



Оригинальная статья / Original article

УДК 556.114.6.027(571.1)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>

Стронций и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна

© Л.П. Алексеева^a, С.В. Алексеев^b^{a,b}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия^aИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Резюме: Цель настоящего исследования заключалась в выявлении ведущих процессов формирования ионного и изотопного составов хлоридных рассолов в осадочных бассейнах Сибирской платформы. Объектом и предметом исследования стали глубокозалегающие крепкие, весьма крепкие и предельно насыщенные рассолы, содержание в них стронция и отношения его стабильных изотопов. Ионно-солевой состав подземных вод был определен традиционными методами (титриметрическим, весовым, пламенной фотометрии), изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ измерялось на масс-спектрометрах (г. Иркутск, Россия и Канада). Рассолы вскрыты на глубине 1500–3000 м и приурочены к соленосной и подсолевой гидрогеологическим формациям. Они характеризуются высокой минерализацией (385–530 г/дм³) и высоким содержанием стронция (2,3–7 г/дм³). Изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ составляет от 0,708 до 0,713062. Большинство проб рассолов по изотопному составу близко к водам венд-кембрийского палеоокеана, однако отдельные пробы рассолов из подсолевой части осадочного разреза бассейна значительно обогащены изотопом ^{87}Sr по сравнению с водами палеоокеана и другими пробами. Вероятно, это обусловлено существенным привнесом ^{87}Sr в рассолы в ходе длительного взаимодействия подземных вод с вмещающими их нижнекембрийскими песчаниками.

Ключевые слова: подземные рассолы, содержание стронция, стронциевое изотопное отношение, Ангаро-Ленский артезианский бассейн

Благодарности: Авторы признательны доктору геолого-минералогических наук А.Г. Вахромееву и Е.О. Чертовских за предоставленные пробы рассолов.

Для цитирования: Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Стронций и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 98–105. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>

Strontium and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio of ground brines in the northeastern Angara-Lena artesian basin

© Lyudmila P. Alekseeva^a, Sergey V. Alekseev^b^{a,b}Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia^aIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of this study is to identify the major formation processes of the ionic and isotopic composition of chloride brines in the sedimentary basins of the Siberian platform. The object and subject of research are deep-seated strong, very strong and extremely saturated brines as well as their strontium content and the ratio of Sr stable isotopes. The groundwater ionic-salt composition was determined by traditional methods (titrimetric, gravimetric, flame photometry), the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio was measured using mass-spectrometers (Irkutsk, Russia and Canada). The brines lying at the depth of 1500–3000 m were tapped and classified into saline and subsalt hydrogeological formations. Their feature is high salinity (385–530 g/L) and high content of strontium (2.3–7 g/L). The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio ranges from 0.708 to 0.713062. By isotopic composition most of the brine samples are close to the waters of the Vendian-Cambrian paleocean. However, some brine samples from the subsalt part of the sedimentary section of the basin are significantly enriched in the isotope ^{87}Sr compared to the paleocean waters and other samples. It could be due to the substantial input of ^{87}Sr into the brines during the long-term interaction of groundwater with the host Lower Cambrian sandstones.

Keywords: underground brines, strontium content, strontium isotopic ratio, Angara-Lena artesian basin

Acknowledgements: The authors acknowledge a gratitude to Dr. Sci. (Geol. & Mineral.) Andrey G. Vakhromeev and Evgeniy O. Chertovskikh for the provided samples of brines.

For citation: Alekseeva LP, Alekseev SV. Strontium and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio of ground brines in the northeastern Angara-Lena artesian basin. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):98–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-98-105>



Введение

Ангаро-Ленский артезианский бассейн занимает южную часть Сибирской платформы. В его северо-восточной части открыт ряд крупных месторождений нефти и газа, продуктивные горизонты которых связаны с отложениями вендского и кембрийского возрастов. Изучение гидрогеологических условий месторождений, особенностей распространения, химического состава подземных вод является необходимым видом комплексных исследований для повышения эффективности добычи углеводородов. Несмотря на то что стронций – один из главных компонентов химического состава рассолов, сопутствующих нефтегазовым залежам, исследованию радиогенного изотопа ^{87}Sr во флюидах уделяется недостаточно внимания. Стронциевое отношение в подземных рассолах позволяет определить источник поступления стронция в раствор, а это в свою очередь дает информацию о происхождении и эволюции водоносных систем.

