

Я. В. Фомина^{1✉}, А. А. Муравьева^{1,2}

Гидрогеохимические особенности карбонатного комплекса кембрия Сибирской платформы

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассмотрены особенности химического состава подземных вод нижне-среднекембрийских отложений Сибирской платформы. Кембрийские отложения представлены тремя водоносными комплексами – литвинцевским, нижнебулайско-ангарским и усольско-бельским, которые относятся к соленосной гидрогеологической формации. В разрезе распространены слабометаморфизованные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания с минерализацией от 30 до 300 г/дм³ и сильно метаморфизованные седиментогенные хлоридные кальциевые и хлоридные натриево-кальциевые рассолы с минерализацией от 300 до 600 г/дм³. В них установлены высокие концентрации полезных компонентов: Li, Rb, Sr, B, Br, I и др, которые возрастают вниз по разрезу по мере роста минерализации.

Ключевые слова: генетические коэффициенты, гидрогеохимические условия подземных вод, рассолы, Сибирская платформа

Ya. V. Fomina^{1✉}, A. A. Muravyeva^{1,2}

Hydrogeochemical features of the cambrian carbonate complex of the Siberian platform

¹A. A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

Abstract. This paper examines the chemical composition of groundwater in Cambrian aquifers on the Siberian Platform. Cambrian deposits are represented by three aquifer systems—the Litvintsevsky, Nizhnebulai-Angara, and Usolsko-Bel'sky—which belong to a saline hydrogeological formation. The section is characterized by weakly metamorphosed sodium chloride leaching brines with mineralization ranging from 30 to 300 g/dm³ and highly metamorphosed sedimentogenic calcium chloride and sodium-calcium chloride brines with mineralization ranging from 300 to 600 g/dm³. These brines contain high concentrations of useful components, including Li, Rb, Sr, B, Br, I, and others, which increase downsection as mineralization increases.

Keywords: genetic coefficients, hydrogeochemical conditions of groundwater, brines, Siberian platform

Введение

Уникальность подземных рассолов изучаемого региона обусловлена высокой минерализацией и степенью метаморфизма, древним возрастом вмещающих

пород, а также высокими концентрациями в рассолах промышленных компонентов, таких как: литий, бор, бром, стронций, рубидий, церий и др. Их содержания в рассолах соленосной формации во много раз превышают минимальные промышленные концентрации.

В настоящее время во всем мире вопросы геохимии рассолов, их генезиса и содержания полезных компонентов широко изучаются специалистами в области гидрогеологии, геохимии и металлогении. Процесс образования рассолов может быть разным: от захоронения древних морских вод и выщелачивания соляных толщ до солнечного концентрирования в лагунах и формирования континентальных соленых озер. Специфической обстановкой образования крепких рассолов являются себхи.

Геохимией сверхкрепких рассолов осадочных бассейнов США занимались такие исследователи, как Kharaka Y.K., Maest A.S., Carpenter W.W., Labotka D.M., Panno S.V., Locke R.A., Wilson T.P., Long D.T. [1,2,3].

Процессы производства, извлечения и переработки ценных компонентов рассолов рассматривали в своих трудах M. Haddad, L. Bazinet, B. Barbeau, G. Scelfo, A. Trezzi, F. Vassallo, A. Cipollina, V. Landi, C. Xenogianni, A. Tamburini, D. Xevgenos, G. Micale [4,5].

Попутно добываемые воды нефтяных и газовых месторождений изучали X. Wang, N. Numedahl, C. Jiang [6]. Проблемой переработки рассолов и извлечения лития занимались D. Fuentealba, C. Flores-Fernandez, E. Troncoso, H. Estay (по литиевым рассолам соленых озер Южной Америки и Китая), M. Marza, G. Ferguson, J. Thorson, I. Barton, Ji-Hyun Kim, L. Ma, J. McIntosh (по бассейнам Северной Америки), A. Panagopoulos, K-J. Haralambous, M. Loizidou [7,8].

Глобальный обзор технологии прямого извлечения лития из рассолов был опубликован J. Farahbakhsh, F. Arshadi, Z. Mofidi, M. Mohseni-Dargah, C. Kok, M. Assefi, A. Soozanipourf, M. Zargar, M. Asadnia, Y. Boroumand, V. Presser, A. Razmjou [9,10].

