

А. В. Черных^{1}, Д. А. Новиков¹, Д. А. Токарев¹*

Гидрогеохимия нижнего кембрия Сибирской платформы

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексных исследований химического состава подземных вод нижнекембрийских отложений Сибирской платформы. В пределах семи горизонтов (усольского, эльгянского, толбачанского, урицкого, олекминского, чарского и наманинского) выявлено доминирование натриевых до кальциево-магниевых и магниевых хлоридных рассолов с величиной общей минерализации, достигающей 632 г/дм³. Наиболее минерализованные воды распространены в усольском горизонте южной и юго-западной части Сибирской платформы. В пределах изучаемой территории содержания некоторых микрокомпонентов значительно превышают нижние пределы концентраций для потенциального минерального сырья и достигают (г/дм³): Sr до 10; Br – до 1,2; Li – до 0,8; Rb – до 0,2 и Cs – до 0,013. На основе сравнительного анализа генетических коэффициентов установлено распространение двух генетических групп подземных вод: инфильтрационных хлоридных с преобладанием катионов натрия в составе, и седиментогенно-инфильтрационно-метаморфических крепких хлоридных рассолов с преобладанием катионов кальция в составе.

Ключевые слова: гидрогеохимия, сверхкрепкие рассолы, солеродный бассейн, кембрий, степень метаморфизации, генетический тип, Сибирская платформа

A. V. Chernykh^{1}, D. A. Novikov¹, D. A. Tokarev¹*

Hydrogeochemistry of the Lower Cambrian of the Siberian Platform

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of comprehensive studies of the groundwater chemical composition of the Lower Cambrian of the Siberian Platform deposits. Within seven horizons (Usolsky, Elgyansky, Tolbachany, Uritsky, Olekminsky, Charsky and Namaninsky) the dominance of Na to Ca-Mg and Mg Cl brines with a TDS reaching 632 g/dm³ was revealed. The extrastrong brines are found in the Usol horizon of the southern and southwestern parts of the Siberian Platform. Within the study area, the contents of some microcomponents significantly exceed the lower concentration limits for potential mineral raw materials and reach (g/dm³): Sr up to 10; Br up to 1.2; Li up to 0.8; Rb up to 0.2 and Cs up to 0.013. Based on a comparative analysis of genetic coefficients the distribution of two genetic groups of groundwater was established: infiltrating chloride with a predominance of sodium cations in the composition, and sedimentogenic-infiltrating metamorphic strong chloride brines with a predominance of calcium cations in the composition.

Keywords: hydrogeochemistry, extrastrong brines, saline basin, Cambrian, degree of metamorphism genetic type, Siberian Platform

Введение

Кембрийский период для гидрогеологии Сибирской платформы имеет особое значение, поскольку в это время на ее территории существовал крупнейший

в мире солеродный бассейн. Следствием этого стало формирование сверхкрепких рассолов хлоридного кальциевого состава с величиной общей минерализации более 650 г/дм^3 . Помимо этого, гравитационное опускание кембрийских рассолов в нижезалегающие вендские водоносные горизонты явилось, в том числе, причиной вертикальной инверсионной гидрогеохимической зональности протерозойских отложений [1]. Гидрогеологические условия кембрия Сибирской платформы рассматривались в целой серии публикаций авторитетных ученых [2-9]. В настоящей работе рассматриваются общие черты гидрогеохимии кембрийских рассолов и впервые представлены карты химического состава и общей минерализации подземных вод усольского и толбачанского горизонтов Сибирской платформы. Дана первая попытка оценить степень катагенетических изменений рассолов.

