

УДК 556.3

Рекомендации по размещению рассолов в глубокозалегающих водоносных горизонтах Ангаро-Ленского бассейна после извлечения промышленных компонентов

Я. В. Фомина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3.

E-mail: Sadykovayv@ipgg.sbras.ru

(Статья поступила в редакцию 19.10.2025 г.)

В пределах нижнего этажа Ангаро-Ленского артезианского бассейна распространены преимущественно хлоридные натриевые и кальциевые рассолы с минерализацией, достигающей 600 г/дм³. В них установлены высокие концентрации полезных компонентов: Li, Rb, Sr, B, Br, I и др. После извлечения полезных компонентов наиболее экологичным и экономически рентабельным является их дальнейшее размещение в глубокозалегающих водоносных горизонтах. Необходимо тщательно планировать выбор подходящего объекта для размещения, чтобы избежать разубоживания концентраций полезных компонентов. Решающее значение будет иметь проведение физико-химического моделирования взаимодействия в системе «вода – порода» и лабораторных экспериментов.

Ключевые слова: литий, промышленные воды, гидрогеохимия, гидроминеральное сырье, Восточная Сибирь, Ангаро-Ленский бассейн.

DOI: 10.17072/psu.geol.25.2.113

Введение

Попутные воды нефтяных месторождений Восточной Сибири содержат повышенные концентрации многих полезных компонентов, таких как йод, бром, бор, различные соединения магния, калия, лития, рубидия, цезия, стронция и др. При этом их добыча из попутных вод экономически оправдана, потому что не требуется значительных капиталовложений для извлечения их из недр, а только для дальнейшей переработки.

Необходимость вовлечения в промышленную разработку промышленных вод объясняется не только ценными потребительскими свойствами содержащихся в них полезных компонентов, но и высокой степенью их экологической опасности для окружающей среды. Так, накопление больших объемов промышленных вод после извлечения из них полезных компонентов требует приня-

тия решения об их правильной утилизации (Alexeev et al., 2020). В соответствии с действующим законодательством наиболее подходящим способом является их дальнейшее размещение в глубокозалегающих водоносных горизонтах в пределах того же лицензионного участка, что позволит использовать существующую инфраструктуру месторождения оптимальным образом. Кроме того, размещение отработанных промышленных вод в подземные горизонты позволит сохранить другие полезные компоненты для их последующей добычи в будущем по мере развития технологий переработки и достижения рентабельности.

Кроме того, поскольку хлоридные натриевые рассолы часто сопутствуют нефтяным месторождениям, часть вод после извлечения из них лития может быть использована для нужд нефтяной промышленности, например в качестве буровых растворов или

© Фомина Я. В., 2026



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

технического водоснабжения (после очистки) (Baspineiro et al., 2020).

Среди основных промышленных методов утилизации избыточных рассолов можно выделить следующие:

1) выпаривание рассолов с последующей кристаллизацией солей и возможностью их использования для добычи других полезных компонентов (например, антигололедного компонента – гранулированного CaCl_2);

2) закачка в глубокозалегающие водоносные горизонты, имеющие подобный состав флюидов;

3) складирование в подготовленные заранее полигоны (хвостохранилища, отработанные рудники, шахты);

4) очищение рассолов с помощью обратного осмоса;

5) термическое обезвреживание вод: сжигание и термическая десорбция.

Выбор методов обращения с оставшимися рассолами после извлечения полезных компонентов в основном зависит от трех факторов: доступных технологий переработки, уровня экономических затрат, экологической эффективности (Alexeev et al., 2020; Farahbakhsh et al., 2024; Pumjan et al., 2022). Кратко рассмотрим содержание основных технологий, позволяющих безопасно разместить подземные воды после извлечения из них полезных компонентов.

Выпаривание рассолов широко применяется при производстве калийных удобрений, где после извлечения полезных компонентов из подземных вод получают остаточные рассолы с минерализацией до 300–600 г/дм³. Технология хорошо отработана, процесс осуществляется в многокорпусной выпарной установке. Далее полученные побочные продукты размещаются на специально отведенных и подготовленных в соответствии с нормативными требованиями полигонах, но после выпаривания они будут занимать существенно меньший объем и могут быть также частично использованы для производства солей, удобрений и добычи других полезных компонентов (йод, бром, бор, соединения магния, калия, рубидия, стронция и др.).

