

ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ, СОЛЕННЫХ ВОД И РАССОЛОВ КРИОАРТЕЗИАНСКИХ БАСЕЙНОВ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев

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

Представлены результаты комплексного изучения подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы. Охарактеризован состав основных геохимических типов подземных льдов. Показано, что своеобразие гидрогеохимической зональности криоартезианских бассейнов проявилось в региональном распространении хлоридных соленых вод и рассолов. На основе изучения стабильных изотопов (^{18}O , D, ^{37}Cl , ^{81}Br , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) сформулирован вывод, что формирование хлоридных рассолов происходило либо в результате растворения галогенных горных пород, либо метаморфогенного преобразования захороненной маточной рапы. Выполнена оценка запасов гидроминерального сырья — дренажных рассолов карьера кимберлитовой трубки Удачная Оленекского криоартезианского бассейна.

Подземные льды, хлоридные подземные соленые воды и рассолы, гидрогеохимическая зональность, стабильные изотопы, гидроминеральное сырье, водопритоки.

GEOCHEMISTRY OF GROUND ICE, SALINE GROUNDWATER, AND BRINES IN THE CRYOARTESIAN BASINS OF THE NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM

L.P. Alekseeva and S.V. Alekseev

We present results of a comprehensive study of ground ice, saline waters, and brines in the cryoartesian basins of the northeastern Siberian Platform. The composition of major geochemical types of ground ice is considered. The specifics of the hydrogeochemical zonation of the cryoartesian basins are the regional distribution of chloride saline waters and brines. Study of stable isotopes (^{18}O , D, ^{37}Cl , ^{81}Br , and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) led us to the conclusion that the chloride brines resulted either from the leaching of halogen rocks or from the metamorphism of bitter connate water. The drainage brine reserves (hydromineral resources) of the Udachnaya kimberlite pipe in the Olenek cryoartesian basin are assessed.

Ground ice, chloride saline groundwater and brines, hydrogeochemical zonation, stable isotopes, hydromineral resources, water inflow

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Подземная гидросфера охватывает все внутриземные формы H_2O . Ее составными компонентами выступают свободные и связанные воды, H_2O в жидком, парообразном и твердом состояниях, которые активно взаимодействуют друг с другом, а при изменении внешних условий переходят из одного в другое. Эволюция подземной гидросферы тесно связана с общим ходом природных процессов на Земле. В областях с холодным резко-континентальным климатом в условиях глубокого охлаждения земных недр их протекание в системе вода—порода имеет свои особенности, обусловленные фазовыми переходами. В результате криогенеза формируется криолитозона, происходит трансформация гидрогеологических (подземных водоносных) систем в криогидрогеологические (криогенные подземные водоносные). Трещины, каверны — проводники воды в горных породах — определяют возможность образования в них подземных льдов.

Степень изученности отдельных генетических типов подземных льдов далеко неодинакова. Очень слабо разработан вопрос о происхождении подземных льдов, цементирующих трещины в скальных породах на больших глубинах. В общем виде процессы льдообразования в породах с жесткими кристаллическими связями анализируются в работах П.А. Шумского, Н.А. Вельминой, Б.И. Втюриной, Е.А. Втюрина, Н.Ф. Кривоноговой, Д.М. Шестернева и др. Первые сведения о подземных льдах криоартезианских бассейнов (КАБ)* Сибирской платформы были получены в ходе научно-исследовательских работ, выполненных в центральной части Якутской алмазоносной провинции [Устинова, 1964; Готовцев, 1983;

* Криоартезианский бассейн (КАБ) — артезианский бассейн с наличием сплошной зоны многолетнемерзлых пород мощностью до 500 м и более. Пресные подземные воды обычно полностью проморожены [Романовский, 1983].

Алексеев, Борисов, 1985; Климовский, Готовцев, 1994; Алексеев, Алексеева, 2000; Алексеев, Пиннекер, 2000; Alexeev, Alexeeva, 2002]. Между тем особенности условий залегания, текстуры и структуры, а также химический состав различных модификаций подземных льдов в скальных породах изучены недостаточно.

Существенным звеном системы вода—порода являются рассолы хлоридного состава. Их генезис и особенности формирования — это фундаментальная проблема, однако до настоящего времени полной ясности в ее решении нет. Особенно интересно происхождение рассолов, насыщающих осадочные терригенно-карбонатные толщи и магматические породы при отсутствии галогенных формаций. Познанием процессов формирования химического состава соленых вод и рассолов занимались как крупные российские ученые — Н.С. Курнаков, М.Г. Валяшко, Н.И. Толстихин, И.К. Зайцев, Е.А. Басков, А.М. Овчинников, В.А. Кирюхин, Е.В. Посохов, Е.В. Пиннекер, К.Е. Питьева, С.Р. Крайнов, П.А. Удодов, В.М. Швец, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев, В.И. Ферронский и другие, так и зарубежные исследователи — Д. Дж. Боттомли (D.J. Bottomley), М. Гэскойн (M. Gascoyne), М. Эдмундс (M. Edmunds), Р. Мокнут (R.H. McNutt), К. Нордстром (K. Nordstrom), Ш.К. Фрейп (S.K. Frapе), П. Фриц (P. Fritz) и др. Полезным инструментом при обосновании генезиса рассолов являются изотопные геохимические исследования, которые в пределах Сибирской платформы начались всего около 40 лет назад [Брандт и др., 1976; Пиннекер и др., 1987; Пиннекер, Шварцев, 1996; Шварцев, 2000; Shouakar-Stash et al., 2002, 2007; Алексеев и др., 2007; Алексеев, 2013; Алексеева, 2014; и др.]. Выявление ведущих процессов формирования ионного и изотопного состава рассолов, установление источников и причин накопления в них макро- и микрокомпонентов, а также особенностей их распределения в рассолах разных геохимических типов, требуют скорейшего решения.

Рассолы региона, заполняющие геологический разрез КАБ Сибирской платформы, характеризуются максимальной концентрацией ряда микрокомпонентов (брома, лития, стронция, рубидия и др.) и представляют собой самостоятельную промышленную ценность как гидроминеральное сырье. Изучением ресурсной базы гидроминерального сырья на Сибирской платформе с середины прошлого века занимались многие ученые и практики (Е.В. Пиннекер, П.И. Трофимук, И.С. Ломоносов, М.Г. Валяшко, В.А. Твердохлебов, А.С. Анциферов, А.А. Дзюба, В.И. Вожов, А.Э. Конторович, Н.П. Коцупало, Е.В. Зелинская, С.Л. Шварцев, М.Б. Букаты, А.Г. Вахромеев и др.). Исследование закономерностей накопления и распределения промышленных компонентов в рассолах в связи с перспективами их использования в качестве гидроминерального сырья для промышленных целей имеет огромное прикладное значение.

Таким образом, цель настоящей работы — охарактеризовать геохимические особенности подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов Сибирской платформы, обосновать их генезис и оценить высокоминерализованные подземные воды как гидроминеральное сырье.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подземные льды изучены в ходе документации керна скважин, пройденных без применения промывочных растворов. Состав подземных льдов и вод определен лабораторными методами (химическим, атомно-абсорбционным, спектрофотометрическим, хроматографическим и др.) в Байкальском ЦКП ИНЦ СО РАН, методом ICP-mass на приборе ELEMENT-2 (Finnigan MAT, Германия). Анализы стабильных изотопов кислорода, хлора и брома (^{18}O , D, ^{37}Cl и ^{81}Br) выполнены в Университете Ватерлоо (Онтарио, Канада) методом Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS), в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток и в Китайском университете Геоунаук (Ухань) на масс-спектрометрах Thermo Finnigan MAT 253. Изотопные стронциевые отношения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) определены в Страсбургском университете (Франция) на масс-спектрометре VG Sector и в ИЗК СО РАН (г. Иркутск) на приборе Finnigan MAT 262 с термической ионизацией в одноленточном режиме на ренийевых лентах. Равновесно-неравновесное состояние системы вода—порода выявлялось на основе использования программного комплекса HydroGeo [Букаты, 2002]. Данные по химическому и изотопному составу изученных подземных соленых вод и рассолов представлены в табл. 1.

ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

К числу важнейших особенностей КАБ северо-востока Сибирской платформы (рис. 1) относятся: 1) древнейший кристаллический фундамент, перекрытый осадочным чехлом переменной мощности (до 4220 м); 2) неоднократные процессы рифтогенеза, которые привели к резкому дифференцированию суммарной мощности чехла; 3) интенсивное проявление траппового и кимберлитового магматизма; 4) наличие в осадочном чехле барьерного рифа протяженностью около 1000 км с юго-востока на северо-запад, распространение выдержанных галогенных толщ к югу от него и их отсутствие — к северу; 5) резко-континентальный климат, отрицательная среднегодовая температура воздуха ($-9\dots-13\text{ }^\circ\text{C}$), низкий внутриземной тепловой поток ($20\text{—}40\text{ мВт/м}^2$), уникальная по мощности (более 1400 м) криолистоны, наличие криопэгов с температурой $-3\dots-1\text{ }^\circ\text{C}$.

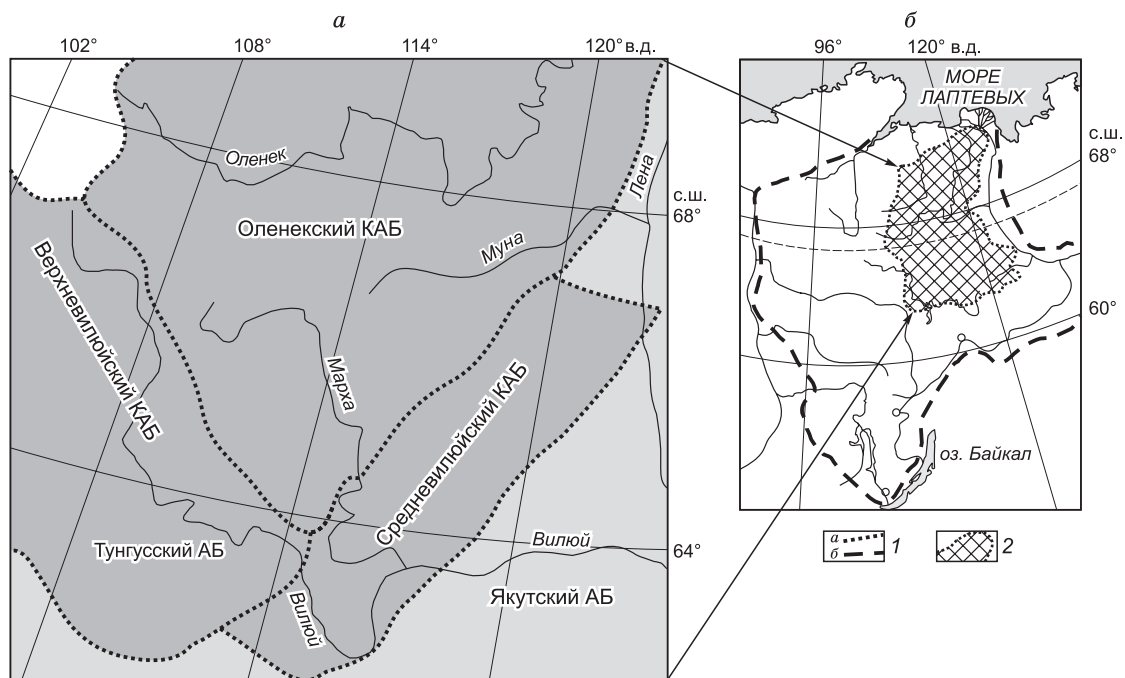


Рис. 1. Схема гидрогеологического районирования Восточно-Сибирской артезианской области (а) [Мерзлотно-гидрогеологические..., 1984] и положение КАБ (б).

1 — границы: а — между КАБ, б — Сибирской платформы; 2 — Оленекский КАБ.

Для Оленекского КАБ (центральной и юго-западной частей) характерен преимущественно карбонатный разрез с многочисленными интрузивными телами. Подмерзлотные воды залегают на глубине от 70 до 2000 м и формируют верхне-, средне-, нижнекембрийский и протерозойский водоносные комплексы, а также обводненные зоны кимберлитовых трубок и траппов. Подземные воды верхнекембрийского комплекса входят в гидрогеохимическую зону соленых вод, слабых и крепких рассолов, а по химическому составу являются Cl Mg-Ca (Ca-Mg) и Na-Ca. Их минерализация изменяется в широких пределах от 31 до 252 г/дм³.

Венд-среднекембрийские водоносные комплексы имеют между собой гидравлическую связь по зонам тектонических нарушений. Подземные воды формируют единый гидрогеологический резервуар, геохимически однообразный, и находятся в пределах гидрогеохимической зоны крепких и весьма крепких рассолов Cl Ca (Mg-Ca, Na-Ca) состава. Минерализация рассолов изменяется от 198 до 404 г/дм³. Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых телах и в осадочных горных породах, идентичны по составу.

В северной части Верхневильюйского КАБ в геологическом разрезе отсутствуют соленосные толщи, а гидрогеологические условия схожи с Оленекским КАБ. Южнее 64° с.ш. в разрезе с глубины 300—460 м появляются пласты нижнекембрийских солей. Подмерзлотные воды вскрываются в интервале глубин 300—2500 м и образуют серию водоносных комплексов.

Надсолевой средненижнекембрийский водоносный комплекс приурочен к отложениям метегерской и ичерской свит. По химическому составу рассолы комплекса Cl-Na с минерализацией 28—300 г/дм³ и содержанием сероводорода до 120 мг/дм³. Соленосный водоносный комплекс вскрыт в слабопроницаемых карбонатных породах нижнего кембрия. По химическому составу рассолы — Cl-Ca, по минерализации — весьма крепкие (350—400 г/дм³). Подсолевой водоносный комплекс приурочен главным образом к терригенным венд-нижнекембрийским отложениям, залегающим на глубине более 1500 м. Подземные воды комплекса являются весьма крепкими рассолами Cl Ca или Na-Ca состава с минерализацией 350—450 г/дм³.

Гидрогеологические условия Средневильюйского КАБ определяются отсутствием соленосных отложений. Подмерзлотные подземные воды вскрываются с глубины 422—433 м и формируют ордовикский, верхнекембрийский, среднекембрийский, венд-нижнекембрийский и вендский водоносные комплексы. По химическому составу подземные воды ордовикского комплекса — Cl Mg-Ca с минерализацией до 252 г/дм³, воды верхнекембрийского комплекса — крепкие рассолы Cl Ca с минерализацией до 323 г/дм³. Воды венд-нижнесреднекембрийских комплексов практически не изучены.

Таблица 1. Химический и изотопный состав соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы

№ скважины	Местоположение	Глубина отбора, м абс.	г/дм ³																%		
			Na	Mg	Ca	Cl	Br	Sr	M	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{81}\text{Br}$	$\delta^{37}\text{Cl}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$							
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16							
Оленекский КАБ																					
84	Тр. Айхал	252	3.64	3.24	4.96	24.21	0.40	0.10	38.7	—	—	0.36	0.24	—	—	—	—				
155	Тр. Заполярная	263	13.55	4.75	11.29	55.96	0.81	0.58	87.0	-127.0	-15.3	1.27	0.84	—	—	—	—				
502-Г	Тр. Поисковая	288	10.35	8.23	8.99	54.78	0.78	0.81	83.8	-120.4	-14.5	—	—	—	—	—	—				
503-Г	Тр. К-магнитная	257	10.99	9.05	10.55	63.28	0.70	0.77	95.4	-123.0	-14.9	—	—	—	—	—	—				
503-НГ	Тр. Комс.-Магнитная	296	11.52	7.83	12.47	61.96	0.82	0.60	95.4	—	—	1.47	0.97	—	—	—	—				
405	Тр. Новинка	278	11.06	7.65	10.20	54.89	1.84	0.74	86.4	-122.8	-15.6	—	—	—	—	—	—				
406	»	260	11.06	6.92	10.53	55.83	0.68	0.61	85.8	—	—	1.26	0.88	—	—	—	—				
501-НГ	Тр. Заполярная	244	11.55	8.04	9.84	57.33	0.79	0.70	88.4	-129.6	-16.5	—	—	—	—	—	—				
204	Долина р. Муна	750	9.57	6.55	7.18	49.89	0.75	0.83	85.7	-108.8	-14.1	2.31	1.30	—	—	—	—				
296	Рудник Айхал	489	27.16	13.68	43.22	160.35	2.15	0.90	252.1	-62.3	-5.1	0.23	0.04	—	—	—	0.70858				
2531	Долина р. Далдын	1650	12.41	13.74	80.92	213.54	4.53	1.93	340.1	—	—	—	—	—	—	—	0.70906				
39	Тр. Осенняя	170	8.07	10.66	16.12	70.07	1.49	0.32	110.0	—	—	—	—	—	—	—	0.7089				
11	Долина р. Далдын	135	4.81	4.96	8.53	37.70	0.70	0.14	59.1	—	—	—	—	—	—	—	0.70885				
11	»	475	26.07	12.82	34.28	201.62	3.28	0.78	316.8	—	—	—	—	—	—	—	—				
9г	Тр. Улачная	525	24.63	13.70	65.75	160.93	3.65	1.14	323.0	-3.0	-66.4	0.07	-0.40	—	—	—	—				
1-г	Тр. Зарница	252	6.51	8.98	15.66	65.22	1.14	0.38	100.1	—	—	—	—	—	—	—	0.70871				
14	»	265	7.24	9.31	19.70	59.54	1.17	0.71	111.3	-13.1	-123.0	0.38	0.01	—	—	—	0.70886				
308	Тр. Улачная	978	19.58	13.68	78.66	155.95	3.62	0.55	353.2	-2.1	-61.7	0.07	-0.35	—	—	—	0.7088				
703	»	1479	8.42	19.70	90.30	179.10	4.91	1.10	395.8	1.7	-45.3	0.14	-0.34	—	—	—	0.70882				
35	»	210	3.92	2.55	6.79	26.30	0.41	0.24	39.9	-16.5	-139.6	0.73	0.52	—	—	—	0.70803				
6	»	105	7.42	14.70	8.63	76.24	1.46	0.31	98.3	-8.9	-109.4	0.18	0.21	—	—	—	0.70919				
87	»	171	11.68	8.98	23.79	86.53	1.04	0.40	135.9	—	—	—	—	—	—	—	0.7090				
314	»	625	22.23	10.81	66.66	192.44	4.44	1.16	317.0	-5.5	-67.3	0.18	-0.22	—	—	—	—				
24	»	313	12.17	5.23	12.49	62.81	0.85	0.23	91.3	-10.2	-95.9	-0.80	-0.40	—	—	—	—				
1ц	Долина р. Далдын	525	26.31	13.62	62.80	151.20	3.23	1.04	315.2	-4.4	-69.9	-0.04	-0.23	—	—	—	—				
330	Тр. Улачная	627	36.95	8.70	60.47	139.43	3.09	0.78	316.1	-5.0	-70.5	0.24	-0.20	—	—	—	—				
310	»	1155	19.01	16.32	82.82	212.28	5.64	0.69	381.4	-8.2	-73.3	-0.07	-0.27	—	—	—	—				

312	»	753	13.37	16.32	78.05	199.15	4.35	1.28	344.6	-2.0	-0.13	-0.24	—
КСС-2	»	1400	15.89	15.58	94.14	252.40	5.24	0.82	403.5	—	-0.23	0.28	—
2У	Карьер гр. Удачная	625	28.44	14.15	69.00	223.25	3.75	1.18	352.3	—	0.00	—	0.70891
3У	»	610	25.78	14.28	78.31	235.14	3.40	1.33	372.0	-48.4	—	—	—
517	»	470	20.39	17.05	88.93	247.22	5.17	1.58	396.7	—	—	—	0.708949
Средневильный КАБ													
Н-1	Карьер Нюрбинский	244	9.01	5.44	16.43	59.26	0.91	0.00	93.0	-119.0	0.29	-0.04	—
4 ГМ	Тр. Ботубинская	540	26.36	14.11	34.03	144.94	1.91	0.74	224.6	—	0.40	0.03	0.709235
28	Тр. Мир	500	30.40	0.80	1.53	42.16	0.05	0.01	87.4	-113.2	—	1.54	0.709382
82	»	600	8.59	21.40	109.33	173.34	4.71	2.38	434.9	-39.3	0.24	-0.32	—
82	»	954	12.07	17.02	88.72	158.92	3.82	1.64	362.9	-5.2	0.18	-0.15	—
83	»	600	23.61	16.11	88.72	163.38	3.42	1.67	388.0	-4.9	0.27	0.04	—
84	»	890	—	—	—	—	—	—	315.0	-91.0	—	—	—
84	»	900	—	—	—	—	—	—	331.0	-89.0	—	—	—
25-ВП	»	410	—	—	—	—	—	—	70.2	-160.0	—	—	—
25-ВП	»	430	—	—	—	—	—	—	84.9	-163.0	—	—	—
102	»	470	—	—	—	—	—	—	91.1	-166.0	—	—	—
107	»	410	—	—	—	—	—	—	36.6	-169.0	—	—	—
Верхневильный КАБ													
ТП-1	Долина р. Нижняя	2100	40.00	9.55	78.83	239.00	4.95	—	386.3	-121.12	0.70	0.58	—
44п	Тунгуска	300	86.39	2.23	31.70	165.22	1.24	0.45	318.0	-88.46	—	-0.11	—

Примечание. М — минерализация подземных вод; анализы $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ выполнены в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток; $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ — в Университете Ватерлоо (Онтарио, Канада) и в Китайском университете Геонаук (Ухань) (выделены полужирным шрифтом); $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ определены в Страсбургском университете (Франция); прочерк — нет данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимия подземных текстуробразующих льдов. Подземные льды изучены в осадочных толщах и кимберлитовых трубках в пределах трех крупных алмазоносных районов: Верхнемунского, Далдыно-Алакитского (Оленекский КАБ) и Среднемархинского (Средневилюйский КАБ) (табл. 2).

Верхнемунский алмазоносный район. Геохимические особенности подземных льдов изучены в кимберлитах тр. Новинка. До глубины 55 м состав льдов преимущественно Cl-HCO₃ или HCO₃-Cl Ca-Mg, реже Ca-Na. Минерализация изменяется от 63 до 244 мг/дм³.

Далдыно-Алакитский алмазоносный район. В результате ранее выполненных исследований в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе выделены три геохимических типа подземных льдов: HCO₃, HCO₃-Cl и Cl, смешанного Ca-Mg или Mg-Ca состава [Алексеев, Пиннекер, 2000; Алексеев, Алексеева, 2000].

Новые данные, полученные в последние годы при бурении скважин, показали, что подземные льды в терригенно-осадочных толщах карбона, нижнего силура и ордовика имеют SO₄-HCO₃ Mg-Ca состав. Минерализация подземных льдов составляет 190—378 мг/дм³ и хорошо согласуется с выявленным ранее трендом (рис. 2).

Среднемархинский алмазоносный район. Подземные льды изучены в терригенно-осадочных толщах нижней юры и нижнего ордовика до глубины 130 м. В интервале глубин 14.0—17.5 м подземные льды имеют SO₄-HCO₃ Na-Ca состав. Минерализация льдов составляет 268 мг/дм³. С ростом глубины происходит закономерный рост минерализации и смена химического состава подземных льдов. На глубине 26.5 м состав проб Cl-HCO₃ Na-Ca. Минерализация расплавов составляет 347 мг/дм³.

В интервале глубин 41.5—43.5, 59.0—77.5 м в составе подземных льдов преобладают сульфаты и хлориды натрия и кальция, магния и кальция. Минерализация увеличивается до 880—900 мг/дм³. С глубины 118 м состав проб только Cl-HCO₃ Mg-Ca. Минерализация льдов достигает 1340—3130 мг/дм³.

При сравнении с речными водами криолитозоны (бассейн р. Сытыкан, Далдыно-Алакитский район), а также с составом подземных вод зоны гипергенеза криолитозоны, в подземных льдах установлено повышенное содержание микрокомпонентов, кроме Sc, Cr и Hf (табл. 3). Обогащение или обеднение подземных льдов микрокомпонентами непосредственно связано с первичным составом подземных вод, насыщающих горные породы, который претерпел существенное преобразование при глубоком промерзании. Повышенная глинистость осадочного разреза Оленекского КАБ способствовала накоплению в подземных водах Al, Ti, Fe. Высокие концентрации микрокомпонентов в подземных льдах осадочных отложений Средневилюйского КАБ связаны, вероятнее всего, с наличием прослоев бурого угля в юрской толще, при взаимодействии подземных вод с которыми происходило выщелачивание микроэлементов, присутствующие в углях в виде минеральных примесей (глинистых минералов, солей щелочных металлов и железа, иногда повышенных содержаний Ge, U, W и др.).