Кембрий повсеместно распространен на Сибирской платформе. Галогенно-карбонатные породы нижнего и среднего кембрия относятся к соленосной гидрогеологической формации, в пределах которой обособляются (сверху вниз) литвинцевский, нижнебулайско-ангарский и усольско-бельский водоносные комплексы. В них можно выделить водоносные горизонты, разделенные между собой пластами солей. В литвинцевском комплексе выделен келорский, в нижнебулайско-ангарском — бильчирский и биркинский, в усольско-бельском — христофоровский, атовский, балыхтинский и осинский горизонты. Для всех перечисленных горизонтов характерны порово-трещинные и трещинно-порово-кавернозные типы коллекторов [11].

Сложность геологического строения в пределах изучаемых районов Сибирской платформы нашла свое отражение в гидрогеологических условиях, площадном распространении рассолов различной минерализации, геохимических и генетических типов [12]. Пластовые воды в нижней части надсолевой формации с глубиной быстро засоляются и становятся сначала крепкими и весьма крепкими рассолами выщелачивания хлоридного натриевого и кальциево-натриевого

состава, а в горизонтах соленосной формации сменяются на высоко метаморфизованные хлоридные рассолы натриево-кальциевого и кальциевого типов.

В ходе исследования была собрана, проинтерпретирована и разбракана база данных, состоящая из более, чем 1000 объектов, куда были включены результаты гидрогеохимического опробования водоносных горизонтов средне-нижне кембрийского возраста.

Основные результаты

Объектом исследования являются подземные воды соленосной гидрогеологической формации средне-нижнекембрийского возраста.

Соленосная гидрогеологическая формация служит зоной перехода от затрудненного водообмена к застоному. Ниже кровли литвинцевской свиты рассолы пользуются повсеместным распространением. В келорском горизонте соленость вод составляет от 9-380 г/дм³ (на глубинах 300-800 м), в бильчирском горизонте распространены воды с общей минерализацией 280-465 г/дм³, далее вниз по разрезу минерализация достигает 500-600 г/дм³ и более (Табл.1). Содержание брома в водах соленосной формации в среднем составляет 3,6 г/дм³, иногда достигает 11-13 г/дм³. Возрастает также содержание других полезных компонентов (литий, стронций, рубидий и др.), водорастворенных органических веществ и газов (ВРГ). Состав газов по вертикали изменяется от азотного и метаново-азотного к азотно-метановому и метановому (метана в сумме с его гомологами более 75 %).

Таблица 1. Характеристика химического состава подземных вод соленосной гидрогеологической формации Сибирской платформы*

Водоносный комплекс	Мобщ	Na+K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
	г/дм ³						
литвинцевский	8,8-380 316(169)	1,55-132,6 54,1(167)	1,0-79,2 55,3(169)	0,1-25,6 8,7(163)	5,3-239,3 197,7(169)	0,01-1,6 0,4(169)	0,01-1,2 0,6(163)
нижнебулайско-ангарский	128-512 321(155)	4,9-122,2 56,3(153)	1,6-144,7 55,5(155)	0,1-42,0 9,1(155)	80,0-336,7 197,8(153)	0,01-5,2 0,9(141)	0,1-3,7 0,7(137)
усольско-бельский	215-632 405(359)	2,3-124,4 47,8(357)	1,6-183,9 86,6(359)	0,16-74,3 12,2(350)	122,2-405,6 254,0(343)	0,03-4,7 0,46(264)	0,02-3,8 0,9(262)

*В числителе приведены предельные значения, в знаменателе - среднее значение, в скобках - количество проб.

По генетическому типу преобладают преимущественно инфильтрогенные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания и седиментогенные высокометаморфизованные натриево-кальциевые и кальциевые рассолы. При минерализации ниже 310-330 г/дм³ практически все рассолы имеют хлоридный натриевый состав, тогда как более минерализованные воды являются натриево-кальциевыми и кальциевыми.

Преимущественно инфильтрогенные рассолы выщелачивания повсеместно распространены вдоль западной и юго-западной границ региона вдоль структур обрамления Сибирской платформы. Их пространственное распространение контролируется глубиной залегания горизонтов и удаленностью от областей питания. Они незначительно метаморфизованы, что подтверждается пониженными значениями натрий-хлорного и хлор-бромного и повышенными значениями кальций-магниевого коэффициентов. Кроме того, установлены пониженная сульфатность и повышенные концентрации кальция, калия, бора и других микрокомпонентов [13,14].

Седиментогенные высокометаморфизованные рассолы натриево-кальциевого и кальциевого типов распространены в центральной части бассейна, их роль уменьшается и в северном направлении к структурам обрамления (от Присаяно-Енисейской синеклизы к Байкитской антеклизе и Катангской седловине). В Тунгусском бассейне большинство изученных рассолов являются натриево-кальциевыми по составу с общей минерализацией 350-400 г/дм³. Зона распространения кальциевых рассолов так же предполагается в центральной и западной частях Курейской синеклизы.

