

Многолетнемерзлые породы как коллектор газовых и газогидратных скоплений

В.С. Якушев, Е.В. Перлова (ВНИИГАЗ), Е.М. Чувиллин (МГУ им. М.В. Ломоносова), В.В. Кондаков (НТФ «Криос»)

На основе изучения и анализа газопоявлений из толщи многолетнемерзлых пород (ММП) в пределах южной части Бованенковского ГКМ (п-ов Ямал, Западная Сибирь) выявлена высокая газонасыщенность верхних горизонтов мерзлых пород района исследования, а также некоторые закономерности, связывающие газопоявления с составом и свойствами грунтов. Проведенные лабораторные исследования мерзлых образцов и анализ термобарического состояния разреза дали возможность установить наличие реликтовых газогидратов метана в мерзлых породах исследуемой толщи наряду с другими формами нахождения газа.

Несмотря на очевидный научный и практический интерес к газообразной компоненте мерзлых пород, ее специфика, формы нахождения и условия формирования в многолетнемерзлом разрезе до сих пор крайне плохо изучены. В основном это относится к значительным по объему газовым скоплениям в толщах мерзлых пород, зафиксированным в ряде районов на небольших глубинах (до 100–150 м) [1–3]. Выбросы газа отличаются высокой интенсивностью и большими дебитами, иногда достигающими промышленных значений. Газопоявления из многолетнемерзлых толщ существенно осложняют сооружение и эксплуатацию добывающих скважин, нередко сопровождаются различными аварийными ситуациями вплоть до пожаров. В последние годы был проведен ряд полевых исследований в областях распространения ММП (север Западной Сибири, Арктическое побережье Канады и Аляски и др.), результаты которых указали на то, что многолетнемерзлые породы могут содержать газовые включения в форме клатратного соединения с водой – газовых гидратов. На газогидратную форму нахождения указывают как прямые (гид-

ратсодержащие керны), так и косвенные (большая газонасыщенность мерзлой толщи как в плане, так и в разрезе, значительные объемы выделяющегося газа при высокой (до 99 %) степени заполнения пор пород льдом и незамерзшей водой) признаки. Кроме того, на газогидратную форму нахождения указывает ряд закономерностей, связывающих газосодержание мерзлых пород с их составом, строением и свойствами. Все это заставляет взглянуть на многолетнемерзлые толщи по-новому, как на практически не исследованный коллектор газовых и газогидратных скоплений.

Исследования на Бованенковском ГКМ. Детальное изучение газовых скоплений в толщах ММП проведено в пределах северо-западной части п-ова Ямал на территории южной части Бованенковского ГКМ. В пределах района исследования буровая научно-техническая фирма «Криос» (г. Воркута) в течение нескольких лет выполняла глубокое (до 500 м) бурение мерзлотных скважин с использованием специальной методики опробования газосодержащих интервалов криолитозоны, разработанной специалистами фирмы.

Бованенковское ГКМ расположено в северной геокриологической зоне и характеризуется суровыми природными условиями [4]. Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, несквозные талики развиты лишь под руслами рек и наиболее крупными озерами. В разрезе сплошность ММП нарушается горизонтами охлажденных расчленов-криопэгов. Мощность многолетнемерзлых пород изменяется от 120 м на поймах до 250 м в отложениях III морской террасы. Среднегодовая температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд в зависимости от ландшафтов и геоморфологического уровня изменяется от –2... –3 до –7 °С.

По данным бурения НТФ «Криос», разрез южной части территории Бованенковского ГКМ вскрыт параметрическими скважинами на глубину примерно 550 м и представлен рыхлыми отложениями мезозойско-кайнозойского возраста преимущественно суглинисто-глинистого состава. Многолетнемерзлые породы исследуемой территории обогащены органическими остатками. Породы характеризуются высокими значениями влажности (28–30 %) и льдистости, убывающими вниз по разрезу. Грунты имеют низкую температуру начала замерзания (до –2... –3 °С) и невысокие значения теплофизических характеристик, что обусловлено их большим засолением и наличием органического вещества.

