

УДК 556.114.6.027

ИЗОТОПНОЕ СТРОНЦИЕВОЕ ОТНОШЕНИЕ ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) В ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ И ВОДАХ ОЛЕНЕКСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

Л.П. Алексеева¹, С.В. Алексеев², А.М. Кононов³

Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

В гидрогеологии изотопное стронциевое отношение используется для характеристики происхождения подземных вод, определения литологических источников (например, силикатных и карбонатных пород), процессов смешения вод, так как оно контролируется процессами взаимодействия вода-порода, отражающими определенный тип пород в пределах дренажного бассейна. В настоящей статье представлены новые данные о значениях стронциевого отношения в подземных текстурообразующих льдах и соленых водах и рассолах Оленекского артезианского бассейна. С целью уточнения генезиса подземных концентрированных растворов проведен сравнительный анализ с величинами стронциевого отношения в осадочных и магматических породах региона, в современной морской воде и воде палеоокеана. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ измерены в горных породах и подземных водах Оленекского артезианского бассейна до глубины 1650 м, а также в подземных текстурообразующих льдах с глубины 79–217 м. Стронциевые отношения в подземных льдах составляют от 0,70809 до 0,70915, что укладывается в область значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для подземных вод осадочных отложений. Изотопные отношения стронция в подземных водах осадочных отложений и кимберлитов, минерализация которых изменяется от 40 до 397 г/дм³, попадают в достаточно узкий интервал: от 0,70803 до 0,70938. Анализ взаимосвязи изотопного стронциевого отношения в подземных водах, льдах и породах подтверждает, что в пределах Оленекского артезианского бассейна формирование подземных вод тесно связано с кембрийскими обстановками соленакопления. Формирование водоносных комплексов и обводненных зон трещиноватости происходило в течение длительного времени на фоне неоднократных этапов тектоно-магматической активизации.

Ключевые слова: изотопы стронция; подземные текстурообразующие льды; подземные соленые воды и рассолы.

ISOTOPIC STRONTIUM SIGNATURE ($^{87}\text{SR}/^{86}\text{SR}$) OF GROUND ICE AND WATER IN THE OLENYOK ARTESIAN BASIN (WESTERN YAKUTIA)

L.P. Alekseeva, S.V. Alekseev, A.M. Kononov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Hydrogeology uses isotopic strontium ratio for characterization of groundwater origin, identification of lithological sources (e.g. silica and carbonate rocks) and water mixing processes, since it is controlled by the processes of water-rock interaction reflecting a certain type of rock within a drainage basin. This article introduces new data on isotopic strontium signatures of ground texture-forming ice, saline waters and brines of the Olenyok artesian basin. In order to specify the genesis of underground concentrated solutions a comparative analysis has been conducted. The strontium signatures of ground texture-forming ice have been compared with the signatures of sedimentary and magmatic rocks, modern seawater and paleocean water. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ signatures have been

¹Алексеева Людмила Павловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии, тел.: (3952) 422777, e-mail: lalex@crust.irk.ru

Alekseeva Lyudmila, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Hydrogeology, tel.: (3952) 422777, e-mail: lalex@crust.irk.ru

²Алексеев Сергей Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией гидрогеологии, тел.: (3952) 426637, e-mail: salex@crust.irk.ru

Alekseev Sergei, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Laboratory of Hydrogeology, tel.: (3952) 426637, e-mail: salex@crust.irk.ru

³Кононов Александр Матвеевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии, тел.: (3952) 422777, e-mail: kononov@crust.irk.ru

Kononov Alexander, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Researcher of the Laboratory of Hydrogeology, tel.: (3952) 422777, e-mail: kononov@crust.irk.ru

measured in the rocks and ground water of the Olenyok artesian basin down to the depth of 1650 m, as well as in ground texture-forming ice from the depth of 79–217 m. The strontium signatures of ground ice are from 0,70809 to 0,70915, which are within the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ range of ground water in sedimentary rocks. Isotopic strontium ratios in the ground water of the sedimentary rocks and kimberlites with salinity from 40 to 397 g/l belong to a narrow range from 0,70803 to 0,70938. The analysis of strontium isotopic ratio relationship in ground waters, ice and rocks confirms that groundwater formation was closely depended on Cambrian salt accumulation within the Olenyok artesian basin. Aquifers and watered fracture zones had been formed for a long time on the background of repeated stages of tectonic and magmatic activity.