Методы и материалы

Основой для настоящего исследования послужили гидрогеохимические материалы, полученные ведущими геологическими коллективами за длительный период времени. Сформированная база данных включает в себя результаты испытаний 269 скважин 155 поисковых площадей и ПХА (включая микрокомпоненты) 771 пробы подземных вод в пределах Сибирской платформы. Химические типы подземных вод выделены по классификации С.А. Щукарева [10]. На расчете основных генетических коэффициентов ($r\text{Na}/r\text{Cl}$, Ca/Cl , Cl/Br , V/Br , $\text{Sr}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$ и $\text{Br}/\text{Cl} \cdot 10^{-3}$) выявлены особенности генезиса подземных вод. Применение интегрированного показателя метаморфизации рассолов (S) [11] позволило сравнить уровень метаморфизации различных химических типов подземных вод изучаемых горизонтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На территории Сибирской платформы в раннем кембрии выделяются три фациальных региона: Туруханско-Иркутско-Олекминский, Анабаро-Синский и Юдомо-Оленекский. Для нижнего кембрия Анабаро-Синского и Туруханско-Иркутско-Олекминского установлены самостоятельные региональные стратиграфические подразделения, а для Юдомо-Оленекского они отсутствуют [12-14].

Для Туруханско-Иркутско-Олекминского региона, охватывающего центральную и южную части Сибирской платформы, выделены четыре фациальных области: Иркутско-Байкитская, Ботуобинско-Олекминская, Бахтинская и Туруханская, каждая из которых разделена на фациальные районы. Для нижнего кембрия здесь установлены следующие горизонты: усольский, эльгянский, толбачанский, урицкий, олекминский, чарский и наманский.

Широко охарактеризованы гидрогеохимическим материалом усольский, толбачанский и чарский горизонты, подземные воды изучаемых горизонтов хлоридные от натриевых до кальциево-магниевых и магниевых (рис. 1).

В усольском горизонте величина общей минерализации изученных вод изменяется в пределах от 34,7 (скв. Кийская-180) до $632,7 \text{ г/дм}^3$. Наиболее минерализованные рассолы (более 550 г/дм^3) установлены в южной и юго-западной ча-

сти Сибирской платформы (Карахунская, Балыхтинская, Марковская площади и др.) и имеют преимущественно хлоридный кальциевый состав. На остальной территории в наибольшей степени распространены Cl Na-Ca и Ca-Na рассолы, величина общей минерализации которых от 250 до 400 г/дм³ (рис. 2). Рассолы с преобладанием в составе катионов магния установлены в пределах Шамановской, Тутурской, Седановской и Юрегинской площадей. Водородный показатель подземных вод усольского горизонта варьирует от 1,3 до 10,0 составляя в среднем 5,8; окислительно-восстановительный потенциал – от -425 до -15 мВ, при среднем -160 мВ. Рассолы вышележащего эльгянского горизонта изучены в пределах Верхнечонской, Даниловской и Чучуканской площадей, величина их общей минерализации изменяется от 282,4 до 446,1 г/дм³, pH 2,6-7,8, состав преимущественно хлоридный натриево-кальциевый.

