

УДК 553.98(571.53)

## Галогенные флюидоупоры Ковыктинского кластера газодобычи Иркутской области

С.Б. Коротков<sup>1\*</sup>, А.А. Франчук<sup>1</sup>, Е.В. Семёнова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

\* E-mail: S\_Korotkov@vniigaz.gazprom.ru

**Ключевые слова:** каменная соль, флюидоупор, Иркутская область, Тыретский солерудник, соляная шахта, образцы соли, рапопроявления, гелий.

**Тезисы.** Актуальность исследований галогенных формаций Иркутской области обусловлена: 1) наличием осложнений и аварий при бурении скважин, связанных с рапопроявлениями; 2) необходимостью оценки надежности флюидоупоров для строительства долгосрочных подземных хранилищ гелиевого концентрата, добываемого при освоении гелийсодержащих залежей природного газа. Галогенные отложения в данном регионе приурочены к венд-кембрийским формациям, с которыми также связаны почти все открытые нефтегазовые залежи.

С целью уточнения геологического строения соленосного пласта верхнебельской свиты и доломитовых пропластков, предположительно ассоциирующихся с зонами возникновения осложнений при бурении на Ковыктинском газоконденсатном месторождении (ГКМ) Иркутской области, авторы статьи посетили шахту Тыретского солерудника, находящуюся в пятом соляном пласте верхнебельской свиты нижнего кембрия. В ходе исследований в теле шахты отбирались образцы пород и флюидов, в том числе в зонах неоднородностей. В районе пос. Тыреть и Ковыктинского ГКМ наблюдается схожее геологическое строение соленосных пачек: плоско-параллельное переслаивание чистых соляных пластов (содержание NaCl – от 90 до 99 %) и доломитовых пропластков. Однако глубина залегания соленосного пласта верхнебельской свиты в пределах Ковыктинского ГКМ составляет порядка 1600 м, что накладывает ряд ограничений на его прямое сопоставление с разрезом в районе пос. Тыреть, прежде всего это ограничения геомеханического характера.

В статье приведены результаты исследований авторов, которые показали несостоятельность некоторых представлений о соляных толщах как флюидоупорах и выявили ряд новых особенностей их строения.

Актуальность исследований галогенных формаций Иркутской области обусловлена необходимостью обеспечить условия для рентабельного освоения дочерними обществами ПАО «Газпром» углеводородных ресурсов Ковыктинского кластера газодобычи. Для этого нужно, во-первых, исключить при бурении возможность связанных с рапопроявлениями осложнений и аварий, во-вторых, определить надежность флюидоупоров с точки зрения строительства долгосрочных подземных хранилищ гелиевого концентрата, добываемого при освоении гелийсодержащих залежей природного газа.

В 1960–1980 гг. под эгидой Мингео СССР и АН СССР всесторонние исследования галогенных формаций имели серьезную финансовую поддержку и активно развивались. С этим периодом связаны фундаментальные научные публикации А.Э. Конторовича, Н.В. Мельникова, Г.А. Беленицкой, А.С. Анциферова, М.А. Жарикова, М.К. Калинин и др. После 1990 г. исследования солей практически полностью прекратились и возобновились в небольшом объеме лишь в последние годы, в том числе в дочерних обществах ПАО «Газпром», таких как ООО «Газпром геотехнологии», ООО «Газпром геологоразведка» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Для Группы Газпром наибольший практический интерес представляет изучение двух соленосных бассейнов – Восточно-Сибирского, рассматриваемого в данной статье, и Прикаспийского.

Восточно-Сибирский соленосный бассейн уникален по своим размерам и охватывает Красноярский край, Иркутскую область и Якутию (рис. 1). Галогенные отложения приурочены к венд-кембрийским формациям, с которыми также связаны почти все открытые нефтегазовые залежи. Осадочный чехол представлен преимущественно следующими типами отложений: средне-верхнерифейскими терригенными, вендскими

