₁ ar			P ₁ ar ₂ - P ₁ k региональная
			Сакмарский - P ₁ s			
			Ассельский - P ₁ d		Каменноугольно-нижнепермских отложений C-P ₁ (5)	
Каменноугольная	C	Верхний - C ₃	Московский - C ₃ m			
		Средний - C ₂	Башкирский - C ₂ b			
		Нижний - C ₁	Серпуховский - C ₁ s			C ₁ v-C ₁ s зональная
			Визейский - C ₁ v			
Девонская	D	Верхний - D ₃	Турнейский - C ₁ t		Верхнедевонско-нижнекаменноугольных отложений D ₃ sm-C ₁ t (4)	
			Фаменский - D ₃ fm			
		Средний - D ₂	Франский - D ₃ f			D ₃ fm+sr региональная
			Живетский - D ₂ zv		Среднедевонско-нижнефранских отложений D ₂ -D ₃ f (3)	
		Нижний - D ₁	Эйфельский - D ₂ ef			
Силурийская	S	Верхний - S ₂	Пржидольский - S ₂ p			
		Нижний - S ₁	Лудловский - S ₂ ld			
			Венлокский - S ₁ v			
Ордовикская	O	Верхний - O ₃	Лландоверийский - S ₁ l		Среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских отложений O ₂ -S-D ₁ (2)	
			Ашгильский - O ₃ as			
		Средний - O ₂	Карадокский - O ₃ k			
		Нижний - O ₁	Лландвирский - O ₂ ld			
Кембрий-Є	Є		Аренигский - O ₁ ar			
			Тремадокский - O ₁ t			
Протерозой-PR	PR				Кембрийских и нижнеордовикских пород Є-O ₁ (1)

Рис. 2. Гидрогеологическая стратификация Тимано-Печорского осадочного бассейна: 1 — известняки, доломиты; 2 — ангидриты, гипсы; 3 — песчаники; 4 — суглинки, пески, галечники; 5 — глины, алевролиты, аргиллиты; 6 — метаморфические сланцы

Fig. 2. Hydrogeological stratification of the Timan-Pechora sedimentary basin: 1 — limestone, dolomite; 2 — anhydrite, gypsum; 3 — sandstone; 4 — loam, sand, pebble-bed; 5 — clay, siltstone, claystone; 6 — metamorphic schist

Для выявления силы и направления взаимосвязи между гидрохимическими характеристиками водоносных комплексов был применен корреляционный анализ с расчётом коэффициентов корреляции Спирмена (табл. 3). Выбор непараметрического коэффициента корреляции рангов Спирмена обусловлен тем, что большинство параметров имеют распределения, статистически значимо (для заданного критического уровня значимости 0.05) отличающиеся от нормального; исключения составляют параметры: давление, температура, содержание брома.

Методика построения карт. Гидрохимические карты распространения ценных компонентов промышленных вод Хорейверской впадины построены с использованием программного пакета ArcGis, геоинформационной системы Golden Software Surfer 11, Corel Draw 13. Контуры Хорейверской впадины и тектонических структур 2-го порядка приведены в соответствии с тектоническим районированием Тимано-Печорского осадочного бассейна [15]. Карты выполнены для трех водоносных комплексов: O₂-S-D₁, D₃-C₁, C-P₁. Рассолы терригенных нижнесреднеордовикских

Таблица 1. Результаты статистической обработки показателей рассолов Хорейверской впадины
Table 1. Results of statistical processing of the parameters brines the Khoreyver depression

Параметры Parameters	Описательные статистики / Descriptive statistics								
	Число наблюдений Number of observations	Среднее Average	Медиана Median	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Нижняя квартиль Lower quartile	Верхняя квартиль Upper quartile	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации, % Variation factor, %
Глубина, м / Depth, m	357	2818.2	2886.0	1147.0	4865.0	2241.0	3375.0	721.3	25.6
Минерализация, г/л Mineralization, g/l	357	136.2	141.0	36.2	211.1	107.5	175.6	44.2	32.5
Температура, °C Temperature, °C	72	63.6	66.5	32.0	99.0	53.9	76.5	16.7	26.3
pH	345	6.5	6.9	3.1	10.9	6.0	7.2	1.0	14.9
Давление, кг/см ² Pressure, kg/cm ²	35	305.3	290.0	160.0	476.0	235.0	369.0	84.0	27.5
Na, г/л	357	39.3	41.4	9.0	65.5	31.4	51.4	13.9	35.3
K, мг/л	279	1148.3	1070.0	32.0	3620.0	600.0	1674.0	736.5	64.1
Mg, мг/л	356	1816.2	1714.6	206.7	4080.0	1398.0	2189.0	681.3	37.5
Ca, г/л	357	9.4	9.5	2.7	41.3	7.1	11.7	3.3	34.7
Cl, г/л	357	83.2	85.5	22.4	129.4	65.9	107.2	26.9	32.3
SO ₄ , мг/л	357	825.7	747.0	3.5	3980.0	261.7	1155.9	678.2	82.1
HCO ₃ , мг/л	353	213.1	182.0	3.1	1024.8	103.7	268.4	157.0	73.6
Br, мг/л	357	357.9	363.4	67.0	1027.2	251.0	475.8	154.7	43.2
I, мг/л	355	15.6	15.0	0.4	52.9	9.0	20.0	8.7	56.2
B, мг/л	202	61.7	57.0	1.4	169.7	40.0	81.0	34.8	56.4
Li, мг/л	100	16.1	15.0	0.1	45.3	10.0	19.0	9.4	58.0
Sr, мг/л	100	407.4	402.0	49.0	1080.0	279.2	501.0	179.1	44.0
Rb, мг/л	19	1.0	0.9	0.1	3.0	0.2	1.5	0.9	86.1
H ₂ S, мг/л	230	6.6	0.9	0.0	154.0	0.4	2.7	19.5	294.2
rNa/rCl	357	0.7	0.7	0.3	0.8	0.7	0.8	0.1	8.0
Cl/Br	357	249.7	244.5	118.0	559.0	217.7	279.6	51.7	20.7
(rCl-rNa)/rMg	356	4.7	4.6	1.3	14.4	3.6	5.6	1.8	37.8

Таблица 2. Результаты проверки распределений параметров рассолов Хорейверской впадины на нормальность статистическими критериями**Table 2.** Results of checking the difference between distributions of parameters of brines of the Khoreyver depression from the normal distribution according to statistical criteria

