

*А. П. Горохов¹, А. Г. Вахромеев^{1,2✉}, М. А. Данилова^{1,3}, К. К. Новодворский¹, Т. В. Кажаяева⁴,
К. С. Савичев⁵, А. В. Корзун^{1,6}, А. В. Левин¹, А. В. Ощепкова¹*

Месторождения промышленных рассолов ЛУ ПАО «РОСНЕФТЬ» на Сибирской платформе: первые оценки ресурсной базы и геолого-экономические показатели освоения

¹ООО «РН-ГИР», г. Красноярск, Российская Федерация

²Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

⁴ООО "Славнефть-Красноярскнефтегаз", г. Красноярск, Российская Федерация

⁵ООО "АнгараНефть", г. Иркутск, Российская Федерация

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: andrey_igp@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены подходы к геолого-экономической оценке ресурсной базы промышленных вод лицензионных участков и месторождений ПАО «Роснефть» в Восточной Сибири, которые выполнены учеными специализированного института по гидроминеральному сырью ООО «РН-ГИР». Проведен анализ основных геолого-экономических показателей совместного освоения залежей углеводородов и промышленных литиеносных рассолов. Рассмотрена методология параллельного развития объектов химической отрасли с объектами нефтяной промышленности цикла «up-stream» на единой по геологическому строению углеводородно-гидроминеральной сырьевой базе. Представленная концепция освоения промышленных вод решает по сути ключевой вызов, который заключается в необходимости поддержания рентабельности процесса добычи (нефти) на поздних стадиях, и базируется на синергии объектов добычи, транспорта и переработки гидроминерального сырья с действующей инфраструктурой углеводородного месторождения.

Ключевые слова: редкометальные промышленные рассолы, попутные воды нефтяных промыслов, литий, бром, геолого-экономическая оценка

*A. P. Gorokhov¹, A. G. Vakhromeev^{1,2✉}, M. A. Danilova^{1,3}, K. K. Novodvorsky¹, T. V. Kazhaeva⁴,
K. S. Savichev⁵, A. V. Korzun^{1,6}, A. V. Levin¹, A. V. Oshchepkova¹*

Exploration experience and strategy for the development of TRIZ polycomponent rare metal industrial brines from the south of the Siberian Platform for lithium salts and other minerals

¹ООО "RN-GIR", Krasnoyarsk, Russian Federation

²Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

⁴ООО Slavneft-Krasnoyarsk Oil Company, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵ООО "Angaraneft", Irkutsk, Russian Federation

⁶Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

e-mail: andrey_igp@mail.ru

Annotation. The approaches to the assessment of the geological and economic resource base of industrial waters of the licensed areas and fields of PJSC Rosneft in Eastern Siberia, which were carried out by scientists of the specialized Institute of Hydromineral Raw Materials RN-GIR, are considered, the main geological and economic indicators of the joint development of oil deposits and industrial lithium-bearing brines are analyzed. The methodology of parallel development of chemical industry facilities with up-stream oil industry facilities based on a single hydrocarbon-hydromineral raw material base is considered. The presented concept of industrial water development addresses the key challenge of maintaining the profitability of the production process (oil production) in the later stages, and is based on the synergy of hydro-mineral raw material extraction, transportation, and processing facilities with the existing infrastructure of a hydrocarbon field.

Keywords: rare-metal industrial brines, associated water from oil fields, lithium, bromine, geological and economic assessment

Введение

В текущем десятилетии мировая промышленность сделала мощный рывок в производстве литиевых источников тока, и это повлекло за собой резкий рост цен на соли лития. В России имеются все типы промышленного сырья на литий: твёрдое редкометальное сырьё, литийсодержащие глины – гекториты и литиеносные рассолы [1, 3-5, 8-10]. Запасы поликомпонентных редкометальных рассолов одного из месторождений ПАО «Роснефть» поставлены на государственный баланс в 2025 году.

Поиск углеводородов на Сибирской платформе неразрывно связан с оценкой и выбором перспективных участков для доразведки и попутной, совместно с углеводородами, добычи промышленных литиеносных рассолов [1]. Цель статьи – показать первые подходы к оценке ресурсной базы компании «Роснефть», которые выполнены учеными специализированного института по гидроминеральному сырью и, что самое главное, продемонстрировать ее геолого-экономические показатели.