Равновесие в системе вода (рассол)—порода. Расчет равновесий подземных соленых вод и рассолов с основными минералами водовмещающих пород выполнен с использованием результатов химического анализа 110 проб подземных вод Оленекского КАБ, вскрытых в осадочных горных породах и

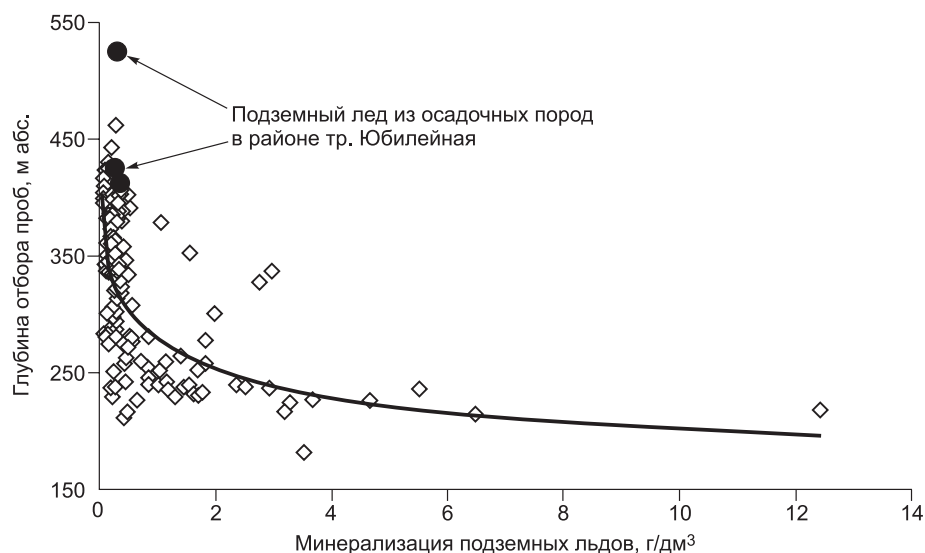


Рис. 2. Изменение минерализации подземных льдов с глубиной в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (Оленекский КАБ).

Таблица 2. Химический состав подземных текстуробразующих льдов алмазных районов северо-востока Сибирской платформы

Глубина отбора пробы, м	рН	Ионный состав, мг/дм ³								Сумма ионов, мг/дм ³
		K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	Br ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
Верхнемунский алмазный район										
2.0—2.5	7.4	2.0	2.0	24.7	4.8	5.7	0.2	<2	136.7	176.1
3.8—4.3	7.1	3.6	2.7	26.5	8.8	10.3	0.2	3.0	145.2	200.4
12—14	7.2	1.6	1.0	5.5	6.4	3.6	<0.1	<2	45.2	63.2
18.5—20.0	7.0	4.6	14.5	21.3	13.0	27.3	0.1	4.0	133.0	217.9
38—40	7.0	3.3	3.1	9.61	13.2	7.1	<0.1	<2	90.3	126.7
42—52	9.4	19.0	28.6	0.7	5.6	18.4	0.2	2.0	61.0	143.2
55—56.5	7.1	11.6	18.1	15.2	29.1	75.2	0.9	<2	94.0	244.0
Далдыно-Алакитский алмазный район										
103.0—123.5	7.7	3.3	10.5	15.4	37.1	9.2	0.1	43.0	180.6	299.2
221—228	8.2	15.7	1.5	10.2	17.3	5.7	<0.1	18.0	122.0	190.4
Среднемархинский алмазный район										
14.0—17.5	7.5	4.7	24.3	10.3	30.1	21.6	<0.1	30.5	146.5	267.9
26.5	7.7	5.6	38.5	15.2	40.1	63.1	—	64.6	119.6	346.7
41—43	<8.0	11.2	100.8	50.5	112.2	310.2	—	211.9	83.0	879.8
59—77	7.8	18.6	74.1	42.6	145.3	221.6	—	257.6	141.6	901.3
118—119	<8.0	23.3	131.9	90.0	172.3	615.1	—	207.8	100.1	1340.5
129—130	<8.0	43.2	310.0	255.4	430.9	1763.1	21.5	237.5	63.5	3133.9

кимберлитовых трубках на глубине до 1750 м. При настройке модели в систему были включены основные ионы (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Sr²⁺, Li⁺, Rb⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Br⁻), ассоциаты (H₂CO₃, Na₂SO₄, (NaSO₄)⁻, NaBr, NaCl, MgSO₄, Mg(SO₄)₂²⁻, MgBr₂, MgCl⁺, MgCl₂, (KSO₄)⁻, K₂SO₄, KBr, KCl, Ca(SO₄)₂²⁻, CaSO₄, CaBr₂, CaCl⁺, CaCl₂, HBr, SrCl⁺, SrCl₂) и породообразующие минералы, типичные для геологического разреза бассейна (кальцит, доломит, магнезит, стронцианит, ангидрит, гипс, целестин, галит). Расчет активностей компонентов, выполненный для лабораторных и пластовых условий, не показал существенного различия степени и характера насыщения подземных вод относительно основных породообразующих минералов.

Результаты физико-химического моделирования свидетельствуют, что значительная часть рассолов верхнекембрийского водоносного комплекса по отношению к карбонатным минералам (кальциту, доломиту, магнезиту и стронцианиту) находится в состоянии, близком к равновесному (рис. 3).

Наименьшая степень насыщения характерна для слабых рассолов хлоридного Mg-Ca или Ca-Mg состава с минерализацией 54—57 г/дм³. Равновесное (или квазиравновесное) состояние подземных вод обусловлено, вероятно, процессами взаимодействия в системе вода—порода: растворения и переноса вещества в результате конвекции (при больших скоростях водообмена) или молекулярной диффузии (при малых скоростях движения воды или отсутствии движения) в открытой системе. С течением времени эти процессы приводили к последовательному изменению химического состава рассолов и его глубокой метаморфизации. Рассолы венд-среднекембрийских водоносных комплексов формируют область, значительно смещенную влево от линии насыщения карбонатными минералами — в поле недонасыщения. Этими минералами насыщена только некоторая часть кислых рассолов с минерализацией от 323 до 404 г/дм³ и рН от 3.7 до 4.8.

Относительно сульфатных минералов (гипса, ангидрита и целестина) подземные рассолы бассейна недонасыщены. Это предопределяется чрезвычайно малым (иногда нулевым) содержанием сульфат-иона, а также отсутствием сероводорода в составе крепких хлоридных кальциевых рассолов бассейна.

С хлоридами (галитом, сильвинитом, карналитом, тахигидритом, бишофитом) равновесия подземных вод бассейна также не наблюдается, что закономерно, поскольку содержание натрия в рассолах, насыщающих преимущественно карбонатные отложения, невысокое — в среднем составляет 10—15 %-экв.