Параметры / Parameters	Число наблюдений Number of observations	d	p	W	p	A	E
Глубина, м / Depth, m	357	0.090	< 0.01	0.980	9E-05	-0.16	-0.51
Минерализация, г/л / Mineralization, g/l	357	0.088	< 0.01	0.949	< 1E-05	-0.50	-0.70
Температура, °C / Temperature, °C	72	0.081	> 0.20	0.970	8.8E-02	-0.18	-0.56
pH	345	0.159	< 0.01	0.905	< 1E-05	-0.74	1.65
Давление, кг/см ² / Pressure, kg/cm ²	35	0.106	> 0.20	0.964	0.306	0.17	-0.81
Na, г/л	357	0.087	< 0.01	0.943	< 1E-05	-0.54	-0.69
K, мг/л	279	0.085	< 0.01	0.963	< 1E-05	0.57	-0.02
Mg, мг/л	356	0.074	< 0.01	0.983	3E-04	0.46	0.43
Ca, г/л	357	0.071	< 0.01	0.848	< 1E-05	2.45	23.80
Cl, г/л	357	0.089	< 0.01	0.951	< 1E-05	-0.48	-0.71
SO ₄ , мг/л	357	0.113	< 0.01	0.902	< 1E-05	1.33	3.04
HCO ₃ , мг/л	353	0.126	< 0.01	0.857	< 1E-05	1.83	4.88
Br, мг/л	357	0.042	< 0.15	0.979	4E-05	0.17	0.02
I, мг/л	355	0.081	< 0.01	0.922	< 1E-05	1.25	3.29
B, мг/л	202	0.088	< 0.01	0.970	2.9E-04	0.61	0.24
Li, мг/л	100	0.149	< 0.01	0.941	2.3E-04	0.9	1.00
Sr, мг/л	100	0.077	< 0.20	0.950	8.3E-04	0.86	2.36
Rb, мг/л	19	0.186	< 0.1	0.902	5.2E-02	0.91	0.15
H ₂ S, мг/л	230	0.367	< 0.01	0.349	< 1E-04	5.03	27.77
rNa/rCl	357	0.180	< 0.01	0.845	< 1E-05	-1.71	5.28
Cl/Br	357	0.055	< 0.01	0.957	< 1E-05	0.92	3.97
(rCl-rNa)/rMg	356	0.093	< 0.01	0.924	< 1E-05	1.29	3.97

Примечание: d — значение критерия Колмогорова — Смирнова (с поправкой Лиллиефорса уровня значимости), W — значение критерия Шапиро — Уилка, p — достигнутый уровень значимости, A — коэффициент асимметрии, E — коэффициент эксцесса.

Note: d — value of the Kolmogorov — Smirnov test with Lilliefors significance correction, W — value of the Shapiro — Wilk test, p — achieved level of significance, A — skewness, E — kurtosis.

толщ исследованы в одной скважине 12 на Средне-макарихинской площади. Для ВК терригенных пермских (P₁₋₂) и триасовых (Т) отложений карты не приводятся в связи с малым количеством точек опробования и отсутствием промышленных концентраций ценных компонентов в рассолах. На трех гидрохимических картах в точках опробования вод (скважинах) соответствующими условными знаками показаны содержания полезных компонентов брома (рис. 3), йода (рис. 4), бора (рис. 5), а также содержания йодобромных (рис. 4) и йодоборных (рис. 5) рассолов при условии их соответствия кондиционным требованиям. Литий и стронций для этих точек наблюдений отмечены специальными знаками при концентрации выше условных предельных значений. Построение изолиний выполнено в геоинформационной системе Golden Software Surfer 11, алгоритм интерполяции — минимизация кривизны (Minimum Curvature); визуализация и последующая авторская интерпретация с учётом структурно-тектонических особенностей впадины проведены в Corel Draw 13.

Результаты и их обсуждение

Подземные пластовые рассолы Хорейверской впадины, исследованные в данной работе, залегают на глубинах до 4.9 км в зонах затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Рассолы с максимальной ми-

нерализацией 211 г/л на этих глубинах имеют температуру 32—99 °C (геотермический градиент 1.6—3.0 °C/100м) и давление 160—476 кг/см² (коэффициент аномальности 0.99—1.16). Состав водорастворенных газов азотно-метановый, в водах отдельных площадей содержится сероводород (до 154 мг/л). Распределение минерализации по водоносным комплексам в зависимости от глубины опробования рассолов приведено на рисунке 6, отражает наличие гидрохимической инверсии в ВК O₂—S—D₁ и D₃—C₁. Химический состав пластовых рассолов — хлоридный (95—100 %-экв) натриевый или кальциево-натриевый (Na — 34—84 и Ca — 11—60 %-экв). Они принадлежат к хлоридному типу по классификации Курнакова — Валяшко (или хлоркальциевому типу по классификации Сулина) при условии (rCl-rNa)/rMg > 1 и rNa/rCl < 1 (табл. 1).

Промышленные бромные рассолы. Содержание брома в пластовых водах Хорейверской впадины изменяется в широких пределах (табл. 1, рис. 3, 7, а, б). Максимальные значения Br = 1027 мг/л зафиксированы в рассолах нижнесреднеордовикских толщ Среднемакарихинской площади. В 270 пробах воды (из 357 проанализированных) концентрации брома превышают 250 мг/л, следовательно, рассолы ВК карбонатных O₂—S—D₁-, D₃—C₁-, C—P₁-отложений практически на всей территории на глубине более 2.0—2.5 км и с минерализацией свыше 100 г/л (рис. 7, а, б) можно считать бромными промышленными. При применении в

Таблица 3. Матрица коэффициентов корреляции между параметрами подземных промышленных вод Хорейверской впадины (данные по 357 т. н.)

Table 3. The matrix of correlation coefficients between the parameters of industrial groundwater in the Khoreyver depression (data for 357 observation points)

Параметры Parameters	Коэффициенты корреляции Спирмена / Spearman correlation coefficients															
	Глубина Depth	Минерализация Mineralization	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	HCO ₃	Br	I	B	Li	Sr	rNa/rCl	Cl/Br
Глубина / Depth	1.00															
Минерализация Mineralization	0.72	1.00														
Na	0.70	0.98	1.00													
K	0.80	0.77	0.75	1.00												
Mg	<i>-0.11</i>	<i>0.21</i>	<i>0.18</i>	0.06	1.00											
Ca	0.67	0.91	0.87	0.71	<i>0.09</i>	1.00										
Cl	0.71	1.00	0.98	0.77	<i>0.22</i>	0.90	1.00									
SO ₄	<i>0.49</i>	<i>0.34</i>	<i>0.36</i>	<i>0.27</i>	<i>-0.14</i>	<i>0.31</i>	<i>0.32</i>	1.00								
HCO ₃	<i>0.18</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.10</i>	<i>0.08</i>	<i>0.0</i>	<i>0.03</i>	<i>0.35</i>	1.00							
Br	0.81	0.89	0.86	0.84	<i>0.13</i>	0.86	0.88	<i>0.37</i>	<i>0.09</i>	1.00						
I	<i>0.23</i>	0.52	0.53	<i>0.34</i>	<i>0.24</i>	<i>0.33</i>	0.53	<i>-0.01</i>	<i>-0.04</i>	<i>0.36</i>	1.00					
B	0.59	0.59	0.55	0.81	<i>0.07</i>	0.63	0.58	<i>0.16</i>	<i>0.06</i>	0.75	<i>0.17</i>	1.00				
Li	0.51	0.62	0.60	0.64	<i>0.16</i>	0.60	0.62	<i>0.22</i>	<i>0.25</i>	0.62	<i>0.37</i>	0.68	1.00			
Sr	<i>0.14</i>	<i>0.35</i>	<i>0.30</i>	<i>0.19</i>	0.52	<i>0.36</i>	<i>0.38</i>	<i>-0.29</i>	<i>-0.14</i>	<i>0.35</i>	<i>0.38</i>	<i>0.25</i>	<i>0.28</i>	1.00		
rNa/rCl	0.53	0.50	0.58	<i>0.33</i>	<i>-0.12</i>	<i>0.30</i>	<i>0.48</i>	0.64	<i>0.19</i>	<i>0.43</i>	<i>0.31</i>	<i>0.07</i>	<i>0.21</i>	<i>-0.28</i>	1.00	
Cl/Br	-0.71	-0.52	<i>-0.49</i>	-0.66	<i>0.01</i>	-0.53	-0.51	<i>-0.34</i>	<i>-0.12</i>	-0.83	<i>-0.13</i>	-0.62	<i>-0.42</i>	<i>-0.21</i>	<i>-0.31</i>	1.00

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции по абсолютному значению больше 0.5, курсивом показаны статистически значимые коэффициенты корреляции ($p < 0.05$).