Применение обратного осмоса для полной очистки рассолов и дальнейшего их использования для питьевых и технических целей

является передовой технологией, активно пропагандируемой в зарубежной литературе, но до настоящего времени не реализованной ни в одном крупномасштабном проекте. К явным недостаткам данной технологии стоит отнести высокую себестоимость за счет высокой энергоемкости производства и частого загрязнения мембран. Кроме того, получаемые соли также должны быть утилизированы либо на полигонах, либо в недрах.

Сжигание, или термическая десорбция, может быть рассмотрена в качестве альтернативного способа переработки рассолов после извлечения полезных компонентов. Необходимо отметить, что данный способ не является экологичным, так как в атмосферу поступает большое количество парниковых газов. Он может быть использован только в случае отсутствия другого более эффективного способа. К недостаткам сжигания относятся также высокие капитальные затраты, относительно высокие эксплуатационные расходы и повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала. При сжигании твердого остатка образуются зола и жидкие шламы, которые, в свою очередь, могут быть классифицированы как опасные отходы, что обуславливает необходимость их дальнейшей безопасной утилизации. В ряде случаев зола и шлак от сжигания могут быть пригодны для вторичного использования в строительстве, сельском хозяйстве и пр.

В настоящее время наилучшим способом утилизации вод после извлечения полезных компонентов является технология дальнейшей закачки их в глубокозалегающие водоносные горизонты. Размещение в пластах горных пород отработанных рассолов позволит избежать загрязнения земель солями, содержащимися в подземных водах. Использование технологии закачивания рассолов в пласт базируется на методике, хорошо отработанной на возврате подтоварных вод месторождений углеводородов и утилизации избыточных рассолов калийных производств (Alexeev et al., 2020; Pumjan et al., 2022). Основные требования – максимальное соответствие химического состава размещаемых вод и пластового флюида, а также соблюдение температурного режима для предотвращения повышенного выпадения солей на оборудо-

вание и в призабойную зону скважины (Рябцев и др., 2013). Однако выбор подходящих для этого водоносных горизонтов необходимо тщательно планировать. Детальный анализ геологических и гидрогеологических условий недр позволит определить вмещающий пласт и его основные характеристики: литологический состав коллектора, фильтрационно-емкостные свойства, толщины, состав флюидов, термобарические условия, наличие надежного водоупорного горизонта и т.д. Обязательными являются проведение математического моделирования системы «вода – порода», испытания на опытных скважинах, которые позволяют уточнить параметры приемистости и детально изучить гидродинамические особенности.

Закачка отработанных рассолов может осуществляться в водоносные горизонты, расположенные ниже региональной водоупорной толщины или зоны гидроразрыва, чтобы избежать миграции вод в вышележающие водоносные горизонты. Кроме того, при наличии многолетнемерзлых пород подземные воды после извлечения полезных компонентов могут быть изолированы под зоной их распространения (например, в республике Саха). Рассмотрим гидрогеохимические особенности и условия для размещения отработанных рассолов на примере Ангаро-Ленского бассейна.

Объект исследования

Объектом исследования являются водоносные комплексы соленосной и подсолевой формаций Ангаро-Ленского бассейна.

В основании разреза выделяется подсолевая гидрогеологическая формация, сложенная вендскими и нижнекембрийскими отложениями, а в верхней части разреза распространены соленосная и надсолевая формации, представленные породами кембрийского, ордовикского и четвертичного возраста (рис. 1). Надсолевая формация соответствует верхней части разреза (до 800–1000 м) от современных четвертичных образований до отложений верхоленской свиты верхне-среднего кембрия включительно и является зоной активного водообмена. В ней выделяется три водоносных комплекса: современных четвертичных образований, ордовик-

ский и средне- верхнекембрийский, они используются для питьевого и технического водоснабжения.

