УДК. 504.06:550.822

К проблемам ресурсной оценки и вовлечения в освоение промышленных рассолов артезианских бассейнов Сибирской платформы (на примере Преображенского месторождения, Непский свод)

М.А. Данилова[1,2], **А.Г. Вахромеев**[1,2,3], А.В. Левин[1], С.К. Квачко[1], И.А. Губин[1], А.В. Кирюхин[4], А.В. Сергеева[4], А.П. Горохов[1], А.В. Корзун[1,5]

[1]ООО «РН-ГИР», Красноярск, Россия
mart16@mail.ru, https:/orcid.org/
[2]ФБГОУ ИРНИТУ, Сибирская школа геонаук, Иркутск, Россия
[3]ФБГУН Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия
[4]Институт вулканологии и сейсмологии, Петропавловск-Камчатский, Россия
[5]Московский государственный университет, Москва, Россия

Крупнейшей редкометальной (K, Li, Rb, Cz) металлогенической провинцией мира является Сибирская платформа (СП). Здесь обнаружены все главные типы литиеносного сырья – промышленные редкометальные рассолы, лимнические глинистые толщи по вулканическим породам, рудные минералы лития (сподумен, петалит, цинвальдит) в изверженных массивах горно-складчатого обрамления кратона. Основная проблема ресурсной оценки и вовлечения в освоение крупных месторождений промышленных редкометальных рассолов артезианских бассейнов на Сибирской платформе – не до конца понятная закономерность распределения зон с разными, с высокими и с низкими фильтрационно-емкостными свойствами в межсолевых карбонатных резервуарах. Концентрации лития, рубидия, цезия, стронция, брома в рассолах превышают минимально промышленные в несколько раз, но только в сочетании с высокими дебитами могут рассматриваться как экономически рентабельные и перспективные для разработки объекты. Понимание модели формирования месторождений, определение основных факторов, влияющих на трещиноватость и кавернозность вмещающих пород, вплоть до карстовых проявлений, дает возможность прогноза поиска месторождений промышленных вод.

On the Issues of Resource Assessment and the Involvement of Industrial Brines from Artesian Basins of the Siberian Platform in Development (Using the Preobrazhenskoye Field and the Nepsky Arch as an Example)

Maria A. Danilova[1,2], **Andrey G. Vakhromeev**[1], Aleksey V. Levin[1], Svetlana K. Kvachko[1], Igor A. Gubin[1], Aleksey V. Kiryukhin[3], Anastasia V. Sergeeva[3], Alexander P. Gorokhov[1], Anna V. Korzun[1,4]

[1]OOO RN-GIR, Krasnoyarsk, Russia
mart16@mail.ru, https://orcid.org/
[2]FSEI Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia
[3]Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, Russia
[4]Institute of Volcanology and Seismology, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
[5] Moscow State University, Moscow, Russia.

The Siberian Platform (SP) is the largest rare-metal (K, Li, Rb, Cz) metallogenic province in the world. All the main types of lithium-bearing raw materials have been found here – industrial rare-metal brines, lacustrine clay sequences overlying volcanic rocks, and lithium ore minerals (spodumene, petalite, zinvaldite) in the igneous massifs of the mountain-folded margin of the craton.The main problem in resource assessment and in involving large deposits of industrial rare-metal brines from artesian basins on the Siberian Platform in development is the not fully understood pattern of distribution of zones with different, high and low, filtration and storage properties in intersalt carbonate reservoirs. The concentrations of lithium, rubidium, cesium, strontium, and bromine in the brines exceed the minimum industrial levels by several times, but only when combined with high flow rates can they be considered economically viable and promising for development. Understanding the model of deposit formation, identifying the main factors influencing the fracturing and cavernous nature of the host rocks – up to karst manifestations – makes it possible to predict the location of industrial water deposits.

Введение

Актуальность работы связана с дефицитом собственного стратегического сырья в России – карбоната лития, более 90% которого сейчас является импортным. Установлено, что промышленные рассолы с самыми высокими концентрациями микроэлементов на Сибирской платформе приурочены к межсолевым галогенно-карбонатным горизонтам нижнего кембрия: усольская (пласт Б1), бельская (пласты А4, А6) и булайская (пласт А3) свиты, что делает эти объекты наиболее перспективными для извлечения из них лития, брома, стронция, рубидия и других элементов с получением целой линейки товарных продуктов.

Причины формирования сложного фильтрационного поля и аномально высоких концентраций редких элементов в рассолах средней части разреза СП до сих пор являются дискуссионными. Авторами статьи принимается гипотеза о многостадийном обогащении седиментационных рассолов межсолевых горизонтов микроэлементами, из различных источников в различные этапы геологической истории территории [1].

По опыту предприятий ПАО «НК «Роснефть» основными проблемами для ресурсной оценки и скважинной добычи промышленных рассолов являются:

1. Условно локализованный, неравномерно распределенный характер фильтрационного поля с аномальными ФЕС. По региональным данным бурения на нефть и газ карбонатные резервуары характеризуются низкими значениями пористости, проницаемости, высокой степенью засолоненности. Установлено, что зоны улучшенных ФЕС, АВПД сопряжены с гидродинамически напряженными условиями, вторичными преобразования коллектора, наложенной трещиноватостью, кавернозностью. Прогноз этих зон является сложной и важной задачей при составлении общей геолого-гидрогеологической концепции формирования месторождений рассолов.