Note: correlation coefficients are shown in bold for an absolute value greater than 0.5, statistically significant correlation coefficients are shown in italics ($p < 0.05$).

Рис. 3. Гидрохимическая карта распространения брома в промышленных водах водоносных комплексов O₂-S-D₁ (a), D₃-C₁ (b), C-P₁ (c) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентраций брома (мг/л), 2—6 — скважина, ее наименование и номер, размер знака соответствует концентрации брома в рассолах скважины: 2 — Br ≤ 200 мг/л, 3 — 200 < Br < 250 мг/л, 4 — 250 < Br < 460 мг/л, 5 — 460 < Br < 760 мг/л, 6 — Br ≥ 760 мг/л

Fig. 3. Hydrochemical maps of distribution of bromine in industrial brines in the aquifers of the Khoreyver depression O₂-S-D₁ (a), D₃-C₁ (b), C-P₁ (c) 1 — isolines of bromine concentrations (mg/l), 2—6 — well, its name and number, the size of a sign corresponds to concentration of bromine in brines: 2 — Br ≤ 200 mg/l, 3 — 200 < Br < 250 mg/l, 4 — 250 < Br < 460 mg/l, 5 — 460 < Br < 760 mg/l, 6 — Br ≥ 760 mg/l

Рис. 4. Карта распространения йода и йодобромных вод, содержащих промышленные концентрации стронция и лития, в водоносных комплексах O₂-S-D₁ (а), D₃-C₁ (б), C-P₁ (в) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентраций йода (мг/л), 2–5 — скважина, ее наименование и номер; размер знака соответствует концентрации йода в рас-
солах: 2 — I ≤ 10 мг/л, 3 — I ≥ 10 мг/л; промышленные воды: 4 — йодобромные (при I ≥ 10 и Br ≥ 200 мг/л), 5 — стронциеносные (Sr ≥ 300 мг/л), 6 — литиеносные (Li ≥ 10 мг/л)

Fig. 4. Maps of distribution of iodine and iodine-bromine industrial waters containing industrial concentration of strontium and lithium in the aquifers of the Khoreyver depression: O₂-S-D₁ (a), D₃-C₁ (b), C-P₁ (c): 1 — isolines of concentration of iodine (mg/l), 2–5 — a well, its name and number; the size of a sign corresponds to concentration of iodine in brines: 2 — I ≤ 10 mg/l, 3 — I ≥ 10 mg/l; industrial brines: 4 — iodine-bromine (at I ≥ 10 and Br ≥ 200 mg/l), 5 — strontium (Sr ≥ 300 mg/l), 6 — lithium (Li ≥ 10 mg/l)

Рис. 5. Карта распространения бора и йодоборных вод, содержащих промышленные концентрации стронция и лития, в водоносных комплексах O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c) Хорейверской впадины: 1 — изолинии концентрации бора (мг/л), 2, 3 — скважина, ее наименование и номер; размер знака соответствует концентрации бора в растворах (2 — $B \leq 75$ мг/л, 3 — $B \geq 75$ мг/л); промышленные воды: 4 — йодоборные ($I \geq 10$ и $B \geq 75$ мг/л), 5 — стронциеносные ($Sr \geq 300$ мг/л), 6 — литиеносные ($Li \geq 10$ мг/л)

Fig. 5. Maps of distribution of boron and iodine-boron industrial waters containing industrial concentration of strontium and lithium in the aquifers of the Khoreyver depression: O_2-S-D_1 (a), D_3-C_1 (b), $C-P_1$ (c): 1 — isolines of boron concentration (mg/l), 2, 3 — well, its name and number; the size of a sign corresponds to concentration of boron in brines: 2 — $B \leq 75$ mg/l, 3 — $B \geq 75$ mg/l; industrial brines: 4 — iodine-boron (at $I \geq 10$ and $B \geq 75$ mg/l), 5 — strontium ($Sr \geq 300$ mg/l), 6 — lithium ($Li \geq 10$ mg/l)

Рис. 6. Изменение величины общей минерализации в зависимости от глубины опробования подземных вод водоносных комплексов Хорейверской впадины. Номер соответствует индексу геологического возраста опробованных водоносных комплексов: 1 — кембрийских-нижнеордовикских отложений ($\epsilon-O_1$); 2 — среднеордовикских, силурийских и нижнедевонских карбонатных отложений (O_2-S-D_1); 4 — верхнедевонско-нижнекаменноугольных (семилюкско-турнейских) карбонатных отложений (D_3-C_1); 5 — каменноугольно-нижнепермских (верхневизейско-нижнепермских) карбонатных отложений ($C-P_1$); 6 — пермских терригенных отложений (P_{1-2}); 7 — триасовых терригенных отложений (T)

Fig. 6. Changes of the mineralization depending on the depth of occurrence of the underground waters aquifers of the Khoreyver depression. Number corresponds to the index of the geological age tested aquifers complexes: 1 — Cambrian — Lower Ordovician deposits ($\epsilon-O_1$); 2 — Middle-Ordovician, Silurian and Lower Devonian carbonaceous deposits (O_2-S-D_1); 4 — Upper Devonian — Lower Carboniferous carbonaceous deposits (D_3-C_1); 5 — Carboniferous — Lower Permian carbonaceous deposits ($C-P_1$); 6 — Lower — Middle Permian terrigenous deposits (P_{1-2}); 7 — Triassic terrigenous deposits (T)

Рис. 7. Содержания брома и йода в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а, с) и величины минерализации вод (b, d). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: Br = 200, 250, 460 мг/л; I = 10 и 18 мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 7. Bromine and iodine concentration in the aquifers of the Khoreyver depression depending on depth of occurrence of the underground waters (a, c) and of mineralization of waters (b, d). The lines on plots show industrial concentration: Br = 200, 250, 460 mg/l; I = 10 и 18 mg/l. Symbols — see Fig. 6

качестве минимальных промышленных концентраций более жестких условий $\text{Br} > 460$ мг/л, предложенных Г. П. Лысениным*, также видно соответствие рассолов $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ и $\text{D}_3\text{-C}_1$ ВК Хорейверской впадины типу бромных промышленных на значительной территории (рис. 3, 7, а, б). Прослеживая изменение состава Cl-Na -рассолов в стратиграфической последовательности от молодых к более древним (рис. 7), отмечаем увеличение концентраций брома с глубиной и ростом минерализации. Наличие этих зависимостей подтверждают значения коэффициентов корреляции (табл. 3). Сильная ($r_s > 0.7$) положительная связь наблюдается у брома также с натрием, калием, кальцием, хлором и бором.