Материалы и методы исследования

В рамках представленного исследования химический ионно-солевой состав подземных вод был проанализирован традиционными методами в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск). Изотопные отношения стронция в восемнадцати пробах рассолов и двух образцах песчаника измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре МИ-1201АТ в двухленточном режиме (ленты Re-Re) на базе центра коллективного пользования «Многоэлементные и изотопные исследования» Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск). Выделение рубидия и стронция выполнялось методом ионообменной хроматографии на кварцевых колонках [1], заполненных катионитом Dowex AG W50x8, элюентом служил 2N HCl. Правильность определения изотопных отношений стронция контролировалась параллельным измерением в каждой серии образцов изотопного стандарта Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева, отношение

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в котором составляет $0,70800 \pm 7$ (2σ , $n = 6$), и стандартом SRM 987 (Strontium Carbonate Isotopic Standard) с отношением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ $0,71026 \pm 6$ (2σ , $n = 6$). Кроме того, изотопный анализ стронция в восьми пробах рассолов выполнялся в компании Isotope Tracer Technologies Inc. (г. Ватерлоо, Канада) на масс-спектрометре термической ионизации Triton Thermo Scientific методом двойной дегазации ренийевых нитей. Стандарты для контроля результатов были откалиброваны в соответствии со стандартом SRM 987 Национального института стандартов и технологий США (англ.: *National Institute of Standards and Technology, NIST*).

Геолого-гидрогеологические условия района

Кристаллический фундамент (AR-PR) в пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна вскрыт скважинами на глубине от 2000 до 4000 м и более [2–5].

Подсолевая (карбонатно-терригенная) гидрогеологическая формация (V-Є₁) залегает на фундаменте и сложена отложениями ушаковской и мотской свит нижнего кембрия, а также рифея. Мощность формации изменяется от 500–1000 до 2000–2500 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками, доломитами, доломито-ангидритами [6–10]. Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный натриево-кальциевый, кальциево-натриевый, магниевый-кальциевый и кальциево-магниевый. Минерализация подземных вод составляет 240–570 г/дм³.

Соленосная (галогеенная) гидрогеологическая формация (Є₁) охватывает отложения усольской, бельской, булайской и ангарской свит раннего кембрия. На долю пластов каменной соли приходится более половины их суммарной мощности. Глубина залегания соленосной формации составляет 600–2500 м. Водовмещающие отложения имеют значительную мощность (1500–2000 м). Они представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами, известняками [3, 7, 8]. Рассолы вскрываются глубокими скважинами в стратиграфически выдержанных келорском, шелонинском, бильчирском, атовском, христофо-



ровском, балыхтинском и осинском горизонтах, а также в межсолевых карбонатных пластах-коллекторах. По химическому составу они относятся к хлоридным кальциево-магниевоым, реже кальциевым. Минерализация рассолов в основном составляет 270–500, максимально – 631 г/дм³.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение изотопного отношения стронция (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) Ангаро-Ленского артезианского бассейна выполнено в пробах рассолов из соленосной (булайская и усольская свиты) и подсолевой (непская, мотская и тетерская свиты) гидрогеологических формаций. По химическому составу рассолы хлоридные кальциевые, рН = 4–5,35, минерализация – 385–530 г/дм³, содержание стронция – 2353–7052 мг/дм³. Одна проба хлоридного

натриевого рассола с минерализацией 95 г/дм³ была использована для сравнения (таблица).

На гистограмме (рис. 1) представлены значения отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, которые характерны для различных природных объектов. Кроме значений стронциевого отношения в крепких рассолах Ангаро-Ленского артезианского бассейна, насыщающих геологический разрез (V-Є₁) с мощными пластами каменной соли, здесь для сравнения также приведены значения отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в крепких рассолах, приуроченных к несоленосным карбонатам (Є₁-Є₂) и кимберлитам (D₃-C₁) Оленёкского артезианского бассейна [11].