Для большинства структур Сибирской платформы характерен прямой тип вертикальной гидрогеохимической зональности. Однако наблюдается резкое повышение минерализации в верхней части усольской и нижней части бельской свит, что связано с их накоплением в эпохи максимальной солености палеобассейна. На ряде структур выделяется инверсионная гидрогеохимическая зональность (Катанская седловина, Непско-Ботуобинская антеклиза), выражающаяся в уменьшении величины общей минерализации с глубиной. Но зональность имеет не классический линейный вид, а характеризуется более сложной формой зависимости.

Анализ химического состава рассолов по горизонтам показал, что залегающий в основании соленосной формации осинский водоносный горизонт изучен наиболее полно глубоким бурением в пределах всей Сибирской платформы. В нем распространены хлоридные кальциево-натриевые рассолы с минерализацией от 214 до 632 г/дм³. Наиболее минерализованные воды встречены в Ангаро-Ленском бассейне на Балаганкинской и Марковской площадях, что связано с наличием пластов солей в основании усольской свиты (таб. 1). Кроме того, в осинском горизонте в больших концентрациях присутствуют промышленные компоненты (мг/дм³): бром – от 650 до 10580 (в среднем 4840), окись бора – от 80 до 962 (458), литий – от 7 до 590 (166), рубидий – от 2 до 175 (25), церий – от 420 до 9960 (3836) (табл. 2).

Рассолы христофоровского, атовского и балыхтинского горизонтов изучены преимущественно в пределах Ангаро-Ленского бассейна. В целом, на Сибирской платформе в этих горизонтах распространены подземные воды с минерализацией от 265 до 555 г/дм³, в горизонтах отмечены повышенные концентрации полезных компонентов (мг/дм³): лития – до 700, рубидия – до 200, церия – до 10600. При минерализации менее 370 г/дм³ по составу рассолы являются хлоридными натриевыми с низкой сульфатностью. Далее по мере роста минерализации они переходят

в кальциевые. На Тулунской площади встречаются хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией 543 г/дм³, содержания брома составляют 7,9 г/дм³, на Коркинской и Тутурской площадях – с минерализацией 450-462 г/дм³, брома – 3,7 г/дм³.

Таблица 2. Содержание промышленных компонентов в соленосной гидрогеологической формации Сибирской платформы*

Водоносный комплекс	Br	I	B ₂ O ₃	Li	Rb	Sr
	г/дм ³	мг/дм ³				
литвинцевский	0,02-4,9 3,3(159)	0,1-32 25(137)	3,8-16,7 12(34)	0,1-670 234(88)	5,6-33 19,8(128)	109-5918 2029(135)
нижебулайско-ангарский	0,14-6,3 3,1(129)	0,2-30 0,3(91)	11,2-2535 756(46)	15-476 142(95)	0,1-105,0 15,6(115)	0,6-8070 1254(133)
усольско-бельский	0,01-36,8 4,9(267)	0,1-290 25,0(178)	7,3-963 392(56)	5,8-700 167(248)	0,2-199,0 28,2(270)	3,6-9963 3125(288)
минимальная промышленная концентрация	0,2	10,0	320,0	10,0	3,0	300,0

*В числителе приведены предельные значения, в знаменателе - среднее значение, в скобках - количество проб.

Рассолы биркинского горизонта имеют преимущественно хлоридный натриевый состав. Их минерализация в изученных скважинах изменяется в основном от 190 до 330 г/ дм³. Близким составом характеризуются рассолы бильчирского горизонта нижебулайско-ангарского комплекса. По составу они хлоридные натриевые с минерализацией, достигающей 318-325 г/дм³. Хлоридные кальциевые рассолы получены из наиболее закрытых частей разреза на Тутурской (346 г/дм³), Коркинской, Илимской (402 г/дм³), Шелонинской (422 г/дм³) площадях. Содержания промышленных компонентов достаточно высоки, достигают (мг/дм³): лития – 200, рубидия – 50, церия – 8070.