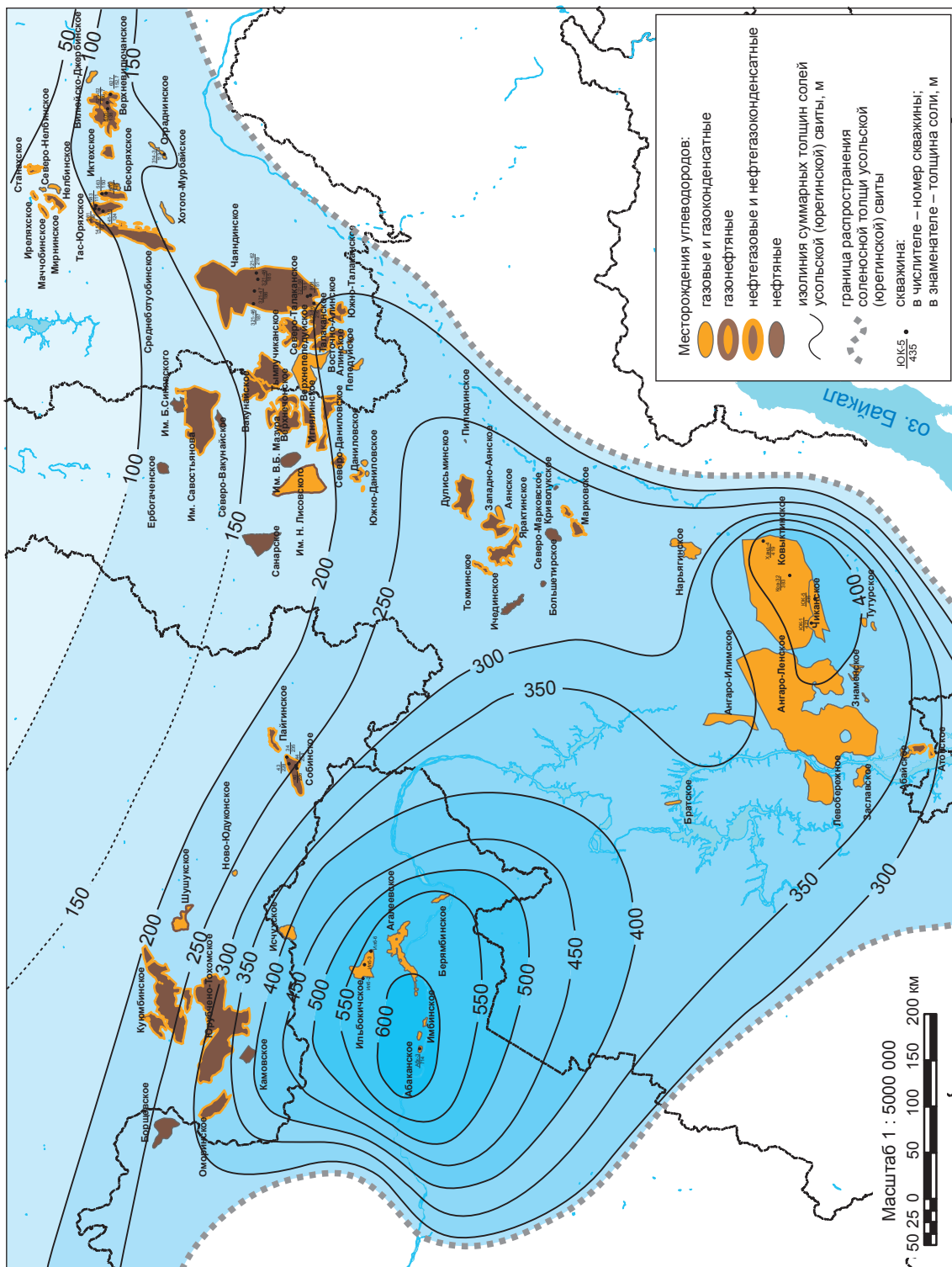


Рис. 1. Схема суммарных толщин пластов каменной соли в разрезе усольской (юретинской) свиты нижнего кембрия центральных и южных районов Сибирской платформы

терригенно-карбонатными, кембрийскими терригенно-карбонатно-соленосными отложениями, а также, в меньшей степени, ордовикскими карбонатно-терригенными, силурийскими терригенными, девонскими карбонатно-терригенными и галогенными, каменноугольно-пермскими терригенными с прослоями углей, триасовыми туфогенными и туфогенно-осадочными, юрскими терригенными с прослоями углей.

Соленосная кембрийская толща характеризуется значительными латеральными и вертикальными изменениями фациального состава. В кембрийских отложениях выделяются соленосные пачки и карбонатные горизонты: бельский, булайский, ангарский, литвинцевский (и их аналоги) [1–2].