Значения стронциевого отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в подземных водах изменяются в зависимости от содержания радиогенного стронция ⁸⁷Sr – продукта радиоактивного распада ⁸⁷Rb в первоначальных источниках – породах и водах палеоокеана. Кроме того, стронциевое

Содержание стронция и изотопное отношение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в рассолах Ангаро-Ленского артезианского бассейна

Strontium content and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr isotopic ratio in the brines of the Angara-Lena artesian basin

Номер пробы, скважина	Место отбора пробы	Глубина отбора пробы, м	Минерализация воды, г/дм ³	Ca ²⁺ , мг/дм ³	Sr ²⁺ , мг/дм ³	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
1, скв. 3	<i>Усольская свита, осинский горизонт</i>	2926–3074	514,7	145	7052	0,70814
2, скв. 323		2992–3052	499,5	143,3	6706	0,70824
3, скв. 32		2599–2640	444,5	121,2	5174	0,70821
4, скв. 323		2992–3052	529,6	156,9	6795	0,708
13, скв. 1		2381	509,1	145	6514	0,708261
15, скв. 1		1559–1586	95,7	7,1	112	0,708451
14, скв. 72	<i>Булайская свита, беркинский горизонт</i>	1670	426,3	98,7	3452	0,708716
6, скв. 28	Мотская свита, парфеновский горизонт	2520–2530	504,6	140,5	3246	0,70846
7, скв. 28		2520–2538	497	133,5	4588	0,70835
5, скв. 97	Непская свита, ярактинский горизонт	2973–2986	384,9	92	3523	0,712521
8, скв. 175		3293–3590	390,6	94,1	3508	0,712642
9, скв. 157		3085–3094	394,5	98,7	3788	0,713062
10, скв. 247		3319–3360	389,9	94	3817	0,712532
11, скв. 1	Тетерская свита, нижеустькутский горизонт	1956–1965	409,3	82,8	2565	0,708626
12, скв. 11	Катангская свита, преображенский горизонт	1754,5–1771	401,1	91,7	2353	0,708623
16, скв. 2231	Непская свита, верхнечонский горизонт	1650	398,3	104,9	2519	0,710123

Примечание. Курсивом приведены рассолы соленосной, прямым шрифтом – подсолевой гидрогеологической формации.

Note. Italic is used for the brines of saline hydrogeological formation; Roman face – for the brines of subsalt hydrogeological formation.

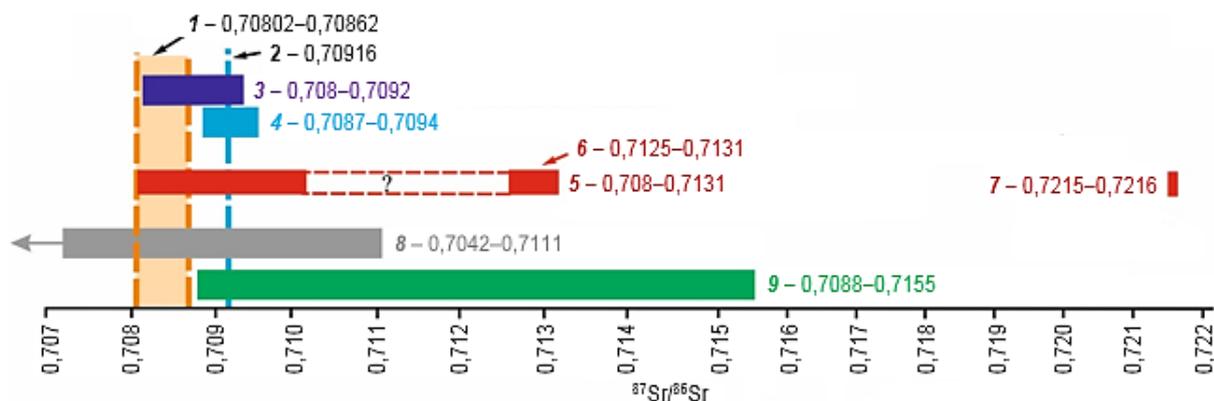


Рис. 1. Изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в различных природных объектах:

