

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

КОМПЛЕКСНОЕ ОСВОЕНИЕ РАССОЛОВ БЕРИКЕЙСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2024 г. А. Б. Алхасов^а, *, Д. А. Алхасова^а

^аИнститут проблем геотермии и возобновляемой энергетики ОИВТ РАН,
просп. И. Шамиля, д. 39а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367030 Россия

*e-mail: alibek_alhasov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2023 г.

После доработки 27.11.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Показано, что комплексная переработка гидротермальных рассолов Берикейского геотермального месторождения может быть высокоэффективной. Освоение ресурсов месторождения возможно осуществить в два этапа. На первом этапе предлагается организовать производство химических соединений на базе самоизливающихся рассолов. После отработки технологии извлечения химических компонентов из рассола рекомендуется перейти ко второму этапу — реализации комплексной технологии утилизации тепловой энергии с последующим извлечением химических компонентов из охлажденного рассола. Такая методика позволяет использовать все ресурсы месторождения. Тепловая энергия геотермального рассола утилизируется в теплице и геотермально-парогазовой электростанции (ГПЭС), которая включает в себя блоки бинарной геотермальной электростанции (ГеоЭС) и газотурбинной электростанции (ГТЭС). В бинарной ГеоЭС нагрев низкокипящего рабочего тела до более высокой температуры осуществляется путем съема тепла с геотермального рассола. Дальнейший нагрев рабочего тела до температуры испарения, его испарение и перегрев осуществляются теплом выхлопных газов ГТЭС. Строительство ГПЭС позволит осуществить бесперебойное и автономное обеспечение всего комплекса электроэнергией. Освоение всех гидротермальных ресурсов Берикейского месторождения даст возможность ежегодно получать 2000 т карбоната лития и обеспечить тем самым значительную часть потребностей в нем промышленности России, а также производить более 580 тыс. т пищевой соли, что решит проблему импортозамещения этого продукта.

Ключевые слова: геотермальные ресурсы, бинарная геотермальная электростанция, геотермальное тепло, низкокипящее рабочее тело, геотермально-парогазовая электростанция, высокоминерализованные рассолы, карбонат лития, реконструирование простаивающих скважин

DOI: 10.56304/S0040363624050023

Для развития энергоэффективных, экологически безопасных и автоматизированных технологий, базирующихся на новых принципах работы и новых материалах, необходимы такие редкие металлы, как литий, стронций, рубидий и цезий. Благодаря своим уникальным свойствам литий является наиболее востребованным из редких металлов. Литий и его соединения используются практически во всех отраслях промышленности, и среди них особенно важны атомная и оборонная. В связи с ускоренным развитием передовых технологий, основу которых составляют литий-ионные аккумуляторы, потребность в литии в последние годы резко выросла и в дальнейшем будет увеличиваться.

Главными производителями соединений лития являются Боливия, США, Чили, Аргентина, Австралия и Китай. В России нет добычи лития и его

соединений, весь литий, используемый в различных сферах экономики, завозится из-за рубежа.

С повышением спроса на щелочные и щелочно-земельные металлы принципиально меняются взгляды на их источники и запасы сырья. Перспективное направление расширения минерально-сырьевой базы многих ценных химических элементов — получение их соединений из природных и техногенных вод и рассолов, содержащих в том числе и редкие металлы.

Россия располагает значительными гидроминеральными ресурсами для обеспечения потребностей различных отраслей экономики в редких металлах. Наиболее перспективными для освоения являются высокотемпературные геотермальные рассольные воды Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ). Для рационального использования этих вод необходима разра-

ботка технологий комплексного извлечения тепловой энергии и минеральных солей с оптимизацией термодинамических циклов, реализуемых в установках по утилизации тепла [1–6]. Ресурсы находятся в мезозойских отложениях глубокого залегания и относятся к рассолам хлоридно-натриевого и кальциевого состава с минерализацией 60–210 г/дм³ и пластовыми температурами 130–220°C и выше. Рассолы являются промышленным гидроминеральным сырьем с высоким содержанием лития, рубидия, цезия, стронция, йода, брома, бора, калия и магния. Потенциальный объем добычи рассолов составляет 2,6 млн м³/сут [7].

