

УДК 665.612.074

Газовые гидраты в отложениях материков и островов

В. С. Якушев, Е. В. Перлова, Н. А. Махонина, Е. М. Чувиллин, Е. В. Козлова

ВЛАДИМИР СТАНИСЛАВОВИЧ ЯКУШЕВ — кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела Центра «Газовые ресурсы» ООО «ВНИИГАЗ». Область научных интересов: нетрадиционные источники природного газа, ресурсы и технологии освоения газогидратных залежей, физикохимия и петрография мерзлых и гидратосодержащих пород.

ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА ПЕРЛОВА — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геокриологии и гидратов Центра «Газовые ресурсы» ООО «ВНИИГАЗ». Область научных интересов: физикохимия и петрография мерзлых и гидратосодержащих пород, географо-генетические и геологические свойства газогидратных залежей, экспериментальные исследования гидратонасыщенных дисперсных систем.

НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА МАХОНИНА — аспирант, младший научный сотрудник лаборатории геокриологии и гидратов Центра «Газовые ресурсы» ООО «ВНИИГАЗ». Область научных интересов: физикохимия и петрография мерзлых и гидратосодержащих пород, экспериментальные исследования гидратонасыщенных дисперсных систем.

142717 пос. Развилка Ленинского района Московской области, ВНИИГАЗ, тел. (095) 355-96-67, факс (095) 355-93-40, 399-32-63, E-mail V_Yakushev@vniigaz.gazprom.ru

ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ ЧУВИЛИН — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геокриологии Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: физикохимия, петрография и микростроение мерзлых и гидратосодержащих пород, природные газогидраты, льдо- и гидратообразование, массоперенос.

ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА КОЗЛОВА — аспирант кафедры геокриологии Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: многолетнемерзлые и гидратосодержащие породы, экспериментальные исследования гидратонасыщенных дисперсных систем.

119899 Москва, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет, кафедра геокриологии, тел. (095) 939-19-27, E-mail chuvilin@geol.msu.ru

Введение

Многие промышленно развитые страны рассматривают природные газовые гидраты в качестве реального нетрадиционного источника углеводородов, что в первую очередь обусловлено оценками ресурсов метана в гидратной форме. Эти оценки изменяются от максимальных, явно завышенных, сделанных без учета определенных геолого-геохимических ограничений [1], до минимальных, проведенных с учетом большого количества факторов, ограничивающих гидратообразование [2]. Но все исследователи сходятся в одном — ресурсы газа в гидратной форме огромны, в пределах $3,1 \cdot 10^{13}$ — $3,4 \cdot 10^{16}$ на суше и $2 \cdot 10^{14}$ — $7,6 \cdot 10^{18}$ м³ в субмаринных гидратах [1—3]. Некоторые ученые считают, что количество углерода в природных гидратах метана примерно вдвое больше, чем в каменном угле, т.е. гидраты метана могут быть основным вместилищем углерода в земной коре.

Надо сказать, что исследования континентальных гидратоносных отложений, в отличие от возможностей изучения гидратов, содержащихся в породах дна морей и океанов, дополнительно ограничиваются целым рядом технологических факторов. Это прежде всего

отсутствие специализированных методов поиска и картирования гидратосодержащих отложений в недрах материков и островов, которые «работали» бы с такой же эффективностью, как геофизические методы, успешно используемые для картирования субмаринных гидратов.

Применимость геофизических методов исследования гидратосодержащих отложений в областях распространения многолетнемерзлых пород ограничена рядом особенностей газовых гидратов как физико-химической системы и их определенной схожестью со льдом, содержащимся в поровом пространстве мерзлых пород, в частности, они имеют близкие акустические и электрические свойства. Поэтому для исследования гидратосодержащих пород в мерзлом разрезе малоэффективны геофизические методы, основанные на измерении изменения скорости прохождения продольных и поперечных волн и удельного электросопротивления в гидратосодержащих залежах по сравнению с водо- и газонасыщенными отложениями.

Расчетные методы по определению термобарического состояния геологического разреза и соответственно интервалов зоны стабильности гидратов также малоэффективны для изучения континентальных пород, особенно мерзлых разрезов. Это связано с суще-

ствованием так называемой зоны метастабильности гидратов, где образованные ранее гидраты существуют благодаря эффекту самоконсервации при отрицательных температурах. При этом реликтовые гидраты могут залегать на глубинах существенно меньших, чем верхняя граница современной термодинамической зоны стабильности гидратов.

Начиная с 70-х годов прошлого века, когда велось интенсивное освоение северных нефтегазовых месторождений с бурением скважин в зоне распространения многолетнемерзлых пород, многие исследователи фиксировали активные газовыделения из интервалов вечной мерзлоты, указывающие на присутствие крупных газовых скоплений (Н.В. Черский и др., 1973; А.Э. Беньяминович, 1973; А.М. Порохняк, 1988; В.С. Якушев, 1989, 1992; Г.Д. Гинсбург, 1990; Е.М. Ривкина и др., 1997; В.В. Кондаков и др., 1998; Ф. Э. Арэ, 1993, 1998; Collett *e. a.*, 1983, 1990; Dallimore *e. a.*, 1996 и др.).

Газовыделения из многолетнемерзлых толщ — широко распространенное явление, наблюдаемое на севере Западной Сибири (п-ов Ямал, Гыданский п-ов, Тазовский п-ов), в Средней Сибири, на арктическом побережье Канады, на Аляске и др. Выбросы газа из толщ мерзлых пород иногда отличаются высокой интенсивностью и большими дебитами, близкими к промышленным. После испытаний скважин активные газовыделения со стабильным дебитом газа могут продолжаться в течение нескольких месяцев.

В практике бурения подобные газопроявления, как правило, не связывали с наличием газовых гидратов главным образом потому, что гидратоносные интервалы располагаются существенно выше кровли зоны стабильности гидратов. Однако более детальные исследования последних лет доказали, в частности, существование реликтовых гидратов природных газов. Это дает основание для более комплексного подхода к исследованиям континентальных гидратосодержащих отложений.

Общие представления о континентальных газогидратах

Природные газовые гидраты могут образовываться в осадочных отложениях материков и островов при определенных термобарических и геохимических условиях. На равновесные условия гидратообразования в пористых средах, помимо состава газа — гидратообразователя, влияет ряд факторов: минералогический, гранулометрический и микроагрегатный состав грунтов, их влажность и плотность, минерализация порового раствора, наличие глинистых частиц и органических примесей.

Обычно зоной стабильности гидратов называют интервал распространения в разрезе земной коры термодинамических условий гидратообразования различных природных газов (чаще всего метана). Иногда под этим термином разными исследователями понимаются несколько разные интервалы в зависимости от набора параметров среды, принимаемых во внимание. По нашему мнению, под термином «зона стабильности газогидратов» целесообразно понимать «часть литосферы и гидросферы Земли, термобарический и геохимический режимы которой соответствуют условиям устойчивого существования гидратов природных газов определенного состава» [4] (рис. 1).

В континентальных условиях области распространения зон стабильности гидратов большинства природных газов приурочены к областям распространения многолетнемерзлых пород и ледников, а также к зонам низких или отрицательных геотермических градиентов. Это обусловлено тем, что лишь при длительном и глубоком охлаждении литосферы возникают необходимые предпосылки для формирования в разрезах пород условий для гидратообразования. Мощность зоны стабильности гидратов обычно пропорциональна мощности криолитозоны — чем глубже залегает нулевая изотерма, тем больше мощность зоны стабильности гидратов.