1 – вода палеоокеана (560–550 млн лет) [12, 13]; 2 – современная морская вода [14, 15]; 3 – рассолы несоленосных осадочных формаций (Оленёкский артезианский бассейн, глубина – 115–1650 м); 4 – рассолы кимберлитов (Оленёкский артезианский бассейн, глубина – 170–630 м); 5 – рассолы соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций (Ангара-Ленский артезианский бассейн, глубина – 1500–3500 м; вопросительный знак – нет данных); 6 – рассолы ярактинского горизонта; 7 – песчаники ярактинского горизонта подсолевой формации (Ангара-Ленский артезианский бассейн, глубина – 2900–3000 м); 8 – кимберлиты (глубина – 50–800 м)¹; 9 – осадочные породы (Оленёкский артезианский бассейн, глубина – 265–1500 м)

Fig. 1. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio in various natural objects:

1 – paleocean water (560–550 Ma) [12, 13]; 2 – modern seawater [14, 15]; 3 – brines of nonsaline sedimentary formations (the Olenek artesian basin, the depth of 115–1650 m); 4 – kimberlite brines (the Olenek artesian basin, the depth of 170–630 m); 5 – brines of saline and subsalt hydrogeological formations (the Angara-Lena artesian basin, the depth of 1500–3500 m; question mark – no data); 6 – the Yarakta horizon brines; 7 – the Yarakta horizon sandstones of the subsalt formation (the Angara-Lena Artesian basin, the depth of 2900–3000 m); 8 – kimberlites (the depth of 50–800 m)¹; 9 – sedimentary rocks (the Olenek artesian basin, the depth of 265–1500 m)

отношение зависит от литологических особенностей вмещающих пород: в терригенных – от происхождения и стадии формирования сланцев и песчаников, в карбонатных – от возраста и степени изменения морских карбонатов, эвапоритов и фосфоритов [9, 16, 17].

Крепкие хлоридные кальциевые рассолы соленосной и подсолевой формаций Ангара-Ленского артезианского бассейна находятся в гидродинамической зоне пассивного водообмена, то есть в обстановке высокой гидрогеологической закрытости. Формирование химического состава рассолов происходило в результате метаморфизации захороненной рапы солеродного бассейна на рубеже венда и кембрия в процессе последующего взаимодействия с терригенными и карбонатными породами. Первоначальные стронциевые отношения палеоокеана в венд-кембрийское время (575–550 млн лет) изменялись в пределах 0,70802–0,70862 [12, 13]. Изотопное отношение стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в рассолах соленосной гидрогеологической формации изменяется

в узком интервале – 0,708–0,708716; в рассолах подсолевой формации этот диапазон гораздо шире – 0,70835–0,713062 (рис. 2).

Практически все значения стронциевого отношения, измеренные в пробах рассолов соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций, укладываются в диапазон между значениями в современной морской воде и воде палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта (подсолевая гидрогеологическая формация), которые формируют на графиках особую группу, отличающуюся наиболее высокими значениями стронциевого отношения (0,71252–0,71306) при содержании Sr^{2+} 3,5–3,8 г/дм³. Они намного превышают значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в современной морской воде и в воде палеоокеана на рубеже венда и кембрия. Возникает вопрос: в чем причина высокого содержания радиогенного стронция в крепких рассолах и каков его источник. Очевидно, ответ кроется в истории накопления венд-кембрийской осадочной толщи Сибирской платформы.

¹ Масловская М.Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 1985. 195 с.