В районе Бованенковского ГКМ газопоявления из ММП имеют достаточно широкое распространение как в плане, так и в разрезе и встречаются в интервалах глубин от 20–30 до 130 м. Кроме того, единичные выбросы газа фиксируются вблизи подошвы ММП и под ней. Статистический анализ имеющихся дан-

ных показывает, что около 90 % газопроявлений из многолетнемерзлых интервалов приурочено к морским суглинистым отложениям ямальской серии ниже-среднеплейстоценового возраста (mQ_{I-II}^{1-2}), к ним также приурочены максимальные замеренные дебиты газа (до 14 000 м³/сут). Остальные газопроявления из ММП на территории исследования связаны с супесчано-суглинистыми морскими отложениями казанцевской свиты (mQ_{III}^1). По имеющимся данным, дебиты газа из казанцевской толщи невелики, максимальный стабилизированный расход газа не превышает 100 м³/сут.

В общем случае замеренные дебиты газа из многолетнемерзлых интервалов имеют большой разброс значений – от 50 до 14 000 м³/сут. До глубин около 50 м дебиты газа не превышают 50–150 м³/сут. Ниже по разрезу дебиты газа превышают 100 м³/сут, достигая значений, близких к промышленным (тысячи кубометров в сутки) (рис. 1). Кроме того, дебиты газа внутри одного и того же интервала глубин также могут иметь большой разброс значений – от 100 до 10 000 м³/сут. Следует отметить, что дебиты газа сильно изменяются в пределах одного куста скважин, т. е. на расстоянии первых десятков метров.

В составе газовых скоплений всей мерзлой толщи преобладает метан (табл. 1). В отложениях казанцевского возраста до глубин около 40 м наряду с метаном (87–99 %) в состав природного газа входят азот, оксид или диоксид углерода и водород. Газ, отобранный в отложениях ямальской серии на глубинах от 50 до 120 м, характеризуется большим (в среднем более 99,5 %) содержанием метана и чаще имеет двухкомпонентный состав ($CH_4 + N_2$), при этом содержание азота составляет доли процента.

По результатам изотопно-спектрометрического анализа метан, отобранный в пределах мерзлой толщи участка исследования на глубинах от 30 до 120 м, имеет биохимическое происхождение и образован в результате микробальной переработки содержащихся в породах органических веществ [3]. Величина отклонения $\delta^{13}C$ от принятого стандарта соотношения $^{13}C/^{12}C$ газа исследованной толщи в основном меньше –70 ‰ (табл. 2), при этом, по принятым классификаци-

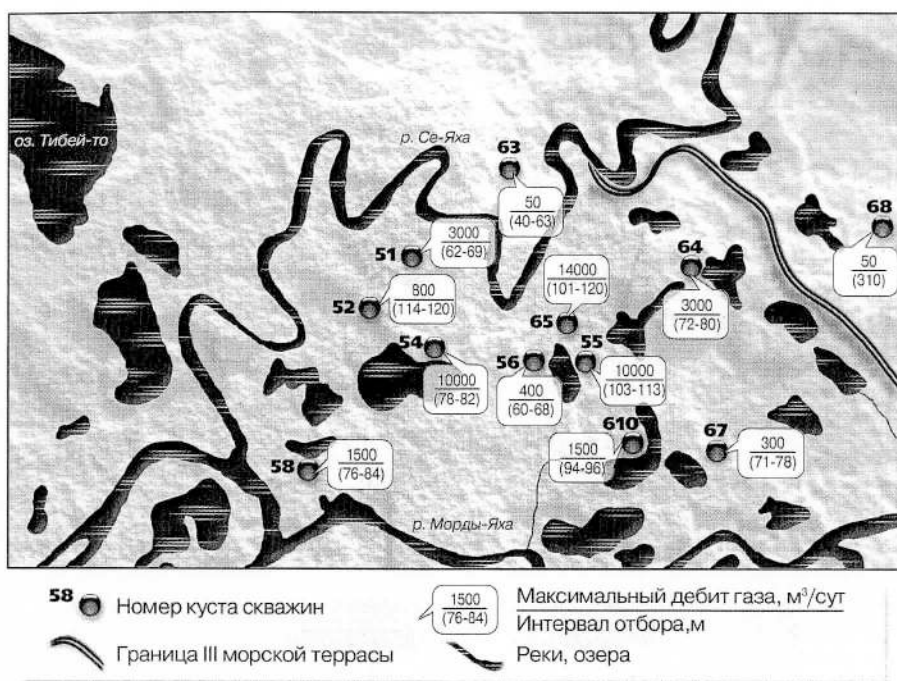


Рис. 1. Карта распределения максимальных дебитов газа из криолитозоны на исследованных кустах скважин в южной части Бованенковского ГМ