Сейчас действует постановление правительства и указ Президента России В.В. Путина о «перенацеливании» геологоразведочного направления России на импортозависимые, дефицитные виды полезных ископаемых, в первую очередь на доразведку, добычу и комплексную переработку редких и редкоземельных металлов. В рассолах Сибирской платформы [1, 3-5, 8-10] по результатам химических анализов пластовых вод уже давно обнаружены: молибден, вольфрам, литий, циркон, ниобий, тантал, редкоземельные элементы, йод, бром, рубидий, цезий, стронций и целая серия других компонентов.

Концепция вовлечения рассолов в производство

Концепция геолого-экономической оценки и вовлечения редкометальных промышленных рассолов в освоение базируется на весьма логичной идее — параллельном развитии этой отрасли с нефтяной промышленностью на единой по геологической сути углеводородно-гидроминеральной сырьевой базе. Освоение Восточной Сибири произошло буквально на наших глазах, не прошло и 15 лет. Каждое месторождение имеет свой положительный «жизненный» цикл, который

проектируется в технологических схемах разработки: от этапа зрелой добычи до стадии падающей добычи.

Базовой макроэкономической практикой в сырьевых проектах на протяжении полувека была и остается кооперация крупных компаний и объединение акционерных капиталов. В этих рамках идея привлечения дополнительных инвестиций в разработку редкометального сырья, добываемого попутно с нефтью, выглядит очень перспективно. Если посмотреть на лицензионные участки «Роснефти» на Сибирской платформе (см. рис. 1), то каждый из них обладает определенным гидроминеральным потенциалом. За счет переоценки ресурсной базы полезных элементов в промышленных водах – лития, рубидия, стронция, солей кальция, магния и калия, брома, еще на стадии акционерного капитала и без вложений в переработку, стоимость акций компании-недропользователя может существенно вырасти. Даже просто переоценка запасов каждого месторождения с учетом гидроминерального сырья существенно поднимает акционерный капитал любого общества. Это актуально для привлечения бизнес-партнеров.



Рис. 1. Расположение ЛУ Роснефть на территории Восточно-Сибирской соленосной подпровинции бромных и редкометальных рассолов

Ключевой вызов и экономический потенциал

Ключевой вызов для компании «Роснефть» заключается в необходимости поддержания рентабельности процесса добычи (нефти) на поздних стадиях. Из того же фонда скважин, и по тем же трубопроводным системам мы получаем на

установки подготовки нефти (УПН) смесь углеводородов и подошвенной/законтурной воды (рис. 2). Нефтяники называют эту воду пластовым рассолом, но фактически это богатейшее гидроминеральное сырье с промышленным содержанием редких, рассеянных элементов, минеральных солей и брома [8], которое является ценным дополнительным активом ПАО «РОСНЕФТЬ» как недропользователя. На второй стадии разработки месторождения добыча нефти достигает пика, а затем начинает падать. В определенный момент запуск переработки гидроминерального сырья позволяет увеличить NPV (чистый дисконтированный доход) и получить дополнительный доход (рис. 3). В сопоставлении этого дохода с затратами и состоит задача геолого-экономической оценки [2]. При этом мы значительно снижаем объем капвложений (основных фондов), так как новый проект переработки попутных промышленных вод проектируется и реализуется в увязке с уже существующей общепромысловой нефтегазовой инфраструктурой месторождения.



Рис. 2. Предложение по совместной разработке объектов УВС и ГМС

Как в России, так и за рубежом известны нефтедобывающие предприятия, где на сотнях действующих скважин нефтепромыслов обводненность продукции составляет от 70% до 95%. Сейчас этот объем попутных вод - рассолов просто закачивается обратно для поддержания пластового давления (ППД) либо утилизируется. Но ведь существует, отлажена и работает готовая система сбора продукции из скважин (нефть, подошвенные рассолы), и действующая инфраструктура, в которую не хватает только цикла переработки для извлечения, например, лития (с получением хлорида, моногидрата гидроокиси или карбоната лития), брома, тяжелых светлых жидкостей для бурения глубоких скважин [4, 6].