Иркутский амфитеатр является наиболее изученной частью Восточно-Сибирского соленосного бассейна, тем не менее некоторые вопросы остаются нерешенными [3–10]. Характерным недостатком большинства предшествующих исследований бассейнов с соленосными формациями является то, что все геометрические и структурные построения поисковых продуктивных объектов ведутся на абстрактных образах, теоретических допущениях и дальних аналогиях. Построение всех геологических моделей месторождений углеводородов базируется на трех «китах»: 1) дискретных

данных бурения и геофизических исследований скважин; 2) низкоразрешающих среднестатистических сейсморазведочных данных; 3) знаниях, полученных в ходе полевых съемок на геологических обнажениях, чаще всего в горно-складчатых областях. Именно с последним типом информации и связано наибольшее количество ошибок при интерпретации геофизических данных и построении геомоделей. Особую проблему представляют соленосные пласты, которые, в отличие от всех существующих типов отложений, нельзя увидеть на естественных или искусственных обнажениях. Единственные места, где можно наблюдать пласт *in situ* – это соляные шахты, количество которых на территории бывшего СССР составляет всего около десятка. При этом следует делать поправку на то, что самая глубокая из них – Тыретский солерудник – не превышает 630 м в глубину, в то время как галогены в нефтегазоносных районах залегают на глубинах 1,5–4,0 км и обладают несколько иными геомеханическими свойствами.

С целью уточнения геологического строения соленосного пласта верхнебельской свиты и доломитовых пропластков, предположительно ассоциирующихся с зонами возникновения осложнений при бурении на Ковыктинском газоконденсатном месторождении (ГКМ), авторами было получено

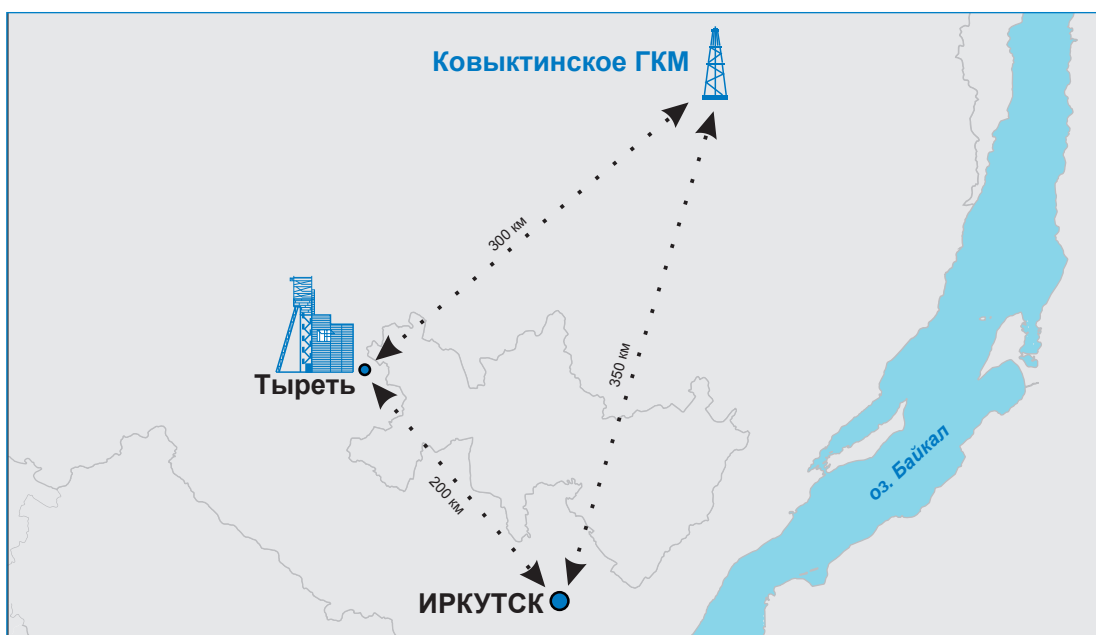


Рис. 2. Схема расположения Тыретского солерудника и Ковыктинского ГКМ в Иркутской области

разрешение администрации ООО «Тыретский солерудник» (г. Тыреть, Иркутская обл.) на посещение шахты, построенной в пятом соляном пласте верхнебельской свиты нижнего кембрия (рис. 2).

