

С. Б. Коротков^{1✉}, Д. В. Изюмченко², С. В. Кожевников²

Глубокозалегающие зоны сосуществования поликомпонентных кристаллогидратов и маточной рапы в кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Иркутского амфитеатра Сибирской платформы

¹ООО «Газпром инвест», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: skorotkov@mail.ru

Аннотация. В кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Иркутского амфитеатра Сибирской платформы на глубинах от 1850 до 2400 м впервые зафиксировано, предположительно, стабильное сосуществование кристаллогидратов в интервалах каменной соли и маточной рапы в поровом пространстве доломитов. На основе данных кавернометрии, ГИС и керна выявлены контактирующие зоны «пласт-рассол». Выявленный феномен позволит развить новые идеи в существующие представления о генезисе соленосных формаций и оптимизировать комплекс геофизических и геохимических методов разведки.

Ключевые слова: кристаллогидраты, маточная рапа, литий, Сибирская платформа

S. B. Korotkov^{1✉}, D. V. Izumchenko², S. V. Kozhevnikov²

Deep-Seated zones of coexisting multicomponent crystalline hydrates and mother brines in the cambrian halogen-carbonate complex of the Irkutsk amphitheater of the Siberian platform

¹Gazprom Invest LLC, St. Petersburg, Russian Federation

²Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: skorotkov@mail.ru

Abstract. This paper presents the results of the discovery of deep-seated zones (intervals of 1850–2400 m) within the section of the Cambrian halogen-carbonate complex of the Irkutsk Amphitheater of the Siberian Platform, where presumably stable coexistence of crystalline hydrates in rock salt intervals and mother brines in the pore space of dolomites has been documented. Based on caliper logging data, wireline logging, and core analysis, contact "formation-brine" zones have been identified. The observed phenomenon provides a basis for establishing exploration criteria and developing a set of geophysical and geochemical exploration methods.

Keywords: crystalline hydrates, brine, lithium, Siberian Platform

Введение

Глубокозалегающие поликомпонентные крепкие рассолы кембрийского галогенно-карбонатного комплекса юга Сибирской платформы представляют собой уникальный тип трудноизвлекаемого гидроминерального сырья, содержащего повышенные концентрации лития, брома, калия, магния и других ценных химических компонентов – ТРИЗ ГМС [1]. В отличие от углеводородного сырья, где глубокими считаются месторождения на глубинах более 4500 м, в случае

промышленных вод к глубокозалегающим можно отнести месторождения на глубинах более 1000 м, добыча которых осуществляется из скважин, построенных с применением тяжелых (неавтомобильных) буровых установок. С момента получения в 1950-х годах фонтанных притоков предельно насыщенных хлоридных кальций-магниевых рассолов с минерализацией до 650 г/л и выше, данная территория рассматривается как перспективная гидроминеральная провинция [2, 3]. В исследовательских институтах СО РАН с 70-х г. разрабатывались методы и технологии поисков, добычи и переработки «жидкой руды», превосходящей по своим кондициям схожее сырье «литиевого треугольника» Латинской Америки [4, 5]. Вместе с тем, для нефтегазовых компаний эти воды, характеризующиеся локальными АВПД, представляли угрозу, проявляясь в виде катастрофических рапопроявлений при бурении скважин на венд-рифейские залежи углеводородного сырья. Аварии приводили к серьезным геолого-технологическим осложнениям, а иногда к гибели скважин. К счастью, человеческих жертв зафиксировано не было, но убытки достигали сотен миллионов рублей. Прикладная НИР по поиску технологий прогноза зон рапопроявлений на Ковыктинском и Астраханском ГКМ для предупреждения аварий, выполненная С.Б. Коротковым в 2016-2017 гг., показала, что достоверных геофизических или геотехнологических методов прогноза не существует [6]. Последующие неудачные попытки применения электроразведки при строительстве сети эксплуатационных скважин подтвердили данный вывод.