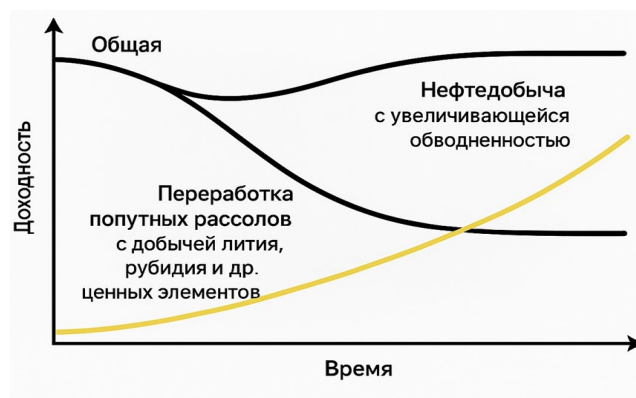


Рис. 3. Основные показатели эффективности освоения попутных вод

Что касается концентраций в попутно добываемых рассолах: на некоторых месторождениях содержание лития составляет от 40 до 58 мг/л, рубидия – 3,5 мг/л, брома – более 2,5 тысяч мг/л. Если же говорить о самостоятельных (чисто гидроминеральных) залежах, то на некоторых участках по разным пластам концентрация лития превышает 450 мг/л. Это огромные значения, гарантирующие значимый дополнительный доход недропользователю при наличии освоенной [1, 6] технологии извлечения ценных элементов и их соединений (табл. 1).

Таблица 1. Содержание полезных компонентов в рассолах на ЛУ компании «Роснефть», в мг/л. В скобках указаны минимальные концентрации

Попутно добываемые рассолы			Рассолы самостоятельных объектов			
ДО	1	2	1	2	3	
ЛУ	1	2	1	2	3	
Водоносный комплекс / пласт	Рифейский		А6	А4	А6	А4
Количество скважин	145	62	-	-	-	-
Количество протоколов	328	112	2	4	4	5
Li ⁺ (10)	42,6	58,5	477	126	317	123,9
Rb ⁺ (3)	3,45	3,5	19,6	6,5	32,3	8,1
Sr ²⁺ (300)	900,8	627,5	1912	1947	4607	2738
Cs ⁺ (0,3)	0,04	н/д	0,51	0,03	0,32	0,02
B (250)	49,1	55,41	453,1	613	314,2	284,6
Br (250)	2915,8	2677	5057	2280	7505	5574
I (10)	8,41	12,2	6,4	2,6	6,4	7,88

Технологические решения и опыт нефтегазовых месторождений Камовского свода

В качестве примера рассмотрим (рис. 4) схему обращения с попутными водами на одном из месторождений Красноярского края (Камовский свод). Схема предполагает отделение нефти от попутной воды – рассолов, подачу ее на установку извлечения ценных компонентов, а затем — обратную закачку очищенного рассола в поглощающие скважины в кембрийские отложения. Это месторождение примечательно тем, что на нем не производится поддержание пластового давления за счет закачки пресных вод, то есть попутная вода идет истинная, природная, без разбавления.

Методология нашего исследования включала анализ обводненности, выбор технологий, экономическую оценку и маркетинг. Для расчетов были выбраны три конечных продукта: хлорид кальция, бромид кальция и карбонат лития.

По предварительным расчетам, отдельно карбонат лития экономику проекта не вытягивает, поэтому важен комплексный подход.