За 20 лет добычи соли (NaCl) на глубине порядка 600 м общая проходка в пласте составляет около 5 км. Глубина залегания данного пласта в пределах Ковыктинского ГКМ начинается от 1600 м, что накладывает ряд ограничений на прямое сопоставление данных по Ковыктинскому ГКМ и Тыретскому солеруднику, прежде всего это ограничения геомеханического характера (рис. 3). В ходе натурных исследований отбирались образцы пород и флюидов, в том числе в зонах неоднородностей.

В районе пос. Тыреть и Ковыктинского ГКМ наблюдается схожее геологическое строение соленосных пачек: плоско-параллельное переслаивание чистых соляных пластов (содержание NaCl – от 90 до 99 %) и доломитовых пропластков. Исследование показало несостоятельность некоторых представлений о солях и поставило ряд новых вопросов.

Например, во многих отчетных материалах доломитовые пласты нижнего кембрия и верхнего венда квалифицируются как рифогенные, что не верно, так как рифов в традиционном понимании в этот период еще не существовало и доломиты имеют строматолитовый генезис, характеризуются темным цветом, низкой пористостью и в ряде случаев низкой механической прочностью (рис. 4).

Второй особенностью является наличие неучтенного в большинстве работ переходного интервала между соленосными и доломитовыми пропластками. При проходке комбайна по соляному телу встречаются строматолитовые бугры, достигающие нескольких метров. Кроме того, существует переходный интервал «грязной» соли или засолоненного доломита, солей с включениями галопелитов и аргиллитовых прослоев, меняющий геометрию фактического флюидоупора. Данный факт требует учета при структурной интерпретации и геологическом моделировании систем «покрышка – коллектор», так как углы падения в них могут отличаться, что в ряде случаев