В разрезе нижнего кембрия Иркутского амфитеатра выделяется галогенно-карбонатная формация, включающая чередование пластов каменной соли и строматолитовых доломитов, являющихся частью уникального солеродного мегабассейна [7], северная часть которого, вероятно, распространяется на континентальный шельф арктических морей РФ [8]. Рапопроявления фиксировались во всех галогенных свитах – ангарской, литвинцевской, бельской и усольской, в интервалах глубин 1700–2400 м. Однако остаются две геологические загадки, препятствующие подбору и адаптации геофизических поисковых методов. Первая – нет окончательного понимания, из каких пластов фонтанируют мощные притоки рапы с начальным пластовым давлением, двукратно превосходящим среднее по региону. Согласно первой гипотезе, «маточная рапа» заполняет порово-трещиноватое пространство доломитов и при их вскрытии буровым инструментом устремляется в ствол скважины [9]. Согласно второй гипотезе, в разрезе присутствуют пропластки кристаллогидратов, буровой инструмент проходит эти пласты (буровой раствор на углеводородной основе или с высоким содержанием соли) и, вскрывая нижележащие доломиты, инициирует перетоки натриевых рассолов, нарушая гидрохимическое равновесие и вызывает скоростное растворение не-натриевых кристаллогидратов, их разогрев и увеличение объема [10]. Так как в этот момент буровой инструмент находится на глубине залегания доломита, а при проходке выше осложнений не зафиксировано, у буровиков создается впечатление, что приток получен из зоны забоя. Тот факт, что вся нижняя часть скважины еще не оборудована обсадными колоннами и не зацементирована, во внимание не принимается. Вторая геологическая загадка – с учетом

интервала глубин рапопроявлений, на которых каменная соль приобретает свойство гель-текучести (геомеханические свойства кристаллогидратов не исследованы), нет понимания их фазового состояния в пласте. С 2024 г. начаты теоретические расчеты фазовых переходов, но экспериментального подтверждения пока не получено [11, 12].

В данной работе предложена новая (третья) модель, объединяющая первые две гипотезы. В результате выполненного анализа технических показателей бурения, интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) и керна, сделано заключение о возможном формировании зон стабильного сосуществования кристаллогидратов и маточной рапы в глубокозалегающих интервалах кембрийского галогенно-карбонатного комплекса. Разработаны критерии их прогнозирования на основе комплекса геофизических и геохимических методов.