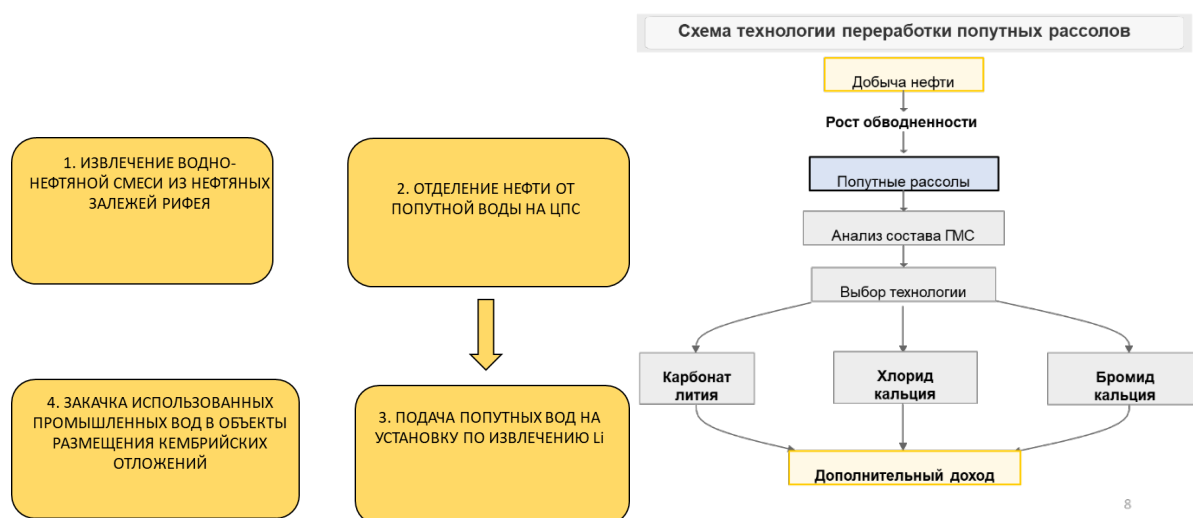


Рис. 4. Схема обращения с попутными водами для нефтяного месторождения целей извлечения полезных компонентов

Вспомним технологию, до которой мы «дошли» еще в 90-х годах во время работы на Знаменской промплощадке в Иркутской области. Проектировался «классический» метод получения товарного брома, который требует строительства опасных складов хранения хлора (СДЯВ). Но российские технологи (А.Д. Рябцев, Н.П. Коцупало) предложили гениальную идею: подвергать электролизу сам хлоридный рассол в потоке (Рис. 5). При воздействии тока на аноде выделяется свободный хлор, который за счет более высокой активности тут же вытесняет бром из этого же потока рассола [7]. Далее идет процесс классической парогазовой десорбции и конденсации паров брома. Схема приоритетная, без производного газообразного хлора, была запатентована в России, и мы до сих пор гордимся этой совместной разработкой.

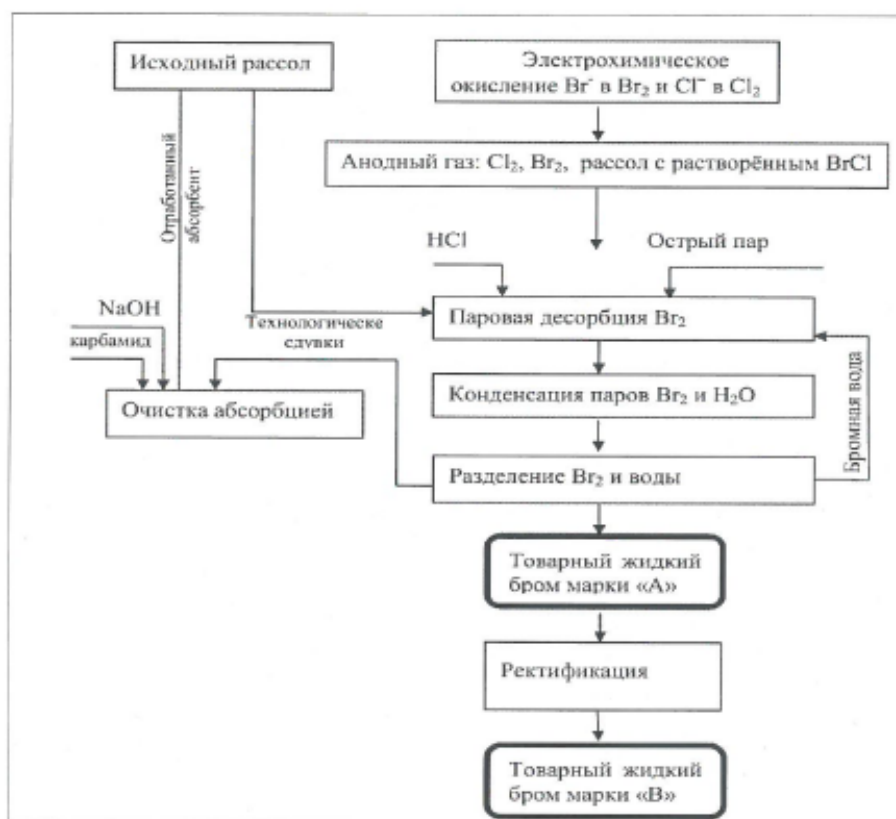


Рис. 5. Способ получения товарного брома электролизом потока рассола без использования привозного газообразного хлора [7].