В последнее время в связи с появлением новых данных о реликтовых газогидратах в многолетнемерзлых отложениях, залегающих существенно выше кровли современной зоны стабильности гидратов, появилась необходимость введения нового понятия — «зона метастабильности газогидратов». Это часть разреза многолетнемерзлых пород, находящаяся выше кровли зоны стабильности гидратов, в которой температурный режим пород соответствует условиям существования эффекта самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах (см. рис. 1). Зона метастабильности, в отличие от зоны стабильности, является не термодинамической, а геологической зоной. Газовые гидраты внутри зоны метастабильности не могут образовываться, но могут существовать в законсервированном состоянии геологически длительное время при условии сохранения льда в разрезе. Соответственно в разрезе сплошность зоны метастабильности гидратов прерывается таликовыми зонами и криопэгами — участками, где в условиях отрицательных температур породы находятся в охлажденном состоянии.

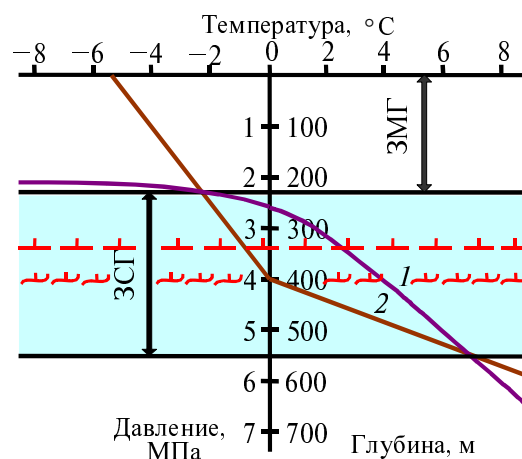


Рис. 1. Графоаналитический метод выделения зоны стабильности и зоны метастабильности газовых гидратов в континентальных условиях.

1 — кривая равновесных условий гидратообразования метана; 2 — распределение температур по разрезу; ЗСГ — зона стабильности газовых гидратов; ЗМГ — зона метастабильности газовых гидратов; — — — — — подошва многолетнемерзлых пород; ~ ~ ~ ~ ~ подошва криолитозоны

Следует отметить, что данные экспериментального моделирования условий существования гидратов метана в дисперсных породах (а не в системе вода—газ, как показано на рис. 1), указывают на смещение вниз по разрезу кровли зоны стабильности гидратов, что, соответственно, расширяет зону метастабильности. Смещение условий стабильного существования гидратов в область более высоких давлений и низких температур будет определяться составом, строением и свойствами вмещающих пород, т.е. всеми факторами, отличающими существование газовых гидратов в дисперсных системах от условий свободного объема.

Исследования континентальных газогидратов

За рубежом одними из первых целенаправленных исследований гидратосодержащих отложений на суше являются работы американских ученых на нефтяных месторождениях Купарук Ривер и Прадхо-Бей на северном склоне п-ва Аляска (точка 1 на рис. 2) (Collett, Kvenvolden, Magoon, Bird e. a. [5]). На начальном этапе в десяти скважинах на этих месторождениях с помощью специальной установки были проведены температурные исследования. По полученным данным был построен широтный профиль с расположением зон многолетнемерзлых пород и зон стабильности гидратов метана. На основании температурных и геофизических исследований были предположительно выявлены гидратоносные пласты (Kvenvolden, McMenamin, 1980). Последующий комплекс скважинных исследований был ориентирован на определение площади распространения и особенностей залегания гидратосодержащих пород (Collett, Kvenvolden, 1989, 1990).

В результате проведенных геологических, геохронологических, геофизических и гидрогеологических исследований было выделено шесть протяженных гидратосодержащих горизонтов с различной степенью гидратонасыщенности (Collett e. a., 1988; Kvenvolden, 1998). Изотопно-спектрометрический анализ гидратного газа показал, что в клатратной форме находится как местный, биохимический газ, так и катагенетический газ, который мигрировал снизу, смешиваясь при этом с биогенным, а затем, попав в зону стабильности гидратов, перешел в гидратное состояние. Важно, что эти исследования продемонстрировали исключительную информативность применения при обработке геофизической информации каротажных диаграмм, включающих данные по кавернометрии, электрокаротажу, сейсмоакустическому каротажу и других методов, используемых при поиске газогидратных залежей. Кроме того, сопоставление на одной диаграмме показаний двух и более геофизических приборов позволяет достаточно четко разделять гидратосодержащие и водосодержащие интервалы.

Следующий район, где были проведены исследования гидратосодержащих отложений в области распространения криолитозоны, расположен на севере Канады в дельте р. Макензи (точка 2 рис. 2). Первые сообщения о газопроявлениях в этом районе были сделаны канадскими исследователями (Bily, Dick, 1974). Выбросы газа фиксировались во время бурения двух добывающих скважин Ивик и Маллик из интервалов глубин порядка 900—1200 м (ниже подошвы многолетнемерзлых пород, но выше нижней границы зоны стабильности гидратов). По результатам проведенного комплекса каротажных исследо-

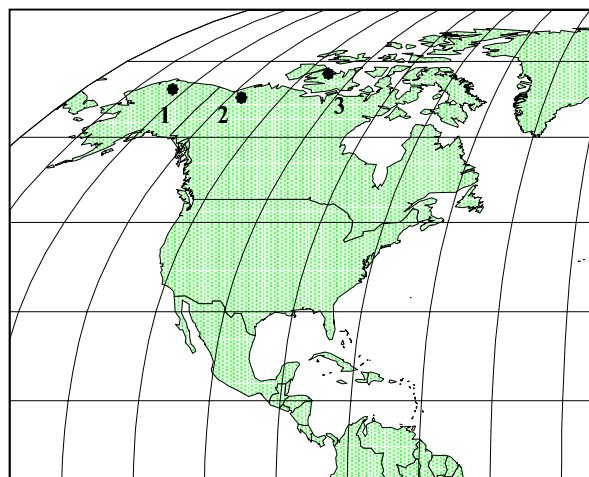


Рис. 2. Районы континентальных газогидратопроявлений в Северной Америке.

1 — США, северный склон Аляски (нефтяные месторождения Купарук Ривер и Прадхо-Бей). На основании исследований гидратосодержащего керна из скважины Эллен Стейт-2, а также каротажных исследований 445 скважин выделено шесть протяженных гидратосодержащих горизонтов с различной степенью гидратосодержания. Гидратонасыщенность пластов увеличивается вверх по падению, и это позволяет предположить, что необходимый для образования гидратов природный газ появился в пластах в результате миграции снизу вверх по падению. Этот вывод подтверждается результатами геохимического анализа газа, отобранного из керна скважины Купарук Ривер Юнит 2Д-15, поднятого из гидратосодержащего интервала многолетнемерзлых пород. По Collett, Bird, Kvenvolden e. a., 1983, 1988, 1990 гг. [5].

2 — Канада, дельта р. Макензи. К этому району относится одно из наиболее ранних сообщений об обнаружении газогидратов на суше, сделанное по результатам буровых и каротажных работ в добывающих скважинах Ивик и Маллик. Суммарная мощность гидратосодержащих прослоев в скважине Маллик составляет около 110 м. В 1998 году для изучения гидратов была пробурена 1150-метровая скважина JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 как часть совместного исследования между Геологической Службой Канады (GSC) и Японской Национальной Нефтяной Корпорацией (JNOC). В 2003 году планируется промышленная эксплуатация подмерзлотных гидратосодержащих пород.