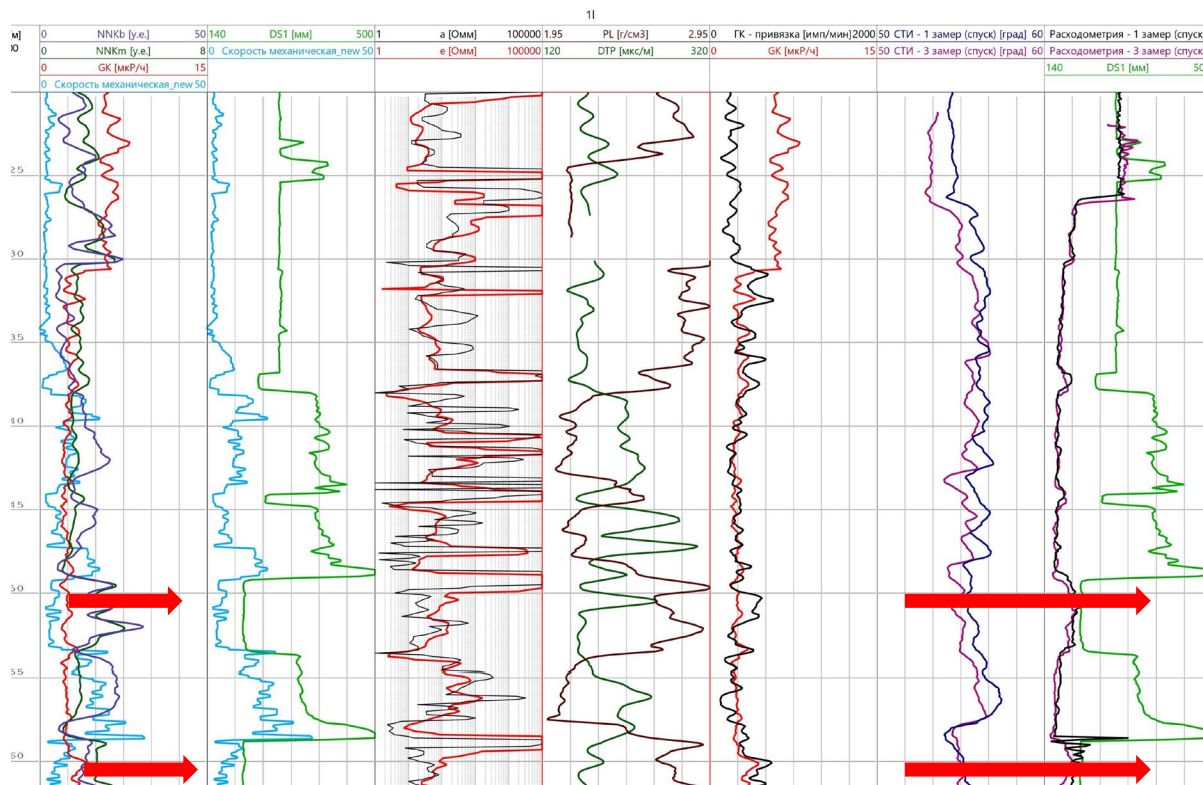
Методы и материалы

Первоначально аномальные зоны размыва солей были случайно замечены С.Б. Коротковым в декабре 2023 г. по данным профилометрии (АКС-ПФ-6-80) одной из новых разведочных скважин Ковыктинского выступа, техническим заказчиком бурения которой выступало ООО «Газпром инвест» в 2022 г.. В ходе совместного анализа газопроявлений природного водорода в интервалах пачек каменной соли, выявленных С.В. Кожевниковым по данным станции ГТИ «Разрез-2» в ходе бурения разведочных скважин, показались странными «языки» на кривой зонда в краевых зонах пластов каменной соли (рис. 1, зеленая кривая). Судя по показаниям, измерительный щуп профилометра «провалился», т.е. не достал стенки скважины. Было сделано предположение о наличии локализованных каверн размыва высотой 1-3 м. Позднее С.В. Кожевниковым и Н.М. Орловым были проанализированы данные ГИС, но только ВИКИЗ «реагировал» на данные аномальные участки, а интерпретационные расчеты определили латеральную глубину размыва в 2-4 м. Механические параметры бурения (скорость проходки и др.) подтвердили предположение о наличии ослабленных зон (рис. 1, голубая кривая). В ходе работ 2024 г. по отбору керна специалистами ООО «Газпром недра» отмечался малый вынос материалы из этих интервалов и наличие следов галопелитовых отложений в пробоотборниках (окончательные результаты исследований еще не опубликованы).

Результаты

На рис. 2 показан керн в карбонатной пачке. В нижней части, приконтактной к галогенной пачке, хорошо видны трещины с измененным цветом ареала насыщения пористого пространства, в течении некоторого времени содержавшие «маточную рапу». Напротив, центральный интервал пачки (верхняя колонка) достаточно однородный, плотный, без трещин и каверн, следов гидротермальной проработки не наблюдается. На рис. 3 показан керн в галогенной пачке. Верхняя колонка (центральная зона пачки) достаточно однородна, массивна, монохромна. По мере приближения к приконтактной зоне с доломитами наблюдается повышенная трещиноватость, полицветность и раздробленность образцов. Самая нижняя колонка

характеризуется максимальной раздробленностью, вынос керна составил от 30 до 70 %, минералогический и химический состав «исчезнувшего» материала неизвестен.



Кривые (слева – направо): скорость проходки (голубая), ННК (сиреневая и темно-зеленая), ГК (красная), скорость проходки (голубая), профилиметрия (зеленая), высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ – черная и красная), литоплотностной каротаж (вишневая) ГК (красная) и привязка ГК по керну (черная); термоанемометр (фиолетовая, темно-синяя), расходомерия (фиолетовая, черная), профилиметрия (зеленая).