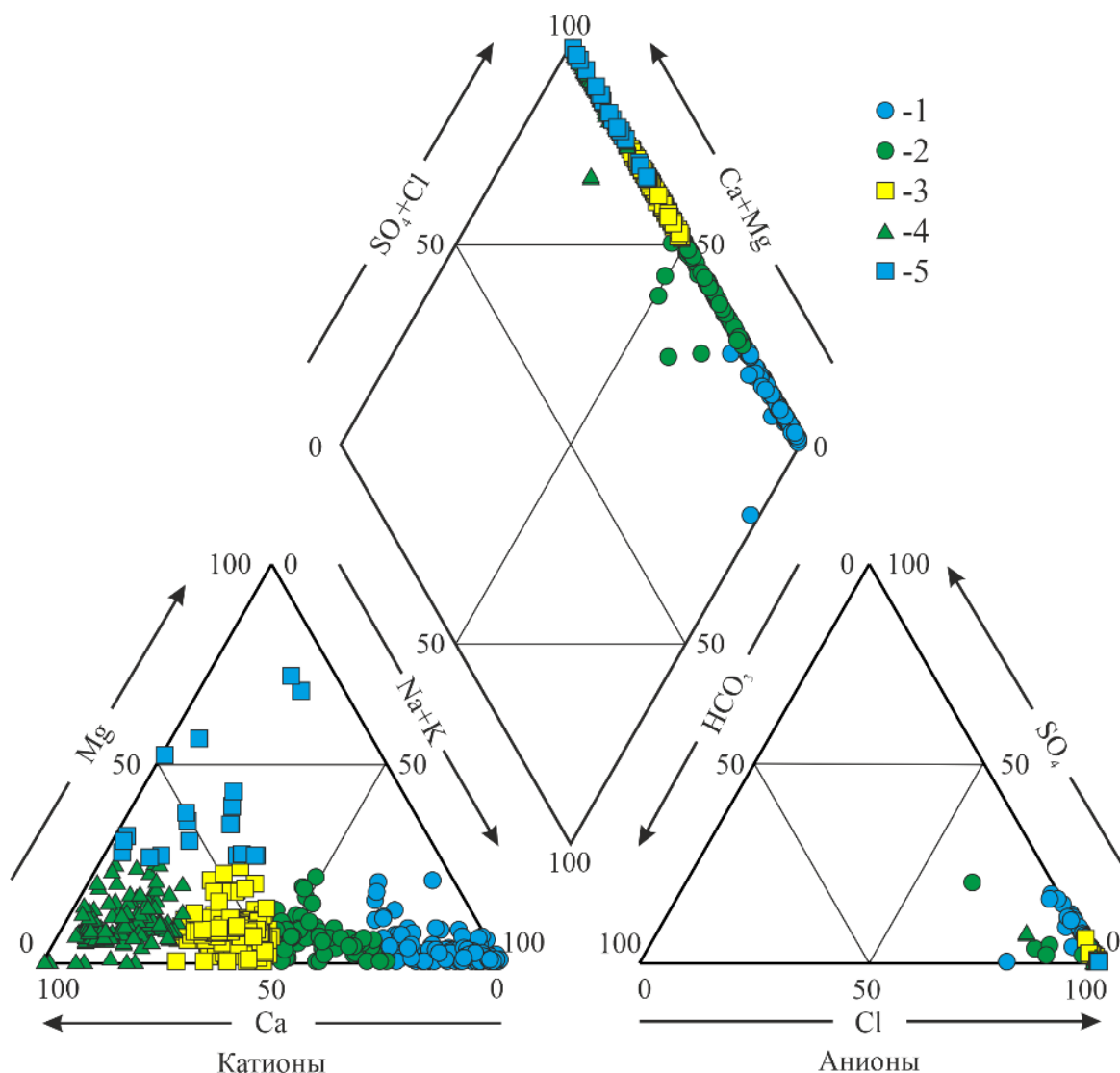


Рис. 1. Диаграмма Пайпера состава подземных вод нижнекембрийский отложений Сибирской платформы.

Химические типы хлоридных рассолов (по С.А. Шукареву): 1 – натриевый; 2 – с преобладанием катионов натрия; 3 – с преобладанием катионов кальция и натрия; 4 – кальциевый; 5 – с преобладанием катионов кальция и магния.