Источником брома в подземных рассолах служат морские воды бассейнов седиментации и захороненные остатки организмов в осадочных породах [4, 10]. Рассчитанная величина Cl/Br -коэффициента (медиана 244.5) свидетельствует о насыщении пластовых рассолов бромом относительно нормально-морских условий ($\text{Cl/Br} = 293$). Высокие значения температуры и давления способствуют постседиментационному разложению органического вещества [4], которым обогащены породы, и концентрированию брома в пластовых водах.

Распределение брома по трем перспективным ВК Хорейверской впадины (рис. 3) свидетельствует об особенностях распределения элемента в каждом из них. В пределах $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ ВК наибольшие концентрации наблюдаются в восточной части впадины. Однако подчеркнем, что пока данных о составе пластовых вод в северо-западной, наиболее погруженной части территории не имеется. Значения брома свыше 700 мг/л установлены в Cl-Na -, Cl-Na-Ca -водах силурийских отложений, сложенных ангидритами и доломитами, залегающими на глубинах свыше 3.7 и 4.1 км в пределах структур II порядка: Коллависовской ступени (Колвинская площадь) и севера Садаггинской ступени (скв. 2ТРМ нефтяного месторождения им. Требса). Эти наиболее глубоко залегающие площади приурочены к зонам сочленения с валом Сорокина Варандей-Адзвинской структурной зоны. Свыше 600 мг/л брома выявлено в пластовых рассолах южной части Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны.

Водоносный комплекс $\text{D}_3\text{-C}_1$ -отложений характеризуется совершенно иным распределением брома по площади. Максимальные значения брома (684 мг/л) выявлены в скважине 1-Среднемакарихинская на глубине 2.9—3.1 км. Содержания Br свыше 500 мг/л установлены в пределах Сандивейского поднятия, южной части Садаггинской ступени и Центрально-Хорейверского выступа.

В рассолах C-P_1 ВК значения брома значительно меньше, чем в нижележащих комплексах. Содержание $\text{Br} > 500$ мг/л выявлено только в двух скважинах: 73-Рогозинская (инт. 2795—2840 м) и 42-Ошкотынская (инт. 2933—2939 м). В пределах Салюкинского вала Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны наблю-

даются концентрации брома менее 200 мг/л, пластовые рассолы данной площади не являются кондиционными.

Промышленные йодные рассолы. Содержания йода свыше 18 мг/л выявлены в 122 точках опробования (34 % от общего числа проб), подземные воды $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ -, $\text{D}_3\text{-C}_1$ -, C-P_1 -отложений отдельных площадей являются йодными промышленными (рис. 4, 7, с—d). Наибольшие концентрации йода приурочены к ВК карбонатных $\text{D}_3\text{-C}_1$ -отложений: содержания йода свыше 40 мг/л определены в крепких рассолах центральной части впадины на Северо-Хоседаюнской, Восточно-Колвинской, Северо-Салюкинской и Пальникской площадях. Рассолы практически всей впадины этого карбонатного комплекса, за исключением Колвинской площади и полосы, охватывающей центральную часть Большеземельского свода, являются кондиционными ($\text{I} > 18$ мг/л). ВК C-P_1 -отложений также возможно рассматривать как источник для извлечения йода, концентрации йода менее 10 мг/л наблюдаются в пределах восточной части Макариха-Салюкинской антиклинальной зоны и в зоне сочленения с грядой Чернышева. В скважине 12-Среднемакарихинская (O_{1-2}), характеризующей первый ВК, количество йода составляет 22.4 мг/л. В $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ ВК условия для накопления и сохранения йода не столь благоприятны, только в отдельных скважинах Баганской и Оленьей площадей, 7-С. Мастерьевская, 3-Сандивейская и 1-Хатахская, отмечен йод свыше 18 мг/л, что позволяет отнести эти рассолы к йодным промышленным.

Йод не показал сильных связей ни с одним изученным параметром вод (табл. 3). Отметим заметные ($r_s = 0.52\text{—}0.53$) связи с натрием, хлором и минерализацией вод. Йод характеризуется наибольшей величиной накопления среди всех изученных компонентов: коэффициент концентрации йода в подземных рассолах Хорейверской впадины по отношению к морской воде достигает 900. Исследования гидрогеохимии йода показали, что его концентрирование происходит в водах в основном в процессе перехода элемента из морских организмов и растений, захороненных в осадочных толщах морского генезиса, в водоносный горизонт в результате взаимодействий в системе «вода — порода — газ — органическое вещество» при повышении температуры (и давления) [6, 11]. Пластовые воды Хорейверской впадины, содержащие промышленные концентрации йода, имеют температуру до 99 °С и залегают на глубинах 1.3—4.9 км, где степень катагенетического преобразования органического вещества (по отражательной способности витринита в воздухе) пород древнее раннепермского возраста соответствует прото- и мезокатагенезу ($\text{MK}_1\text{—MK}_5$ при $R^a > 7.0$) [8, 21].

Йодобромные промышленные воды, содержащие полезные компоненты в концентрациях, превышающих условные предельные значения при их одновременном извлечении $\text{Br} \geq 200$ и $\text{I} \geq 10$ мг/л [2], определены в 235 точках наблюдения в ВК $\text{O}_2\text{-S-D}_1$ -, $\text{D}_3\text{-C}_1$ - и C-P_1 -отложений в пределах всей площади на глубинах свыше 2000 м (рис. 4, 8). В качестве минимальных промышленных концентраций для выделения месторождений промышленных вод Тимано-Печорского бассейна Г. П. Лысенин с соавторами (1969) предложили при их совместном извлечении использовать значения брома — 440 мг/л, йода — 10 мг/л. И в 90 точках опробования рассолы Хорейверской впадины соответствуют таким требованиям. Эти подземные йодобромные промышлен-

* Составление прогнозной карты эксплуатационных ресурсов йодобромных вод и других микроэлементов вод нефтяных месторождений (Территория Коми АССР и Ненецкого национального округа Архангельской области): Отчёт / Г. П. Лысенин, А. Н. Осинников, О. А. Солнцев, Г. Ф. Муранова. Ухта, ВНИИГАЗ Коми филиал, 1969 г. ТФИ РК, инв. № 06908

Рис. 8. Диаграммы рассеяния содержаний йода и брома в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают промышленные концентрации при совместном их извлечении: йод (10 мг/л) и бром (200 и 440 мг/л)

Fig. 8. Scatter diagrams of iodine and bromine contents in the aquifers. The lines on plots show industrial concentration at companion extraction: iodine (10 mg/l) and bromine (200 and 440 mg/l)

ные воды имеют минерализацию свыше 145 г/л, распространены на глубинах более 2600 м и большей частью являются рассолами D_3-C_1 ВК (рис. 7). С. С. Бондаренко и др. [2] рекомендовано использовать в качестве ориентировочных кондиционных требований к месторождениям подземных йодобромных вод Тимано-Печорского бассейна промышленных вод условия: $Br \geq 760$ мг/л и $I \geq 14$ мг/л. В пределах Хорейверской впадины только рассолы нижнесреднеордовикских отложений скважины 12-Среднемакарихинская, опробованные в интервале глубин 4360–4505 м, при таких условиях могут считаться месторождением промышленных йодобромных вод.