В настоящее время эти ресурсы не осваиваются ни как энергетические, ни как минерально-сырьевые, хотя в пределах ВПАБ на выработанных нефтегазовых месторождениях имеется более 2000 простаивающих скважин, которые можно перевести на добычу геотермальных вод. Капитальные затраты на реконструкцию простаивающих нефтегазовых скважин незначительны по сравнению с затратами на бурение и обустройство новых геотермальных скважин. Назрела необходимость в комплексном освоении этих ресурсов с использованием простаивающих скважин, что позволит решить целый комплекс экономических, экологических и социальных проблем региона. На территории ВПАБ на глубинах 3000–5500 м выявлено 92 площади с редкометалльными промышленными водами, из которых 55 находятся на территории Дагестана, 29 – в Ставропольском крае и 8 – в Чеченской Республике [8, 9].

К промышленным водам относятся подземные воды, содержащие полезные компоненты или их соединения в количествах, обеспечивающих их рентабельную добычу и переработку.

При комплексном освоении высокоминерализованных термальных вод их тепловой потенциал используется на различные теплоэнергетические нужды, а затем из геотермального рассола извлекаются химические компоненты. Наиболее перспективно использовать тепловой потенциал для получения электроэнергии, применяя технологии бинарных ГеоЭС на низкокипящих рабочих телах.

В высокотемпературных рассолах ВПАБ редкие элементы содержатся в промышленных концентрациях и в количествах, достаточных для обеспечения различных отраслей экономики России в долгосрочной перспективе. Для этих редких элементов установлены нижние пределы их концентраций в промышленных термальных минерализованных водах: литий – 10,0, стронций – 300,0, рубидий – 3,0, цезий – 0,5 мг/дм³ [10].

Рассолы ВПАБ как сырье для химической и редкометалльной отраслей промышленности привлекательны в связи с их значительными запасами и относительно невысокой стоимостью

извлечения из них практически всех ценных химических элементов. При комплексном освоении геотермальных рассолов также существенно снижаются затраты на решение экологических проблем. Следует отметить, что извлечение химических элементов из горной породы путем строительства горных предприятий обходится намного дороже и приводит к значительным негативным изменениям природной среды.

Оптимальным является освоение в ближайшем будущем части этих ресурсов с использованием простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях. Только в Северном Дагестане имеется более 1000 таких скважин, пробуренных на глубины от 2000 до 5000 м. Большинство из этих скважин могут быть успешно применены для добычи термальных вод в системах по выработке электроэнергии в бинарных ГеоЭС.

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕРИКЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Наиболее подготовленными к комплексному освоению являются геотермальные рассолы Берикейского и Тарумовского месторождений и попутные высокоминерализованные воды Южно-Сухокумской группы газонефтяных скважин Северного Дагестана.

Первоочередное освоение Берикейского месторождения обусловлено необходимостью решения экологической проблемы, связанной с многолетним сбросом высокоминерализованных рассолов из аварийной скважины в акваторию Каспийского моря. Берикейское геотермальное месторождение расположено в 100 км к югу от г. Махачкалы и в 5 км от береговой линии Каспийского моря. В 1954 г. в результате аварии на скважине № 20 месторождения образовался провал, превратившийся в проточное озеро редкометалльных рассолов, и в настоящее время в него разгружаются сотни грифонов. Рассол из озера по отводному каналу сливается в море (рис. 1). С момента аварии в море вынесено более 10 млн т минеральных солей и токсичных компонентов. В начале аварии на скважине ее расход составлял 40 тыс. м³/сут, со временем расход начал снижаться и к 1980 г. достиг уровня 1600 м³/сут. По современным замерам расход не превышает 1500 м³/сут, что свидетельствует о выходе скважины на стационарный режим.