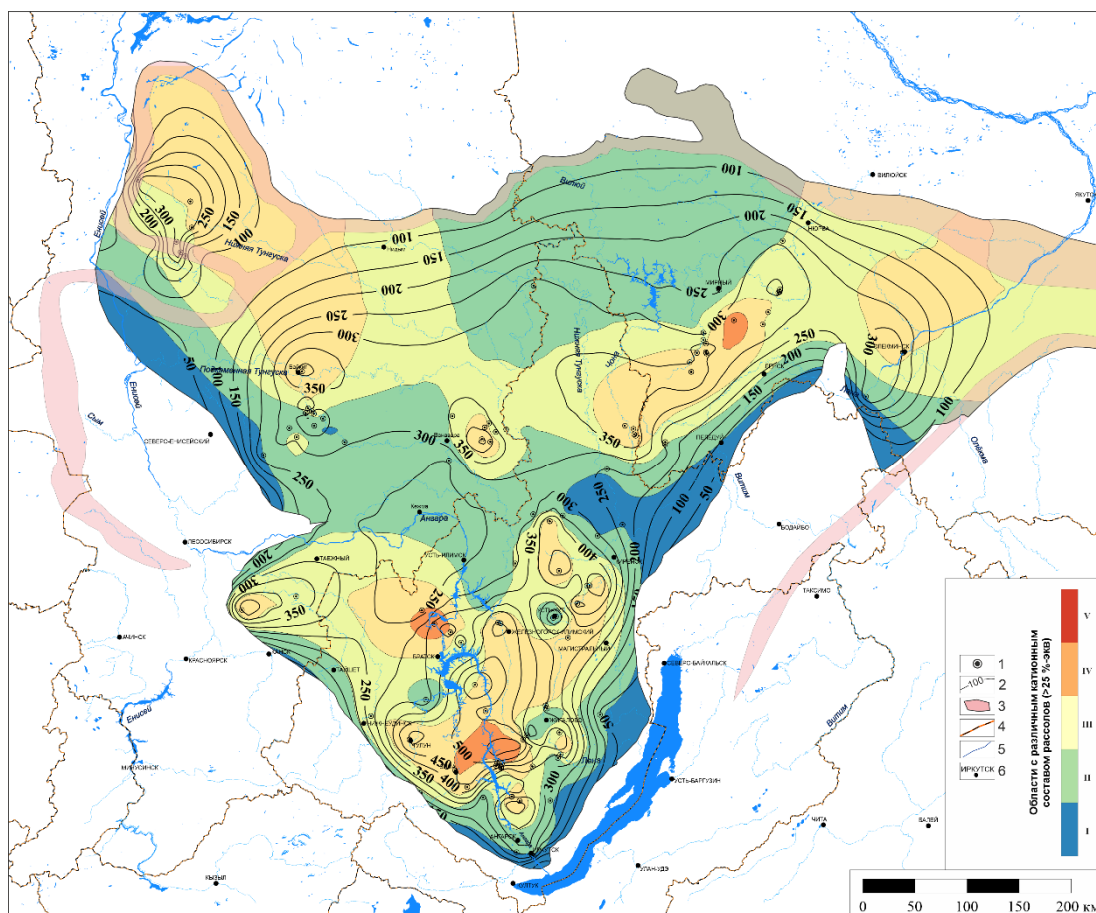


Рис. 2. Карта общей минерализации и химического состава подземных вод усольского горизонта.

1 – скважины; 2 – изоминеры, г/дм³; 3 – зона развития ранне-среднекембрийского рифового комплекса; 4 – границы субъектов РФ; 5 – гидросеть; 6 – населенные пункты. Химические типы хлоридных рассолов (по С.А. Щукареву): I – натриевый; II – с преобладанием катионов натрия; III – с преобладанием катионов кальция и натрия; IV – кальциевый; V – с преобладанием катионов кальция и магния.

Среди химических типов подземных вод толбачанского горизонта пользуются большим распространением хлоридные с преобладанием натрия и кальция (см. рис. 1). Величина общей минерализации варьирует в пределах от 26,5 (скв. Ангарская-130) до 512,2 г/дм³, рассолы с минерализацией свыше 500 г/дм³ выявлены на Айхальской и Ковыктинской площадях. Слабоминерализованные рассолы преобладают в периферийных частях изучаемой территории, наибольшее распространение на остальной территории имеют рассолы с минерализацией, изменяющейся в пределах от 300 до 400 г/дм³ (рис. 3). Хлоридные кальциево-магниевые рассолы установлены в пределах Илимской и Нижнетунгусской площадей. Доминируют восстановительные условия (Eh от -365 до -120 мВ), по

значению рН воды от сильно кислых до сильно щелочных (3,8-11,4), при доминировании слабокислых и нейтральных.