Многолетнемерзлые гидратосодержащие породы в районе дельты р. Макензи фиксировались и изучались в скважине 92 GSC TAGLU, пробуренной вблизи газового поля Таглу, расположенного приблизительно на 10 км южнее моря Бофорта. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) изменяется от 480 до 560 м. Газовые гидраты фиксировались в ММП как в зоне стабильности гидратов (интервалы 230—250 м и 319—365 м), так и выше современной кровли зоны стабильности гидратов (интервалы 50—70 м). По Dallimore, Collett, Wright e. a., 1992, 1996, 1999 гг..

3 — Канада, Канадский арктический архипелаг. Прослои гидратов в песках с высокой пористостью зафиксированы при проведении каротажных исследований скважин. Толщина зоны стабильности гидратов метана в районе Канадского арктического архипелага достигает 1800 м. По Judge, 1982 г.

ваний установлено, что суммарная мощность гидратосодержащих прослоев в скважинах Ивик и Маллик составляет 110 и 27 м, соответственно [6].

В ходе дальнейших исследований (Dallimore, Collett e. a., 1992, 1996, 1999) в скважинах, пробуренных в центральной части дельты р. Макензи, пять горизонтов

были идентифицированы как возможно гидратосодержащие. Из скважины 92 GSC TAGLU с использованием специального оборудования для снижения физических и термальных нарушений были извлечены три образца мерзлого гидратосодержащего керна. Два из них имели глинистый состав и содержали видимые включения газовых гидратов, а из песчаного образца при оттаивании выделился значительный объем газа, существенно превосходящий объем порового пространства. Песчаный образец был извлечен из интервала выше современной кровли зоны стабильности гидратов, а присутствие в нем гидратов может быть объяснено эффектом самоконсервации газовых гидратов при отрицательной температуре.

Позже экспериментальные исследования в районе дельты р. Макензи были продолжены совместно с

российскими учеными. В ходе этих исследований был проведен сравнительный анализ (по составу и свойствам) природных гидратосодержащих отложений и образцов гидратонасыщенных пород, полученных путем экспериментального моделирования гидратообразования при условиях, схожих с природными [7].

Изучение континентальных газовых гидратов в России до сих пор, к сожалению, не носит системный характер. Специальные исследования континентальных гидратов практически не проводились и большинство накопленных данных по гидратопроявлениям в отложениях суши России — это попутные результаты исследований, имевших другую направленность.

Тем не менее на сегодняшний день известен ряд регионов в России (рис. 3), где газовые гидраты были обнаружены (или предположительно обнаружены)

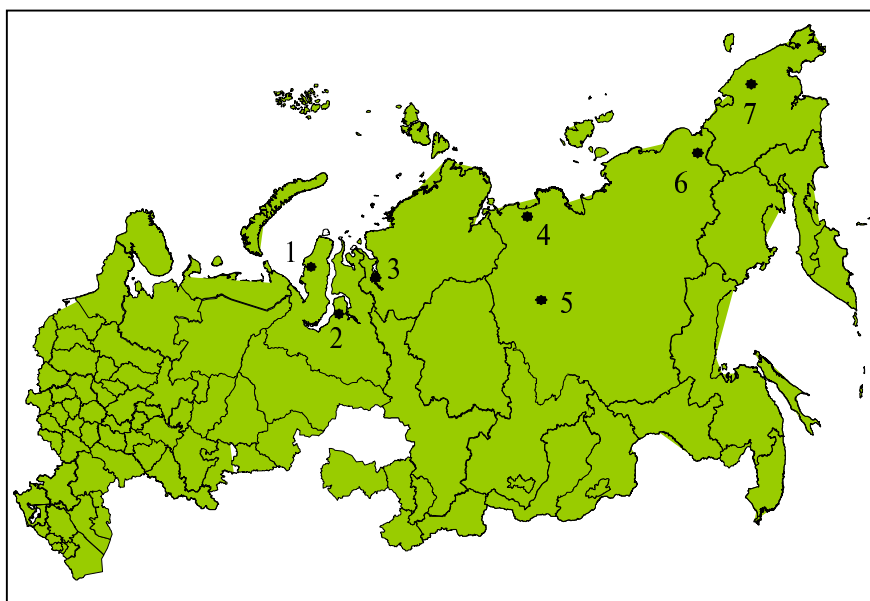


Рис. 3. Районы континентальных гидратопроявлений в России.

1 — Бованенковское газоконденсатное месторождение (северо-западная часть п-ва Ямал, Западная Сибирь). Мощность многолетнемерзлой породы (ММП) составляет около 200 м. Газопроявления зафиксированы в интервалах глубин 50—130 м, выделяется интервал 60—80 м наиболее часто встречающихся газопроявлений и максимальных дебитов газа. Исследования мерзлого керна из газопроявляющих горизонтов показали наличие рассеянных реликтовых гидратов. По данным В.В. Кондакова, Е.В. Перловой, Е.М. Чувилина, В.С. Якушева 1996—2000 гг.

2 — Ямбургское газоконденсатное месторождение (север Западной Сибири). Мощность ММП изменяется от 350 до 400 м, газо- и гидратопроявляющие образцы подняты с интервала 70—120 м. По данным Якушева В.С., 1989, 1992 гг.

3 — Мессояхское газовое месторождение (север Западной Сибири). Ранее предполагались значительные подмерзлотные газогидратные скопления в верхнем продуктивном горизонте (810—830 м). Исследования последних лет показывают, что в продуктивном пласте Мессояхского месторождения клатратная форма газа может составлять не более 5%. По данным Г.Д. Гинсбурга и др., 1990—2000 гг.; С.Н. Закирова и др., 1989 г.; С.Е. Агалакова и др., 1997 г.

4 — Устье р. Оленек (Улахан-Юряхская площадь, северное побережье Средней Сибири). Мощность ММП достигает 450 м. Газосодержащие породы залегают в интервале 300—780 м и приурочены к зоне стабильности гидратов. По данным Н.В. Черского и др., 1973 г.

5 — Западная Якутия (южный край Анабарской антеклизы, Сибирская платформа). Мощность криолитозоны достигает 680—1050 м, мощность ММП изменяется от 100 до 600 м. Реликтовые газовые гидраты залегают в интервалах 80—100, 140—190 м, в пределах современной зоны стабильности гидратов — 335—340, 453—462 и 543—548 м. По данным А.М. Порохняка, 1988 г.

6 — Кольмо-Инди́гирская низменность (р. Большая Чукочья, д. Ахмела). Содержание метана в отдельных слоях ММП в пределах глубин от 2 до 60 м достигает 40 мл/кг. Лабораторные исследования показали, что метан находится в гидратном состоянии. Ежегодное формирование и разрушение газовых гидратов происходит в сезонно-талом слое. По данным Д.А. Гиличинского и др., 1992, 1995 гг.

7 — Север п-ова Чукотки. Активные газовыделения из ММП при их оттаивании в подземных выработках на коренных и россыпных золотоносных месторождениях. Газовыделения связываются с оттаиванием внутримерзлотных газогидратов. По данным П.Д. Чабана, 1991 г.

либо в результате непосредственного изучения извлеченного из скважины керна (точки 1, 2, 4 на рис. 2), либо по косвенным признакам — путем анализа каротажных данных, наблюдений за газопроявлениями в полевых условиях, на основании лабораторных исследований оттаявших кернов (точки 3, 5, 6, 7 на рис. 2) [8—10]. Кроме этого, имеется ряд регионов, где скопления газовых гидратов специально не изучались, но некоторые признаки, такие как активные газопроявления при высокой степени заполнения пор пород льдом, указывают на возможность их существования.