Keywords: strontium isotopes; ground texture-formed ice; underground saline waters and brines.

Стронциевое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в гидрогеологии – это полезный трассер для характеристики происхождения подземных вод, процессов смешения вод, вычисления смешиваемых частей, взаимодействия вода- порода и определения путей миграции подземных вод. Высокая точность измерения изотопов Sr с помощью масс-спектрометра и отсутствие фракционирования Sr в гидрогеологических процессах улучшают пригодность этого трассера. Sr – это элемент с большой массой, и его фракционирование в геологических и биологических процессах очень мало по сравнению с фракционированием элементов с малой массой (например, ^2H и ^{18}O). Изотопное стронциевое отношение используется для определения литологических источников (например, силикатных и карбонатных пород), так как оно контролируется процессами взаимодействия вода-порода, отражающими определенный тип пород в пределах дренажного бассейна. При длительном взаимодействии рассолов с горными породами изотопное отношение стронция в водах стремится к отношению в исходной породе. Следовательно, оно отражает только степень взаимодействия в системе вода-порода и его нельзя использовать для определения ни возраста, ни происхождения воды. В геохимии изотопов стронция установлен ряд значений, которые считаются реперными величинами [2]. Первое из них – это минимально возможное в природе значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, характерное для протопланетного стронция – 0,69899 (так называемое BABI). Вероятно, в гипотетической древней ювенильной воде от-

ношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ должно быть близко к BABI. Вторая постоянная величина $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -отношения (0,7087–0,7095) характерна для вод морей и океанов [4].

Более поздние определения уточнили эту величину, в настоящее время стронциевое отношение в современной морской воде принимается равным 0,70918 [5].

Близость величины изотопного отношения стронция какой-либо природной воды к этому значению свидетельствует о ее морском происхождении. В речных водах среднее отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ принято равным 0,7119 [6].

Соотношение изотопов стронция в геологической истории земной коры, как известно, изменяется только за счет ^{87}Sr , количество которого возрастает по мере радиоактивного распада ^{87}Rb . Период полураспада рубидия около 50 млрд лет, и значения стронциевого отношения в породе за это время пропорционально отношению Rb/Sr в каждой минеральной фазе [8]. Поэтому отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ существенно выше в обогащенной рубидием континентальной, чем в бедной рубидием океанической коре.

Цель настоящей статьи – на основе новейших данных по изотопным стронциевым отношениям уточнить представления о происхождении высокоминерализованных вод и оценить степень участия вмещающих пород в формировании подземных вод.

Регион исследования – Оленекский артезианский бассейн, расположенный в северо-восточной части Сибирской платформы (рис. 1).