Бор в рассолах Хорейверской впадины. Содержания бора (при величине $pH < 8$ существует в виде ортоборной кислоты H_3BO_3) в подземных водах впадины невысоки — менее 170 мг/л (медиана — 57 мг/л) (табл. 1, рис. 5, 9). Концентрации бора свыше 250 мг/л, позволяющие считать их борными промышленными водами, не выявлены ни в одной скважине. Необходимо отметить, что определения бора выполнены только для 56 % исследованных пластовых вод.

В целом для Хорейверской впадины наблюдается повышение концентраций бора с увеличением глубины опробования рассолов и минерализации (рис. 9). Бор также показал сильные положительные ($r_s > 0.7$) связи с калием и бромом (табл. 3) и заметные ($0.5 < r_s < 0.7$) — с литием, кальцием, хлором, натрием. Распределение бора в хлоридных водах контролируется литолого-геохимическими особенностями водовмещающих толщ и тесно связано с соленостью вод бассейна седиментации [4], эпигенетическими изменениями. Об этом свидетельствует отрицательная связь (табл. 3) бора со значениями хлорбромного коэффициента. В морских осадках бор находится преимущественно в глинистых минералах и концентрируется в органическом веществе. В процессе метаморфизации под влиянием температуры и давления в результате разрушения металлоорганических комплексов, кристаллохимических перестроек глинистых минералов, сопровождаемых изменением (снижением) обменной емкости [4, 9], бор переходит из связанного состояния в подвижное и скапливается в пластовых водах. Поскольку бор относится к летучим элементам, часть его может теряться в длительном процессе геологического развития территории при отсутствии экрани-

Рис. 9. Содержания бора в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а) и величины минерализации вод (б). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: $B = 75$ мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 9. Boron content in the aquifers of the Khoreyver depression depending on depth of occurrence of the underground waters (a) and of mineralization of waters (b). Lines on plots show industrial concentration: $B = 75$ mg/l. Symbols — see Fig. 6

Рис. 10. Диаграммы рассеяния содержаний йода и бора в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации при совместном их извлечении: $I = 10$ мг/л, $B = 75$ мг/л

Fig. 10. Scatter diagrams of iodine and boron concentrations in the aquiferous complexes. The lines on plots show industrial concentrations at companion extraction: $I = 10$ mg/l, $B = 75$ mg/l

рующих толщ. И наблюдаемые более высокие концентрации бора в ВК O_2-S-D_1 -отложений Хорейверской впадины (рис. 5) частично можно объяснить залеганием этих пластовых вод под региональным тиманско-саргаевским флюидоупором.

Йодоборные промышленные воды должны иметь концентрации полезных компонентов при их одновременном извлечении: $I \geq 10$ и $B \geq 75$ мг/л. Такие установлены в 52 точках наблюдений в карбонатных комплексах пород ордовика — перми (рис. 5, 10). Эти рассолы с минерализацией 106—204 г/л при глубине залегания свыше 2.5 км содержат также и промышленные концентрации брома (339—619 мг/л).

Для бороносности вод благоприятны повышенные содержания йода в пластовых водах нефтегазовых структур платформенных областей [23]. Однако, по имеющимся в нашем распоряжении данным по рассолам Хорейверской впадины, такой однозначный вывод получить не представляется возможным. На рисунке 10 показаны связи между $I-B$ по трем перспективным комплексам: для ВК O_2-S-D_1 можно видеть их обратно пропорциональную зависимость, для ВК $C-P_1$ — прямую.

Наибольшее распространение йодоборных вод зафиксировано в ВК D_3-C_1 -отложений (рис. 10), область кондиционных рассолов охватывает Центрально-Хорейверский выступ и северную часть Сандивейского поднятия. В пределах ВК O_2-S-D_1 -отложений рассолы с содержанием бора свыше 75 мг/л занимают центральную часть Хорейверской впадины. Однако только в отдельных скважинах Сандивейского поднятия (300-Лыдушорская, 85-Яромусьюрская, 206-Верхневозейская, 31-Веяжская и 1-В. Ярокутавожская) и в скважине 5-Варкнавтская (рис. 5, а) рассолы могут быть отнесены к йодоборным. Водоносный комплекс $C-P_1$ -отложений также только по единичным площадям (42-Ошкотынская, 40-В. Помолесьюрская, 1-Колвависовская, 68-Мусьюрская, 32-Мадагашорская и 55-Малохатахская) может быть перспективен на наличие йодоборных промышленных вод.

Литиеносные промышленные воды. Концентрация лития в рассолах палеозойских карбонатных комплексов Хорейверской впадины достигает 45 мг/л (табл. 1, рис. 11, 12). Максимальные (свыше 40 мг/л) количества этого редкого щелочного элемента выяв-

Рис. 11. Содержания лития в водоносных комплексах Хорейверской впадины в зависимости от глубины опробования подземных вод (а) и величины минерализации вод (б). Линии на графиках показывают промышленные концентрации: $Li = 10$ мг/л. Условные обозначения — см. рис. 6

Fig. 11. Lithium concentration in the aquifers of the Khoreyver depression, depending on the depth of occurrence of the underground waters (а) and of mineralization of waters (б). The lines on plots show industrial concentration: $Li = 10$ mg/l. Symbols — see Fig. 6

Рис. 12. Зависимости содержаний лития и йода, бора, брома в водоносных комплексах. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации при совместном извлечении: $\text{Li} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{I} = 10 \text{ мг/л}$, $\text{B} = 75 \text{ мг/л}$, $\text{Br} = 200 \text{ мг/л}$

Fig. 12. Scatter diagrams of lithium and iodine, boron, bromine concentrations in the aquiferous complexes. The lines on plots show minimum industrial concentrations at companion extraction: $\text{Li} = 10 \text{ mg/l}$, $\text{I} = 10 \text{ mg/l}$, $\text{B} = 75 \text{ mg/l}$, $\text{Br} = 200 \text{ mg/l}$

лены в рассолах ВК C-P_1 и $\text{D}_3\text{-C}_1$ на Ошкотынской, Верхнеколвинской и Восточно-Хорейверской площадях Садагинской ступени и Центрально-Хорейверского уступа. Содержания $\text{Li} > 10 \text{ мг/л}$, при которых подземные воды являются литиеносным гидроминеральным сырьем, были выявлены в 77 точках наблюдений на глубинах свыше 2.1 км при минерализации вод 83–210 г/л. Концентрации других ценных элементов в этих рассолах, представляющих интерес для комплексного извлечения, составляют: бром — 165–720 мг/л, йод — 3–53 мг/л, бор — 3–170 мг/л. Кондиционные содержания Li в рассолах по площади впадины показаны на рисунках 4 и 5 соответственно. К литиеносным относятся йодобромные и в меньшей степени йодоборные рассолы (рис. 12) различных площадей всех исследованных карбонатных комплексов.