В верхней части гидрогеологического разреза в литвинцевском водоносном комплексе преобладают соленые воды, которые постепенно переходят в рассолы выщелачивания. По результатам опробования келорского горизонта литвинцевского водоносного комплекса на Непско-Ботуобинской антеклизе (Преображенская и Даниловская площади) выявлено распространение подземных вод с минерализацией 30,0-61,3 г/дм³ хлоридного натриевого состава. Концентрации микрокомпонентов достаточно низки(мг/дм³): лития содержится не более 1, стронция – 27, бора – 5,2. В Курейской синеклизе (Южно-Тунгусская НГО) среднекембрийские отложения опробованы множеством скважин, в ней распространены рассолы с минерализацией от 203 до 380 г/дм³ и более. Соответственно содержание полезных компонентов так же возрастает: лития(мг/дм³) – до 670, рубидия – до 33, церия – до 5918.

Заключение

Таким образом, в ниже-среднекембрийских отложениях развиты рассолы с минерализацией от 9 до 632 г/дм³ двух основных типов — инфильтрационные хлоридные натриевые рассолы выщелачивания и сильно метаморфизованные седиментогенные натриево-кальциевые и кальциевые рассолы. В целом, в регионе преобладает прямая вертикальная гидрогеохимическая зональность, осложненная повышением минерализации в верхней части усольской и нижней части бельской свит, связанным с обстановками осадконакопления. В латеральной зональности наиболее минерализованные рассолы тяготеют к внутренним частям бассейна, опресняясь по направлению к структурам обрамления, где развиты области питания подземных вод. Помимо наличия солевых пластов и удаленности от зон внутреннего питания на состав подземных вод в пределах Сибирской платформы так же влияют развитие интрузий и многолетне-мерзлых пород на севере региона. Наибольший интерес представляют воды усольско-бельского комплекса —самые богатые промышленными компонентами.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования № FWZZ-2026-0047.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kharaka Y.K. Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi Salt Dome Basin, USA. /Y.K. Kharaka, A.S. Maest, W.W. Carpenter, L.M. Law, R.J. Lamother, T.L. Fries // *Applied Geochemistry*. – 1987. — Vol. 2. – P.543-561.
2. Labotka D.M. Isotopic and geochemical characterization of fossil brines of the Cambrian Mt. Simon Sandstone and Ironton–Galesville Formation from the Illinois Basin, USA. / D.M. Labotka, S.V. Panno, R.A. Locke, J.T. Freiburg // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2015. – Vol. 165. – P. 342–360.
3. Wilson T.P. Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan Basin, U.S.A. / T.P. Wilson, D.T. Long // *Applied Geochemistry*. – 1993. – Vol. 8. – P. 507-524.
4. Haddad M. Eco-efficient treatment of ion exchange spent brine via electrodialysis to recover NaCl and minimize waste disposal / M. Haddad, L. Bazinet, B. Barbeau // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 690. – P. 400–409.
5. Demonstration of ultra-high-water recovery and brine concentration in a prototype evaporation unit: Towards zero liquid discharge desalination / G. Scelfo, A. Trezzi, F. Vassallo, A. Cipollina, V. Landi, C. Xenogianni, A. Tamburini, D. Xevgenos, G. Micale // *Separation and Purification Technology*. – 2025. Vol. 354. – 129427.
6. Direct lithium extraction from Canadian oil and gas produced water using functional ionic liquids – A preliminary study / X. Wang, N. Numedahl, C. Jiang // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Vol. 172. – 106126.
7. Technological tendencies for lithium production from salt lake brines: Progress and research gaps to move towards more sustainable processes / D. Fuentealba, C. Flores-Fernandez, E. Troncoso, H. Estay // *Resources Policy*. – 2023. – Vol. 83. – 103572.
8. Geological controls on lithium production from basinal brines across North America / M. Marza, G. Ferguson, J. Thorson, I. Barton, Ji-Hyun Kim, L. Ma, J. McIntosh // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2024. Vol. 257. – 107383.

9. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review / A. Panagopoulos, K-J. Haralambous, M. Loizidou // *Science of the Total Environment*. – 2019. Vol. 693. – 133545.
10. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization / J. Farahbakhsh, F. Arshadi, Z. Mofidi, M. Mohseni-Dargah, C. Kok, M. Assefi, A. Soozanipourf, M. Zargar, M. Asadnia, Y. Boroumand, V. Presser, A. Razmjou // *Desalination*. – 2024. – Vol. 575. – 117249.
11. Никитенков А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Пенигин А.В., Варакина И.В., Жуковская Е.А. О возможности реализации проектов CCS в карбонатных коллекторах Сибирской платформы // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 68-78.
12. 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.
13. Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Вахромеев А.Г. и др. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения // *Рациональное освоение недр*. – 2013. – №1. – С.44-51.
14. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects// *Applied geochemistry*. – 2020. – V.117. – P. 104588.

© Я. В. Фомина, А. А. Муравьева, 2026