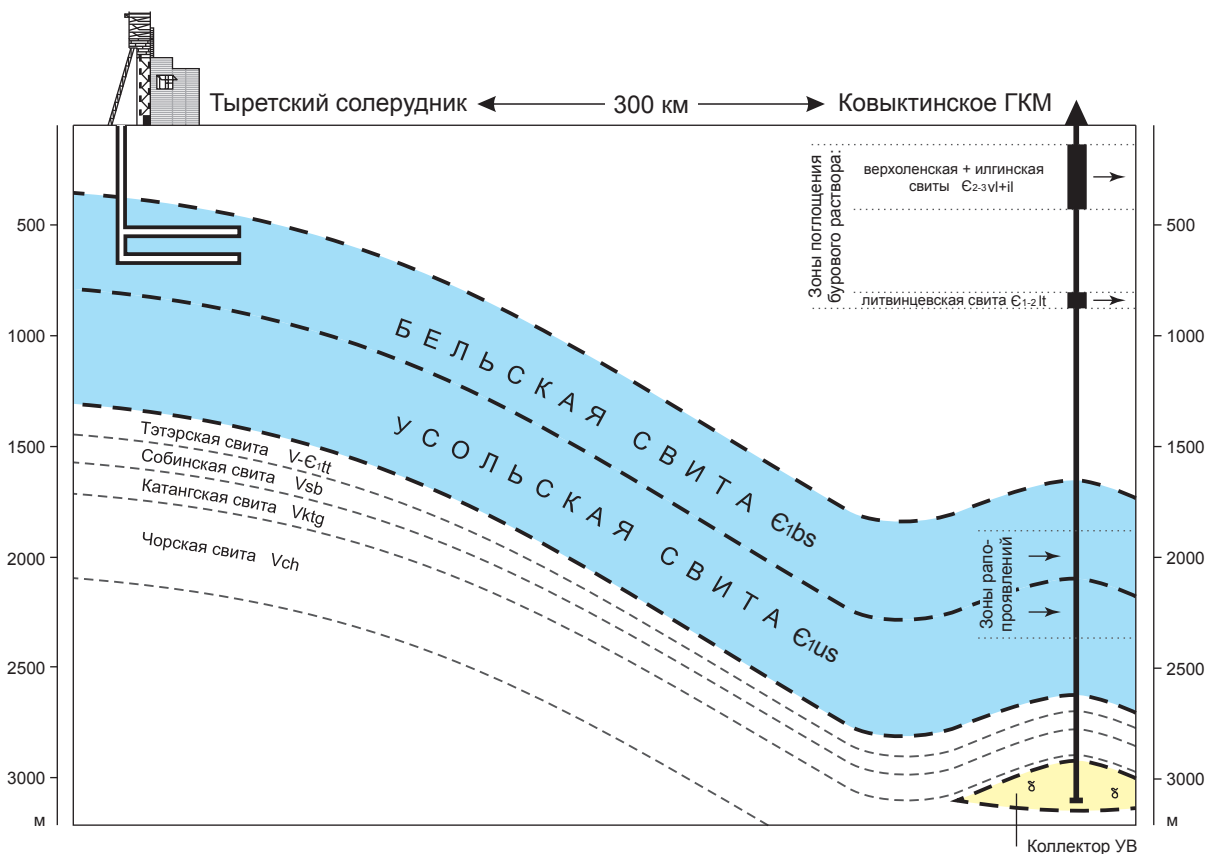


Рис. 3. Схема корреляции соляных пластов бельской и усольской свит Тыретского солерудника и Ковыктинского ГКМ



Фото С.Б. Короткова, 2017 г.

Рис. 4. Пластовая каменная соль из кровельной части пласта с включениями мергелистых доломитов строматолитового генезиса (а); строматолит из коллекции Байкальского музея ИНЦ СО РАН в пос. Листвянка (б); доломит из кровельной части соленосного пласта (в); строматолит (Красноярский край) из коллекции Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН (г)

приводит к «раскрытию» залежи по переходному интервалу и миграции углеводородов из целевого объекта.

Интересной особенностью верхнебельской свиты в районе пос. Тыреть является практически идеальное субгоризонтальное залегание соляных пачек без каких-либо тектонических осложнений или нарушений. Это не типично для раннекембрийских отложений, находящихся на расстоянии 200 км от сейсмоактивной байкальской складчатой зоны. Единственными неоднородностями являются субгоризонтальные слабофлюидопроводящие каналы жильного типа (цилиндрической формы) с сердцевинной, заполненной влажным мергелистым веществом (рис. 5).

Соль в Тыретском солеруднике технически чистая (поступает на обработку и фасовку без

дополнительной очистки), крупнокристаллическая, с большим количеством монокристаллов от 5 до 20 см диаметром. Из-за высокой прозрачности монокристаллов в теле образцов местами заметны пузырьки с газом и рапными растворами (диаметр пузырьков – до 0,5 см). Органические остатки не встречаются (рис. 6).

При приближении добычного комбайна к доломитовому слою или при его случайном вскрытии сотрудниками солерудника наблюдалось активное газопроявление, в том числе проявление углеводородных газов. Авторами статьи были замечены пузырьки газа в ходе отбора рапных растворов в теле шахты (рис. 7).

Широко распространено мнение о пластичности и низкой прочности солей. Пластичность соли приобретают лишь при значительных нагрузках и температурах, превышающих



Фото С.Б. Короткова, А.А. Франчук, 2017 г.

**Рис. 5. Жильные флюидоканалы с высоковлажным центральным мергелистым заполнением (Тыретский солерудник)**



Фото С.Б. Короткова, 2017 г.

**Рис. 6. Монокристалл NaCl с пузырьками газа и рапных растворов размером до 5 мм**



Фото С.Б. Короткова, 2017 г.

**Рис. 7. Газопроявления в луже маточной рапы в теле соляной шахты (Тыретский солерудник)**

определенный критический порог. Горные выработки в соляном пласте на глубине 600 м поражают размерами, горизонтальным сводом и полным отсутствием каких-либо подпирющих крепежных систем. Средний размер очистных камер достигает 10–12 м в ширину и 15 м в высоту, при этом в них осуществляется интенсивное движение тяжелого забойного и грузового транспорта (рис. 8). Прочность соли в пласте такова, что отколоть образец геологическим молотком невозможно.

Вместе с тем в ряде мест заметны свежие трещины, вызванные «снятием» горного давления (рис. 9). По устной информации главного геолога солерудника Г.Н. Безводного, после отработки пласта в забойной зоне до нескольких дней могут наблюдаться растрескивание и характерные шумы.