Таблица 1

Химический состав газа, отобранного из ММП

Скважина	Глубина отбора, м	Химический состав газа, %				
		CH ₄	N ₂	H ₂	CO	CO ₂
51-II-1	28–33	99,82	0,09	0,07	–	0,02
	59–64	98,17	0,75	0,15	0,88	0,05
51-II-2	38–44	87,08	6,36	1,5	5,06	–
	62–69	99,65	0,35	–	–	–
52-II-1	69–70	98,25	1,63	–	–	0,12
	119–123	98,02	1,9	–	–	0,08
52-II-2	46–52	99,98	0,02	–	–	–
	114–120	99,49	0,51	–	–	–
52-II-3	89–96	99,79	0,21	–	–	–

ям (Алексеев и др.), $\delta^{13}C$ метана бактериального генезиса определяется величиной от –50 до –97 ‰. Кроме того, местный микробный генезис метана косвенно подтверждается наличием в химическом составе исследованного газа азота, т. е. газ не связан с нижележащими продуктивными горизонтами меловой системы.

Районирование территории по газоопасности ММП. Помимо закономерностей газосодержания в разрезе ММП в районе исследования можно проследить некоторые особенности распределения газовых выбросов в плане. Для характеристики площадной газоопасности территории был введен коэффициент

Таблица 2

Изотопный состав газа, отобранного из ММП

Скважина	Глубина отбора, м	$\delta^{13}C(CH_4)$, ‰
51-II-1	28–33	–73,9
	59–64	–74,6
51-II-3	62–69	–72,3
52-II-1	63–70	–71,0
52-II-1	119–123	–71,8
52-II-2	46–52	–70,4
52-II-2	114–120	–70,4
55-II-3	103–113	–73,6
56-II-2	70–80	–76,8
58-II-1	100–107	–72,7
58-II-2	27	–59,56
	105	–90,41