Рассмотрим имеющиеся к настоящему времени сведения, свидетельствующие о наличии залежей газовых гидратов на территории России.

В Усть-Оленекском районе (Лено-Енисейская плита) в начале 50-х годов прошлого века были проведены буровые разведочные работы на нефть и газ с отбором керна из интервала зоны стабильности гидратов. В начале 1970-х годов Н.В. Черский и В.П. Царев из архивных материалов обнаружили, что в описании этих образцов керна были отмечены характерные для присутствия гидратов газопроявления [11]. Гидратосодержащие породы приурочены к современной зоне стабильности гидратов и залегают в интервале глубин 300—780 м как в мерзлых породах (до глубин порядка 450 м), так и в подмерзлотных отложениях.

В отечественной литературе достаточно долго обсуждался вопрос о возможности существования подмерзлотных гидратосодержащих отложений в районе Мессояхского газового месторождения (Западная Сибирь) [10, 12]. Как предполагалось, гидраты содержатся в толще пород верхнего продуктивного горизонта месторождения в интервале глубин 810—830 м (А.Э. Беньяминович, 1973; Ю.Ф. Макогон, 1986). Проблемой газовых гидратов на Мессояхском месторождении в различные годы занимались Н.В. Черский, Г.Д. Гинсбург, В.П. Царев, Ю.Ф. Макогон, Д.И. Медовский, В.А. Ненахов, Д.А. Дубровский, Р.Г. Богатырева и др. В результате этих исследований были получены весьма ценные данные по геологии, геофизике и геохимии пластовых флюидов. Однако публикации последних лет говорят о завышенных первичных оценках количества газогидратов в продуктивном пласте Мессояхского месторождения [13]. Одним из наиболее веских доказательств присутствия газогидратов в продуктивных пластах месторождения считается резкое увеличение дебитов скважин после метанольной обработки призабойной части пласта. Но, по-видимому, дебиты газа свидетельствуют скорее о разложении в призабойной части пластов техногенных газогидратов, образовавшихся при депрессии на пласт. Что касается природных гидратов, то не исключена возможность существования маломощных гидратосодержащих слоев в верхнем продуктивном горизонте месторождения и на крыльевых участках складки [4]. Объективные исследования показывают, что в продуктивном пласте Мессояхского месторождения, если и присутствуют газовые гидраты, клатратная форма газа составляет не более 5% [14].

Еще один район возможного залегания газогидратов в многолетнемерзлых породах в Западной Якутии (южный край Анабарского массива) описан А.М. Порохняком [15]. Гидратосодержащие интервалы здесь были выделены по результатам закачки высокоинтен-

сифицированных рассолов в проницаемые горизонты мерзлой толщи. Подача рассолов привела к выделению значительных объемов газа. Как гидратосодержащие породы автором идентифицируются многолетнемерзлые интервалы 80—100 и 140—190 м, расположенные выше кровли зоны стабильности гидратов, а также подмерзлотные, но отрицательно-температурные интервалы в пределах современной зоны стабильности (от 330 до 550 м).

Газовые и газогидратные скопления в криолитозоне

Ямбургское газоконденсатное месторождение

Ямбургское газоконденсатное месторождение (ГКМ) — один из первых районов, где была предпринята попытка специального изучения внутримерзлотных газовых скоплений. При исследованиях было установлено, что одной из форм нахождения газа является его клатратные соединения с водой [4, 16].

Ямбургское ГКМ расположено в северной геокриологической зоне. Мощность многолетнемерзлых пород, имеющих сплошное распространение, составляет 350—400 м в зависимости от геоморфологического уровня. Верхняя часть осадочного чехла построена из песчано-глинистых отложений мелового, палеогенового и четвертичного возрастов.

Газопроявления на Ямбургском ГКМ различной интенсивности зафиксированы в интервалах глубин от 10 до 150 м (рис. 4). Они имеют ряд общих признаков, свидетельствующих о наличии гидратных скоплений в многолетнемерзлом разрезе наряду с другими формами газовых скоплений. Основными признаками являются: повышенное давление газа; запах сероводорода, который мог сохраниться в криолитозоне только в гидратной форме; усиление интенсивности газопроявлений при оттаивании околоскважинного пространства и затухание газопроявлений при прекращении оттаивания.

Химический анализ газа, отобранного из газоносных интервалов, показал, что газ состоит из метана (91,5%) и азота (8,5%). Отсутствие тяжелых гомологов метана и значительное содержание азота указывают на биохимическое происхождение газа, а также на то, что внутримерзлотные газовые скопления не связаны с нижележащими продуктивными горизонтами меловой системы.

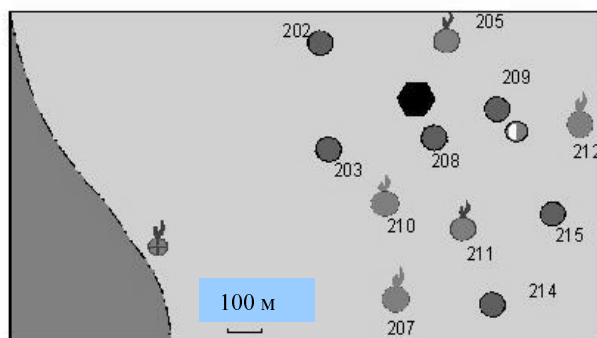


Рис. 4. Зафиксированные газопроявления из криолитозоны на кустах скважин Ямбургского газоконденсатного месторождения в районе УКПГ-2

На Ямбургском ГКМ впервые была применена разработанная во ВНИИГАЗе методика определения содержания газовых гидратов в мерзлом керне ненарушенного сложения [4], поднятого из верхних глубин (150 м) мерзлой толщи. Мерзлотная скважина была пробурена в районе одной из установок комплексной подготовки газа, на добывающих скважинах вокруг которой неоднократно отмечались газовыделения из верхних интервалов криолитозоны. Как видно на литологической колонке скважины (рис. 5), образцы газовых гидратов подняты из интервала глубин 70—120 м, где имеет место чередование песчаных и глинистых отложений. Все газопроявляющие интервалы представлены песками и легкими супесями с массивной криогенной текстурой, которые, как правило, подстилаются глинистыми отложениями. Этот интервал располагается выше верхней границы современной зоны стабильности газовых гидратов, поэтому там могли быть только реликтовые гидраты.

При оттаивании образцов в керосине фиксировалось выделение газов. Плотность выделений газа с поверхности образца составляла 1 газопоявление/3 см², длительность газопоявлений 2—3 мин. В образцах, отобранных из других интервалов глубин, подобных газопоявлений не отмечалось, несмотря на их большую пористость и меньшую степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой.

Специальные лабораторные исследования физических свойств газопроявляющих образцов показали, что газосодержание обусловлено клатратной формой существования газа, так как степень заполнения пор мерзлых супесей и песков близка к единице (в порах нет места для свободного газа), а объемы газа при оттаивании достигают более 0,2 см³/г породы.

Низкая плотность газовыделений при оттаивании кернов свидетельствует о рассеянном состоянии газовых гидратов в поровом пространстве исследованных пород. Это дает основание предположить возможность

их широкого распространения в мерзлых толщах в качестве аутигенного минерала, имеющего инженерно-геологическое и геокриологическое значение. В то же время интенсивные газопоявления в других районах распространения многолетнемерзлых пород (например, на Бованенковском газоконденсатном месторождении) позволяют предположить возможность значительных скоплений газовых гидратов в многолетнемерзлых массивах.