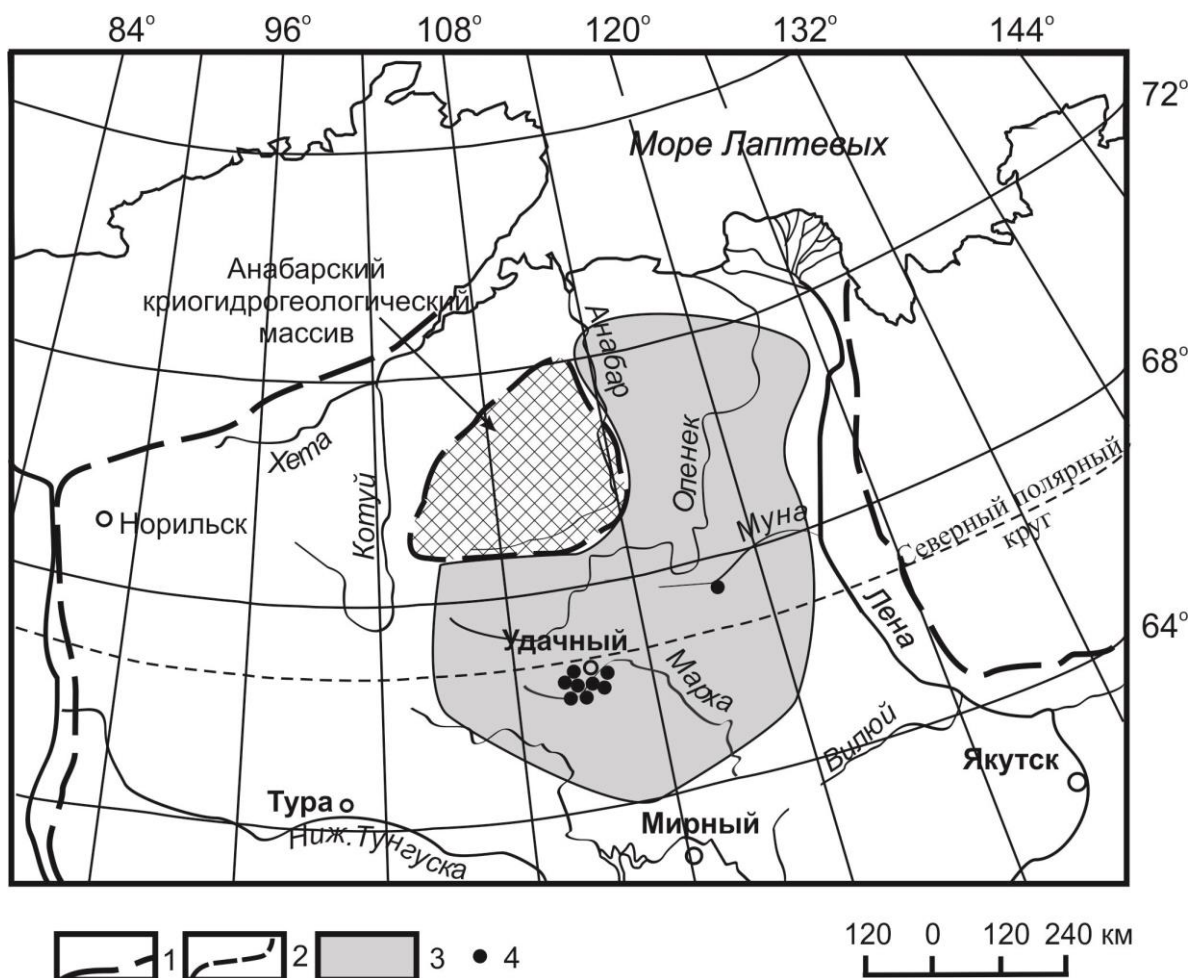


Рис. 1. Местоположение Оленекского артезианского бассейна в Западной Якутии:

1 – граница Сибирской платформы; 2 – граница распространения нижнекембрийских соленосных отложений; 3 – Оленекский артезианский бассейн; 4 – пункт гидрогеологического опробования

Для преимущественно карбонатного геологического разреза бассейна характерно наличие погребенных рифогенных структур, сложенных эпифитоновыми известняками и кавернозными доломитами. Широко распространены интрузии, кимберлитовые трубки, дайки – проявление траппового и кимберлитового магматизма. Криолитозона в пределах региона достигает уникальной мощности (более 1400 м). Подземные воды залегают здесь на глубине от 70 до 2750 м и формируют верхне-, средне-, нижнекембрийский и протерозойский водоносные комплексы, а также обводненные зоны кимберлитовых трубок. Подземные воды верхнекембрийского комплекса входят в гидрохимическую зону соленых вод, слабых и крепких рассолов. По химическому составу они

являются Cl, Mg-Ca, Ca-Mg и Na-Ca; минерализация вод изменяется в широких пределах: от 31 до 252 г/дм³. Подземные воды нижних венд-среднекембрийских водоносных комплексов находятся в пределах гидрохимической зоны крепких и весьма крепких рассолов. По химическому составу воды являются Cl-Ca. Минерализация рассолов этих водоносных комплексов изменяется от 198 до 404 г/дм³. Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых телах и гидравлически связанные с водоносными комплексами вмещающих горных пород, в целом идентичны по составу и минерализации. Они представляют собой хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией от 140 до 380 г/дм³.

Методы исследования. Химический макрокомпонентный состав подземных вод проанализирован лабораторными методами в Аналитическом центре Института земной коры СО РАН (Россия, г. Иркутск). Содержания микроэлементов и РЗЭ определены в Байкальском аналитическом центре коллективного пользования Иркутского научного центра СО РАН (Россия, г. Иркутск) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ELEMENT-2 (Finnigan MAT, Германия). Изотопные стронциевые отношения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) определены в Страсбургском университете (Франция, г. Страсбург) на масс-спектрометре VG

Sector и в Институте земной коры СО РАН (Россия, г. Иркутск) на приборе Finnigan MAT 262 в одноленточном режиме на рениевых лентах.