Минерализация самоизливающегося рассола составляет 70 кг/м³ с содержанием лития 0,044 кг/м³. Необходимо отметить, что минерализация и концентрации отдельных компонентов не изменились за все время излива рассола из скважины. В табл. 1 приведен химический состав рассола. Температура рассола в отводном канале на выходе из озера



Рис. 1. Озеро из самоизливающихся рассолов

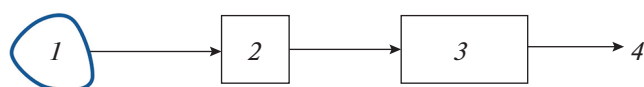


Рис. 2. Схема освоения самоизливающихся рассолов Берикейского геотермального месторождения.
 1 – озеро из рассола; 2 – насосная станция; 3 – завод по извлечению химических компонентов; 4 – опресненная вода на хозяйственные цели

снижается с 70 до 23–35°C в зависимости от времени года, что свидетельствует об активном отводе тепла из озера в окружающую среду.

Добыча геотермальных рассолов на Берикейском месторождении может быть доведена до 10 млн м³/год при времени разработки 40 лет, что позволит получить 2000 т/год карбоната лития. Для этого нужно восстановить 17 простаивающих скважин, оборудовать их глубинными насосами и обустроить водозабор.

Комплексное освоение геотермальных ресурсов Берикейского месторождения предлагается осуществлять в два этапа [11]. На первом этапе на базе самоизливающихся рассолов с дебитом 1500 м³/сут необходимо организовать производство по извле-

чению химических компонентов из рассола с утилизацией его тепловой энергии (рис. 2). После отработки этой технологии и поиска путей снижения затрат на ее реализацию можно перейти ко второму этапу – созданию расширенного производства с использованием всех ресурсов месторождения.

В табл. 2 приведены потенциальные объемы добычи соединений лития, магния, кальция, а также поваренной соли после реализации первого и второго этапов проекта.

АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РАССОЛОВ БЕРИКЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Насущной энергетической проблемой для Дагестана является нехватка электроэнергии. Генерирующие мощности обеспечивают до 55% необходимого энергопотребления, остальная электроэнергия поступает из-за пределов республики. В условиях постоянных веерных отключений электроэнергии для стабильной эксплуатации завода по переработке геотермального рассола необходима автономная энергетическая система. Та-

Таблица 1. Химический состав рассола Берикейского месторождения, мг/дм³

Li ⁺	K ⁺	Na ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Fe _{общ}	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻	HCO ₃ ⁻
44	590	24060	4	1	270	1400	260	230	23	41050	165	15	1350