Самым серьезным осложнением при строительстве скважин в соленосных отложениях

в Ковыктинском кластере газодобычи являются катастрофические выбросы рапных растворов. До сих пор не существует единого представления об источниках рапы и зонах рапопроявления, а также причинах возникновения таких зон. Более того, нет надежных доказательств точности определения интервалов рапопроявлений: на данный момент их традиционно связывают с забойной зоной, что не является доказанным фактом. Существуют три основные гипотезы: 1) зоны рапопроявлений связаны с субгоризонтальными межсолевыми пропластками, рапа в которых находится под аномальным давлением; 2) зоны рапопроявлений связаны с субвертикальными зонами тектонических нарушений, характеризующимися потерей корреляции на сейсмических разрезах и коррелирующимися с вышележащими зонами катастрофических поглощений бурового раствора; 3) рапа в жидкой форме



Фото С.Б. Короткова, А.А. Франчук, 2017 г.

Рис. 8. Действующий забой шахты, отработанный на 70 % (а), и забой шахты, отработанный на 10 % (б) (Тыретский солерудник)

образуется только в момент вскрытия пласта буровым инструментом.

Существуют серьезные аргументы в пользу каждой из этих версий, но есть и ряд неясностей. Например, литолого-физические характеристики доломитов Тыретского солерудника схожи с таковыми Ковыктинского ГКМ (анализы еще не проведены), а низкая пористость, засоленность и глинистость вряд ли могут способствовать колоссальным дебитам плотных соляных растворов (от 300 до 600 г/л), достигающим 2500 л/сут. Кроме того, различные составы маточной рапы, взятой из шахты и скважин Ковыктинского ГКМ: в первом случае это преимущественно NaCl, во втором – сложнкомпонентный состав, включающий Ca, Mg, Fe, Cl. На рис. 10 показаны две пробы рапных растворов: из шахты Тыретского солерудника и из скв. 72 Ковыктинского ГКМ. На рис. 11 можно увидеть выделение маточной рапы в местах понижения забоя шахты Тыретского солерудника, откуда и был произведен забор образца.

Вторая гипотеза о форме и генезисе зон рапопроявлений также имеет ряд противоречий, прежде всего полное отсутствие тектонических нарушений в соляном пласте Тыретского солерудника. В случае погружения на большие глубины соль может приобретать пластичность, и наличие нарушений становится еще менее вероятным. Для обеих версий серьезную проблему представляет тот факт, что для получения приемлемых дебитов газа из относительно хороших коллекторов приходится выполнять ряд мероприятий по интенсификации притока, а дебиты пластовых вод в подавляющем большинстве случаев ничтожно малы по всей Восточной Сибири.

Третья версия, имеющая некоторую связь со второй, – это отсутствие как таковой рапы в жидкой форме до момента вскрытия буровым инструментом. На это могут указывать состав рапы, определенный в лабораториях, а также большое количество осадка окислов железа, отмеченное всеми наблюдавшими рапопроявления не только в Ковыктинской зоне, но и на Астраханском ГКМ в Прикаспии.

Согласно третьей версии (которой придерживаются авторы статьи), возможный механизм формирования выбросов рапных растворов выглядит следующим образом: при бурении происходит вскрытие кавернозного пласта, по-видимому, связанного с трапповыми

формациями, в котором каверны заполнены высокорастворимыми солями (бишофит, тахигидрид и др.). Поскольку бурение происходит на соляном растворе, а NaCl является относительно слаборастворимым веществом, то первоначально раствор поглощается. На второй стадии хлорид натрия выпадает в осадок, замещаясь кальций-магниевыми солями. Подтверждение либо опровержение данной гипотезы требуют расчетов и лабораторных исследований.

Подводя итоги, можно сказать, что, несмотря на большое число предшествующих исследований соленосных отложений Восточно-Сибирского мегабассейна, остается много вопросов, решение которых позволит повысить



Фото А.А. Франчук, 2017 г.

**Рис. 9. Свежая трещина в стенке забоя ствола шахты (Тыретский солерудник):**  
глубина – 600 м, длина шкалы на молотке – 20 см



**Рис. 10. Рапные растворы верхнебельской свиты из Тыретского солерудника (слева) и из скв. 72 Ковыктинского ГКМ (справа)**





Фото С.Б. Короткова, 2017 г.

**Рис. 11. Выделение маточной рапы в местах понижения забоя (Тыретский солерудник)**

рентабельность производственной деятельности ПАО «Газпром» в данном регионе.