Источником лития в рассолах служат морские седиментационные воды и водовмещающие породы, содержащие глинистые минералы, слюды, глауконит, вулканические стекла и др. [9, 19]. Содержания лития

возрастают с ростом степени метаморфизации и минерализации пластовых вод (рис. 11, b), особенно хорошо эта связь прослеживается на примере рассолов $\text{D}_3\text{-C}_1$ и C-P_1 ВК. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость ($0.5 < r_s < 0.7$) лития также с концентрациями калия, натрия, кальция, хлора, брома, бора и глубиной залегания (табл. 3, рис. 11, 12). Температурные условия (более 40–60 °С), высокая минерализация вод и низкие значения хлорбромного коэффициента, указывающие на высокую степень преобразований системы «вода — порода», благоприятны для перехода и накопления лития в пластовых водах. Повышенные концентрации лития в ВК $\text{D}_3\text{-C}_1$ и C-P_1 могут быть связаны с поступлением элизионных вод из смежных терригенных тиманско-саргаевских ($\text{D}_3\text{tm-sr}$), нижнекаменноугольных ($\text{C}_1\text{v+C}_1\text{s}$) и нижнепермских ($\text{P}_1\text{ar-P}_1\text{k}$) отложений.

Стронциеносные промышленные воды. Содержание стронция, традиционно относимого к редким металлам, изменяется в значительном диапазоне —

от 49 до 1080 мг/л (табл. 1, рис. 13), значение медианы равно 402 мг/л. В 73 точках наблюдения концентрации стронция превышают 300 мг/л, и рассолы ВК карбонатных O_2-S-D_1 , D_3-C_1 , $C-P_1$ Хорейверской впадины (рис. 4, 5) и терригенных P_{1-2} -отложений Сандивейского поднятия можно считать стронциеносными промышленными. Эти рассолы большей частью являются также и литиеносным гидроминеральным сырьем (для 60 проб $Li \geq 10$ мг/л) (рис. 4, 5, 13), однако корреляционной связи между этими элементами не выявлено. Максимальные (более 1000 мг/л) значения стронция содержатся в пластовых водах ВК $C-P_1$ -отложений в центральной части впадины (скважины 1-В. Мусюшорская, 1-Сюрхаратинская). Из матрицы коэффициентов корреляции видно (табл. 3), что стронций имеет статистически значимую заметную положительную связь с магнием ($r_s = 0.52$). Корреляции Sr с другими параметрами слабые. Однако по отдельным комплексам наблюдаются прямо пропорциональные зависимости между компонентом и величиной минерализации, кальцием, бромом и отрицательная связь с сульфат-ионом, особенно четко они прослеживаются в рассолах ВК O_2-S-D_1 ВК.

Стронций является геохимическим аналогом кальция, тесно связан с морскими карбонатными и сульфатными отложениями. Поскольку Sr имеет большую, чем кальций и магний, способность к сорбционным и ионообменным процессам [9], он лучше сорбируется глинистыми образованиями в условиях седиментации и способен при эпигенезе выделяться в пластовые воды. На глубинах более 2 км в толще пород существует благоприятная обстановка для протекания вторичных процессов — доломитизации, образования ангидрита (гипса) и др., пластовые воды при этом теряют стронций. С этим, вероятно, и связано меньшее содержание Sr в наиболее глубоко залегающих водоносных комплексах (рис. 13). Метаморфизация седиментационных богатых стронцием морских вод, разнонаправленные эпигенетические процессы приводят в целом к формированию йодобромных и в меньшей степени йодобромных рассолов палеозоя с кондиционными содержаниями стронция в пределах отдельных скважин всей Хорейверской впадины.

Рис. 13. Зависимости содержания стронция в водоносных комплексах Хорейверской впадины от концентраций лития, глубины опробования подземных вод и величины минерализации. Линии на графиках показывают минимальные промышленные концентрации: $Li = 10$ мг/л, $Sr = 300$ мг/л

Fig. 13. Scatter diagrams of the strontium concentration from content of lithium, the depth of occurrence of underground waters and mineralization in the aquiferous complexes of the Khoreyver depression. Lines on plots show minimum industrial concentrations: $Li = 10$ mg/l, $Sr = 300$ mg/l

Выводы

Проведенные исследования подтвердили высокую перспективность Хорейверской впадины Хорейверско-Печороморской синеклизы на наличие поликомпонентных (Br, I, B, Sr, Li) промышленных вод. Выполненный анализ распределения полезных компонентов в рассолах осадочного чехла впадины позволил выявить перспективные площади и отдельные скважины, рассолы которых удовлетворяют требованиям к промышленным Li–Sr-йодобромным и Li–Sr-йодоборным водам, рекомендуемым нами для комплексного извлечения ценных компонентов (табл. 4, рис. 1, 4, 5). Эти пластовые хлоридные рассолы обогащены также макроэлементами (Na, Ca, Mg, K) в концентрациях $n \sim 10$ г/л. Йодобромные литие- и стронциеносные рассолы выявлены во всех ВК нижнего палеозоя в 55 точках наблюдения.

Гидрохимические исследования позволили выделить площади с Li–Sr-йодоборными кондиционными водами (табл. 4), которые также являются и йодобромными промышленными водами. Поскольку при прогнозной оценке ресурсов перспективных площадей редкометалльных вод необходимо учитывать такие граничные показатели, как глубина залегания водоносного комплекса ≥ 3000 – 3500 м и коэффициент водопроводимости $km \geq 1$ – 20 м²/сут [2], особого внимания в пределах Хорейверской впадины заслуживают рассолы ВК С–P₁-отложений Сандивейского поднятия (табл. 4, рис. 1), залегающие на глубинах менее 3 км, в хорошо изученных в процессе геолого-разведочных работ районах с наиболее развитой нефтедобывающей инфраструктурой. Перспективность южной части Хорейверской впадины отмечалась и ранее [14, 17].

Несмотря на глубокое залегание пластовых хлоридно-натриевых поликомпонентных промышленных рассолов, развитие новых технологий извлечения элементов и приемов переработки гидроминерального сырья позволит в дальнейшем извлекать ценные компоненты из карбонатных ВК палеозоя в промышленных масштабах, в том числе при комплексном освоении месторождений углеводородного и гидроминерального сырья.

Авторы благодарят И. О. Машину за компьютерные картографические построения.