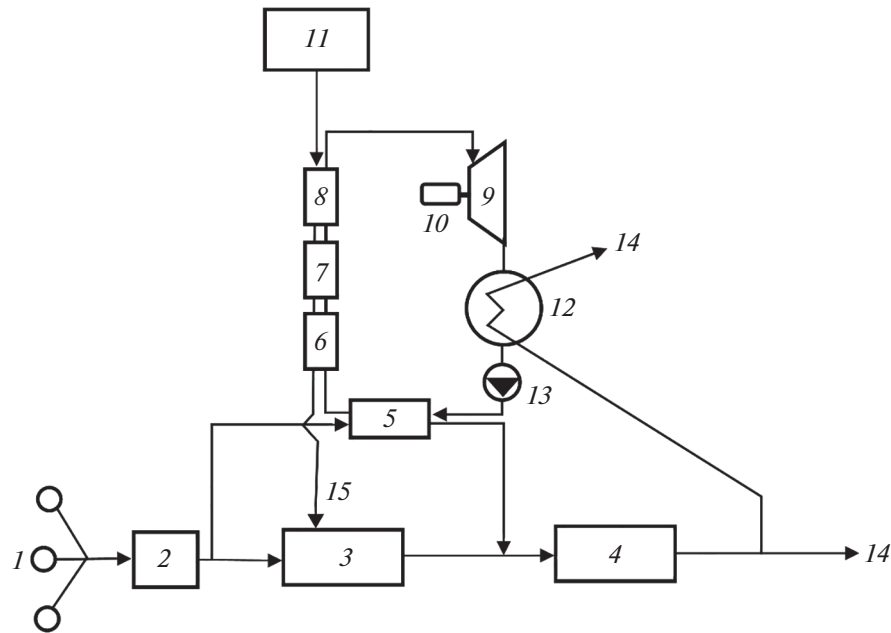


Рис. 3. Схема комплексного освоения геотермальных рассолов Берикейского месторождения. 1 – геотермальные скважины; 2 – сборный пункт; 3 – теплица; 4 – завод по извлечению химических компонентов; 5 – теплообменник для нагрева низкокипящего рабочего тела; 6 – теплообменник для догрева рабочего тела до температуры испарения; 7 – испаритель; 8 – перегреватель; 9 – турбина; 10 – генератор; 11 – газотурбинная электростанция; 12 – конденсатор; 13 – циркуляционный насос; 14 – опресненная вода; 15 – подвод отработанных выхлопных газов в теплицу

кой системой может быть ГПЭС, состоящая из бинарной ГеоЭС и ГТЭС.

Принципиальная схема второго этапа освоения рассолов Берикейского геотермального месторождения с полным извлечением всех имеющихся в них ресурсов приведена на рис. 3. Геотермальный рассол из добычных скважин 1 поступает в сборный пункт 2, откуда часть рассола направляется в ГПЭС, а другая часть подводится в теплицу 3. Рассол проходит в теплообменник 5 типа “труба в трубе”, нагревает низкокипящее рабочее тело до определенной температуры и затем, уже в охлажденном состоянии, направляется на завод по извлечению химических компонентов 4. Туда же поступает другая часть рассола из теплицы. Из теплообменника 5 рабочее тело последовательно проходит через теплообменники 6, 7 и 8, где осуществляется его нагрев до температуры испаре-

ния, испарение и перегрев теплом от выхлопных газов ГТЭС. Далее перегретое рабочее тело подается на турбину 9 с генератором 10, где вырабатывается электроэнергия. Отработанный в турбине пар проходит через конденсатор 12 и далее циркуляционным насосом направляется в теплообменник 5. На заводе 4 из рассола извлекаются химические компоненты, что приводит к его опреснению. Опресненная вода используется на различные хозяйственные нужды, в том числе и для конденсации рабочего тела в цикле Ренкина. Часть охлажденных выхлопных газов подводится в теплицу для углекислотной подкормки растений, остальная часть выбрасывается в атмосферу.

На рис. 4 приведена T, s -диаграмма геотермально-парогазового цикла, состоящая из двух частей: цикла Брайтона с утилизацией тепла отработавших в газовой турбине продуктов сгора-

Таблица 2. Потенциальный объем добычи полезных соединений из рассолов Берикейского месторождения

Продукт, получаемый из рассолов	Количество соединений в рассолах, кг/м ³	Объем добычи, т/год, после реализации этапа	
		первого	второго
Карбонат лития (Li ₂ CO ₃)	0.2	110	2000
Магnezия жженная (MgO)	0.4	220	4000
Карбонат кальция (CaCO ₃)	2.6	1425	26000
Поваренная соль (NaCl)	58.2	31865	582000