Результаты работы. Значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ измерены в горных породах и подземных водах Оленекского артезианского бассейна до глубины 1650 м, а также в подземных текстурообразующих льдах с глубины 79–217 м (рис. 2). Рассоловмещающие кембрийские осадочные отложения (известняки, доломиты) и магматические породы (кимберлиты) имеют одинаковый диапазон изменения стронциевых отношений: $0,70879 - 0,71554 = 0,0068$ и $0,7042 - 0,7110 = 0,0068$.

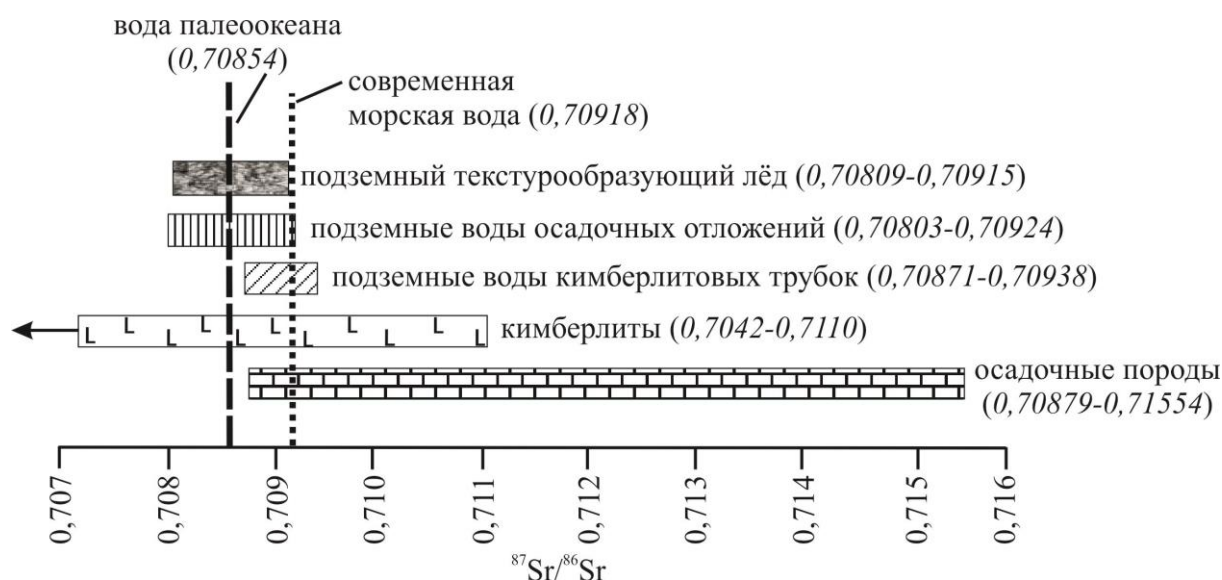


Рис. 2. Стронциевое изотопное отношение, измеренное в различных природных объектах:

в современной морской воде [4]; в воде палеоокеана [7]; в Оленекском КАБ [1]; в осадочных породах (10 анализов, глубина 265–1500 м); в подземных водах кимберлитов (6 анализов, глубина 170–630 м); в подземных водах осадочных пород (8 анализов, глубина 115–1650 м); в кимберлитах (глубина 50–800 м, [3]); в подземных текстурообразующих льдах (4 анализа, глубина 79–217 м)

В осадочных породах этот диапазон смещен в сторону более высоких значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, причем он не перекрывается со значением для воды палеоокеана 542 млн лет назад (граница венд-кембрийского интервала) – $0,70854$ [7].

Стронциевые отношения в подземных льдах составляют от $0,70809$ до

$0,70915$, что укладывается в область значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для подземных вод осадочных отложений. Если учесть, что две пробы льда были отобраны из кимберлитов, а две – из вмещающих пород, то выявляется прямая связь более низких стронциевых отношений в кимберлитах с подземными льдами кимберлитов ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70809–0,70812$), а более

**Содержание Sr и изотопное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
в подземных водах Оленекского артезианского бассейна**