Следует отметить, что корректность термодинамических расчетов была доказана на практике в ходе экспериментального захоронения дренажных вод карьера тр. Удачная в многолетнемерзлые породы. При закачке дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы в течение 15 лет в эксплуатационных скважинах не наблюдалось ни ухудшения фильтрационных свойств пород, ни осаждения солей

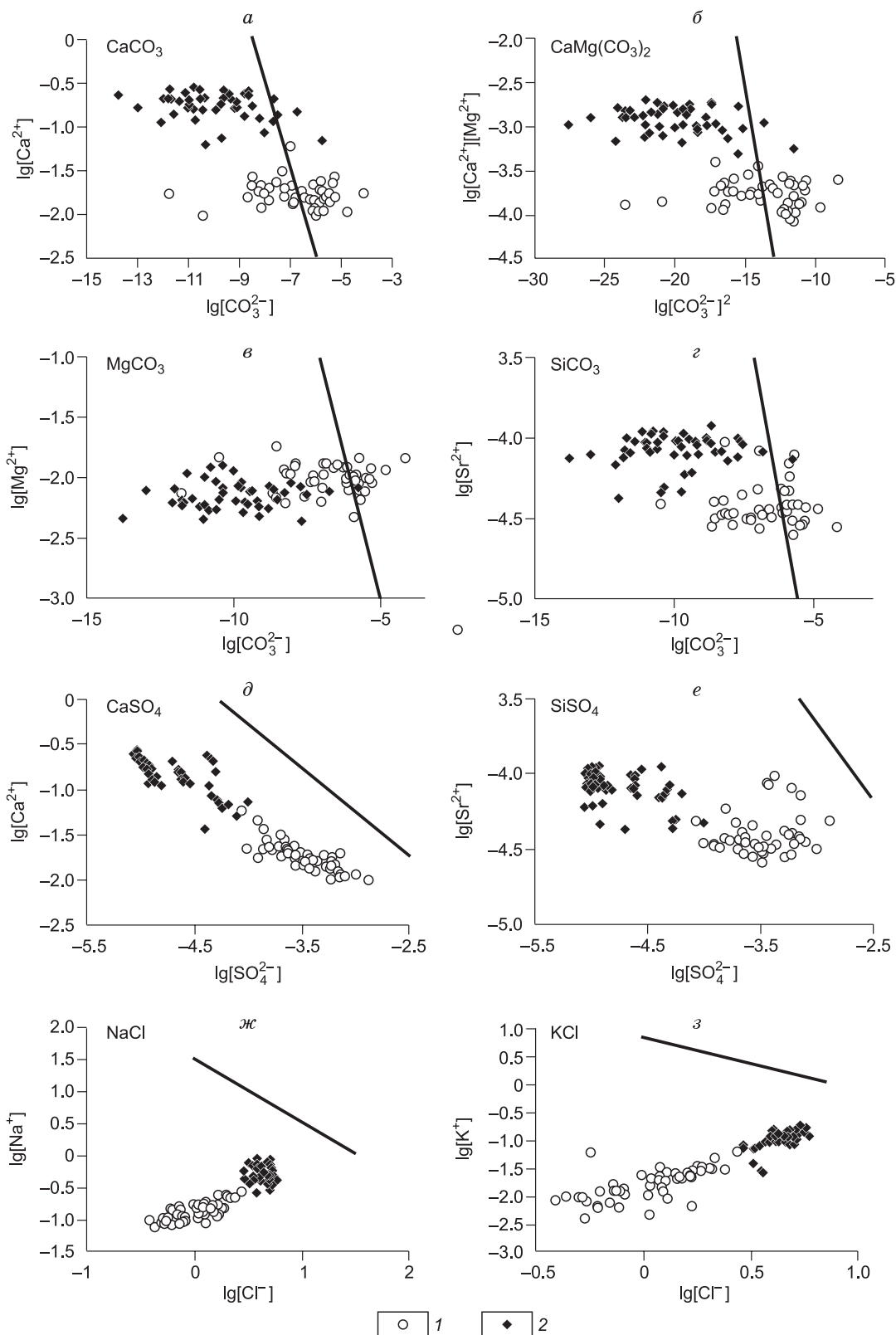


Рис. 3. Степень насыщения подземных вод Оленекского КАБ относительно карбонатных (а, б, в, г), сульфатных (д, е) и хлоридных (ж, з) минералов.

Рассолы: 1 — первой гидрохимической зоны, 2 — второй гидрохимической зоны. Линии насыщения построены с использованием констант равновесия [Bowers et al., 1984; Крайнов и др., 2004; Геологическая..., 2005].

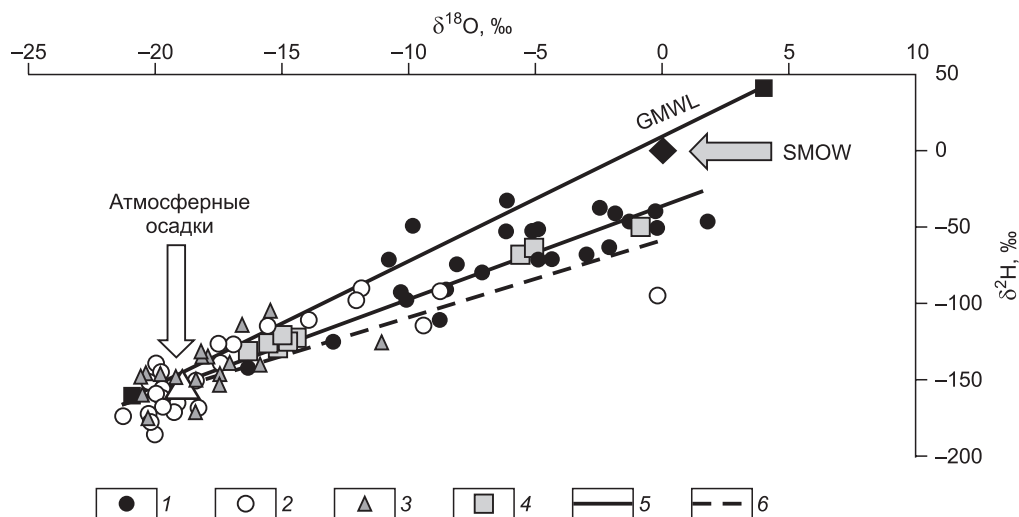


Рис. 4. Соотношение δ дейтерия и кислорода-18 в соленых водах и рассолах Сибирской платформы.

GMWL — глобальная линия метеорных вод, SMOW — стандарт среднеокеанической воды. 1 — Cl-Ca рассолы осадочных отложений; 2 — Cl-Na соленые воды и рассолы осадочных отложений; 3 — поверхностные воды; 4 — воды обводненных зон и кимберлитовых тел; тренды: 5 — Cl-Ca рассолов, 6 — Cl-Na соленых вод и рассолов.

в приквaziнном пространстве, что непременно происходило бы в случае пересыщенности (или даже равновесного состояния в пластовых условиях) рассолов минералами вмещающих пород.

Изотопы в подземных соленых водах и рассолах. Исследования изотопного состава подземных вод, выполненные ранее в пределах Сибирской платформы, позволили установить особенности распределения *стабильных изотопов водорода и кислорода* [Пиннекер и др., 1987; Алексеев и др., 2007]. По значениям $\delta^{18}\text{O}$ и δD все соленые подземные воды и рассолы разделены на 2 группы: 1) хлоридные натриевые с пониженным содержанием тяжелых изотопов, что свойственно поверхностным водам, 2) хлоридные кальциевые, обогащенные кислородом-18 (от -16.76 до $+1.73$ ‰) и дейтерием (от -194.90 до -30.62 ‰). Показано, что дифференциация геохимических типов вод обусловлена связью изотопного состава рассолов с их минерализацией и с глубиной их залегания. Существенное утяжеление изотопного состава хлоридных рассолов происходит при минерализации подземных вод более 300 г/дм³. Тренды изотопного состава рассолов Сибирской платформы лежат несколько ниже и под углом к GMWL, т.е. хлоридные натриевые и кальциевые рассолы обогащены дейтерием и кислородом-18 по сравнению с метеорными и поверхностными водами (рис. 4). Новые данные о содержании стабильных изотопов кислорода и водорода в подземных водах обводненных зон кимберлитов Западной Якутии, полученные нами, хорошо укладываются в диапазон изменения δD и $\delta^{18}\text{O}$ для соленых вод и рассолов Сибирской платформы. Часть проб подземных рассолов, отобранных из карьеров кимберлитовых трубок Удачная и Айхал, попадают точно на линию тренда хлоридных кальциевых рассолов, что, безусловно, свидетельствует в пользу седиментогенно-метаморфогенной гипотезы происхождения рассолов, насыщающих обводненные зоны кимберлитовых тел.

Пробы подземных вод, отобранные из обводненных зон кимберлитовых трубок Новинка, Заполярная, Поисковая, Комсомольская-Магнитная и Нюрбинская, тяготеют к группе соленых вод и рассолов с облегченным изотопным составом кислорода и водорода, что характерно для поверхностных вод. Это дает основание полагать, что метеорные воды участвовали в разбавлении седиментогенных вод до минерализации менее 100 г/дм³.

Исследование распределения изотопов хлора и брома в подземных водах КАБ Сибирской платформы показало, что значения $\delta^{37}\text{Cl}$ в подземных соленых водах и рассолах колеблются в пределах $-0.527...+1.302$ ‰ (SMOC), что входит в диапазон значений для подземных вод различных регионов мира (рис. 5).