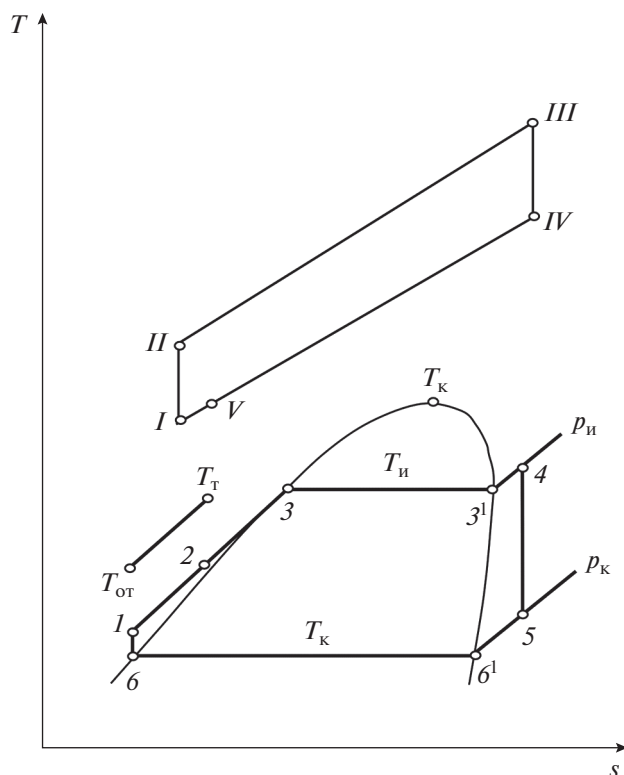


Рис. 4. T, s -диаграмма геотермально-парогазового цикла.

T_t — температура термальной воды; $T_{от}$ — температура отработанной воды; $T_{и}$ — температура испарения; T_k — температура кипения; $p_{и}$ — давление испарения; p_k — давление кипения

ния ($I-II-III-IV-V-I$) и цикла Ренкина ($I-2-3-3'-4-5-6'-6-I$). Рабочее тело нагревается до 60°C на участке $1-2$ теплом от рассола, при этом температура термальной воды снижается с 70°C до температуры отработанной воды 40°C в теплообменнике 5 (см. рис. 3). Дальнейший нагрев рабочего тела ($2-3$), его испарение ($3-3'$) и перегрев ($3'-4$) происходят в теплообменниках 6, 7 и 8 (см. рис. 3) теплом выхлопных газов ГТЭС при снижении их температуры ($IV-V$).

Массовый расход низкокипящего рабочего тела m и мощность N_g ГеоЭС определяются по формулам

$$m(h_2 - h_1) = Gc_b(T_t - T_{от}); \quad N_g = \eta m(h_4 - h_5),$$

где h_1, h_2, h_4, h_5 — энтальпии низкокипящего рабочего тела, соответствующие точкам 1, 2, 4, 5 на рис. 4, кДж/кг; G — массовый расход геотермального рассола, кг/с; c_b — теплоемкость рассола, кДж/(кг · К); η — относительный электрический КПД турбогенератора.

Характеристики ГПЭС на основе ГТУ-4П для геотермальных рассолов Берикейского месторождения приведены далее:

Мощность энергоблока ГТУ-4П, МВт:

электрическая 4.3

тепловая 9.63

Мощность энергоблока

бинарной ГеоЭС, МВт 1.5

Расход, кг/с:

геотермального рассола 18.2

низкокипящего рабочего тела (изобутан) 28

Температура рассола, $^\circ\text{C}$:

начальная 70

после отработки 40

Температура рабочего тела, $^\circ\text{C}$:

в первичном теплообменнике 60

в испарителе 89

на выходе из перегревателя 91

Давление испарения рабочего тела, МПа 1.6

Освоение всех гидрогеотермальных ресурсов Берикейского месторождения (объем добычи рассола 10 млн $\text{м}^3/\text{год}$) со снижением их температуры до 40°C позволит отапливать теплицы площадью 0.15 км^2 , куда также будут поступать отработанные выхлопные газы из ГПЭС — для углекислотной подкормки растений. Тепличный блок существенно улучшит эколого-экономические показатели всей системы комплексного освоения месторождения.