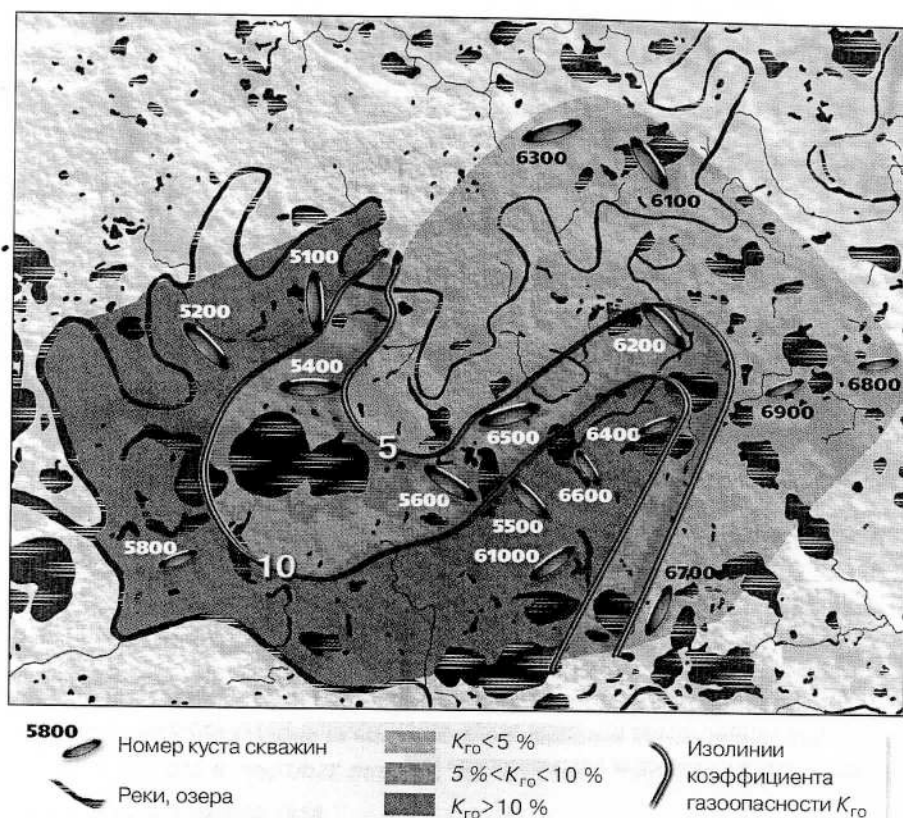


Рис. 2. Районирование территории южной части Бованенковского ГМ по частоте встречаемости газопоявлений из ММП

газоопасности $K_{го}$, представляющий собой число зафиксированных газопоявлений из ММП на данном кусте скважин, выраженное в процентах от общего числа газопоявлений, зафиксированных на всех кустах:

$$K_{го} = (n/N)100 \%,$$

где n – число газопоявлений на мерзлотных скважинах в пределах одного куста; N – общее число газопоявлений на всех кустах.

Также составлена карта, показывающая зональные изменения плотности газовых выбросов на территории исследования (рис. 2).

По величине введенного коэффициента территория исследования подразделяется на три основные зоны.

1. Юго-восточная и юго-западная часть территории Бованенковского ГМ, а также центральная его часть в районе кустов скважин 5500, 6400 и 61000 попадают в зону максимальной газоопасности ММП ($K_{го} > 10 \%$). При этом наибольшее число выбросов газа зафиксировано в скважинах куста 5100 ($K_{го} = 16 \%$), 5200, 5800 и 61000 ($K_{го} = 13-14 \%$).

Следует отметить, что дебиты газа в этой зоне в среднем невелики (100–150 м³/сут) и лишь в кусте 61000 достигают 100–1500 м³/сут.

2. Центральная зона южной части месторождения (кусты скважин 5400, 6200, 5600 и 6500) попадают в зону со средней газоопасностью ММП ($5 \% < K_{го} < 10 \%$). Следует отметить, что именно к этой зоне приурочены максимальные замеренные дебиты газа (до 14 000 м³/сут – скв. 65-П-3, до 10 000 м³/сут – скв. 55-П-3).

3. Центральная часть месторождения характеризуется минимальной газоопасностью ММП территории исследования ($K_{го} < 5 \%$) и приурочена к участкам низкой поймы р. Се-Яха (кусты скважин 6700, 6900) и району III морской террасы. Дебиты газа также невелики и составляют в среднем около 50 м³/сут.

Анализ полученных данных показывает, что территория Бованенковского ГМ отличается повышенной частотой газовых выбросов с различных глубин мерзлой толщи (в среднем зарегистрированы примерно два выброса из разных интервалов на одну мерзлотно-па-

раметрическую скважину). При этом газоопасность многолетнемерзлых отложений территории исследования снижается по направлению от пойм р. Се-Яха и Морды-Яха к III морской террасе, с северо-запада на юго-восток. По-видимому, подобная тенденция является следствием увеличения мощностей ММП на водораздельных участках. Следовательно, районы с повышенной газоопасностью ММП следует ожидать в областях сокращения мощностей многолетнемерзлых толщ (русловые и пойменные участки крупных водотоков, а также районы распространения наиболее крупных озер).

Признаки гидратсодержащих отложений и модель образования газовых и газогидратных коллекторов в мерзлом массиве. Анализируя распределение, а также характер газовыделений из толщи мерзлых пород, можно предположить некоторые закономерности, связывающие газопоявления, их приуроченность, характер и интенсивность с некоторыми особенностями состава, строения и свойств мерзлых пород района исследования [5].

Практически все газовыделения литологически приурочены к маломощным прослоям оторфованных пылеватых песков, встречающимся в разрезе мерзлой толщи до глубин 130 м. При этом в более глинистой толще на глубинах более 130 м газопоявления из многолетнемерзлых интервалов практически не фиксируются.