Бованенковское газоконденсатное месторождение

Детальное изучение газовых скоплений в толщах многолетнемерзлых пород было проведено в пределах северо-западной части полуострова Ямал на территории южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. Здесь научно-техническая фирма «Криос» в течение нескольких лет проводила бурение мерзлотных скважин с использованием специальной методики опробования на газонасыщенность мерзлых пород.

Бованенковское ГКМ расположено в северной геокриологической зоне и характеризуется суровыми природными условиями. Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, несквозные толщи развиты лишь под руслами рек и наиболее крупными озерами. В разрезе сплошность мерзлых пород нарушается горизонтами охлажденных рассолов—криопеггов. Мощность многолетнемерзлых пород меняется от 150 м на поймах до 250 м в отложениях III Морской террасы. Среднегодовая температура пород на глубине нулевых годов

Глубина (м)	Геологический индекс	Литологическая колонка	Описание пород
50	рп Q _ш		Пески мелкозернистые, местами оторфованные
			Переслаивание песков пылеватых, супесей, суглинков. В интервале 33—37 м породы оторфованы
	mgm Q _ш ²⁻⁴		Суглинки темно-серые с прослоями мелкозернистого песка. В прослоях песка отмечены включения щебня и мелкой гальки
100	m Q _{г-п}		Переслаивание песков средне - мелкозернистых с супесями и суглинками
			Супесь тяжелая с включениями гравия
150	Q _г		Однородный суглинок зеленовато-серого цвета

Рис. 5. Литологическая колонка мерзлотной скважины в районе УКПГ-2 Ямбургского газоконденсатного месторождения.

«Белыми» квадратами в графе «Геологический индекс» обозначены места отбора образцов мерзлого керна, «черными» квадратами — газо- и гидратосодержащие образцы

вых амплитуд в зависимости от ландшафта и геоморфологического уровня меняется от $-2 \div -3^\circ\text{C}$ до -7°C .

Разрез южной части территории Бованенковского ГКМ был вскрыт мерзлотно-параметрическими скважинами на глубину порядка 550 м. Геологический разрез представлен рыхлыми отложениями мезозойско-кайнозойского возраста преимущественно суглинисто-глинистого состава (рис. 6).

В районе Бованенковского ГКМ газопроявления из многолетнемерзлых пород широко распространены как в плане, так и в разрезе и встречаются в интервалах

глубин от 20—30 до 130 м (рис. 7). Кроме того, единичные выбросы газа фиксируются вблизи подошвы многолетнемерзлых пород. Статистический анализ имеющихся данных показывает, что около 90% газопоявлений из многолетнемерзлых интервалов приурочено к морским суглинистым отложениям ямальской серии ниже-среднеплейстоценового возраста ($m Q_{I-II}^{1-2}$). Здесь также замерены максимальные замеренные дебиты газа (до $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$). Остальные газопоявления из многолетнемерзлых пород на территории исследования связаны с супесчано-суглинистыми

Геологический индекс	Глубина подошвы слоя, м	Литологическая колонка	Описание пород
a Q_{IV}	5.4		Супесь оторфованная, L_d^* до 2,2 м 40—60 %, ниже < 3%
	10		Суглинок серый, КТ** сетчатая, L_d 10—20 %
m Q_{III}^1	29		Супесь серая, коричневатая-серая с прослоями торфа, КТ массивная
m Q_{I-II}^{1-2}	130		Суглинок серый, темно-серый с прослоями пылеватого песка, мощность прослоев от 1—2 до 10 мм. До глубины 62 м с оторфованными прослоями и вкраплениями растительного детрита; в интервале 81—83 м включения дресвы и щебня, КТ массивная. В интервалах 54—8, 71—76 и 91—94 м — газопоявления
	165		Суглинок серый, темно-серый, КТ массивная. На глубине 165 м — подошва многолетнемерзлых пород
	205		Глина серая, с черными углистыми пятнами и прослоями, в интервале 180—183 м отложения оторфованы. Глина талая, полутвердая
m Q_{I-II}^{1-2}	243		Суглинок темно-серый, опесчаненный, с включениями плохо окатанного гравия; с глубины 225 м — с прослоями песка мощностью до 2 м. Суглинок талый, полутвердый, песок водонасыщенный
	283		Переслаивание суглинка темно-серого опесчаненного и песка пылеватого с включениями плохо окатанного гравия. В интервале 279—283 м — прослой песка. Отложения талые, суглинок твердый, пески водонасыщенные
	314		Глина темно-серая, твердая, в основании слоя (311—314 м) песок водонасыщенный, с включениями гравия и гальки
	507		Глина темно-серая до черной, уплотненная, с включениями макрофауны, с редкими прослоями мелкозернистого слабо сцементированного песчаника, с редкими включениями мелкой древесины
m K_2	550		Алевролит темно-серый, слабо сцементированный, с прослоями уплотненной глины мощностью 10—20 см и включениями остатков фауны. С глубины 600 м — газовая залежь

* L_d — льдистость за счет шпиров льда, ** КТ — криогенная текстура

Рис. 6. Геологический разрез мерзлотно-параметрической скважины 610-П-3 (аллювиальная пойма р. Морды-Яха)

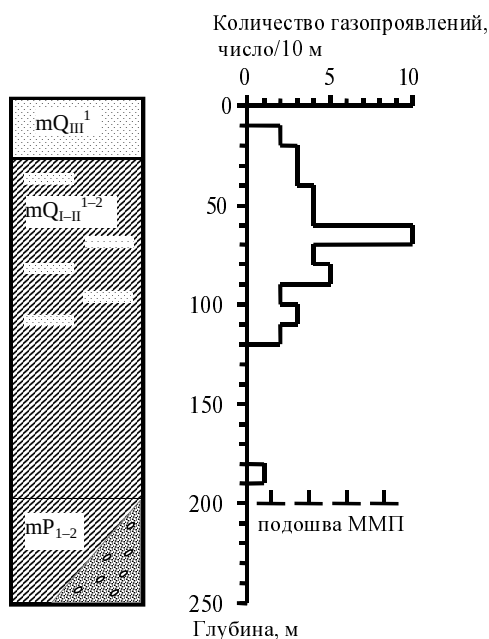


Рис. 7. Распределение по глубине частоты встречаемости зафиксированных газовых выбросов из криолитозоны Бованенковского газоконденсатного месторождения.

ММП — многолетнемерзлая порода

морскими отложениями казанцевской свиты ($m Q_{III}^1$). По имеющимся данным, дебиты газа из казанцевской толщи невелики, максимальный стабилизированный дебит газа не превышает $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ [17].

В общем случае замеренные дебиты газа из многолетнемерзлых интервалов глубин имеют большой разброс значений, от 50 до $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$. До глубин по-

рядка 50 м дебиты газа не превышают $50\text{--}150 \text{ м}^3/\text{сут}$, ниже по разрезу они составляют более $100 \text{ м}^3/\text{сут}$, достигая значений, близких к промышленным (тысячи $\text{м}^3/\text{сут}$). Максимальные замеренные дебиты газа в толще многолетнемерзлых пород района исследования представлены на рис. 8.