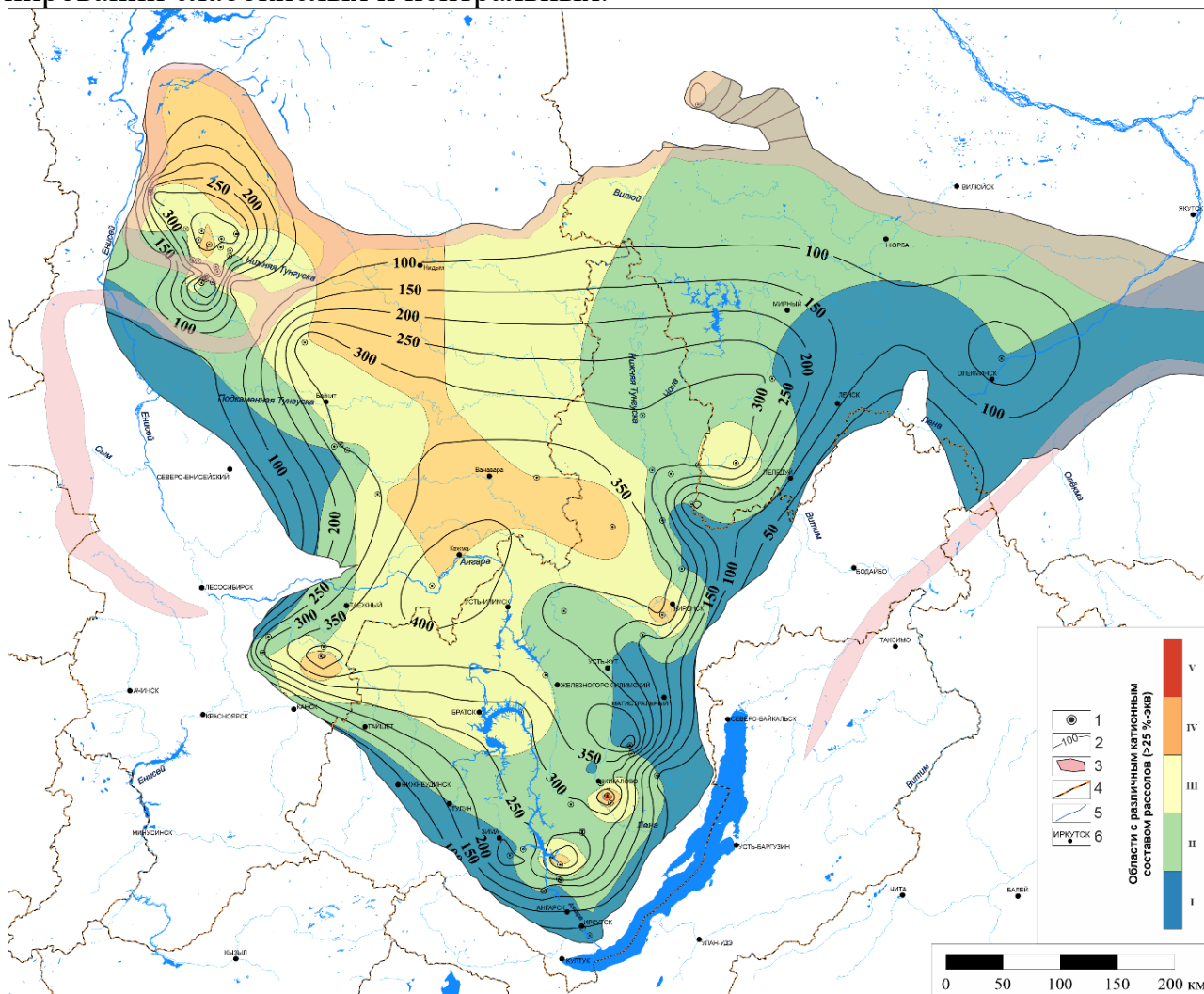


Рис. 3. Карта общей минерализации и химического состава подземных вод толбачанского горизонта. Условные обозначения см. рис. 2.