Рис. 1. Данные ГИС, профилиметрия (зеленая кривая), и тех. параметров бурения (голубая). Стрелки (красным) указывают на предполагаемые зоны залегания пластов кристаллогидратов. Шкала глубин обезличена (шаг 5 м), глубина составляет более 1000 м.



Рис. 2. Керн в интервале строматолитовых доломитов в ненасыщенном среднем интервале (вверху) и насыщенном приконтактном интервале (снизу).



Рис. 3. Керн в интервале каменной соли (вверху) и зонах предположительного нахождения кристаллогидратов и неполного выноса керна (внизу).

На рис. 4 показано сопоставление кавернометрии и керна. Четко коррелируются «языки» профилометрии и интервалы неполного выноса и раздробленности керна. Отметим, что по всем галогенным пластам отмечается небольшой размыв, вызванный, вероятно, захватом буровым раствором вышележащей пластовой воды натриевого состава минерализацией 150-200 г/л.

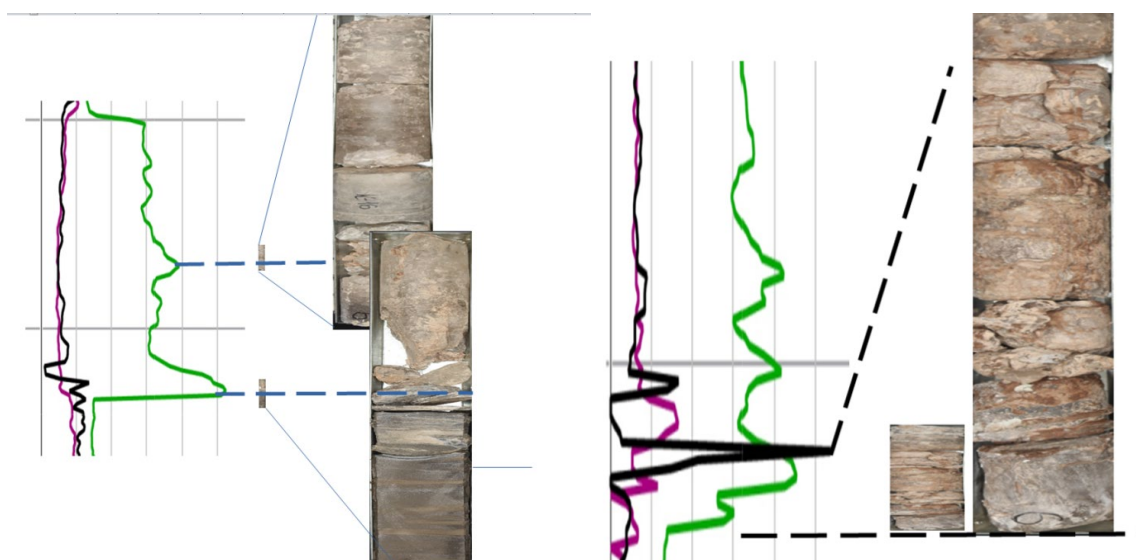


Рис. 4. Увязка по глубине данных кавенометрии и керна в верхнем (слева) и нижнем (справа) интервале усольской свиты.

В результате проведенных исследований в интервалах глубин 1850–2400 м выделены два типа геологических зон:

Тип I (галогенные интервалы с кристаллогидратами). В пластах каменной соли, в приконтактной к карбонатам интервалам, мощностью от 1 до 3 м существуют пропластки поликомпонентных кристаллогидратов, представленных, вероятно, тахгидритом ($\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), бишофитом ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), антарктицитом ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и карналлитом ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Точный состав пока не известен, т.к. подъем керна затруднителен и требует специализированного оборудования.

Тип II (карбонатные интервалы с маточной рапой). В доломитах строматолитового типа, характеризующихся каверново-трещинной пустотностью, в приконтактной к галогенному интервалу, сформированы локализованные по латерали и вертикали залежи маточной рапы хлоридного кальциевого типа с минерализацией 550–700 кг/м³.