Номер скважины	Глубина отбора проб, м	Минерализация воды M , г/дм ³	Ca^{2+} , мг/дм ³	1/Sr	Sr^{2+} , мг/дм ³	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Подземные воды осадочных отложений						
2531	1650	340	80,92	0,00052	1928,5	0,70858
11	135	59	8,53	0,00722	138,5	0,70890
11а	475	317	34,28	0,00128	781,4	0,70835
703	1480	396	92,98	0,0006	1667	0,70882
35	210	40	6,79	0,00415	241	0,70803
6	115	98	14,7	0,00325	308	0,70919
87	171	136	23,79	0,00253	395,8	0,70900
4ГМ	540	225	34	0,00136	736,7	0,70924
Подземные воды кимберлитовых трубок						
517	470	397	88,93	0,00063	1578,7	0,70895
39	170	110	16,12	0,00316	316	0,70906
14	265	111	19,7	0,00141	710	0,70886
1-г	250	100	15,66	0,00262	382	0,70871
Ню	244	93	16,4	0,00287	347,9	0,70938
2У	630	352	69	0,00085	1183,3	0,70891

высоких отношений – в осадочных породах с подземными льдами осадочных пород ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70905\text{--}0,70915$), что вполне логично, поскольку льдообразование происходило при промерзании соответствующих водонасыщенных пород.

Изотопные отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в подземных водах осадочных отложений и кимберлитов Оленекского артезианского бассейна попадают в достаточно узкий интервал: от 0,70803 до 0,70938 (таблица). Минерализация этих вод изменяется от 40 до 397 г/дм³, однако взаимосвязи стронциевого отношения с минерализацией вод не выявлено.

Относительно современной морской воды, значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в которой составляет 0,70918 [5], изотопные отношения почти для всех проб подземных вод меньше, независимо от величины минерализации воды, за исключением проб со значениями: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,70924 ($M = 225$ г/дм³) и 0,70938 ($M = 93$ г/дм³).

Содержание Sr в подземных водах составляет от 138,5 до 2565 г/дм³ и строго коррелирует с содержанием кальция (рис. 3). Тесная парагенетическая связь ($R^2 = 0,95$) указывает на общий источник поступления и концентрирования этих элементов в водах.

Распределение стронциевых отношений в породах и подземных водах по глубине представлено на рис. 4.

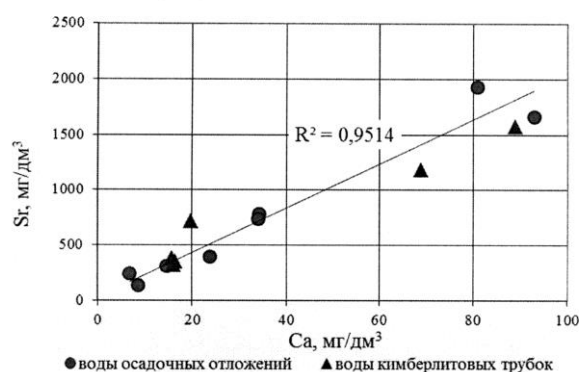


Рис. 3. Зависимость содержания стронция от содержания кальция в подземных водах Оленекского артезианского бассейна

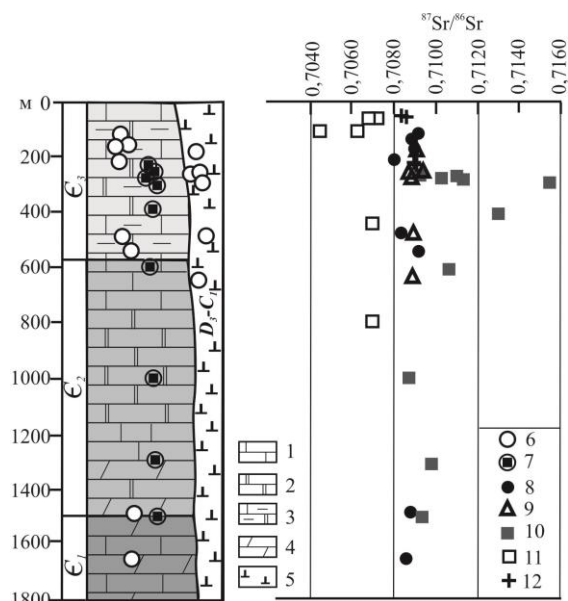


Рис. 4. Sr-изотопная характеристика геологического разреза Оленёкского артезианского бассейна:

1 – известняки, 2 – доломиты, 3 – глинистые известняки и доломиты, 4 – алевролиты, мергели, 5 – кимберлиты; 6–7 – места отбора: 6 – проб воды, 7 – образцов пород; 8–12 – стронциевые отношения: 8 – в подземных водах осадочных отложений, 9 – в подземных водах кимберлитовых трубок, 10 – в осадочных отложениях [1], 11 – в кимберлитах [3], 12 – в подземных текстурообразующих льдах

Сравнение диапазонов стронциевых отношений в подземных водах осадочных отложений и кимберлитов с изотопными отношениями вмещающих пород и морской воды приводит к неоднозначной интерпретации происхождения изотопов стронция в подземных водах. С одной стороны, самые низкие стронциевые отношения в подземных водах кембрийских карбонатных пород (0,70803) ближе всего к водам палеоокеана на рубеже венда и кембрия – 560–550 млн лет назад [7]. Это подтверждает гипотезу о сингенетичности подземных вод вмещающим породам и о формировании рассолов в результате захоронения маточной рапы древних солеродных бассейнов. В течение длительного геологического времени эти растворы взаимодействовали с карбонатными вмещающими породами с повышенным значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

(0,70879–0,71554), обогащаясь радиоактивным стронцием. С другой стороны, подземные воды кимберлитовых трубок имеют более узкий диапазон стронциевых отношений, и среднее значение (0,70898) ближе всего к значению в современной морской воде (0,70918). Значение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в самих кимберлитах изменяется в очень широких пределах в связи с тем, что кимберлиты – это брекчированная ультраосновная порода, содержащая разнообразные и многочисленные инородные и сходные включения с различным составом стронция. Измерения изотопного отношения в карбонатах основной массы трубки «Удачная» [3] обнаружили значительные вариации величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: от 0,7042 до 0,7110. Следовательно, в подземных водах, насыщающих эти породы и взаимодействующих с ними, изотопный состав стронция мог изменяться в направлении как уменьшения, так и увеличения содержания радиоактивного стронция в зависимости от источника его поступления в воду. Это может указывать на закрытость системы водопорода, что также согласуется с гипотезой седиментогенно-метаморфогенного происхождения соленых вод и рассолов.

Заключение. Проведенные исследования изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ показали, что в пределах Оленекского бассейна формирование подземных вод очень тесно связано с кембрийскими обстановками соленакопления. Современные рассолы бассейна имеют узкий диапазон значений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, близких к древней морской воде и, вероятно, являются продуктами метаморфизации рапы солеродных бассейнов в карбонатных породах. Наличие подземных вод с близкими значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в породах с более широким диапазоном стронциевых отношений свидетельствует о сложном формировании водоносных комплексов и обводненных зон трещиноватости, происходившем длительное время на фоне неоднократных

этапов тектоно-магматической активизации.

Библиографический список

1. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, В.Н. Борисов [и др.] // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 291–304.

2. Изотопные отношения стронция в некоторых природных водах Сибири: Междунар. геолог. конгресс, XXV сессия. Геохимия, минералогия, петрология / С.Б. Брандт, В.Н. Борисов, В.С. Лепин [и др.]. М.: Наука, 1976. С. 98–105.

3. Масловская М.Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса: автореф. дис. ... канд. геолог.-минеролог. наук. Иркутск, 1985. 20 с.

4. Фор Г., Пауэлл Дж. Изотопы стронция в геологии. М.: Мир, 1974. 215 с.

5. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alter-

ation processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea / K.S. Lackschewitz, W. Devey, P. Stoffers, R. Botz, A. Eisenhauer, M. Kummerow, M. Schmidt, A. Singer // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. V. 68. I. 21. P. 4405–4427.

6. Palmer M.R., Edmond J.M. The strontium isotope budget of the modern ocean // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1989. V. 92. I. 1. P. 11–26.

7. Sr-изотопные характеристики хорбусуонской серии венда Оленекского поднятия (Северо-Восток Сибирской платформы) / И.А. Вишневская, Б.Б. Кочнев, Е.Ф. Летникова, В.Ю. Киселева, Н.И. Писарева // ДАН, 2013. Т. 449. № 3. С. 317–321.

8. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of Canadian Shield brines and fracture minerals with applications to groundwater mixing, fracture history, and geochronology / R.H. McNutt, S.K. Frapre [et al] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. V. 54. P. 205–215.

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Иркутского государственного технического университета М.А. Тугарина