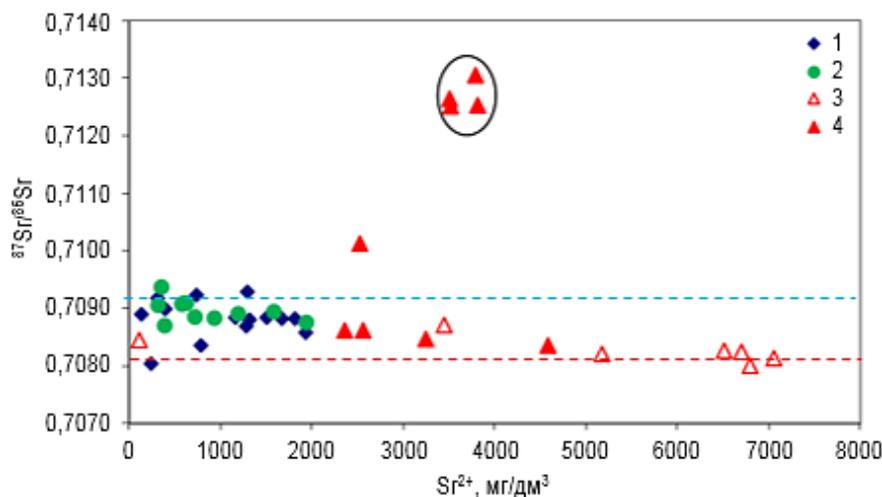


Рис. 2. Зависимость изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от содержания стронция в рассолах:
1 – карбонатных пород Оленёкского артезианского бассейна; 2 – кимберлитов Оленёкского артезианского бассейна; 3 – соленосной гидрогеологической формации Ангаро-Ленского артезианского бассейна; 4 – подсолевой гидрогеологической формации Ангаро-Ленского артезианского бассейна
Линии голубого цвета – современная морская вода, красного цвета – вода палеоокеана, в овале – рассолы ярактинского горизонта

Fig. 2. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio vs strontium content in the brines of:

1 – carbonate rocks of the Olenek artesian basin; 2 – kimberlites of the Olenek artesian basin;
3 – saline hydrogeological formation of the Angara-Lena artesian basin; 4 – subsalt hydrogeological formation of the Angara-Lena artesian basin
Blue lines – modern seawater, red lines – paleocean water, in an oval – Yarakta horizon brines

Ярактинский нефтегазоносный горизонт приурочен к непской свите в базальной части осадочного чехла, глубина его залегания составляет 2600–2700 м. Накопление существенно песчаных отложений ярактинского горизонта в непское время позднего венда (575–585 млн лет) происходило в условиях мелкого шельфа и прибрежной равнины, временами заливавшейся морем [9, 18, 19]. Основным источником сноса обломочного материала были внутренние районы Сибирской платформы, а также локальные выступы гетерогенного фундамента. Временные потоки переносили значительное количество продуктов разрушения горных пород, вероятно, обогащенных рубидием, которые в первую очередь заполняли песчано-алевролитистым материалом эрозионные формы рельефа и прилегающие территории [20]. Вследствие этого повышалось содержание радиогенного стронция и стронциевого отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в породах. При трансгрессии моря устанавливалась морская обстановка осадконакопления, в результате чего сформировался глинистый слой, представленный аргиллитами от зеленовато-серых до черных, слабослюдистых, пиритизированных, вероятно, с повышенным

стронциевым отношением. Последующие процессы преобразования песчаников, алевролитов и аргиллитов ярактинского горизонта и взаимодействие подземных вод с породами, обогащенными радиогенным стронцием, приводили к переходу ^{87}Sr в раствор. Измеренное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в песчаниках ярактинского горизонта с глубины 3000 м составляет 0,721507–0,721603, что однозначно подтверждает источник повышенного изотопного отношения в рассолах подсолевой гидрогеологической формации.

Заключение

Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в хлоридных кальциевых рассолах соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций Ангаро-Ленского артезианского бассейна в основном коррелируют со стронциевым отношением в воде кембрийского палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта, значительно обогащенные радиогенным стронцием, вероятным источником которого в растворах являются терригенные отложения (песчаники) с высоким значением отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ благодаря процессам взаимодействия в системе «вода – порода».