Обсуждение

Выявленный феномен сосуществования кристаллогидратов и маточной рапы в глубокозалегающих интервалах галогенно-карбонатного юга Сибирской платформы имеет важное теоретическое и практическое значение. Полученные результаты не опровергают существовавшие ранее представления об исключительной локализации либо рапы в доломитах, либо кристаллогидратов в солях, а подтверждают правильность обеих гипотез и объединяют их в новой парадигме. Наличие твердых пластов кристаллогидратов бишофитового типа, по информации Д.В. Изюмченко, неоднократно подтверждалось в ходе разведочного и эксплуатационного бурения на Астраханском ГКМ в интервалах пермских солей. В пределах Ковыктинского выступа глубокозалегающие пласты кристаллогидратов ранее не выявлялись. Полученные результаты позволяют сформировать комплекс рабочих

поисково-разведочных методов картирования пластов кристаллогидратов по данным профилометрии, ГИС, керну и техническим параметрам бурения, т.е. по разведочным и эксплуатационным скважинам. К сожалению, определить ареал распространения до бурения, по геофизическим или геохимическим данным пока не представляется возможным. Это связано с тем, что отсутствует общепринятая гипотеза генезиса зон повышенной концентрации ценных химических компонентов и высокой минерализации, хотя попытки предпринимались [13]. Необходимо искать не рассол с минерализацией 600 г/л внутри рассола с минерализацией 200 г/л, в километровом галогенно-карбонатном слоистом разрезе на глубине 2000 м, чем безуспешно занимаются геофизики-электроразведчики, а рудно-гидрохимическую первопричину [14]. Если в качестве рабочей гипотезы принять предположение Н.Н. Крука о коре выветривания пегматитового субвертикального тела сподуменового типа или предположение С.Б. Короткова о палеотрубке взрыва, то результативными может оказаться комплекс наземной высокоточной магниторазведки, пассивной сейсморазведки и геохимической съемки по тяжелым элементам и по газам. Если же принять предположение А.В. Кирюхина о палеокольдере палеовулкана, по аналогии с кольдерой вулкана Узон (Камчатка), где А.В. Сергеевой выявлены повышенные концентрации лития в глинах, то эффективной будет комплексная геохимическая и гидрогеологическая съемка. По мнению авторов, важную дополнительную информацию может дать детальная геологическая съемка, от которой в нефтегазовой геологии отказались еще в 60е годы XX в.

Заключение

В результате проведенных исследований в интервалах глубин 1450–2200 м кембрийского галогенно-карбонатного комплекса Иркутского амфитеатра по косвенным данным – ГИС, техническим параметрам бурения, анализу керна и интервалов неполного выноса керна авторами сформулирована новая гипотеза о существовании зон стабильного сосуществования поликомпонентных кристаллогидратов в галогенных толщах и «маточной» поликомпонентной рапы в порово-трещиноватом пространстве доломитов.

Предложен комплекс методов для картирования зоны распространения пластов кристаллогидратов по данным бурения, исследований и испытания разведочных и эксплуатационных скважин: профилометрия, ВИКИЗ, скорость проходки, расходометрия. Полученные результаты расширяют теоретические представления о галогенезе и открывают новые перспективы освоения гидроминерального сырья Сибирской платформы.

Развитие прикладных дистанционных поисковых технологий будет возможно после уточнения механизмов формирования высокопродуктивных зон, в связи с чем, авторы возлагают большие надежды на научные школы ИНГГ, ИЗК и ИГМ СО РАН.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность ученым Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука и ИГМ им. В.С. Соболева СО