Воды урицкого и олекминского горизонтов опробованы на 29 поисковых площадях, среди катионов в химическом составе доминируют кальций и натрий, воды с преобладанием магния не установлены (см. рис 1). В них широко распространены рассолы с величинами общей минерализации в пределах 250-350 г/дм³, менее минерализованные воды (до 100 г/дм³) установлены на Ангарской и Нижнетайгинской площадях, наиболее минерализованные (350-550 г/дм³) – на Сухотунгусской, Тутончанской и Среднеботуобинской. Значения окислительно-восстановительного потенциала изменяются от -335 до -115 мВ, доминируют умеренно кислые и слабокислые рассолы при диапазоне рН от 3,2-12,4.

В горизонтах тойонского яруса (чарский и наманский) доминируют рассолы хлоридного кальциево-натриевого состава, на Ковыктинской, Шелонинской, Нижнетунгусской, Вакунайской и Таначинской площадях установлено распространение рассолов с преобладанием катионов магния (см. рис 1). Величина об-

щей минерализации изученных вод изменяется от первых единиц на Ногинской, Ангарской, Тыретской площадях и достигает более 500 г/дм³ в пределах Ковыктинской, пойменной и Нижнетунгусской площадей. Воды в основном умеренно и слабокислые, диапазон изменения водородного показателя – 2,8-10,8.

На основе статистических расчетов в программе Statistica version 12 установлено, что подземные воды фонового состава нижнекембрийских горизонтов охарактеризованы Cl Ca-Na химическим составом, плотностью 1280 кг/м³, значениями величины общей минерализации 346,1 г/дм³, слабокислым pH (6,0) и восстановительными условиями (-228 мВ). Фоновые содержания макрокомпонентов составляют (г/дм³): Na⁺ – 42,5; K⁺ – 13,9; Ca²⁺ – 59,3; Mg²⁺ – 8,5; Cl⁻ – 214,9; SO₄²⁻ – 0,2; HCO₃⁻ – 0,4.

Наибольший интерес в микрокомпонентном составе хлоридных рассолов представляют йод, бром, бор, литий, цезий, рубидий, стронций, являющимися главными компонентами гидроминерального сырья. В пределах изучаемой территории содержания некоторых значительно превышают нижние пределы концентраций для потенциального минерального сырья. Так, содержания стронция в нижнекембрийских отложениях изменяются от первых долей до 9-10 г/дм³ при значениях фона 1,7 г/дм³; брома – до 1,2 (фон 3,5 г/дм³); лития – до 0,8 (фон 0,1 г/дм³); рубидия – до 0,2 (фон 0,02 г/дм³) и цезия – до 0,013 (фон 0,0002 г/дм³). Содержания йода и бора не превышают кондиционные и составляют до 13,4 (фон 0,006) и 4,2 мг/дм³ (фон 0,13) соответственно. Среди остальных микрокомпонентов наибольшие концентрации (в г/дм³) установлены у кобальта (до 3,6), железа (до 1,5), хрома (1,3) и бария (1,1).

Сравнительный анализ генетических коэффициентов (rNa/rCl, Cl/Br, Ca/Cl отношения и показатель метаморфизации S) показал, что изученные подземные воды можно объединить в две генетические группы (рис. 4). В первую группу входят инфильтрационные хлоридные подземные воды с преобладанием катионов натрия в составе, распространенные в периферийных районах территории исследования. Они характеризуются величиной общей минерализации, достигающей 320-350 г/дм³, повышенными значениями rNa/rCl (0,4-1,2), Cl/Br (100-10000) коэффициентов и низким Ca/Cl отношением (до 0,3). Величины интегрированного показателя метаморфизации рассолов S изменяются от первых единиц до 300. Данные подземные воды по своему геохимическому облику и значениям генетических коэффициентов имеют большое сходство с современными рассолами выщелачивания каменной соли, распространенными в зонах развития соляных куполов Анабаро-Хатангского бассейна [15-17].

Ко второй группе относятся седиментогенно-инфильтрационно-метаморфические крепкие хлоридные рассолы с наибольшей степенью метаморфизации величиной общей минерализации, достигающей 630 г/дм³ и преобладанием катионов Ca в составе. Они характеризуются низкими значениями rNa/rCl (до 0,4), Cl/Br (до 200) коэффициентов, и высокими значениями Ca/Cl (более 0,25) отношения, показатель метаморфизации рассолов составляет более 250.