В заключение хотелось бы выразить благодарность людям, оказавшим помощь в сборе материалов по галогенным формациям Иркутской области: администрации ООО «Тыретский солерудник», Г.Н. Безводному и С.М. Сударикову за организацию посещения шахты и консультации по вопросам залегания соляных пластов; специалистам ООО «Газпром геотехнологии» (Ю.Л. Филимонову и др.) за консультации по геомеханическим свойствам солей; специалистам ООО «Газпром геологоразведка» А.С. Смирнову и А.А. Шапошникову за консультации по рапопроявлениям при бурении и участие в натурных исследованиях в шахте; специалистам ООО «Газпром добыча Иркутск» (Д.А. Скориченко, С.П. Вагину, В.И. Васильеву, Д.М. Пасько и др.); Г.А. Беленицкой (ФГБУ «ВСЕГЕИ») за консультации по вопросам генезиса и особенностей строения галогенных формаций.

## Список литературы

1. Чечель Э.И. Прогнозная оценка Сибирской платформы на калийные соли / Э.И. Чечель, Я.Г. Машович, Ю.Г. Гилев и др. – Иркутск: ВостСибНИИГИМС, 1973. – 393 с.
2. Чечель Э.И. Закономерности строения соленосных отложений кембрия юга Сибирской платформы / Э.И. Чечель, Я.Г. Машович, Ю.Г. Гилев. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
3. Лаврентьев А.М. Перспективы постановки поисковых работ на каменную соль на территории Иркутской области / А.М. Лаврентьев, И.С. Ишмухаметов, И.С. Потапов и др. – Иркутск: ВСГУ по поискам и разработке нефти и газа, 1972. – 259 с.
4. Корнев В.М. Оценка перспектив создания подземных резервуаров в солях и удаление строительного рассола в районах добычи и переработки нефти и газа в Ангаро-Ленском соленосном бассейне / В.М. Корнев, Л.З. Садыков, Я.Г. Машович и др. – М.: Подземгазпром, 1992. – 255 с.
5. Анциферов А.С. Метаморфизм рассолов и засолонение коллекторов нефти и газа в Лено-Тунгусской нефтегазозоной провинции / А.С. Анциферов // Геология и геофизика. – Новосибирск: СО РАН, 2003. – Т. 44. – № 6. – С. 499–510.
6. Беленицкая Г.А. Соли и нефтиды: глобальные пространственные и кинетические взаимосвязи / Г.А. Беленицкая // Региональная геология и металлогения. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. – № 59. – С. 97–112.
7. Казарян В.А. Геологические и технологические основы строительства и эксплуатации подземных хранилищ газонефтепродуктов в отложениях каменной соли / В.А. Казарян, Н.А. Эдиашвили, А.И. Игошин и др. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 760 с.
8. Коротков Б.С. Перспективы поисков промышленно значимых залежей углеводородов на больших глубинах в России / Б.С. Коротков, С.Б. Коротков, В.Ф. Подурушин. – М.: Газпром экспо, 2009. – 114 с.
9. Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира / М.А. Жарков. – М.: Недра, 1974. – 392 с.
10. Фрадкин Г.С. О девонской галогенной формации Сибирской платформы / Г.С. Фрадкин // Геология и геофизика. – 1964. – № 11. – С. 3–15.

## Halogen fluid traps at the Kovykta gas production cluster of Irkutsk Region

S.B. Korotkov<sup>1\*</sup>, A.A. Franchuk<sup>1</sup>, Ye.V. Semenova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

\* E-mail: S\_Korotkov@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** Studies of halogen formations in Irkutsk Region are topical due to 1) the evidence of troubles and accidents in course of drilling caused by manifestation of bittern, and 2) the necessity to estimate reliability of fluid traps in order to construct long-living underground storages for helium concentrate recovered from the helium-bearing deposits of natural gas. In the named region the halogen sediments are dated to the Vendian-Cambrian formations, which are also related with almost every discovered oil-gas deposit.

In order to specify geological structure of the salt-bearing stratum of Upper-Belskaya suite and the dolomite alternations, which hypothetically associate with the zones of troubled drilling at Kovykta gas-condensate field (KGCF) in Irkutsk Region, the authors of this visited a pitshaft at the Tyret salt mine, which locates in fifth salt stratum of Lower-Cambrian Upper-Belskaya suite. In course of explorations the samples of rocks and fluids were taken from the shaft body including the zones of heterogeneities. The geological structure of the salt-bearing interbedded sequences Nearby Tyret settlement and KGCF is similar: namely, it is represented with plane-parallel interstratification of the pure salt strata (NaCl concentration – 90–99%) and dolomite alternations. Meanwhile, the burial depth of the salt-bearing layer in Upper-Belskaya suite within the margins of KGCF is nearly 1600 m. This circumstances become an obstacle for direct comparison of the named layer and a column near Tyret; first of all there are geomechanical limitations.