Воды надсолевой формации пресные, их общая минерализация достигает $0,8 \text{ г/дм}^3$. Преобладающий химический тип вод – гидрокарбонатный кальциевый. Надсолевая формация не может быть использована для захоронения отработанных промышленных рассолов, поскольку состав подземных вод этого комплекса отличается от них весьма значительно и содержащиеся в ней воды широко применяются для хозяйственных и питьевых целей.

Соленосная формация представлена литвинцевской, ангарской, булайской, бельской, усольской свитами, сложенными переслаиванием карбонатных и соленосных пород. По своим гидродинамическим особенностям они объединяются в литвинцевский, булайско-нижнеангарский, верхнеусольско-бельский, даниловско-нижнеусольский водоносные комплексы. Между собой они разделяются верхнеангарским, верхнебельским, верхнеусольским водоупорными горизонтами, представленными преимущественно соленосными породами. Солоноватые и соленые воды распространены в верхней и средней части соленосной формации (литвинцевская свита). Залегающие ниже комплексы характеризуются развитием рассолов с минерализацией от 150 до 600 г/дм^3 . Все они являются хлоридными натриевыми и кальциевыми по составу, часто с повышенным содержанием магния.

Основные результаты

В рассолах булайско-нижнеангарского, верхнеусольско-бельского и даниловско-нижнеусольского водоносных комплексов содержатся в значительных концентрациях следующие микрокомпоненты (мг/дм^3): бром – до 13900, стронций – до 10600, бор – до 600, литий – до 700, т.е. существенно превышают минимальные промышленные содержания (табл.).

Литвинцевский водоносный комплекс представлен келорским горизонтом, сложенным массивными доломитами с прослоями глинистых сульфатно-карбонатных пород. Карбонаты по типу коллектора являются

трещинными, кавернозными, открытая пористость в них достигает 12 %. Толщины комплекса – 120–250 м. Флюидоупором в кровле служат каменные соли, залегающие в верхней части литвинцевской свиты, а в подошве – галогенно-карбонатный горизонт верхней части ангарской свиты. Пластовые температуры комплекса достигают 22–25° С, а давления – от 4 до 11 МПа, что чаще всего ниже условно-гидростатических. В комплексе распространены солоноватые и соленые воды, которые переходят в рассолы с минерализацией от 1,5 до 50 г/дм³ преимущественно хлоридного натриевого и кальциевого состава. Для размещения рассолов после извлечения промышленных компонентов литвинцевский комплекс не подходит, поскольку он недостаточно надежно изолирован в кровле от зоны активного водообмена. Часто вышележащие отложения и сам горизонт отсутствуют в разрезе из-за предверхоанского перерыва в осадконакоплении.

Бильчирский и биркинский водоносные горизонты булайско-нижнеангарского комплекса представлены доломитами, известняками, отмечаются прослои глинистых доломитов, солей, реже – песчаников. Породы по типу пустотного пространства относятся к кавернозно-поровым, порово-трещинным, поры часто имеют битуминозное и нефтяное насыщение. Комплекс сильно изменчив по коллекторским свойствам. Открытая пористость изменяется от долей процента до 15–20 %. Проницаемость низкая. Из отложений комплекса получены притоки подземных вод с минерализацией от 150 до 600 г/дм³. Состав вод преимущественно хлоридный натриевый кальциевый, отмечается высокая степень метаморфизации. Содержания лития достигают 700 мг/дм³. В интервалах высокой трещиноватости и кавернозности пород отмечаются процессы поглощения бурового раствора. Пластовые температуры составляют 24–35° С, а пластовые давления достигают 25 МПа.

Верхнеусольско-бельский водоносный комплекс подразделяется на атовский, христофоровский, балыхтинский, межсолевой горизонты, представленные переслаиванием известняков, доломитов, глинистых доломитов, ангидрито-доломитов. Тип коллекторов: поровый, трещинно-поровый, кавернозно-

поровый. Фильтрационно-емкостные свойства очень изменчивы: пористость составляет в среднем 3–6 %, проницаемость – до 10·10⁻³ мкм². В комплексе распространены сверхкрепкие рассолы с минерализацией до 600 г/дм³. Содержания лития достигают 500 мг/дм³. Пластовые давления от нормальных до аномально-высоких варьируются от 22 до 46,6 МПа. Пластовые температуры достигают 60° С. Процессы поглощения бурового раствора – от частичного до полного – отмечаются по всему комплексу.