Значения $\delta^{81}\text{Br}$ изменяются от -0.80 до $+2.31$ ‰ (SMOB) и перекрывают эти величины в подземных водах кристаллических пород Канадского и Фенноскандинавского щитов, однако очень близки к значениям $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах осадочного бассейна Уиллистон (Северная Америка). Для подземных вод кимберлитов и осадочных отложений КАБ характерна линейная зависимость между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0.8), что может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимиче-

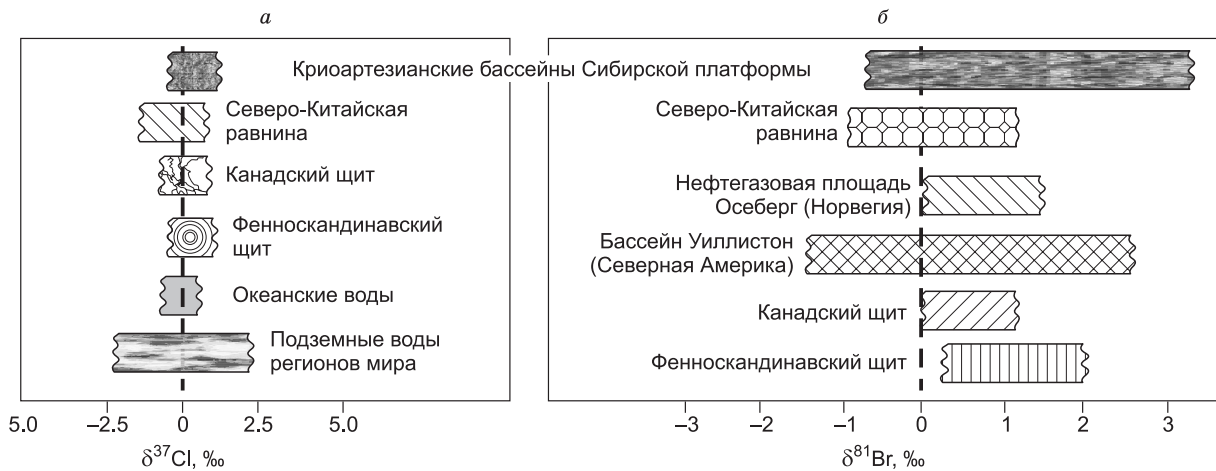


Рис. 5. *a* — вариации $\delta^{37}\text{Cl}$ (SMOC - Standard Mean Ocean Chloride); *б* — вариации $\delta^{81}\text{Br}$ (SMOB — Standard Mean Ocean Bromide) в природных водах, подземных соленых водах и рассолах некоторых регионов мира и КАБ северо-востока Сибирской платформы.

ских процессов на преобразования состава подземных вод в системе вода—порода. Значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ контролируются не только составом рассолов, но и их минерализацией.

Особенности изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных рассолах отражают степень взаимодействия в системе вода—порода. В геохимии изотопов стронция установлен ряд реперных значений, в том числе для древней ювенильной воды — 0.70854 [Вишневская и др., 2013] и современной морской воды — 0.70918 [Lackschewitz et al., 2004]. Изотопные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах осадочных отложений и кимберлитов Оленекского КАБ с минерализацией 40—397 г/дм³ попадают в достаточно узкий интервал: от 0.70803 до 0.70938, близкий к морской воде (рис. 6).

Это свидетельствует о том, что формирование подземных вод Оленекского КАБ тесно связано с кембрийскими обстановками соленакопления, и происходило оно в результате захоронения маточной рапы древних солеродных бассейнов. Эволюция гидрогеологических систем в течение длительного времени шла в условиях закрытой системы на фоне неоднократных этапов тектономагматической активизации [Алексеева и др., 2014].

Формирование состава хлоридных кальциевых рассолов. Главная особенность гидрогеологического разреза КАБ северо-востока Сибирской платформы состоит в том, что здесь повсеместно и на всю мощность осадочного чехла (до глубины 2—3 км) распространены подземные воды единого химического типа — хлоридные соленые воды и рассолы. Два основ-

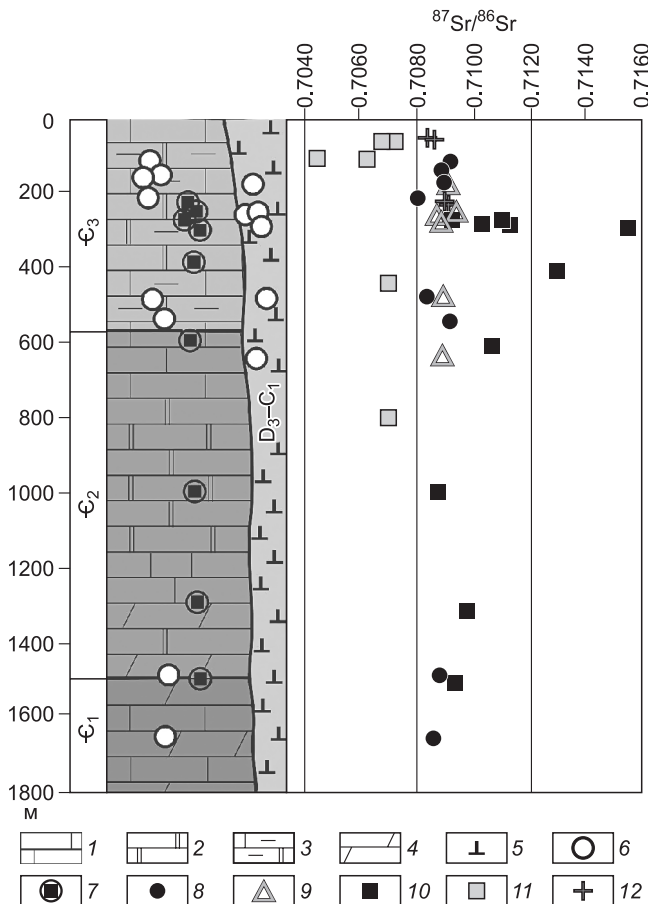


Рис. 6. Sr-изотопная характеристика геологического разреза Оленекского КАБ.

1 — известняки; 2 — доломиты; 3 — глинистые известняки и доломиты; 4 — алевролиты, мергели; 5 — кимберлиты; место отбора: 6 — проб воды, 7 — образцов пород; стронциевые отношения: 8 — в подземных водах осадочных отложений, 9 — в подземных водах кимберлитовых труб, 10 — в осадочных отложениях, 11 — в кимберлитах [Масловская, 1985], 12 — в подземных текстуробразующих льдах.

ных подтипа подземных вод — хлоридный натриевый и хлоридный кальциевый — отличаются по происхождению, закономерностям распространения, содержанию микрокомпонентов. Базовые качественные признаки подтипов определяются строением геологического разреза, а именно наличием или отсутствием галогенных толщ.

Особый интерес представляет установленное в Оленекском КАБ существенное недонасыщение крепких рассолов карбонатами. Неравновесность подземных вод с карбонатными минералами могла быть вызвана рядом причин — изменением интенсивности водообмена, времени взаимодействия воды с горными породами, *P–T*-условий или локальными причинами [Геологическая..., 2005]. При относительном постоянстве этих факторов в ходе геолого-геохимической эволюции бассейна степень равновесия крепких рассолов с карбонатами могла измениться и в результате разбавления рассолов солоноватыми или пресными подземными водами.

Между тем начиная с плиоцена подземные воды зоны активного водообмена в пределах Оленекского КАБ полностью заморожены. Горные породы, трещины и поры которых заполнены текстурообразующими льдами, слагают верхний ярус криолитозоны. Его подстилают охлажденные до $-3...0^{\circ}\text{C}$ породы с напорными рассолами — криопэггами, образуя нижний ярус охлаждения. При таком строении мерзлотно-гидрогеологического разреза процесс разбавления рассолов, казалось бы, должен быть исключен.