Распределение общей засоленности отложений по глубине носит достаточно неоднородный характер (рис. 3). При этом для мерзлой толщи прослеживается приуроченность газовых выбросов к грунтовым зонам с пониженным засолением, а также увеличение общей засоленности пород ниже горизонтов зафиксированных газопоявлений. Подобную закономерность можно объяснить криогидратным отжатием солей.

Снижение общего засоления пород в газопоявляющих интервалах в большинстве случаев совпадает с локальными минимумами содержания неразложившихся органических остатков (см. рис. 3), при этом содержание органического материала в этих интервалах падает в 3 раза и более. Более полное разложение органики в подобных гори-

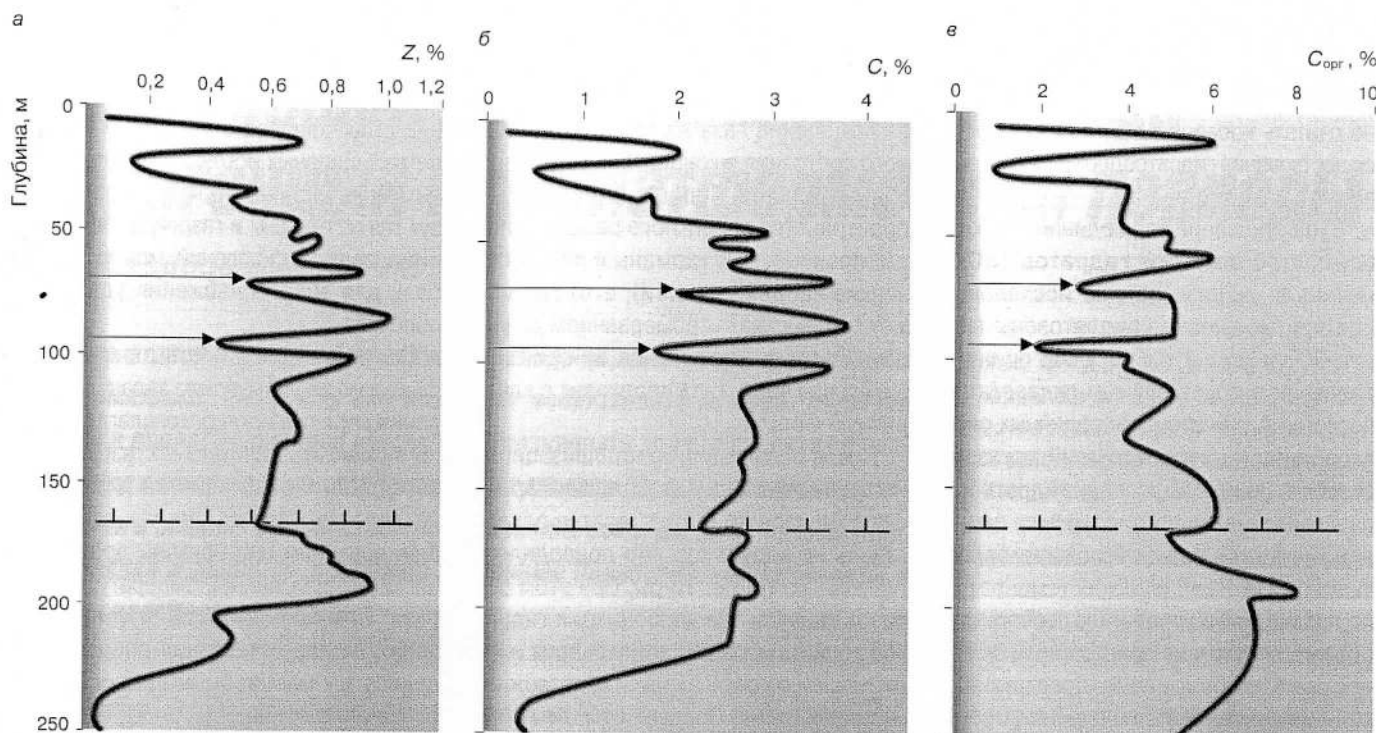


Рис. 3. Распределение по глубине общей засоленности Z , концентрации порового раствора C и содержания органического материала $C_{\text{орг}}$ (граница ММП показана на глубине 160 м)

зонтах, по-видимому, привело к большему количеству образовавшегося *in situ* биогенного газа, который аккумулировался при криогенном концентрировании в песчаных линзах.