Преобладающим газом в составе газовых скоплений по всей мерзлой толще является метан (87—99%). В отложениях казанцевского возраста до глубин около 40 м наряду с метаном в состав природного газа входят также азот, оксид или диоксид углерода, водород. Газ, отобранный из отложений ямальской серии на глубинах от 50 до 120 м, характеризуется большим содержанием метана (в среднем более 99,5%) и, как правило, содержит азот (доли процента). По результатам изотопного анализа метан, отобранный в пределах мерзлой толщи на глубинах от 30 до 120 м, имеет биохимическое происхождение, он образован в результате микробной переработки содержащегося в породах органического вещества. Отклонение величины $\delta^{13}\text{C}$ от принятого стандарта менее -70‰ . Для сравнения: для газовых образцов из нижележащего (с глубины 550 м) продуктивного сеноманского горизонта величина $\delta^{13}\text{C}$ составляет $-46 \div -54\text{‰}$.

Анализируя характер газовыделений из толщи мерзлых пород северо-западной части п-ва Ямал в сопоставлении с распределением некоторых свойств мерзлой толщи по глубине (общая засоленность пород, минерализация поровых вод, содержание органического вещества), можно выявить некоторые закономерности, связывающие приуроченность газопоявлений, их характер и интенсивность с особенностями состава, строения и свойств мерзлых пород в исследуемом районе [17, 18]. По нашему мнению, некоторые из выявленных закономерностей можно считать косвенными признаками гидратосодержащих отложений.

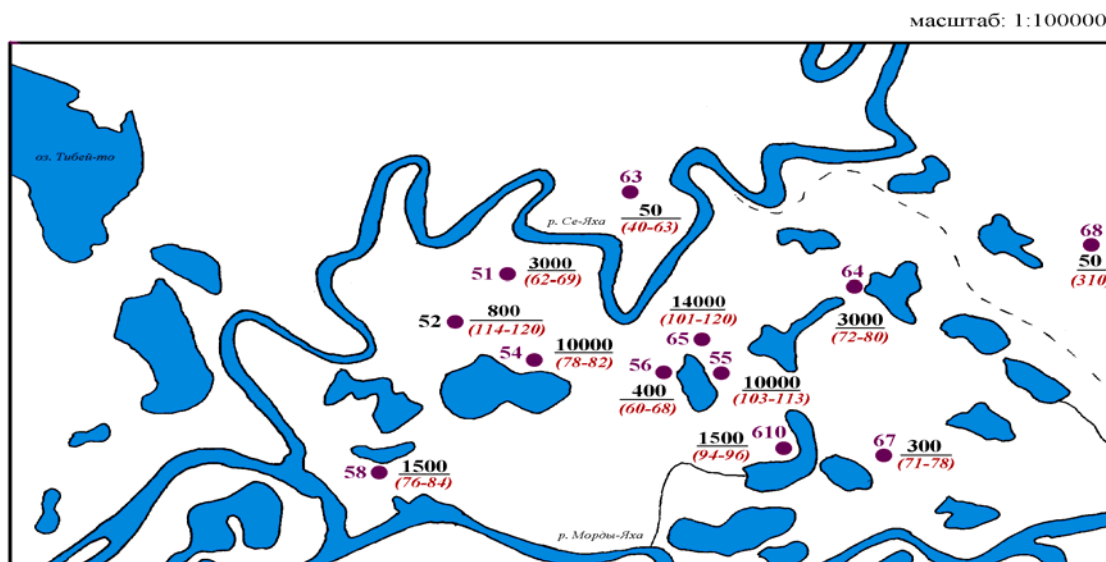


Рис. 8. Карта распределения максимальных дебитов газа из криолитозоны на исследованных кустах скважин в южной части Бованенковского ГКМ.

65 — номер куста скважин; 14000 (101-120) — максимальный дебит газа, $\text{м}^3/\text{сут}$; интервал глубин отбора, м; ---- — граница III Морской террасы; — — реки, озера

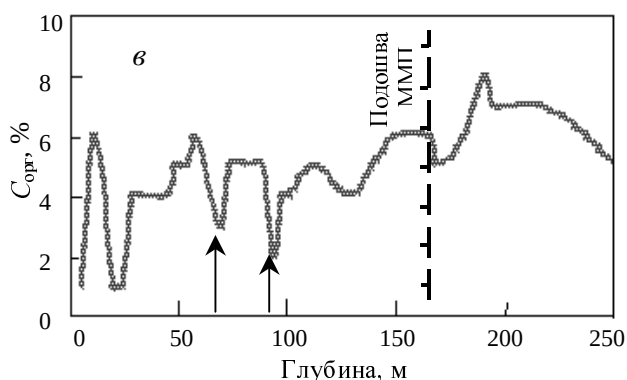
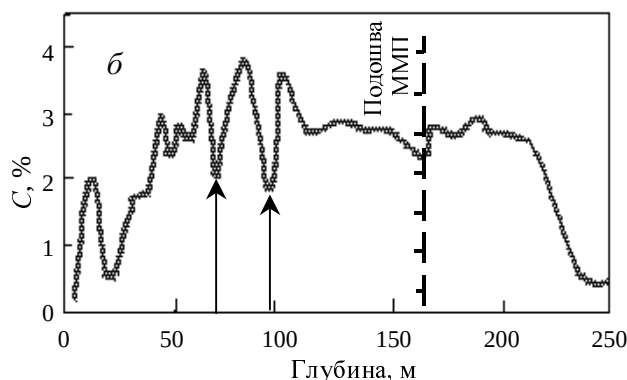
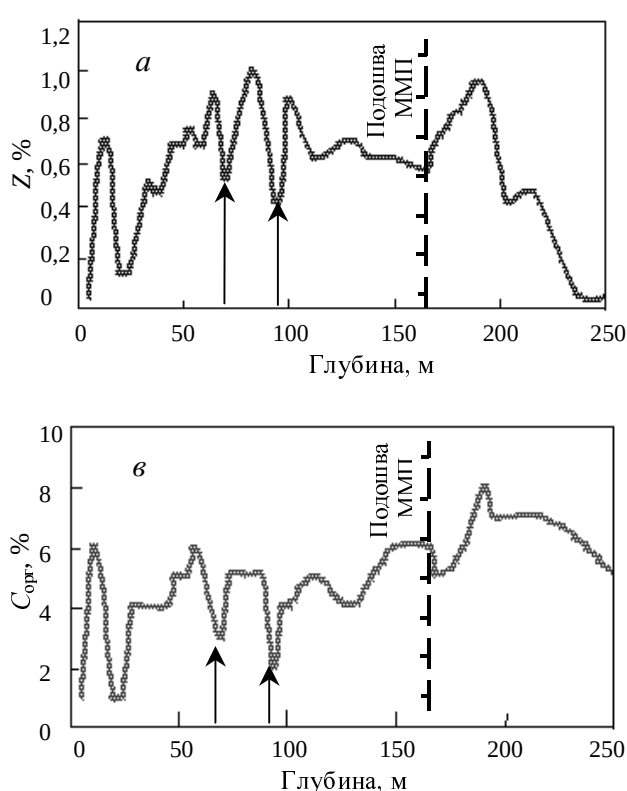


Рис. 9. Распределение по глубине общей засоленности отложений (а), концентрации солей в поровом растворе (б), содержания органического материала (в).

(По результатам опробования мерзлотно-параметрической скважины 610-П-2). Зафиксированные интервалы газопроявлений (указаны стрелками): 63–67 м (дебит газа 500 м³/сут) и 91–95 м (дебит газа 1000 м³/сут). ММП — многолетне-мерзлые породы

Практически все газовыделения в пределах Бованенковского ГКМ литологически приурочены к маломощным прослоям (2–3 см) оторфованных пылеватых песков, встречающимся в разрезе мерзлой толщи до глубин около 130 м. В глинистой толще на глубинах свыше 130 м газопроявления из многолетнемерзлых интервалов практически не фиксируются.