Тем не менее, учитывая особую способность рассолов плавить лед при отрицательной температуре среды и высокую льдистость многолетнемерзлых пород, можно объяснить появление дополнительного объема воды, снижающего величину минерализации рассолов при переходе льда в жидкую фазу. Результатами взаимодействия рассолов со льдом при отрицательной температуре могут быть полное или частичное плавление льда, опреснение и стратификация жидкой фазы по плотности, образование «вторичного» солоноватого льда, восстановление проницаемости мерзлых литифицированных горных пород, формирование протяженных таликовых зон.

В КАБ контактирование отрицательно-температурных хлоридных рассолов (криопэггов) с многолетнемерзлыми породами прослеживается повсеместно. При современных температурах мерзлой толщи (в среднем $-2...-6^{\circ}\text{C}$, минимально до -13°C) криопэги не замерзают, поскольку температура кристаллизации растворенных в них солей NaCl и CaCl_2 составляет -21.4 и -55.0°C соответственно. При отрицательной температуре, более высокой, чем температура замерзания рассола, на границе лед—рассол нарушается термодинамическое равновесие, возникает концентрационная диффузия растворенных солей, в результате чего лед плавится, а концентрация рассола уменьшается. Взаимодействие в системе лед—рассол сопровождается изменением объема при переходе твердой фазы в жидкую и разбавлением концентрированных растворов.

Соленые воды и рассолы как гидроминеральные ресурсы. В недрах КАБ Сибирской платформы находятся огромные ресурсы гидроминерального сырья. В хлоридных магниевых-кальциевых рассолах содержание лития, рубидия, стронция, брома и др. многократно превышает концентрации этих элементов в водах, что позволяет рассматривать рассолы как промышленное сырье. В настоящее время минимальные концентрации ряда элементов, представляющих промышленный интерес (кондиционное содержание), составляют (мг/дм^3): литий — 10—20, рубидий — 3—5, стронций — 300, бром — 150—250, а реальное содержание этих компонентов в рассолах во много раз больше (табл. 4). Из таблицы видно, что в качестве гидроминерального сырья для добычи ценных компонентов могут рассматриваться не только подземные воды водоносных комплексов и обводненных зон кимберлитов, но и дренажные рассолы алмазодобывающих карьеров. Порядок содержания брома, лития, рубидия и стронция в этих рассолах одинаково большой.

Отработка крупнейших алмазных месторождений (трубки Удачная, Мир), которые находятся в пределах Оленекского и Верхневилуйского КАБ, многие годы осложнена притоком хлоридных подземных рассолов. За время проведения горных работ общий объем откачанных дренажных вод превысил 27 млн м^3 (карьер тр. Удачная) и 300 млн м^3 (карьер тр. Мир). Изоляция дренажных вод алмазодобывающих карьеров осуществляется посредством захоронения в многолетнемерзлые породы или в водоносные комплексы. Однако одним из способов утилизации дренажных вод может быть использование их в качестве сырья для совместного извлечения полезных компонентов, в том числе лития, рубидия, брома и стронция.

На основе данных о притоке дренажных вод в карьер тр. Удачная и содержания ценных компонентов в этих водах рассчитано количество лития, брома, рубидия и стронция, выносимое в горную выработку с рассолами. Для оценки использованы материалы Удачнинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) и ИЗК СО РАН за период 2006—2014 гг. Расчеты показывают, что при средних концентрациях (в мг/дм^3): лития — 148, брома — 3000, рубидия — 16.6 и стронция — 894 в дренажных водах и реальном водопитоке в карьер Удачный с дренажными рассолами выносится в среднем в год: до 250 т лития, около 5000 т брома, около 30 т рубидия, до 1500 т стронция, а при прогнозном увеличении водопитоков до 300 $\text{м}^3/\text{ч}$ (7200 $\text{м}^3/\text{сут}$) среднее значение этих величин будет превышено в 1.5—2 раза.

Таблица 3.

Среднее содержание микрокомпонентов (мкг/дм³) в подземных текстурообразующих льдах и речных водах

Микрокомпонент	Верхнемунский район (кимберлиты)	Далдыно-Алакитский район (песчаники, известняки)	Среднемархинский район		р. Сытыкан
			песчаники, известняки	кимберлиты	
Li	6.89	49.35	129.12	17.95	11.7
B	221.08	665.93	882.36	163.35	63
Al	34.45	168.6	9.48	237.15	9.3
Si	791.43	733.84	1611.73	654.05	865
P	48.80	11.65	7.38	39.4	9.8
S	3327.9	—	75352	—	5099
Sc	0.02	0.03	0.09	—	0.64
Ti	2.92	5.26	0.46	15.95	0.42
V	1.3	1.13	3.31	1.2	0.37
Cr	2.83	0.49	0.19	—	0.75
Mn	7.82	18.54	104.62	100.55	2.49
Fe	104.33	75.55	3.31	19.45	4.72
Co	0.23	0.73	10.4	2.7	0.07
Ni	7.57	5.08	45.57	—	1.24
Cu	3.66	1.71	2.22	6.78	3.1
Zn	5.05	5.73	7.94	16.2	9.9
Ga	0.02	0.2	0.1	0.16	0.004
Ge	0.008	0.03	0.14	—	0.49
As	0.58	0.86	11.47	—	0.44
Se	0.18	0.18	1.38	—	—
Br	437.3	306.83	9914.72	—	172
Rb	4.44	14.16	23.59	10.17	1.14
Sr	391.1	678.1	3446.43	351.2	195
Y	0.04	0.04	0.03	0.65	0.03
Zr	0.13	0.21	0.04	1.6	0.18
Nb	0.02	0.01	0.002	—	0.001
Mo	0.69	45.38	56.85	1.73	0.39
Ag	0.01	0.01	—	—	—
Cd	0.02	0.45	0.02	0.07	—
Sn	—	1.1	0.02	—	0.02
Sb	0.14	1.42	0.14	0.64	0.29
Cs	0.009	0.09	62.29	0.14	0.003
Ba	46.53	37.01	0.001	6.57	65
Hf	0.003	0.01	0.73	—	0.005
Ta	0.0005	0.0008	—	—	—
W	0.22	1.46	0.14	—	0.06
Re	0.0012	0.02	0.05	—	0.001
Tl	0.048	0.03	0.12	0.06	—
Pb	1.80	0.04	0.05	0.88	0.04
Bi	0.034	—	0.02	0.01	0.0004
Th	0.028	0.01	0.02	0.22	0.001
U	0.06	0.75	5.28	0.18	0.48

Если оценить потери промышленных компонентов с начала осушения карьера (из расчета по их минимальной концентрации в дренажных водах), то при общем объеме (27 217 000 м³) откачанных вод за период 1985—2014 гг. они составили: лития — более 380 т, брома — 16 000 т, рубидия — около 52 т, стронция — более 4000 т. Это колоссальное количество потерянных ценных компонентов убеждает в необходимости использования дренажных вод карьера кимберлитовой тр. Удачная, являющихся ценнейшим гидроминеральным сырьем и неисчерпаемым источником химических товарных продуктов.

Таблица 4. Содержание некоторых ценных компонентов в рассолах КАБ Сибирской платформы

КАБ	Подземные воды	Содержание	Компонент				
			М	г/дм ³			
				г/дм ³	Br ⁻	Li ⁺	Rb ⁺
Верхневиллюйский	Соленосный водоносный комплекс (С ₁)	Макс.	444.6	6.8	90.5	4.5	2549
		Мин.	169.8	2.0	5.8	1.1	362
		Среднее	404.0	5.9	39.1	3.6	1959
	Подсолевой водоносный комплекс (V-С ₁)	Макс.	433.9	6.7	90.0	6.9	2900
		Мин.	169.8	0.9	0.9	0.1	1300
		Среднее	356.3	3.1	22.3	4.5	2200
Оленекский	Водоносный комплекс (С ₃)	Макс.	252.2	2.6	120.8	7.7	866
		Мин.	31.1	0.1	3.1	0.1	58
		Среднее	92.0	1.0	33.3	1.2	311
	Водоносные комплексы (V-С ₂)	Макс.	411	6.5	415.3	46.4	2168
		Мин.	195.8	2.3	34.1	3.0	357
		Среднее	328.0	4.2	183.4	14.6	1192
	Дренажные воды карьера тр. Удачная	Макс.	396.7	5.2	299.8	32.5	1578
		Мин.	96.8	0.6	13.9	1.9	154
		Среднее	272.3	3.0	147.7	16.6	894

Рассматривая в целом хлоридные кальциевые рассолы, следует констатировать, что значительные содержания микрокомпонентов делают их чрезвычайно привлекательными в качестве комплексного гидроминерального сырья. Оценка только по осредненным содержаниям полезных компонентов показывает многократное превышение кондиционных норм (рис. 7).