Если говорить о геологии рифейского водоносного комплекса на Камовском своде, то резервуар представляет собой гигантский массивный трещинный коллектор, ограниченный предвендской эрозионной поверхностью, плащеобразно перекрытый палеозойским осадочным чехлом (рис 6). Рассолы рифейских отложений относятся к хлоридно-кальциевому и натриево-кальциевому типам, кислые или слабокислые. При этом наиболее кислые рассолы Сибирской платформы, как правило, оказываются самыми богатыми на редкометальное и бромное сырье.

Помимо попутных вод, компания «Роснефть» владеет участками с самостоятельными залежами гидроминерального сырья, которые вскрываются скважинами еще на стадии поиска углеводородов. Восточно-Сибирский солеродный бассейн – крупнейший на планете [8]. Чередование карбонатных и соленосных толщ в разрезе обеспечивает надежную сохранность этих изолированных залежей, расположенных друг над другом, причем с совершенно разными концентрациями элементов и разным объемом пустотного пространства. При оценке ресурсов и подсчете запасов таких замкнутых систем мы опираемся на данные электроразведки (где рассолы выделяются как области хорошей «проводимости»), комплексируя эти данные с данными сейсморазведки. Примечательно, что в оценку попадают только упругие запасы рассолов, которые составляют в среднем около 2.5% от общего объема

[illegible]

Экономическая эффективность проектов

Рекомендованный нами вариант (рис. 7) комплексной переработки промышленных рассолов включает извлечение лития, рубидия, брома и получение хлорида кальция. Расчетная производительность опытно-промышленной установки составляет 5 млн тонн рассола в год. При таких параметрах мы получаем: карбонат лития – около 3 000 тонн в год; рубидий хлористый – 1.5 тонны в год и водный хлорид кальция – 43 000 тонн в год.