Литература

1. Анциферов А. С. Ресурсы уникальных хлоридных кальциевых рассолов Сибирской платформы и проблемы их промышленного освоения // Разведка и охрана недр. 2004. № 8–9. С. 30–32.
2. Бондаренко С. С., Куликов Г. В. Подземные промышленные воды. М.: Недра, 1984. 358 с.
3. Бураков Ю. Г., Лысенин Г. П. и др. Южный купол Вуктыльского месторождения — нетрадиционный источник энергетических ресурсов, углеводородного и гидроминерального сырья // Геология и разработка газовых месторождений: Сб. науч. тр. (по материалам науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения профессора В. М. Сенюкова, г. Ухта, 1997 г.). ИРЦ «Газпром», 1998. С. 172–179.
4. Валяшко М. Г., Поливанова А. И., Жеребцова И. К., Меттих Б. И., Власова Н. К. Геохимия и генезис рассолов Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1965. 160 с.
5. Вахромеев А. Г. Месторождения промышленных поликомпонентных рассолов глубоких горизонтов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Вестник ИРГТУ. 2014. № 9 (92). С. 73–78.
6. Виноградов А. П. Йод в морских илах // Тр. Биогеохим. лаб. АН СССР. Т. 5. 1939. С. 19.
7. Вожов В. И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Новосибирск: СНИИГТИМС, 2006. 209 с.
8. Данилевский С. А., Склярова З. П., Трифачев Ю. М. Геофлюидальные системы Тимано-Печорской провинции. Ухта, 2003. 298 с.
9. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швеиц В. М. Геохимия подземных вод: Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
10. Красинцева В. В. Гидрогеохимия хлора и брома. М.: Наука, 1968. 196 с.
11. Кудельский А. В. Гидрогеология и гидрогеохимия йода. Минск: Наука и техника, 1976. 216 с.
12. Ланина Т. Д., Литвиненко В. И., Варфоломеев Б. Г. Процессы переработки пластовых вод месторождений углеводородов. Ухта: Ухтин. гос. техн. ун-т, 2006. 172 с.
13. Митюшева Т. П., Амосова О. Е. Применение факторного анализа при изучении подземных промышленных йодобромных вод Тимано-Североуральского региона // Вода: химия и экология. 2013. № 9. С. 78–86.
14. Подземные воды Европейского Северо-Востока СССР / Дедеев В. А., Зытнер Ю. И., Оберман Н. Г., Мигунов Л. В., Мильков В. М., Горбачев А. Ф., Руфов С. Б. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми НЦ УрО АН СССР. 1989. 160 с.
15. Прищепина О. М., Богацкий В. И., Макаревич В. Н., Чумакова О. В. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т. 6. № 4. 2011. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf (дата обращения: 05.09.2017).
16. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / Алексеев С. В., Вахромеев А. Г., Коцупало Н. П., Рябцев А. Д. Иркутск: Географ, 2014. 162 с.
17. Руфов С. Б., Мильков В. М. Прогнозная оценка промышленных вод Хорейверской впадины // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейского Северо-Востока: природные углеводороды. Сыктывкар, 1991. С. 226–229. (Тр. XI геолог. конф. Коми АССР).
18. Серебряков О. И. Перспективы развития минерально-сырьевой базы на Астраханском ГКМ // Развитие и освоение нефтяных и газоконденсатных месторождений. 2003. Вып. 4. С. 79–82.
19. Солодов Н. А., Балашев Л. С., Кременецкий А. А. Геохимия лития, рубидия и цезия. М., 1980. 233 с.
20. Тектоника Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции: Объяснительная записка к структурно-тектонической карте Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. М-б 1:1000 000. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1989. 28 с.
21. Тимано-Печорский седиментационный бассейн: Объяснительная записка к Атласу геологических карт / Под ред. З. В. Ларионовой, В. И. Богацкого. Ухта: Изд-во ТП НИЦ, 2002. 122 с.
22. Шестов И. Н., Шувалов В. М. Минеральные лечебные и промышленные воды Пермского края // Геология и полезные ископаемые Западного Урала / Пермский гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2013. С. 126–129.

Таблица 4. Подземные воды Хорейверской впадины, относящиеся к редкометалльным (Li, Sr) йодоборным-йодобромным промышленным водам

Table 4. Ground waters of the Khoreyver depression classified as rare metal (Li, Sr) iodine-boron-iodine-bromine industrial waters

Перспективная площадь (или скважина, номер) Potential area (or well, number)	Интервал опробования ВК, м AC Testing interval, m	Минерализация вод, г/л Water minerali- zation, g/l	Содержания, мг/л / Contents, mg/l								
			Br	I	B	Li	Sr	Na	K	Ca	Mg
Минимальные промышленные концентрации элементов (при одновременном извлечении) [1] / Minimal industrial concentrations of elements (simultaneous recovery)			200	10	75	10	300	–	–	–	–
Водоносный комплекс C–P ₁ -отложений / Aquiferous complex of C–P ₁ -sediments											
Малохатояхская, 55 Malokhatoyakhskaya, 55	2563–2602	165.0	424.00	19.00	89.7	18.0	405.0	48330.0	1075.0	11222.0	1946.0
Колвависовская, 1 Kolvavisovskaya, 1	2599–2629	175.0	467.42	20.09	85.26	19.0	364.0	51880.9	1240.0	11600.0	1884.8
Ошкотынская Oshkotynskaya	2630–2939	133.0–193.5	322.3– 506.2	16.9–23.7	55.3–89.2	25.0–45.3	452.3– 845.5	36880.3– 57660.5	638.9– 1600.0	8416.8– 13426.8	1215.0– 2308.5
Водоносный комплекс D ₃ –C ₁ -отложений / Aquiferous complex of D ₃ –C ₁ -sediments											
Шор-Сандивейская, 70 Shor-Sandiveyskaya, 70	2968–3012	188.0	545.00	11.00	118.0	18.0	525.0	40430.0	1670.	13100.0	1763.0
Северо-Хоседаюская Severo-Khosedayuskaya	3210–3502	181.4–205.0	446.2– 544.00	41.5–47.00	68.3–82.0	17.0–37.0	364.0– 425.0	52400.0– 60000.0	1710.0– 1950.	10497.0– 12470.0	1649.9– 2122.0
Южно-Сюрхаратин- ская, 10 / Yuzhno- Syurkharatinskaya, 10	3265–33429	178.7–194.3	519.5– 556.78	22.7–23.1	103.0– 112.18	21.5	562.9	50800.0– 56360.0	2216.0– 2378.0	11623.2– 12024.0	1944.0– 2673.0
Верхнеколвинская Verkhnekolvinskaya	3271–3500	186.0–188.0	499.5– 514.0	25.4–25.0	102.6– 111.0	26.0–43.0	395.0– 402.0	51300.0– 55380.0	2318.0– 2378.0	12697.0– 11663.0	1684.0– 2121.0
Сюрхаратинская Syurkharatinskaya	3285–3560	188.8–202.0	431.6– 517.00	24.0–24.5	67.1–102.2	16.3–19.0	465.0– 501.9	55600.4– 60000.0	1487.8– 2102.8	11824.0– 12424.8	1215.0– 2552.0
Мусюшорская Musyushorskaya	3301–3349	167.0–182.7	447.0– 542.5	12.0–17.9	109.0– 123.0	17.5	500.0– 550.0	48711.0– 53824.1	1730.0– 1770.0	11600.0– 12000.0	1581.0– 2188.8
Водоносный комплекс O ₂ –S–D ₁ -отложений / Aquiferous complex of O ₂ –S–D ₁ -sediments											
Восточно-Ярокутовож- ская, 1 / Vostochno- Yarokutovozhskaya, 1	3375–3429	177.0	619.00	10.00	136.0	22.0	563.0	49338.0	2800.0	12650.0	2523.0
Яромусюршорская, 85 Yaromysyurshorskaya, 85	3647–3830	106.0–122.0	381.0– 433.0	11.0–17.0	112.0– 139.0	19.0–24.0	402.0– 492.0	30038.0– 33479.0	1420.0– 1530.0	7700.0– 8350.0	1094.0– 1398.0
Лыдошорская, 300 Lydoshorskaya, 300	3666–3763	135.0–144.0	414.0– 443.0	15.0–18.0	75.0–87.0	17.0–18.6	471.0– 509.0	39233.0– 42042.0	1470.0– 1560.0	9068.0– 9619.0	1490.0– 1520.0
Варкнавтская, 5 Varknavtskaya, 5	4103–4110	180.2	564.77	17.26	94.34	17.6	441.7	53700.5	2482.9	9619.2	1701.0

23. Шербаков А. В. Гидрогеохимические исследования при поисках и разведке подземных бороносных вод. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 128 с.