Список литературы

1. Pin C., Briot D., Bassin C., Poitrasson F. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography // *Analytica Chimica Acta*. 1994. Vol. 298. P. 209–217.
2. Геология нефти и газа Сибирской платформы / ред. А.Э. Конторович, В.С. Сурков, А.А. Трофимук. М.: Недра, 1981. 552 с.
3. Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира. М.: Недра, 1973. 392 с.
4. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. 247 с.
5. Анциферов А.С., Букаты М.Б., Дзюба А.А., Пиннекер Е.В., Сурнин А.И., Шварцев С.Л. Геологические запасы промышленных рассолов основных нефтегазоносных регионов Лено-Тунгусской провинции // Геология и проблемы поисков новых крупных месторождений нефти и газа в Сибири: сб. стат. / гл. ред. А.Э. Конторович, В.С. Сурков. Ч. I. Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГимС, 1996. С. 139–142.
6. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии: закономерности распространения и формирования подземных вод. М.: Наука, 1977. 196 с.
7. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. М.: Наука, 1966. 332 с.
8. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / ред. Н.В. Мельников. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.
9. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы: стратиграфия, история развития. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 146 с.
10. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботубинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 467 с.
11. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 2. С. 183–197. <https://doi.org/10.15372/GiG20180204>
12. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. Strontium isotope stratigraphy // *The geologic time scale* / eds. F.M. Gredstein, J.G. Ogg, M.D. Schmotz, G.M. Ogg. Oxford: Elsevier, 2012. P. 127–144.
13. Вишневская И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., Киселева В.Ю., Писарева Н.И. Sr-изотопные характеристики хорбусуонской серии венда Оленекского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 3. С. 317–321. <https://doi.org/10.7868/S0869565213090247>
14. Banner J.L. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy // *Earth-Science Reviews*. 2004. Vol. 65. Iss. 3-4. P. 141–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00086-2)
15. Lackschewitz K.S., Devey W., Stoffers P., Botz R., Eisenhauer A., Kummert M., et al. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alteration processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. Vol. 68. Iss. 21. P. 4405–4427. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.016>
16. Mazumdar A., Strauss H. Sulfur and strontium isotopic compositions of carbonate and evaporite rocks from the Late Neoproterozoic – Early Cambrian Bilara group (Nagaur-Ganganagar basin, India): constraints on intrabasinal correlation and global sulfur cycle // *Precambrian Research*. 2006. Vol. 149. Iss. 3-4. P. 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.008>
17. Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E., Kuznetsov A.B., Bujakaite M.I. Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones // *Journal of the Geological Society*. 2009. Vol. 166. Iss. 1. P. 183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
18. Савинкин П.Т., Кузнецов В.Г., Илюхин Л.Н., Тихомирова Г.И. Фациально-палеогеоморфологическая обстановка формирования ярактинского горизонта юго-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы // Геология нефти и газа. 1991. № 12. С. 8–11.
19. Александров В.М., Белкина В.А., Казанская Д.А. Концептуальная геологическая модель продуктивных отложений ярактинского горизонта // Территория «Нефтегаз». 2016. № 6. С. 30–39.
20. Коновальцева Е.С. Вторичные процессы в породах-коллекторах продуктивных отложений Ярактинского месторождения // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf (18.02.2021).

References

1. Pin C, Briot D, Bassin C, Poitrasson F. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 1994;298:209–217.
2. Kontorovich AE, Surkov VS, Trofimuk AA. *Oil and gas geology of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 1981. 552 p. (In Russ.)
3. Zharkov MA. *Paleozoic saline formation*. Moscow: Nedra; 1973. 392 p. (In Russ.)