Система	Отдел	Свита	Гидрогеол. формация	Гидрогеол. комплекс	Толщины, м	Продуктивный горизонт	Гидродинамический режим	Нефтегазонасыщенность	Рассолосодержащие горизонты	Утилизация рассолов
ОРДОВИКСКАЯ	нижний	устькутская+ийская	надсолевая	ордовикский	0-447		активный			
		верхолонская+илишинская		ордовикский	407-1071					
	сред.-верхний	литвинцевская	солёносная	средне-верхнекембрийский	114-273	кеморский	затруднённый			
	ниж.-средний	ангарская		литвинцевский	137-183	бильчирский				
		булайская		булайско-нижнеангарский	137-183	биркинский				
	нижний	бельская		верхнеусольско-бельский	137-183	атовский				
		усольская		дакиловско-нижнеусольский	980-2160	христофоровский				
				осинский		балыхтинский				
				устькутский		преображенский				
	V2	татарская		парфеновский		шамановский				
		собинская		боханский		базальный				
ВЕНДСКАЯ	V1	чорская	подсолевая	непско-тирский	213-238		застойный			
		базальн.								
АРХЕЙСКО-ПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ФУНДАМЕНТ										

Схема гидрогеологической стратификации Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Таблица. Средние концентрации промышленных компонентов в рассолах Ангаро-Ленского бассейна

Гидро-геологический комплекс	Содержания промышленных компонентов в рассолах*							
	K	Mg	Br	I	B	Li	Rb	Sr
	г/дм ³			мг/дм ³				
булайско-нижеангарский	<u>0,3–17,0</u> 8,3(15)	<u>0,1–42,0</u> 13,5(15)	<u>0,1–6,9</u> 3,3(12)	<u>6,0–8,0</u> 6,73(3)	<u>3,6–368,0</u> 141,0(5)	<u>5,5–206,0</u> 64,1(13)	<u>5,5–49,0</u> 18,3 (7)	<u>278,0–8070,0</u> 1866,1(13)
верхнеусольско-бельский	<u>0,9–39,0</u> 11,7(27)	<u>0,2–66,3</u> 14,8(27)	<u>0,01–13,9</u> 4,6(27)	<u>5,5–29,4</u> 13,9(10)	<u>2,3–124,7</u> 51,6(17)	<u>8,1–700,0</u> 260,0 (18)	<u>5,9–199,0</u> 48,7(17)	<u>280,0–10600,0</u> 3428,0(22)
даниловско-нижеусольский	<u>0,3–26,2</u> 11,8(30)	<u>0,2–47,6</u> 13,2(30)	<u>0,1–11,1</u> 5,4(28)	<u>0,1–6,8</u> 7,5(10)	<u>7,5–604,0</u> 155,5(10)	<u>37,0–457,0</u> 194,0(23)	<u>2,2–41</u> 21,5(20)	<u>57,5–5980,0</u> 2802,0(23)
непско-тирский	<u>0,4–25,0</u> 7,4(120)	<u>1,2–39,0</u> 9,8(120)	<u>0,1–11,9</u> 4,6(107)	<u>0,1–138,0</u> 12,7 (84)	<u>2,0–117,0</u> 33,0(69)	<u>14,0–370,0</u> 107,1(98)	<u>1,0–134,0</u> 17,6(52)	<u>570,0–7405,0</u> 3119,0(102)
минимальное промышленное содержание	1,0	1,0	0,2	10,0	100,0	10,0	3,0	300,0

* В числителе приведены предельные значения, в знаменателе – средние и количество проб (в скобках)

Булайско-нижеангарский и верхнеусольско-бельский водоносные комплексы наилучшим образом подходят для размещения рассолов после извлечения из них промышленных компонентов, добытых из этих же комплексов. Состав подземных вод комплексов близок между собой, и они надежно экранированы соленосными породами. При выборе объекта для размещения отработанных рассолов лучше останавливаться на залегающем выше комплексе, в этом случае не произойдет существенного изменения гидродинамического режима и разубоживания концентраций полезных компонентов.