References

1. Anciferov A. S. *Resursy unikalnyh hloridnyh kal'cievyh rassolov Sibirskoj platformy i problemy ih promyshlennogo osvoenija* (Resources of unique calcium chloride brines of the Siberian platform and problems of their industrial development). *Razvedka i ohrana nedr* (Exploration and protection of subsoil), 2004, No. 8–9, pp. 30–32.
2. Bondarenko S. S., Kulikov G. V. *Podzemnye promyshlennye vody* (Underground industrial water). Moscow: Nedra, 1984, 358 p.
3. Burakov Ju. G., Lysenin G. P. et al. *Juzhnyj kupol Vuktylskogo mestorozhdenija — netradicionnyj istochnik jenergeticheskikh resursov, uglevodorodnogo i gidromineral'nogo syrja* (The southern dome of the Vuktyl field is an unconventional source of energy resources, hydrocarbon and hydromineral raw materials). Proceedings of conference, Ukhta, 1997. Gazprom, 1998, pp. 172–179.
4. Valjashko M. G., Polivanova A. I., Zherebcova I. K., Mettikh B. I., Vlasova N. K. *Geohimija i genezis rassolov Irkutskogo amfiteatra* (Geochemistry and genesis of brines of the Irkutsk amphitheater). Moscow: Science, 1965, 160 p.
5. Vahromeev A. G. *Mestorozhdeniya promyshlennykh polikomponentnykh rassolov glubokikh gorizontov gidromineralnoj provincii Sibirskoj platformy* (Deposits of industrial multicomponent brines of deep horizons of the hydromineral province of the Siberian platform). *Vestnik of Ir STU*, 2014, No. 9 (92), pp. 73–78.
6. Vinogradov A. P. *Jod v morskikh ilah* (Iodine in sea silts). Proceedings of the Biogeochemical Laboratory of the USSR Academy of Sciences, 1939, V. 5, p. 19.
7. Vozhov V. I. *Podzemnye vody i gidromineralnoe syre Leno-Tunguskoj neftegazonosnoj provincii* (Groundwaters and hydromineral raw materials of the Leno-Tunguska oil and gas province). Novosibirsk: SNIIGiMS, 2006, 209 p.
8. Danilevskij S. A., Skljarov Z. P., Trifachev Ju. M. *Geofluidalnye sistemy Timano-Pechorskoj provincii* (Geofluidic systems of the Timan-Pechora province). Uhta, 2003, 298 p.
9. Krajnov S. R., Ryzhenko B. N., Shvec V. M. *Geohimija podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i jekologicheskie aspekty* (Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and environmental aspects). Moscow: Science, 2004, 677 p.
10. Krasinceva V. V. *Gidrogeohimija hlora i broma* (Hydrogeochemistry of chlorine and bromine). Moscow: Science, 1968, 196 p.
11. Kudel'skij A. V. *Gidrogeologija i gidrogeohimija joda* (Hydrogeology and hydrogeochemistry of iodine). Minsk: Nauka i tehnika Publ., 1976, 216 p.
12. Lanina T. D., Litvinenko V. I., Varfolomeev B. G. *Processy pererabotki plastovykh vod mestorozhdenij uglevodorodov* (Processes of processing of aquifers of hydrocarbon deposits). Uhta: UGTU, 2006, 172 p.
13. Mitjusheva T. P., Amosova O. E. *Primenenie faktornogo analiza pri izuchenii podzemnykh promyshlennykh jodobromnykh vod Timano-Severouralskogo regiona* (Application of factor analysis in the study of underground industrial iodine-

bromine waters of the Timan-North Ural region). *Voda: himija i jekologija* (Water: chemistry and ecology), 2013, No. 9, pp. 78–86.

14. *Podzemnye vody Evropejskogo Severo-Vostoka SSSR* (Underground waters of the European North-East of the USSR). Dedeev V. A., Zytner Ju. I., Oberman N. G., Migunov L. V., Milkov V. M., Gorbachev A. F., Rufov S. V. Syktyvkar: Institute of geology of the Komi SC UB of the USSR Academy of Sciences, 1989, 160 p.

15. Prishhepa O. M., Bogackij V. I., Makarevich V. N., Chumakova O. V. *Novye predstavlenija o tektonicheskom i neftegazogeologicheskom rajonirovanii Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii* (New ideas about the tectonic and oil and gas-geological zoning of the Timan-Pechora oil and gas province). *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika* (Oil and gas geology. Theory and practice), 2011, V. 6, No. 4. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/40_2011.pdf / (accessed: 05.09.2017).

16. *Promyshlennye rassoly Sibirskoj platformy: gidrogeologija, burenie i dobycha, pererabotka, utilizacija* (Industrial brines of the Siberian platform: hydrogeology, drilling and production, processing, utilization). Alekseev S. V., Vahromeev A. G., Kocupalov N. P., Rjabcev A. D. Irkutsk: Geograf. Publ., 2014, 162 p.

17. Rufov S. B., Milkov V. M. *Prognostnaja ocenka promyshlennykh vod Horejverskoj vpadiny* (Predictive estimate of the industrial waters of the Khoreyver depression). *Geologija i mineral'no-syr'e vyve resursy Evropejskogo severo-vostoka: prirodnye uglevodorody* (Geology and Mineral Resources of the European North-East: natural hydrocarbons). Proceedings of conference. Syktyvkar, 1991, pp. 226–229.

18. Serebrjakov O. I. *Perspektivy razvitiya mineralno-syrovoy bazy na Astrahanskom GKM* (Prospects for the development of the mineral resource base at the Astrakhan GCF). *Razvitie i osvoenie neftejnykh i gazokondensatnykh mestorozhdenij* (Development and using of oil fields and gas condensate fields). 2003, V. 4, pp. 79–82.

19. Solodov N. A., Balashev L. S., Kremeneckij A. A. *Geohimija litija, rubidija i cezija* (Geochemistry of lithium, rubidium, and caesium). Moscow, 1980, 233 p.

20. *Tektonika Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii: Objasnitel'naja zapiska k strukturno-tektonicheskoj karte Timano-Pechorskoj neftegazonosnoj provincii. Masshtab 1:1000 000* (Tectonics of the Timan-Pechora oil and gas province: Explanatory note to the structural and tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province. Scale 1: 1000 000). Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1989, 28 p.

21. *Timano-Pechorskij sedimentacionnyj bassejn: Objasnitel'naja zapiska k Atlasu geologicheskikh kart* (Timan-Pechora sedimentation basin: Explanatory note to the Atlas of Geological Maps). Eds. Z. V. Larionova, V. I. Bogackii. Uhta: TP NIC Publ., 2002, 122 p.

22. Shestov I. N., Shuvalov V. M. *Mineralnye lechebnye i promyshlennye vody Permskogo Kraja* (Mineral curative and industrial waters of Perm Territory). *Geologija i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala* (Geology and minerals of the Western Urals). Perm State University, 2013, pp. 126–129.

23. Shherbakov A. V. *Gidrogeohimicheskie issledovaniya pri poiskah i razvedke podzemnykh boronosnykh vod* (Hydrogeochemical studies in the search and exploration of underground boric waters). Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 1961, 128 p.