4. Vakhromeev AG. *Patterns of industrial brine deposits formation and localization in cambrian carbonated vuggy-fractured rocks reservoir of south Siberian plate*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 247 p. (In Russ.)
5. Antsiferov AS, Bukaty MB, Dzyuba AA, Pinneker EV, Surnin AI, Shvartsev SL. Geological reserves of industrial brines in the main oil and gas regions of the Lena-Tunguska province. In: Kontorovich AE, Surkov VS (eds.). *Geologiya i problemy poiskov novykh krupnykh mestorozhdenii nefti i gaza v Sibiri = Geology and prospecting problems of new large oil and gas fields in Siberia*. Part I. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1996. p.139–142. (In Russ.)
6. Pinneker EV. *Problems of regional hydrogeology: patterns of groundwater distribution and formation*. Moscow: Nauka; 1977. 196 p. (In Russ.)
7. Pinneker EV. *Brines of the Angara-Lena artesian basin: distribution patterns, composition, dynamics, formation and use*. Moscow: Nauka; 1966. 332 p. (In Russ.)
8. Mel'nikov NV. *Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Riphean and vendian of Siberian platform and plaited border*. Novosibirsk: Geo; 2005. 428 p. (In Russ.)
9. Mel'nikov NV. *Vendian-Cambrian saline basin of the Siberian platform: stratigraphy, evolution*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. 146 p. (In Russ.)
10. Shemin GG. *Geology and oil-and-gas potential of the Vendian and Lower Cambrian central regions of the Siberian Platform (Nepa-Botuoba, Baikit anteklise and Kantanga saddle)*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007. 467 p. (In Russ.)
11. Alekseeva LP, Alekseev SV. Geochemistry of ground ice, saline groundwater, and brines in the cryoartesian basins of the northeastern Siberian Platform. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(2):183–197. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20180204>
12. McArthur JM, Howarth RJ, Shields GA. Strontium isotope stratigraphy. In: Gredstein FM, Ogg JG, Schmotz MD, Ogg GM (eds.). *The geologic time scale*. Oxford: Elsevier; 2012. p.127–144.
13. Vishnevskaya IA, Kochnev BB, Letnikova EF, Kiseleva VYu, Pisareva NI. Sr-isotope characteristics of the Khorbusuon Group of the Vendian Olenek Uplift (northeast of the Siberian Platform). *Doklady Akademii nauk*. 2013;449(3):317–321. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565213090247>
14. Banner JL. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*. 2004;65(3-4):141–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00086-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00086-2)
15. Lackschewitz KS, Devey W, Stoffers P, Botz R, Eisenhauer A, Kummert M, et al. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alteration processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004;68(21):4405–4427. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.04.016>
16. Mazumdar A, Strauss H. Sulfur and strontium isotopic compositions of carbonate and evaporite rocks from the Late Neoproterozoic – Early Cambrian Bilara group (Nagaur-Ganganagar basin, India): constraints on intrabasinal correlation and global sulfur cycle. *Precambrian Research*. 2006;149(3-4): 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.008>
17. Melezhik VA, Pokrovsky BG, Fallick AE, Kuznetsov AB, Bujakaite MI. Constraints on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones. *Journal of the Geological Society*. 2009;166(1):183–191. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-171>
18. Savinkin PT, Kuznetsov VG, Ilyukhin LN, Tikhomirova GI. Facies-paleogeomorphologic environment of the formation of the Yarakta horizon, southeastern Nepka-Botuoba anteklise. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1991;12:8–11. (In Russ.)
19. Alexandrov VM, Belkina VA, Kazanskaya DA. Conceptual geological model of Yarakta horizon production deposits. *Territoriya "Neftegaz" = Oil and Gas Territory*. 2016;6:30–39. (In Russ.)
20. Konovalceva ES. Secondary processes in reservoir rocks of productive sediments of Yarakinski deposit. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2010;5(1). Available from: http://www.ngtp.ru/rub/2/18_2010.pdf [Accessed 18th February 2021]. (In Russ.)

Сведения об авторах / Information about the authors



Алексева Людмила Павловна,

доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,

✉ e-mail: lalex@crust.irk.ru

Lyudmila P. Alekseeva,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher of the Laboratory of Hydrogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,

✉ e-mail: lalex@crust.irk.ru



Алексеев Сергей Владимирович,

доктор геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: salex@crust.irk.ru

Sergey V. Alekseev,

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Laboratory of Hydrogeology,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: salex@crust.irk.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

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

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

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

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 05.03.2021; одобрена после рецензирования 09.04.2021; принята к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 05.03.2021; approved after reviewing 09.04.2021; accepted for publication 12.05.2021.