2. Невыдержанный характер концентраций микроэлементов как по площади, так и в разрезе вероятно связан с наличием различных источников поступления вещества в пределах Сибирской платформы, многостадийностью их поступления, неравномерностью протекавших физико-химических процессов при различных температурах и давлениях [1]. Участки с максимальными концентрациями элементов в рассолах вероятно сформированы при сочетании нескольких источников обогащения на территории одной лагуны, «отшнурованного» палеобассейна. В докладе рассмотрена концепция формирования перспективного месторождения промышленных вод в карбонатных межсолевых отложениях усольской свиты (пласт Б1) на Преображенском участке ПАО «НК «Роснефть».

Результаты исследований и их обсуждение

В общей концепции формирования рассолов предполагаются следующие этапы и источники поступления микроэлементов в рассолы галогенно-карбонатной формации [2] Сибирской платформы:

1. На этапе существования кембрийского моря – концентрирование элементов в результате повышения солености в закрытых лагунах [2–4] до стадии эвтоники. Максимальные концентрации лития могли достигать 50 мг/л.

2. При извержении подводных и наземных кембрийских вулканов – привнос мантийных элементов с пеплами, и далее снос подводными течениями от очагов вулканической деятельности с глинистым материалом с формированием ореолов рассеивания [5]. В результате происходит накопление лития в пепловых туфах, их преобразование на дальнейших этапах в литиевые глины в кальдерах вулканов. На данном этапе глины являются сорбентом, и далее – источником лития для хлоридных рассолов, обеспечивая процесс обогащения по модели «вода-порода».

3. Длительный этап метаморфизма рассолов в закрытой гидродинамической системе при взаимодействии с вмещающими породами (карбонаты, гипс-ангидритовые толщи, глинистые минералы выветривания вулканических отложений, соли). Важно отметить, что несколько этажей мощных соляных пластов, сформированных в усольское, бельское, булайское и ангарское время обеспечили изолированность многопластовой карбонатной

системы резервуаров от внедрения водных растворов сверху более чем на 500 млн. лет, что подтверждается уникальным изотопным составом рассолов всех межсолевых объектов, не испытавших влияния атмогенных вод. Таким образом, трансформации состава рассолов межсолевых резервуаров могли происходить либо внутри самой системы, либо при влиянии снизу (условно мантийные, магматогенные эманации).

4. Этап геодинамической и тектоно-магматической активности, во время которого происходило масштабное внедрение траппов в пермо-триасовое время: в межсолевые горизонты привел к локальным нарушениям целостности и закрытости системы. Произошло повышение температуры пород при внедрении огромных масс раскаленной магмы, был запущен процесс формирования пародоминирующих систем: кипения рассолов, с достижением закритических температур парогазовой фазы, и появление в системе сверхкритических флюидов с аномальными свойствами, новые типы взаимодействия с карбонатами и солями, не протекавшие ранее [2]. При насыщении магмы водой – появление летучих компонентов, микроэлементов, трансформация как макро- так и микрокомпонентного состава рассолов. Трапповые магмы оказали не только физическое, но химическое воздействие на рассолы и вмещающие вулканогенно-осадочные породы.

5. На посттрапповом этапе при снижении температуры замедлялась циркуляция гидротерм по зонам разуплотнения (через трубки взрыва, по путям авто-ГРП внедрения трапповых силлов [1, 2]. Гидротермальные потоки привносили различные типы оруденения с формированием железорудных, золоторудных, медно-никелевых и др. месторождений.

На примере скважин лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» по результатам изучения данных ГИС было выявлено, что пласты А4 и А6, Б1 представляют собой кальцит-доломитовые разности, осложненные локальным наличием интервалов окремнения и ангидритизации. Структура емкостного пространства характеризуется засолонением и наличием невытесняемого органического вещества (преимущественно, залечивающего трещины). Пласты четко определяются в разрезах скважин, имеют региональное распространение и выдержанные параметры в пределах всей южной части платформы. Фильтрационные параметры изучаемых объектов, рассчитанные по результатам интерпретации данных ГИС: коэффициент эффективной проницаемости рассолов, в среднем, варьирует в диапазоне от 0.3 до 10 мД. Разработанная петрофизическая модель показывает, что в некоторых зонах только 2–4% пустотного пространства занято подвижным рассолом (динамическая емкость), остальная часть заполнена неподвижными флюидами: остаточными нефтью, битумом и рассолом. Подвижная часть рассолов в глубоких (более 900 м) горизонтах представлена упругими запасами. Начальные дебиты скважин фиксируются на уровне 10–70 $м^3$/сут.