Подсолевая гидрогеологическая формация сверху ограничена в кровельной части усольским региональным флюидупором, снизу – кристаллическими породами фундамента. Даниловско-нижеусольский водоносный комплекс расположен в нижней части соленосной формации и в верхней части подсолевой. Он относится к зоне затрудненного и застойного водообмена и залегает на больших глубинах. Даниловско-нижеусольский комплекс представлен осинским, усть-кутским, преображенским горизонтами, сложенными известняками и доломитами, в подчиненном количестве присутствуют прослои ангидритодоломитов, ангидритов, аргиллитов, солей. В комплексе распространены рассолы с минерализацией до 500 г/дм³. Особенностью осинского горизонта является наличие кислых вод с pH от 2,5 до 4. По всему комплексу фиксируются поглощения бурового рас-

твор. Пластовые давления изменяются от 29 до 49 МПа, температуры достигают 50° С.

Даниловско-нижеусольский комплекс может быть рассмотрен в качестве объекта для утилизации отработанных рассолов. При этом также необходимо проведение моделирования взаимодействия рассолов с вмещающими породами, водами, а также оценки последствий изменения гидродинамического режима, поскольку чрезмерная закачка флюидов в пласт может привести к нарушению естественного гидродинамического режима и процессам смешения вод даниловско-нижеусольского и верхнеусольско-бельского комплексов.

Непско-тирский гидрогеологический комплекс состоит из парфеновского, шамановского, боханского и базального водоносных горизонтов. Они сложены разномеристыми песчаниками с подчиненными прослоями алевролитов и аргиллитов. Минерализация рассолов, полученных из комплекса, изменяется от 313 до 484 г/дм³, воды преимущественно хлоридного кальциевого типа с высокой степенью метаморфизации. В терригенном комплексе венда также отмечаются высокие концентрации полезных компонентов (мг/дм³): лития – до 370, стронция – до 7405, рубидия – до 134, брома – до 11900, йода – до 138, бора – до 117 (табл.) (Новиков и др., 2021).

В непско-тирском комплексе зафиксированы аномально-низкие пластовые давления. В парфеновском горизонте давления в среднем составляют 25,7 МПа, а в боханском – 27,3 МПа. Пластовые температуры в парфе-

новском горизонте достигают 61° С. В некоторых скважинах в парфеновском и боханском горизонтах фиксируются поглощения бурового раствора от частичного до полного.

Непско-тирский комплекс является основным газоносным в Ангара-Ленской нефтегазоносной области. К нему приурочены газоконденсатные залежи на уникальных по запасам месторождениях – Ковыктинском и Ангара-Ленском. Меньшие по запасам залежи газа и конденсата открыты на Левобережном, Чиканском, Ангара-Ильимском, Братской, Атовском и др. месторождениях. В связи с этим крайне не рекомендуется проводить закачку отработанных рассолов в данный интервал. Существенное изменение гидродинамического режима может повлиять на контур залежи и процессы добычи углеводородов.

Проведение термодинамического моделирования в системе «вода – порода» подтвердило сделанные выводы. Наилучшим объектом для размещения рассолов после извлечения промышленных компонентов являются бильчирский и биркинский горизонты булайско-нижнеангарского комплекса, поскольку смешение вод не приводит к серьезным изменениям фильтрационно-емкостных свойств. Однако перед проектированием закачки обязательно проведение детального моделирования для целевого горизонта с учетом конкретного планируемого к закачке состава раствора, так как даже в пределах одного месторождения и одного водоносного горизонта реакции могут существенно различаться.