The paper reveals results of authors' researches, which showed groundlessness of some previous ideas about the salt formations as fluid traps, and found out several new structural features of the salt formations.

**Keywords:** rock salt, fluid trap, Irkutsk Region, Tyret salt mine, samples of salt, manifestation of bittern, helium.

### References

- CHECHEL, E.I., Ya.G. MASHOVICH, Yu.G. GILEV et al. *Prognostic assessment of Siberian Platform on potassium salts* [Prognoznaya otsenka Sibirskoy platform na kaliynnye soli]. Irkutsk: VostSibNIIGGIMS, 1973. (Russ.).
- CHECHEL, E.I., Ya.G. MASHOVICH, Yu.G. GILEV. *Structural patterns of the salt-bearing Cambrian sediments at the south of Siberian Platform* [Zakonomernosti stroyeniya solenosnykh otlozheniy kembriya yuga Sibirskoy platformy]. Moscow: Nedra, 1977. (Russ.).
- LAVENTYEV, A.M., I.S. ISHMUKHAMETOV, I.S. POTAPOV et al. *Outlooks for arrangement of potassium salt prospecting at the territory of Irkutsk Region* [Perspektivy postanovki poiskovykh rabot na kamennuyu sol na territorii Irkutskoy oblasti]. Irkutsk: VSGU, 1972. (Russ.).
- KORENEV, V.M., L.Z. SADYKOV, Ya.G. MASHOVICH et al. *Estimation of outlooks for creation of underground reservoirs in salts and withdrawal of technical brine in the districts of gas and oil production and reprocessing at Angara-Lena salt-bearing basin* [Otsenka perspektiv sozdaniya podzemnykh rezervuarov v solyakh i udaleniye stroitel'nogo rassola v rayonakh dobychi i pererabotki nef'ti i gaza v Angaro-Lenskom solenosnom bassejne]. Moscow: Podzemgazprom, 1992. (Russ.).
- ANTSIFEROV, A.S. *Metamorphism of brines and salinization of the oil and gas reservoirs in Lena-Tungus oil-gas-bearing province* [Metamorfizm rassolov i zasoloneniye kollektorov nef'ti i gaza v Leno-Tungusskoy neftegazonosnoy provintsii]. *Geologiya i geofizika*. Novosibirsk: Siberian branch of RAS, 2003, vol. 44, no. 6, pp. 499–510. ISSN 0016-7886. (Russ.).
- BELENITSKAYA, G.A. *Salts and naphthides: global spatial and kinetic interrelationship* [Soli i naftidy: globalnyye prostranstvennyye i kineticheskiye vzaimosvyazi]. *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. St.Petersburg: A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), 2014, no. 59, pp. 97–112. ISSN 0869-7892. (Russ.).
- KAZARYAN, V.A., N.A. EDIASHVILI, A.I. IGOSHIN et al. *Geological and engineering principals for construction and operation of underground gas-oil storages in the sediments of rock salt* [Geologicheskiye i tekhnologicheskiye osnovy stroitelstva i ekspluatatsii podzemnykh khranilishch gazonefteproduktov v otlozheniyakh kamennoy soli]. Moscow and Izhevsk: Institute of computer research, 2015. (Russ.).
- KOROTKOV, B.S., S.B. KOROTKOV, V.F. PODURUSHIN. *Outlooks for prospecting industrial deposits of hydrocarbons off soundings in Russia* [Perspektivy poiskov promyshlennno znachmykh zalezhey uglevodorodov na bolshikh glubinakh v Rossii]. Moscow: Gazprom expo, 2009. (Russ.).
- ZHARKOV, M.A. *Paleozoic salt-bearing formations of the World* [Paleozoyskiye solenosnyye formatsii mira]. Moscow: Nedra, 1974. (Russ.).
- FRADKIN, G.S. *On Devonian halogen formation of Siberian Platform* [O devonskoy galogennoy formatsii Sibirskoy platformy]. *Geologiya i geofizika*. 1964, no. 11, pp. 3–15. ISSN 0016-7886. (Russ.).