В рамках гипотезы о значимом воздействии масштабно проявленного траппового магматизма на изменение пород и составов рассолов [1, 2], зоны с улучшенными ФЕС должны фиксироваться в областях влияния магмы мантийных силлов, но при условии наложения других факторов: геохимических (гидротермальных), палеогеографических и структурно-тектонических. В апикальной области под давлением внедряющегося потока магмы, кипения рассолов на фронте внедрения и увеличения давления, начиналось латеральное движение парогазового фронта в область более низких значений давления (рис. 1). Движение парожидкостной фазы (в жидком и субкритическом состоянии) происходило при наличии зон разуплотнения (тектонической и кавернозной трещиноватости), либо при формировании новых зон трещиноватости за счет авто-ГРП при повышении давления в системе сверх критического [2]. Удаление из системы избытков пара, газа и продуктов реакции приводило к увеличению пустотного пространства, где локализована залежь промышленных рассолов за счет процессов выщелачивания, глубинного карстования, доломитизации.

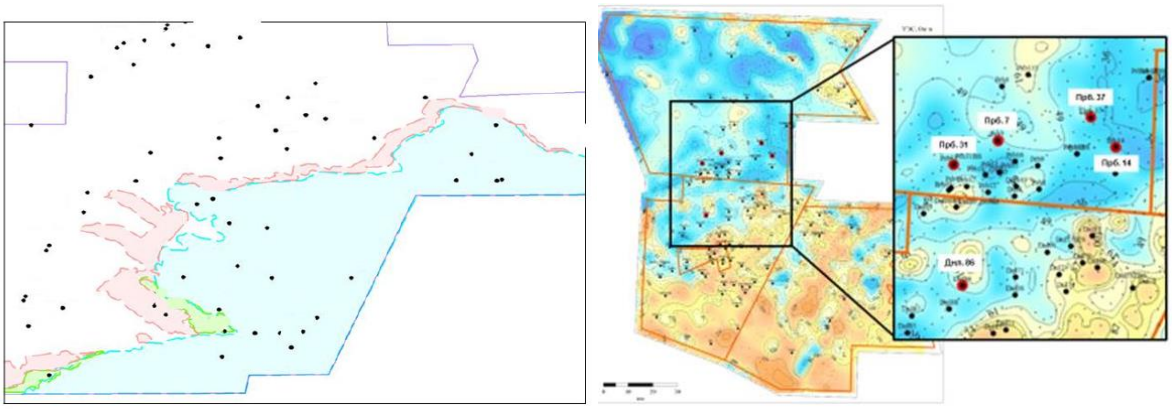


Рисунок 1 – Прогнозная схема: а) апикальной части траппового тела Усольского силла и от нее северо-западнее − б) контуров одной из залежей месторождения промышленных рассолов

Снижение энергии перетоков – направленной разгрузки на некотором удалении от траппа с течением времени привело к остыванию системы, замедлению всех процессов, выпадению легкорастворимых солей в пустотном пространстве карбонатных пород с полным его залечиванием и формированием слабопроницаемых границ, и наконец – к «запечатыванию» залежей. Конфигурация и размеры зон разуплотнения тектонической, карстовой природы вероятно предопределены интенсивностью и длительностью влияния фронта парогидротермального потока на вмещающие породы.

Заключение

Авторами доклада выполнено комплексирование различных методов исследований с целью уточнения граничных условий месторождения промышленных рассолов. Так, по результатам интерпретации данных сейсморазведочных работ 3D с применением атрибутного анализа и скважинным геопромысловым данным закартировано трапповое тело. Совмещение с картой разломов позволило определить предположительные направления палеодвижения парогазового фронта от силла, а по результатам интерпретации данных электроразведочных работ (ЗСБ), определено граничное условие сопротивления, соответствующее зоне максимального рассольного насыщения (см. рис. 1). В зонах пониженных сопротивлений, сопоставляемых с путями прорыва и палеперетоков парогазового флюида, отмечаются более высокие дебиты откачек, чем за их пределами.

Список литературы

1. *Данилова М.А.* Общие магматогенно-гидротермальные эвапоритовые циклы обогащения литием подземных вод древних и современных тектонически активных регионов. / *М.А. Данилова, А.Г. Вахромеев, А.П. Горохов и др.* // Мат-лы Всеросс. Научн. Конф. «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2024). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2024. 111 с. С. 108–111.

2. *Vakhromeev* A.G. Likely Sources of Lithium Mineralization in Intersalt Deposits and a Hydrogeological Model for the Angara--Lena Deposit of Commercial Lithium-Bearing Brine in the Siberian Platform / *A.G. Vakhromeev, M.A. Danilova, E.V. Demidova et al.* // Journal of Volcanology and Seismology, 2026, Vol. 20, No. 2, pp. 100–113. © Pleiades Publishing, Ltd., 2026

3. *Пиннекер Е.В.* Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука. 1966. 322 с.

4. *Мельников Н.В.* Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). Новосибирск: СО РАН. 2009. 148 с.

5. *Tyumentseva M.I.* New genetic type of lithium mineralization / *M.I. Tyumentseva, N.I. Akulov, A.I. Melnikov* // Solid Earth Sciences. 2024. V. 9. I. 3. 100194.