Распределение общей засоленности отложений по глубине носит достаточно неоднородный характер (см. рис. 9а). Для интервалов мерзлой толщ прослеживается приуроченность газовых выбросов к грунтовым зонам с пониженным засолением. Рис. 9а показывает также увеличение общей засоленности пород, расположенных ниже горизонтов зафиксированных газопроявлений.

Анализ водопроявлений по глубине мерзлой толщ показал, что внутримерзлотные минерализованные воды в основном находятся ниже интервала наиболее часто встречающихся газопроявлений в многолетнемерзлом разрезе. Можно заключить, что как на уровне общего засоления пород и минерализации порового раствора, так и на уровне криопэггов имеет место тенденция к увеличению содержания солей в слоях ниже газопроявляющих горизонтов. Подобную закономерность можно объяснить криогидратным отжатием солей.

Уменьшение общей засоленности пород в газопроявляющих интервалах в большинстве случаев совпадает с локальными минимумами содержания неразложившихся органических остатков (см. рис. 9в), причем содержание органического материала в этих интервалах снижается в три и более раз. Более полное разложение органического материала в подобных горизонтах, по-видимому, привело к образованию *in situ* большого количества биогенного газа, запасы которого пополнялись за счет криогенного концентрирования в песчаных линзах.

Прослеживается определенная связь содержания газов в мерзлой толще в районе Бованенковского месторождения с некоторыми ее свойствами. Так, теплопроводность мерзлых грунтов при закономерной зависимости ее от фазового состава влаги уменьшается в газопроявляющих горизонтах по сравнению с негазопроявляющими при прочих равных условиях (содержание незамерзшей воды и льдистость).

Примером связи структурных особенностей порового пространства мерзлых пород района исследования с их газосодержанием могут служить результаты лабораторных определений газосодержания в мерзлых породах путем измерения объема газа, выделяющегося при оттаивании керна. Оказалось, что объем выделившегося газа на 2–3 порядка превосходит то свободное пространство в порах пород, которое мог бы занять газ в свободной форме. Согласно существующим представлениям о клатратных соединениях, это объясняется гидратной формой нахождения газа и может являться уже прямым признаком наличия реликтовых (метастабильных) гидратных включений в поровом пространстве исследованных пород [19].

Для изучения принципиальной возможности гидратообразования в поровом пространстве засоленных супесчано-суглинистых пород северо-западной части п-ва Ямал была проведена серия экспериментальных исследований по искусственному гидратонасыщению и изучению *p, T*-условий существования гидратов метана в наиболее характерных для мерзлой толщ грунтовых разновидностях — супесях, суглинках и глинах [20]. Во всех проведенных экспериментах гидратообразование в поровом пространстве дисперсных пород зафиксировано визуально при петрографических исследованиях мерзлых гидратонасыщенных образцов (рис. 10). Возможность образования и значительного накопления гидратов метана в

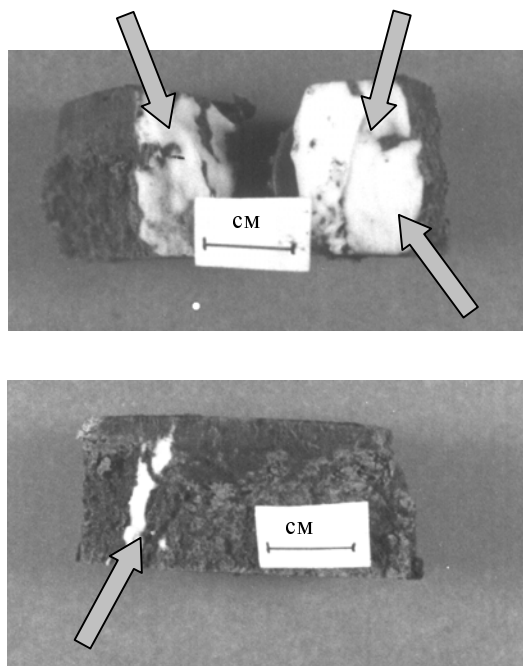


Рис. 10. Линзовидные гидратные включения в искусственно гидратонасыщенном образце пылеватой глины из отложений ямальской серии (mQ_{1-11}^{1-2})

дисперсных породах района исследования можно считать косвенным доказательством существования гидратосодержащих интервалов в районе п-ва Ямал.

По нашим представлениям, существование термодинамической зоны стабильности гидратов метана в разрезе района исследования при мощности криолитозоны менее 300 м сомнительно, если принять давление в порах равным гидростатическому. Проведенные экспериментальные исследования показали смещение p, T -условий образования гидратов метана в дисперсных породах изучаемой толщи в область более высоких давлений и низких температур по сравнению с условиями свободного объема, так что отсутствие современной зоны стабильности гидратов в изучаемом разрезе по «гидростатической» модели становится очевидным.

Таким образом, есть все основания полагать, что газовые скопления в разрезе многолетнемерзлой толщи района Бованенковского газоконденсатного месторождения содержат по крайней мере часть газа в гидратной форме. На это указывают как косвенные, так и прямые признаки. Эти скопления попадают в зону метастабильности газовых гидратов, в которой ранее образованные в этой палео-зоне гидраты существуют при отрицательных температурах благодаря эффекту самоконсервации. Под зоной метастабильности гидратов в исследуемом районе мы понимаем всю мощность многолетнемерзлых пород от подошвы слоя сезонного оттаивания до подошвы мерзлой толщи, где температура массива не превышает температуру оттаивания грунтов.

Заполярье нефтегазоконденсатное месторождение

Не исключена возможность существования газовых гидратов в надпродуктивной толще Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ). Крио-

литозона Заполярного НГКМ, расположенного в северной геокриологической зоне в северной части Пур-Тазовской геокриологической области, характеризуется в основном сплошным распространением многолетнемерзлых пород. По данным институтов «Фундаментпроект» и ПНИИИС, на территории месторождения встречаются участки многолетнемерзлых пород сливающегося и реже несливающегося типов. Глубина залегания кровли многолетнемерзлых толщ колеблется от 1–3 до 5–10 м. Среднегодовые температуры пород на подошве слоя годовых колебаний изменяются от 0 до $-3 \div -4$ °С. Максимальные глубины погружения кровли мерзлых пород и среднегодовые температуры характерны для равнинных участков, покрытых листовидными растениями и сложенных с поверхности песчаными породами. Прослои и линзы талых пород обычно приурочены к подошрам и подрусловым таликам.

По данным разведочных работ и промысловых исследований в скважинах, мощность многолетнемерзлых пород достигает 400–450 м, причем, по мнению ряда исследователей, она увеличивается над сводовой частью газосодержащей куполовидной структуры, снижаясь над краевыми ее частями. В поймах мелких и средних рек мощность мерзлых толщ может уменьшаться до 150 м.

На Заполярном НГКМ не проводилось бурение глубоких мерзлотно-параметрических скважин с исследованием керна, поэтому о газонасности разреза криолитозоны можно судить только по косвенным данным бурения и на основании анализа геологического строения интервала криолитозоны (рис. 11).

В геологическом строении многолетнемерзлой толщи принимают участие песчано-глинистые отложения палеогенового и четвертичного возрастов. Наиболее благоприятные для газонакопления интервалы представлены континентальными песчаными осадками тибейсалинской (талицкой) свиты (палеоцен) мощностью 150–250 м, а выше по разрезу — супесчано-суглинистыми отложениями казанцевской свиты (верхний плейстоцен).