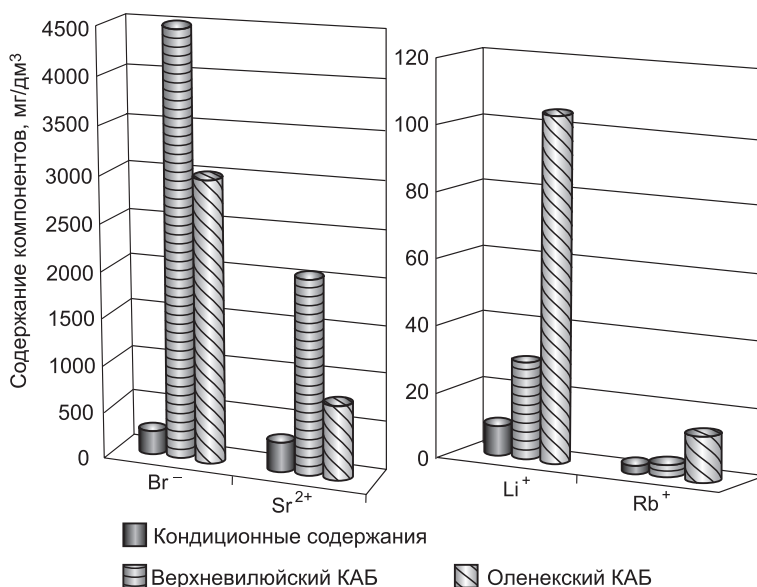
В целом подземные воды Верхневиллюйского КАБ характеризуются большим содержанием брома и стронция, а для соленых вод и рассолов Оленекского КАБ свойственно большее содержание лития и рубидия. Концентрации ценных компонентов (брома, лития, стронция) выше средних значений в том и другом районах встречаются в 45—50 % проанализированных проб подземных вод (рубидия — в 12—18 % проб). Следовательно, потенциальная возможность использования соленых и рассольных вод в качестве промышленных вод для совместного извлечения редких элементов очень высока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Глубокое промерзание обводненных осадочных и магматических пород артезианских бассейнов в позднем кайнозое сопровождалось подземным льдообразованием. Специфика геохимии подземных льдов — результат взаимодействия в системе вода—порода. Переход в раствор карбонатных, сульфатных и хлоридных солей происходил до эпохи похолодания, а современный химический состав подземных льдов обусловлен процессами криогенеза.

2. Длительная эволюция артезианских бассейнов на северо-востоке Сибирской платформы определила формирование сложнопостроенных гидрогеологических разрезов и своеобразие гидрохимической зональности, которая выразилась в широком распространении подземных вод единого химического типа — хлоридных солей.

Рис. 7. Превышение среднего содержания ценных компонентов подземных рассолов Верхневиллюйского и Оленекского КАБ над их кондиционными концентрациями для промышленных вод.



ных вод и рассолов. Рассолы имеют признаки метеогенных и седиментогенных вод, а также их смешения в ходе геологической эволюции системы вода—порода.

3. Вариации стабильных изотопов (^{18}O , D , ^{37}Cl , ^{81}Br , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) являются важнейшим генетическим признаком формирования рассолов в результате либо растворения галогенных горных пород, либо глубокого преобразования захороненной рапы солеродных бассейнов в условиях различной степени закрытости гидрогеологических систем.

4. В масштабе геологического времени формирование состава хлоридных рассолов после захоронения маточной рапы в терригенно-карбонатной толще происходило в результате длительного взаимодействия с водовмещающими породами в условиях замедленного водообмена, палеозойско-мезозойской активизации с огромными масштабами кимберлитового и траппового магматизма, на которые накладывались процессы криогенеза при глобальном плиоцен-плейстоценовом похолодании климата.

5. Поликомпонентные высокоминерализованные подземные воды криоартезианских бассейнов — это уникальное гидроминеральное сырье для извлечения ценных промышленных компонентов. Эксплуатационные запасы дренажных хлоридных кальциевых рассолов алмазодобывающих карьеров являются достаточной базой для организации безотходного производства ценных компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев С.В. Новые данные об изотопном составе (^{18}O и ^2H) подземных вод кимберлитовых полей (Западная Якутия) / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, А.М. Кононов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2013, № 2(43), с. 93—99.

Алексеев С.В., Борисов В.Н. Химический состав подземных льдов трубки Северная // Гляциологические исследования в Восточной Сибири. Иркутск, 1985, с. 129—137.

Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Гидрогеохимия криолитозоны центральной части Якутской алмазодобывающей провинции // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 4, с. 89—96.

Алексеев С.В., Пиннекер Е.В. Геохимия подземных льдов в осадочных толщах Якутии // ДАН, 2000, т. 373, № 5, с. 660—662.

Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н., Шоуакар-Сташ О., Фрейн Ш., Шабо Ф., Кононов А.М. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 291—304.

Алексеева Л.П. Изотопное стронциевое отношение ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в подземных льдах и водах Оленекского артезианского бассейна (Западная Якутия) / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, А.М. Кононов // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2014. № 6(49), с. 97—104.

Брандт С.Б., Борисов В.Н., Лепин В.С., Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ржещичкий Ю.П., Солодянкина В.Н. Изотопные отношения стронция в некоторых природных водах Сибири: Междунар. геол. конгресс, XXV сессия. Геохимия, минералогия, петрология. М., Наука, 1976, с. 98—105.

Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. Томского политех. ун-та, 2002, т. 305, вып. 6, с. 348—365.

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) / ДАН, 2013, т. 449, № 3, с. 317—321.

Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода—порода: в 5 томах. Т. 1. Система вода—порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / Ред. С.Л. Шварцев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005, 244 с.

Готовцев С.П. Исследование льдистости скальных пород Сибирской платформы // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии. Якутск, 1983, с. 66—72.

Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазодобывающей провинции. Новосибирск, Наука, 1994, 167 с.

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М., Наука, 2004, 677 с.

Масловская М.Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса: Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Иркутск, 1985, 20 с.

Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / Ред. П.И. Мельников. Новосибирск, Наука, 1984, 192 с.

Пиннекер Е.В., Шварцев С.Л. Изотопы стронция в рассолах Сибирской платформы // Докл. РАН, 1996, т. 351, № 1, с. 109—111.

Пиннекер Е.В., Борисов В.Н., Кустов Ю.И., Брандт С.С., Днепровская Л.В. Новые данные об изотопном составе кислорода и водорода рассолов Сибирской платформы // Водные ресурсы, 1987, № 3, с. 105—115.

Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.

Устинова З.Г. К гидрохимии кимберлитов трубок Якутии // Вопросы геохимии подземных вод. М., Недра, 1964, с. 237—252.

Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // Геохимия, 2000, № 11, с. 1170—1184.

Alexeev S.V., Alexeeva L.P. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2002, v. 13, p. 53—59.

Bowers T.S., Jackson K.J., Helgeson H.C. Equilibrium activity diagrams. Berlin, Springer-Verlag, 1984, 397 p.

Lackschewitz K.S., Devey W., Stoffers P., Botz R., Eisenhauer A., Kummetz M., Schmidt M., Singer A. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of hydrothermal alteration processes in the active, submarine, felsic-hosted PACMANUS field, Manus Basin, Papua New Guinea // Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, v. 68, № 21, p. 4405—4427. doi:10.1016/j.gca.2004.04.016.

Shouakar-Stash O., Alexeev S.V., Frapе Sh., Alexeeva L.P., Pinneker E.V. Geochemistry and stable isotopic signatures of deep groundwaters and brine from the permafrost zone of the Siberian platform, Russia // GSA Annual Meeting «Science at highest level». Denver, Colorado (USA), 2002, p. 218—224.

Shouakar-Stash O., Alexeev S.V., Frapе S.K., Alexeeva L.P., Pinneker E.V. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep groundwaters, of the Siberian platform, Russia // Appl. Geochem., 2007, v. 22, № 3, p. 589—605.

*Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г.
Г.А. Аношиным*

*Поступила в редакцию
22 августа 2016 г.*