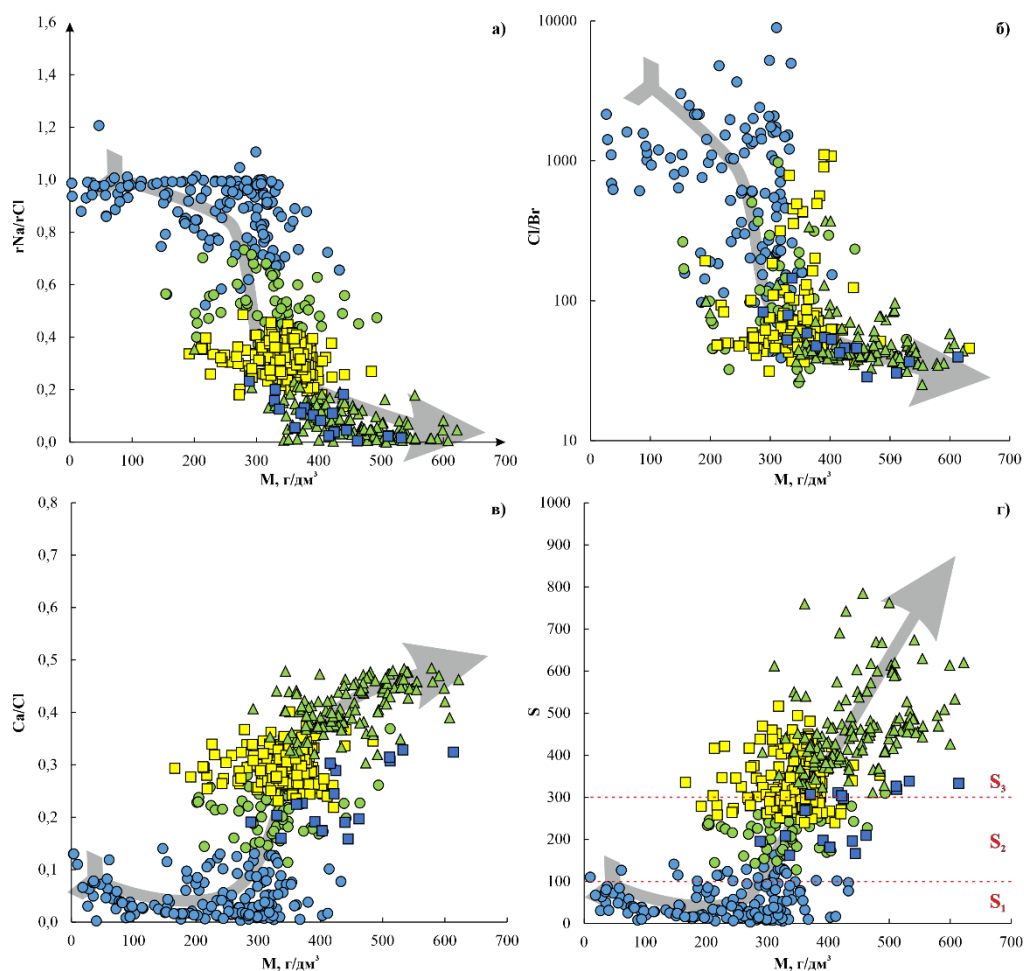


Рис. 4. Изменение отношений rNa/rCl (а), Cl/Br (б), Ca/Cl (в) и степени метаморфизации S (г) подземных вод нижнекембрийских отложений Сибирской платформы в зависимости от величины их общей минерализации. Стрелкой показано направление метаморфизации химического состава рассолов. Усл. обозн. см. на рис. 1.