39

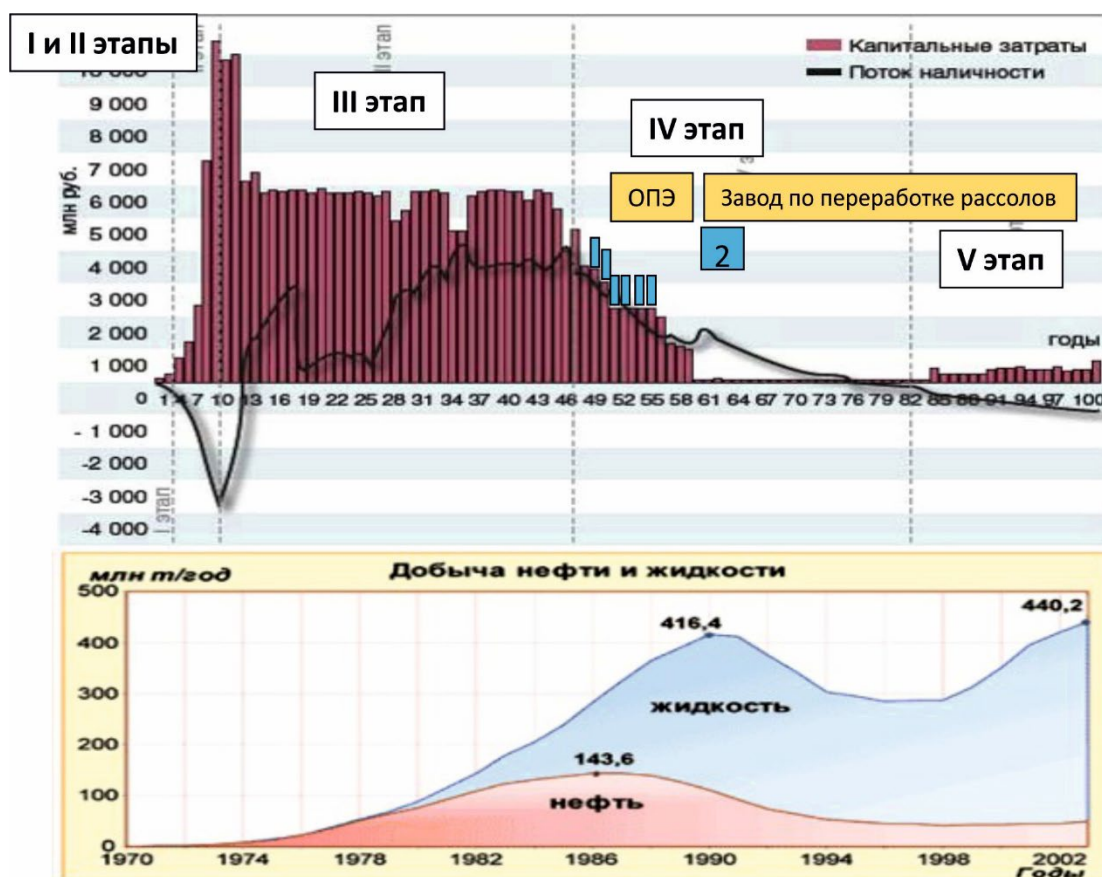


Рис. 7. Совместная переработка сырья с месторождений УВС и ГМС: характерный денежный поток при разработке месторождения

По нашим оценкам, для опытно-промышленной установки показатели эффективности составляют: IRR (внутренняя норма доходности) около 24%, NPV – порядка 830 млн рублей, а срок окупаемости капитальных вложений – около 6 лет. Динамическая модель учитывает акционерный капитал, заемные средства, налоговые льготы и процентные ставки по кредитам. Проект является высоко привлекательным для инвестиций.

Заключение

Резюмируя, важно подчеркнуть: пластовый рассол в едином углеводородно-гидроминеральном Проекте – это не сопутствующие отходы нефтедобычи, а самостоятельное, полноценное и высоколиквидное сырье. Использование существующей инфраструктуры углеводородных месторождений позволяет в кратчайшие сроки запустить рентабельное производство дефицитных металлов и соединений в синергии с действующими нефтепромыслами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев С.В. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация // С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев. – Иркутск: Изд-во ООО «Географ». – 2014. – 162 с.

2. Бондаренко С.С., Лубенский Л.А., Куликов Г.В. Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод. – Москва: Недра, 1988. – 204 с.
3. Вахромеев А.Г. Гл. 1. Знаменский рассолопромысловый проект. С. 13-69. // Кузьмин С.Б., Вахромеев А.Г. Геоэкологические исследования на Лено-Ангарском плато. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. – 122 с.
4. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): автореф. дис...д-ра геол.-мин. наук. – Иркутск, 2009. – 36 с.
5. Вожов В.И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазовой провинции. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2006. – 209 с.
6. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Химия и технология получения соединений лития из литиеносного гидроминерального сырья // ЗАО «Экостар-Наутех». – Новосибирск: изд-во «ГЕО», 2008. – 291 с.
7. Патент РФ № 2171862. Способ извлечения брома и установка для его осуществления // Рябцев А.Д., Гущина Е.П., Шинкаренко П.И. и др. Заявл. 25.12. 1998, опубл.: Бюлл. № 36, 10.01. 2001.
8. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. – М. : Наука, 1966. – 322 с.
9. Шварцев С.Л. О формировании крепких и предельно насыщенных подземных рассолов. Проблемы соленакопления. Т.1. Новосибирск: Наука, 1977. – С. 192–195.
10. S.V. Alexeev, L.P. Alexeeva, A.G. Vakhromeev. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied Geochemistry, 117(6) 2020.

© А. П. Горехов, А. Г. Вахромеев, М. А. Данилова, К. К. Новодворский, Т. В. Кажеева, К. С. Савичев,
А. В. Корзун, А. В. Левин, А. В. Ощепкова, 2026