Заключение

Таким образом, соленосная и подсолевая гидрогеологические формации Ангара-Ленского артезианского бассейна содержат огромные запасы промышленных рассолов, извлечение и переработка которых является актуальной задачей для многих недропользователей в настоящее время. Помимо извлечения рассолов необходимо решать вопросы их дальнейшей переработки и утилизации. Наиболее экологичным способом является их дальнейшее размещение в глубоководных водоносных горизонтах. Вы-

бор целевого горизонта должен быть осуществлен на основе проведения термодинамического моделирования в системе «вода – порода» с учетом реальных геохимических параметров и термобарических условий, как было показано в работе (Никитенков и др., 2023). Среди наиболее подходящих стоит отметить биркинский и бильчирский горизонты булайско-нижнеангарского комплекса.

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

Библиографический список

- Никитенков А. Н., Новиков Д. А., Максимова А. А., Пензгин 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. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4157 EDN: ZXGFVL
- 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. DOI: 10.15372/GiG2021115 EDN: NOHZVV
- 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. EDN: PYYICL
- Alexeev S. V., Alexeeva L. P., Vakhromeev A. G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied geochemistry. 2020. Vol. 117. P. 104588. DOI: 10.1016/j.apgeochem. 2020.104588 EDN: PMPGET
- Baspineiro C. F., Franco J., Flexer V. Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines // The Science of the total environment. 2020. Vol. 720. P. 137523. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137523 EDN: LRCRWN
- Farahbakhsh J., Arshadi F., Mofidi Z. et al. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization // Desalination. 2024. Vol. 575. P. 117249. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117249 EDN: KLTNTA
- Pumjan S., Tran Thanh Long, Ho Huu Loc, Park E. Deep well injection for the waste brine disposal solution of potash mining in Northeastern Thailand // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 311. P. 114821. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114821 EDN: SDEFPE

Recommendations for the Injection of Brines in Deep-Lying Aquifers of the Angara-Lena Basin after the Extraction of Industrial Components

Ya. V. Fomina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia.

E-mail: SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Predominantly chloride sodium and calcium brines with mineralization up to 600 g/dm³ are widespread within the lower level of the Angara-Lena artesian basin. They have high concentrations of useful components: Li, Rb, Sr, B, Br, I, etc. After the extraction of useful components, their further injection in deep-lying aquifers is the most environment friendly and economically viable. It is necessary to carefully plan the selection of a suitable object for disposal the residuals in order to avoid dilution of the concentrations of useful components. The physical and chemical modeling of the interaction in the "water-rock" system and laboratory experiments will be of decisive importance.

Key words: *Lithium; industrial water; hydrogeochemistry; hydromineral raw materials; Eastern Siberia; Angara-Lena basin.*

References

Nikitenkov A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A., Penigin A.V., Varaksina I.V., Zhukovskaya E.A. 2023. O vozmozhnosti realizatsii proektov CCS v karbonatnykh kollektorakh Sibirskoy platformy` [On the possibility of implementing CCS projects in carbonate reservoirs of the Siberian platform]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 344(8): 68-78. (in Russian)

Novikov D.A., Chernykh A.V., Konstantinova L.N., Dultsev F.F., Yurchik I.I. 2021. Gidrogeokhimiya venda Sibirskoy platformy` [Hydrogeochemistry of the Vendian of the Siberian Platform]. Russian Geology and Geophysics journal. 62(8):1081-1101. (in Russian)

Ryabtsev A.D., Koczupalo N.P., Vakromeev A.G. et al. 2013. Polikomponentnye litienosnye rassoly Sibirskoy platformy – syryo mnogotselevogo naznacheniya [Polycomponent litho-bearing brine of the Siberian platform is a multi-purpose raw materi-

al]. Rational development of subsoil resources. 1:44-51.

Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. 2020. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. Applied geochemistry. 117: 104588.

Baspineiro, C.F., Franco J., Flexer V. 2020. Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines. The Science of the total environment. 720:137523.

Farahbakhsh J., Arshadi F., Mofidi Z et al. 2024. Direct lithium extraction: A new paradigm for lithium production and resource utilization. Desalination. 575:117249.

Pumjan S., Tran Thanh Long, Ho Huu Loc, Park E. 2022. Deep well injection for the waste brine disposal solution of potash mining in Northeastern Thailand. Journal of Environmental Management. 311: 114821.