ВЫВОДЫ

1. Комплексное освоение геотермальных рассолов Берикейского месторождения способно решить экологическую проблему, связанную с многолетним сбросом в Каспийское море высокоминерализованных токсичных рассолов.

2. Разработка технологии добычи редких элементов из рассолов и организация производства на Берикейском месторождении позволят получить до 2000 т карбоната лития и значительно снизить объемы закупки лития за рубежом. Производство лития в России будет способствовать развитию технологий нового поколения в различных областях промышленности.

3. Переработка рассолов Берикейского месторождения может дать до 580 тыс. т поваренной соли ежегодно, что полностью обеспечит потребности России в этом продукте.

4. Комплексное освоение гидрогеотермальных минерализованных ресурсов — перспективное направление развития технологий переработки природного гидроминерального сырья с исполь-

зованием простаивающих нефтегазовых скважин, которые должны быть реконструированы и переведены на добычу геотермальных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008.
2. Алхасов А.Б., Раджабов Р.И. Повышение эффективности использования геотермального тепла // Теплоэнергетика. 2003. № 3. С. 52–54.
3. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северокавказского региона // Теплоэнергетика, 2014. № 6. С. 28–34.
<https://doi.org/10.1134/S004036326614030023>
4. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Оценка эффективности создания бинарных геотермальных энергоустановок с использованием отработанных нефтяных и газовых скважин на юге России // Теплоэнергетика. 2018. № 2. С. 24–32.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618020017>
5. Рамазанов А.Ш., Атаев Д.Р., Каспарова М.А. Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 4. С. 52–58.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216404.6238>
6. Коцупало Н.П., Рябцев А.Д. Химия и технология получения соединений лития из литиеносного гидроминерального сырья. Новосибирск: Гео, 2008.
7. Освоение геотермальной энергии / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, М.Г. Алишаев, А.Ш. Рамазанов, М.М. Рамазанов. М.: Физматлит, 2022.
8. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001.
9. Технологии освоения высокоминерализованных геотермальных ресурсов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. 2017. № 9. С. 17–24.
<https://doi.org/10.1134/S0040363617090016>
10. Бондаренко С.С., Куликов Г.В. Подземные промышленные воды. М.: Недра, 1984.
11. Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 11–17.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615060016>

Comprehensive Development of Brines of the Berikei Geothermal Field

A. B. Alkhasov^{a,*} and D. A. Alkhasova^a

^a Institute of Geothermal Problems and Renewable Energy, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030 Russia

*e-mail: alibek_alkhasov@mail.ru

Abstract—It has been shown that complex processing of hydrothermal brines from the Berikei geothermal field can be highly effective. The development of the deposit's resources can be carried out in two stages. At the first stage, it is proposed to organize the production of chemical compounds based on self-flowing brines. After developing the technology for extracting chemical components from brine, it is recommended to move on to the second stage: implementing an integrated technology for utilizing thermal energy with the subsequent extraction of chemical components from the cooled brine. This technique allows one to use all the resources of the field. The thermal energy of the geothermal brine is recovered in a greenhouse and a geothermal steam-gas power plant (GSGP), which includes units of a binary geothermal power plant (GeoPP) and a gas turbine power plant (GTPP). In a binary GeoPP, the low-boiling working fluid is heated to a higher temperature by removing heat from the geothermal brine. Further heating of the working fluid to the evaporation temperature and its evaporation and overheating are carried out by the heat of the GTPP exhaust gases. The construction of a GSGP will allow for uninterrupted and autonomous supply of electricity to the entire complex. The development of all hydrothermal resources of the Berikei deposit will make it possible to annually obtain 2000 t of lithium carbonate and, thereby, provide a significant part of the needs of Russian industry as well as produce more than 580 000 t of table salt, which will solve the problem of import substitution of this product.

Keywords: geothermal resources, binary geothermal power plant, geothermal heat, low-boiling working fluid, geothermal-steam-gas power plant, highly mineralized brines, lithium carbonate, reconstruction of idle wells