Заключение

В семи горизонтах нижнекембрийских отложений (усольском, эльгянском, толбачанском, урицком, олекминском, чарском и наманинском) установлено доминирование от натриевых до кальциево-магниевых и магниевых хлоридных рассолов. Величина минерализации подземных вод варьирует в пределах от первых единиц в периферийных частях бассейна до 632 г/дм^3 . Наиболее минерализованные воды распространены в южной и юго-западной части Сибирской платформы (Карахунская, Балыхтинская, Марковская площади и др.). В микрокомпонентном составе рассолов установлены высокие концентрации главных компонентов гидроминерального сырья (г/дм^3): Sr до 10; Br – до 1,2; Li – до 0,8; Rb – до 0,2 и Cs – до 0,013. Сравнительный анализ генетических коэффициентов (rNa/rCl , Cl/Br , Ca/Cl отношения и показатель метаморфизации S) показал, что изученные подземные воды можно объединить в две генетические группы: инфильтrogenные хлоридные подземные воды с преобладанием катионов натрия в

составе, распространенные по периферии региона исследования и седиментогенно-инфильтрогенно-метаморфические крепкие хлоридные рассолы с преобладанием катионов кальция в составе с наибольшей степенью метаморфизации.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0012 и FWZZ-2022-0014.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков Д.А., Черных А.В., Константинова Л.Н., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И. Гидрогеохимия венда Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 8. – С. 1081-1101.
2. Шварцев С.Л., Шубенин Н.Г. Особенности формирования микрокомпонентного состава подземных вод зоны криогенеза (на примере Западной части Сибирской платформы) // Геология и геофизика. – 1973. – Т. 14. – № 11. – С. 69-74.
3. Букаты М.Б., Вожов В.И., Горохова Т.А., Рахленко Е.З., Шварцев С.Л. Причины засоления нефтегазоносных коллекторов на юге Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1981. – Т. 22. – № 9. – С. 17-27.
4. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С., Серебряков Е.В., Павлов С.С., Ильин А.В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. – 2018 – Т. 9. – № 4. – С. 1235-1253.
5. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Shvartsev S.L., Trifonov N.S., Sidkina E.S. Specifics of the late cenozoic geochemical evolution of chloride calcium brines in the Olenek cryoartesian basin // *Geochemistry International*. – 2017. – Т. 55. – № 5. – С. 442-456.
6. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна: закономерности размещения, состав, динамика, формирование и использование. – М.: Наука, 1966. – 322 с.
7. 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.
8. Новиков Д.А., Ильин А.В., Каширцев В.А., Черных А.В., Пыряев А.Н., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Зуева И.Н., Чалая О.Н. Геохимия рассолов и нефтепроявлений кимберлитовой трубки Удачная (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63 – № 2 – С. 197-218.
9. Новиков Д.А., Гордеева А.О., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Житова Л.М. Влияние траппового магматизма на геохимию рассолов нефтегазоносных отложений западных районов Курейской синеклизы (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 6. – С. 861-881.
10. Самарина В.С. Гидрогеохимия. – Л., Изд.-во Ленингр. ун-та, 1977. – 360 с.
11. Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // Геохимия. – 2000. – № 11. – С. 1170-1184.
12. Конторович А. Э., Савицкий В. Е. К палеогеографии Сибирской платформы в раннюю и среднюю кембрийские эпохи // Труды СНИИГГиМС. – 1970. – вып. 106. – С. 95-108.
13. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. – Л.: ВСЕГЕИ, 1983. – 216 с.
14. Сухов С.С., Шабанов Ю.Я., Пегель Т.В., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Коровников И.В., Сундуков В.М., Федоров А.Б., Варламов А.И., Ефимов А.С., Конторович В.А., Конторович А.Э. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы. В 2 т. Т. 1: Стратиграфия. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2016. – 497 с.
15. Черных А.В., Новиков Д.А. Палеогидрогеология Анабаро-Хатангского бассейна // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2018. – № 4. – С. 27-33.

16. Черных А.В., Новиков Д.А. Палеогидрогеохимия нефтегазоносных отложений Анабаро-Хатангского бассейна // Отечественная геология. – 2020. – № 2. – С. 81-96.
17. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – Т. 44. – № 5. – С. 780-786.

© А. В. Черных, Д. А. Новиков, Д. А. Токарев, 2023