Прослеживается определенная связь газосодержания мерзлой толщи района исследования с некоторыми ее свойствами. Так, теплопроводность мерзлых грунтов при закономерной зависимости ее значений от фазового состава влаги уменьшается в газопроявляющих горизонтах по сравнению с негазопроявляющими при прочих равных условиях.

Примером связи структурных особенностей порового пространства мерзлых пород района исследования с их газосодержанием могут служить результаты специальных лабораторных определений га-

зосодержания мерзлых пород при оттаивании керна в газоотборнике (табл. 3). Объем выделившегося газа на 2–3 порядка превосходил то свободное пространство в порах пород, которое мог занять газ в свободной форме. Это явление можно объяснить только гидратной формой нахождения газа, и оно может являться уже прямым признаком наличия реликтовых (метастабильных) гидратных включений в поровом пространстве исследованных пород.

Для изучения принципиальной возможности гидратообразования метана в поровом пространстве засоленных супесчано-суглинистых пород северо-западной части п-ова Ямал была проведена серия экспериментальных исследований искусственного гидратонасы-

щения и p/T -условий существования гидратов метана в образцах керна, представляющих наиболее характерные грунтовые разновидности – супеси, суглинки и глины [6].

Во всех проведенных экспериментах гидратообразование в дисперсных породах зафиксировано визуально при петрографических исследованиях мерзлых гидратонасыщенных образцов, так как в условиях отрицательной температуры гидратонасыщенные образцы вследствие эффекта самоконсервации сохраняли определенную стабильность. При этом гидратообразование в исследованных грунтах песчаного состава сопровождалось образованием схожих с мерзлыми породами типов гидратного цемента и текстур (включений). Экспериментально

Таблица 3

Результаты лабораторного определения физических свойств мерзлого керна из газопроявляющих горизонтов

Скважина	Глубина отбора, м	Порода	Степень заполнения пор	Удельная активная пористость, см ³ /г	Газосодержание, см ³ /г
58-П-2	25	Суглинок	0,99	0,0005	0,50
	26	Песок	0,99	0,0027	0,56
	105	Суглинок	0,99	0,0009	0,36
58-П-1	27	Песок	0,99	0,0015	0,31
	100	Суглинок	0,99	0,0016	0,50

подтвержденную возможность образования гидратов метана в дисперсных породах района исследования также можно считать косвенным доказательством существования гидратсодержащих интервалов в данном районе.

Существование термодинамической **зоны стабильности гидратов (ЗСГ)** метана в разрезе района исследования при мощности криолитозоны менее 300 м сомнительно, если принять давление в порах равным гидростатическому. А с учетом проведенных экспериментальных исследований, показавших смещение p/T -условий гидратообразования метана в дисперсных породах изучаемой толщи в область более высоких давлений и низких температур по сравнению с условиями свободного объема, отсутствие современной ЗСГ в изучаемом разрезе по «гидростатической» модели является очевидным.

Все зафиксированные газовые скопления в многолетнемерзлом разрезе района Бованенковского ГКМ, содержащие по крайней мере часть газа в гидратной форме, на что указывают как косвенные, так и прямые признаки, попадают в **зону метастабильности газовых гидратов (ЗМГ)**, в которой ранее образованные в палео-ЗСГ гидраты существуют при отрицательных температурах благодаря эффекту самоконсервации. Под ЗМГ в исследуемом районе, при отсутствии ЗСГ метана, понимается вся мощность ММП от подошвы сезонно-талого слоя до подошвы ММП, где температура массива не превышает температуру оттаивания грунтов. Соответственно по площади и в разрезе сплошность ЗМГ нарушается таликовыми зонами и криопэгами. В связи с этим возникает вопрос о возможных механизмах и условиях аккумуляции в мерзлых породах газа с переходом по крайней мере его части в гидратную форму на относительно небольших глубинах.