В интервале глубин 50–150 м в отложениях казанцевской свиты ожидается присутствие как скоплений свободного газа, так и реликтовых газовых гидратов, которые могут существовать в неравновесных термобарических условиях благодаря упомянутому выше эффекту самоконсервации газовых гидратов при отрицательных температурах. Интервал глубин 300–500 м попадает в зону стабильности газовых гидратов, поэтому в песчаных отложениях тибейсалинской свиты возможно наличие как скоплений свободного газа, так и стабильных газовых гидратов.

При бурении скважин из обоих интервалов глубин отмечались газопроявления различной интенсивности, причем как на Заполярном НГКМ, так и на соседних Уренгойском НГКМ и Ямбургском газоконденсатном месторождении, что говорит о региональной газо- и гидратонасности этих интервалов. Но если верхний газонасный интервал криолитозоны можно рассматривать только как фактор, осложняющий ведение буровых работ, то нижний (тибейсалинская свита) вполне может содержать промышленно-значимые запасы газа в гидратном состоянии.

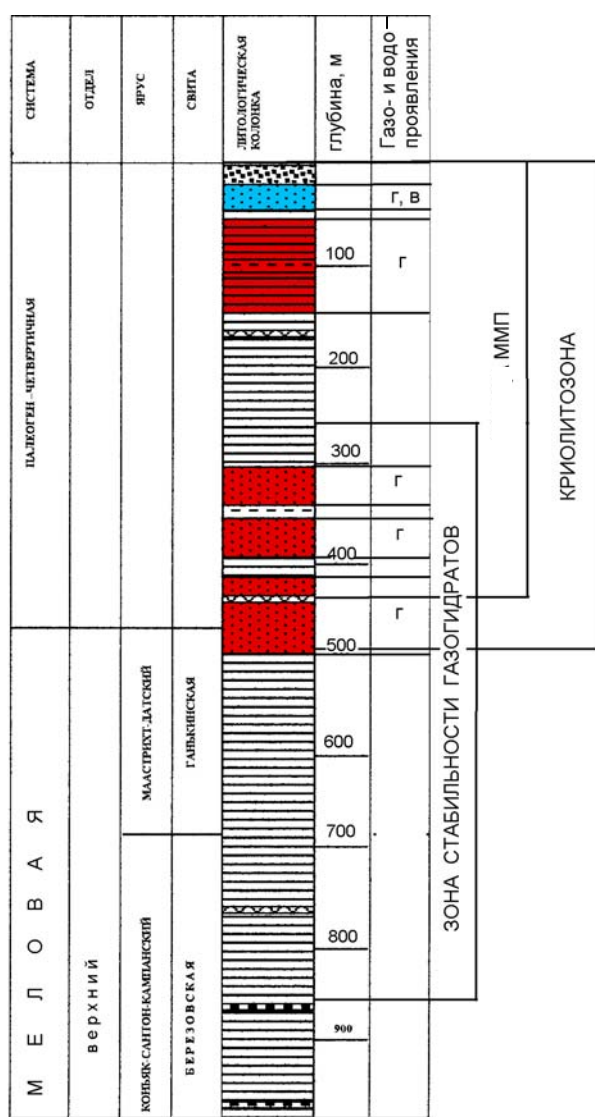


Рис. 11. Литологическая колонка скважины Р-3 на Заполярном нефтегазоконденсатном месторождении.

Из плейстоцен-четвертичных отложений (казанцевская свита, верхний затемненный интервал колонки) ожидаются водо- и газопроявления; из палеогеновых отложений (тибей-салинская свита, нижний затемненный интервал колонки) — газопроявления, связанные с газогидратами

Заключение

Приведенный обзор современного состояния исследований континентальных гидратосодержащих отложений показывает, что в России эти исследования, к сожалению, пока еще не носят целенаправленный характер. Большинство полевых данных по континентальным гидратопроявлениям получено как «неожиданный и попутный» результат геолого-разведочных и промышленных работ в области распространения криолитозоны. В то же время эти данные свидетельствуют о возможности широкого распространения гидратосодержащих пластов в криолитозоне. Это связано в основном с благоприятным геологическим строением

ем огромных российских территорий — северо-востока европейской части, Западной и Средней Сибири. В этих, а также в некоторых других регионах, помимо благоприятной геохимической обстановки, мощная криолитозона не только расширяет зону стабильности гидратов в разрезе, но и обуславливает возможность существования реликтовых гидратов природных газов в верхних горизонтах на незначительных глубинах (до 100—150 м).

Все это ставит вопрос о необходимости проведения дальнейших полевых и экспериментальных исследований, позволяющих разработать единый грамотный подход к изучению континентальных гидратов. В этом смысле исследовательские работы последних лет на Ямбургском и Бованенковском газоконденсатных месторождениях можно считать наиболее специализированными по методическому подходу и наиболее полными по полученным результатам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dobrynin V.M., Korotajev Yu.P., Plyushev D.V. Long-term Energy Resources. Boston: Pitman, 1981, p. 727—729.
2. MacIver R.D. Ibid., 1981, p. 713—726.
3. Соловьев В.А. Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 648—661.
4. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992, 236 с.
5. Collett T.S., Kvenvolden K.A., Magoon L.B. Applied Geochemistry, 1990, v. 5, p. 279—287.
6. Dallimore S.R., Collett T.S. Geological Survey of Canada, Bulletin 544, Eds. T. Uchida, T.S. Collett. 1999, p. 31—43.
7. Dallimore S.R., Chuvilin E.M., Yakushev V.S. e. a. 2nd Internat Conference on Natural Gas Hydrates, Toulouse, France, 1996, p. 525—531.
8. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномерзлых золотоносных россыпях. Колыма, 1991, № 6, с. 18—19.
9. Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А., Маккей К., Даллимор С., Остроумов В.Е. В сб.: Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997, с. 270—276.
10. Агалаков С.Е. Геология нефти и газа, 1997, № 3, с. 16—21.
11. Черский Н.В., Царев В.П. В сб.: Исследования и рекомендации по усовершенствованию добычи полезных ископаемых в северных и восточных регионах СССР: часть 1. Перспективы разработки газогидратных залежей. Под ред. Н.В. Черского и др. Якутск, 1973, с. 54—60.
12. Гинсбург Г.Д., Борисов В.В., Новожилов А.А. Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. Л., 1990, с. 211—223.
13. Гинсбург Г.Д., Новожилов А.А., Дучков А.Д., Прасолов Э.М., Заварзин И.В., Коллетт Т.С. Геология и геофизика, 2000, т. 41, № 8, с. 1165—1177.
14. Закиров С.Н., Дубровский Д.А., Толкач В.М. Влияние процесса разложения гидратов на разработку Мессояхского месторождения. М.: ВНИИЭгазпром, 1989, 23 с.
15. Порохняк А.М. Газогидраты криолитозоны в Западной Якутии. М.: изд-во ЦНИИЦветмета, 1988, 84 с.
16. Якушев В.С. Геология и геофизика, 1989, № 11, с. 100—105.
17. Чувилин Е.М., Якушев В.С., Перлова Е.В., Кондаков В.В. Докл. АН, 1999, т. 369, № 4, с. 522—524.
18. Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Proceedings of the 4th International conference on gas hydrates. Yakohama, Japan, 2002, p. 216—221.
19. Чувилин Е.М., Перлова Е.В. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4 Геология, 1999, № 5, с. 57—59.
20. Чувилин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В. Материалы Второй конф. геокриологов России. Т. 1, ч. 4. Москва, 2001, с. 169—173.