РАН (г. Новосибирск), ИЗК СО РАН (г. Иркутск), ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург), ИЗК ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), ИПНГ РАН (г. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова и СПбГУ, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром недра» за многолетнее сотрудничество и ценные советы и консультации. Особая признательность академику А.Э. Конторовичу, академику М.И. Эпову, академику Н.П. Похиленко чл.-корр. В.Н. Глинских, чл. корр. В.И. Богоявленскому, чл.-корр. Л.М. Бурштейну, чл.-корр. Н.Н. Круку, чл.-корр. А.П. Немудрому, д.г.-м.н. А.Г. Вахромееву, д.г.-м.н., А.В. Кирюхину, д.г.-м.н. С.В. Алексею, д.г.-м.н. А.В. Ступаковой, д.г.-м.н. Г.А. Беленицкой, к.г.-м.н. С.А. Бушмину, к.г.-м.н. С.А. Моисееву, к.г.-м.н. М.А. Фомину, к.г.-м.н. О.В. Якубович, к.г.-м.н. А.В. Сергеевой, к.г.-м.н. А.В. Корзун, к.г.-м.н. Н.Г. Паршиковой, к.г.-м.н. Я.В. Бельтикову, к.г.-м.н. А.А. Сусловой, к.г.-м.н. Р.С. Сауткину, к.х.н. Р.В. Горохову, к.г.-м.н. А.В. Чугунову, М.А. Мисюре, Н.М. Орлову за ценные консультации и обсуждение результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт ГРП и стратегия освоения ТРИЗ поликомпонентных редкометальных промышленных рассолов юга Сибирской платформы на соли лития и другие полезные ископаемые / А. Г. Вахромеев, С. В. Алексеев, Д. П. Гладкочуб [и др.] // Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича, Новосибирск, 29 января – 01 2024 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. – С. 38-41
2. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангара-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука. 1966. 322 с.
3. Анциферов А.С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. М.: Недра, 1989. 176 с.
4. Поликомпонентные литиеносные рассолы Сибирской платформы – сырье многоцелевого назначения / А. Д. Рябцев, Н. П. Коцупало, А. Г. Вахромеев, М. Ф. Комин // Рациональное освоение недр. – 2013. – № 1. – С. 44-51.
5. 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.
6. Коротков, С. Б. Галогенные флюидоупоры Ковыктинского кластера газодобычи Иркутской области / С. Б. Коротков, А. А. Франчук, Е. В. Семенова // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2017. – № 3(31). – С. 298-307
7. Беленицкая, Г. А. Соленосные осадочные бассейны: Литолого-фациальный, геодинамический и минерагенический анализ / Г. А. Беленицкая; Министерство природных ресурсов РФ, Российская академия наук (РАН), Все-российский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). – Санкт-Петербург : Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2000. – 72 с. – (Осадочные бассейны России). – ISBN 5-93761-008-3
8. Прогноз ареала распространения соленосных толщ шельфа арктических морей России на основе геологических и океанографических данных / С. Б. Коротков, С. М. Карнаухов, А. В. Ступакова [и др.] // Новые идеи в геологии нефти и газа: Сборник научных трудов, Москва, 23–24 мая 2019 года / Ответственный редактор А.В. Ступакова. – Москва: Издательство "Перо", 2019. – С. 237-241

9. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 248 с.
10. Особенности освоения гидроминерального сырья в районах газодобычи Иркутской области / В. Н. Федоров, С. Б. Коротков, А. Г. Вахромеев [и др.] // Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа : Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А.Э. Конторовича, Новосибирск, 29 января – 01 2024 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. – С. 240-242.
11. Мисюра, М. А. Численная термодинамическая модель флюидной системы $\text{H}_2\text{O}-\text{LiCl}-\text{CaCl}_2$ для интервала температур от -77 до $+50^\circ\text{C}$ / М. А. Мисюра, С. А. Бушмин, Е. В. Савва // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 525, № 1. – С. 91-100. – DOI 10.7868/S3034506525110106.
12. Условия кристаллизации хлоридов при скважинной эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы / А. В. Сергеева, А. В. Кирюхин, А. Г. Вахромеев [и др.] // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276-2. – С. 89-106
13. Беленицкая, Г. А. Об участии природных солей в щелочном магматизме. Статья 1. Природные соляно-щелочные ассоциации / Г. А. Беленицкая // Литосфера. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 153-176.
14. Коротков, С. Б. Особенности геологической интерпретации результатов сейсморазведки на венд-кембрийские и рифейские отложения Восточной Сибири / С. Б. Коротков // Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами: Материалы научно-практической конференции, Красноярск, 22–25 октября 2024 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2025. – С. 59-67

© С. Б. Коротков, Д. В. Изюмченко, С. В. Кожевников, 2026