При эпигенетическом промерзании отложений, благодаря понижению тем-

ператур разреза, вниз продвигается фронт фазовых переходов поровой влаги в лед. Промерзание пород вызывает выделение газа из водорастворенного состояния и концентрацию его под этим фронтом. Попадая в замкнутые пространства различного размера (поры, проницаемые карманы и литологические неоднородности), этот газ может быть «дожат» промерзанием до условий гидратообразования, притом значительная часть газа переходит в клатратную форму.

После релаксации кристаллизационного давления воды (прохождения фронта промерзания) часть гидратов разлагалась на воду и газ, что приводило к понижению температуры. При этом образовавшаяся при диссоциации гидратов вода вымерзала, консервируя изолирующей ледяной пленкой неразложившиеся гидраты. Следует отметить, что при гидрато-, как и при льдообразовании, возможно отжатие солей параллельно фронту гидратообразования. Вероятно, этот процесс нашел свое отражение в современном строении изучаемого многолетнемерзлого разреза, когда приуроченность газопроявляющих горизонтов к грунтовым зонам с пониженным засолением сопровождается увеличением минерализации поровых вод в ниже лежащих интервалах.

Таким образом, проведенные исследования показали следующее:

- Многолетнемерзлые толщи на Бованенковском ГКМ являются коллектором значительных газовых и газогидратных скоплений на относительно небольших глубинах (до 100–150 м). В связи с этим проведение дальнейших полевых и экспериментальных исследований, помимо несомненного научного интереса, имеет большое прикладное значение. Выбросы газа из ММП существенно осложняют буровые работы и эксплуатацию газодобывающих скважин на месторождениях, расположенных в области распространения криолитозоны, и приводят к различным аварийным ситуациям, что требует

разработки нового методического подхода к буровым работам.

- Наличие значительных газовых скоплений ставит вопрос о ресурсных оценках нетрадиционных источников газа в криолитозоне. Вполне вероятно, что, используя газ из газовых и газогидратных внутримерзлотных скоплений, можно создать базу для энергоснабжения удаленных поселков.

- Полученные результаты ставят специфическую экологическую задачу определения реакции неглубокозалегающих и, по-видимому, значительных газовых и газогидратных скоплений на глобальное потепление климата, так как своим существованием они обязаны достаточно низким современным температурам разреза. Повышение температуры до значений начала оттаивания пород может привести к масштабным выбросам газа из криолитозоны.

Список литературы

1. Dallimore S.R., Collett T.S. Gas hydrates associated with deep permafrost in the Mackenzie Delta, N.W.T., Canada: regional overview // Proc. 7th Intern. Permafrost Conf., Yellowknife. – Canada, 1998. – P. 201–206.
2. Yakushev V.S., Collett T.S. Gas hydrates in Arctic regions: risk to drilling and production // Proc. 2nd Intern. Offshore and Polar Engineering Conf. – San Francisco, USA, 1992. – Vol.1. – P. 669–673.
3. Skorobogatov V.A., Yakushev V.S., Chuvin E.M. Sources of natural gas within permafrost North-West Siberia // Proc. 7th Intern. Permafrost Conf., Yellowknife. – Canada, 1998. – P. 1001–1007.
4. Баулин В.В., Аксенов В.И., Дубиков Г.И. и др. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. II. Геоэкологические условия освоения Бованенковского месторождения. – Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 1996. – 240 с.
5. Чувилин Е.М., Якушев В.С., Перлова Е.В., Кондаков В.В. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-ов Ямал) // ДАН. – 1999. – Т. 369. – № 4. – С. 522–524.
6. Чувилин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В. Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ова Ямал // Материалы Второй конф. геоэкологов России, т. 1, ч. 4. – М., 2001. – С. 169–173.

Вниманию читателей!

В статье В.С. Якушева, Е.В. Перловой, В.А. Истомина «Перспективы вовлечения в промышленную разработку метана угольных пластов» (2003. – № 1. – С. 44–47) условные обозначения к рис. 2 следует читать: голубой цвет – 2040 г.; черный цвет – 2035 г.; темно-серый цвет – 2030 г.