УДК 551.345;551.435.53

ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ МЕРЗЛЫЕ ПОРОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

© 2021 г. А. Н. Хименков^{1,*}, А. В. Кошурников^{2,**}, Д. О. Сергеев¹, П. А. Соболев²

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия ² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

E-mail: a_khimenkov@mail.ru* *E-mail: msu-geophysics@mail.ru* Поступила в редакцию 19.11.2020 г. После доработки 24.12.2020 г. Принята к публикации 11.01.2021 г.

Рассмотрены процессы формирования и разрушения зон повышенного содержания газа в мерзлых породах. В настоящее время теоретическая база изучения данной темы практически не разработана, хотя ее практическая значимость в последние годы резко возросла. Это связано с выбросами газа при бурении скважин в мерзлых породах, выявлением значительной эмиссии парниковых газов в Арктике, обнаружением ранее неизвестных процессов в криолитозоне, например, образование воронок за счет газового выброса. В работе впервые показано, что газонасыщенные зоны в сезонно- и многолетнемерзлых породах имеют все признаки геосистем: локализацию в пространстве, границы, морфологию, индивидуальное строение и свойства, историю развития, иерархию. Рассмотрены основные структурные элементы геосистем газонасыщенных мерзлых пород. Выделено пять типов данных геосистем: деятельного слоя, генетического типа, приуроченных к геологическим структурам; структурно-геологического типа, вторичных, связанных с разложением газогидратов в естественных условиях; и техногенных (за счет теплового или механического воздействия на гидрато- и газонасыщенные мерзлые породы).

Ключевые слова: мерзлые породы, газовые каналы, фильтрация газа, флюиды, геосистема газонасыщенных пород, диссоциация газогидратов, напорная фильтрация газа, стадии развития DOI: 10.31857/S0869780921020041

ВВЕДЕНИЕ

По классическому определению, данному А.И. Поповым, "Мерзлые породы являются многофазными и многокомпонентными системами. По агрегатному состоянию в мерзлых породах следует выделять твердую, жидкую и газообразную составляющие" [22, с. 11]. Из трех названных основных составляющих мерзлых пород газовая наименее изучена. Наличие газовой компоненты – важная особенность строения мерзлых пород. Газы в порах мерзлых пород могут находиться в адсорбированном и свободном состоянии; они могут присутствовать во льду или воде (при наличии криопэгов или охлажденных пород), заполняющей поры, в виде мелких пузырьков или в растворенном состоянии. Газы оказывают влияние на различные свойства мерзлых пород. Наиболее сушественно от газосодержания зависят их физические характеристики: плотность, теплофизические параметры (теплоемкость, теплопроводность и др.), проницаемость, а также физикомеханические свойства.

Адсорбированный газ образуется на поверхности грунтовых частиц и на поверхности льда под воздействием молекулярных сил притяжения. Благодаря этим силам на поверхности частиц образуются полимолекулярные газовые "пленки", нижние слои которых находятся под давлением в несколько десятков или даже сотен мегапаскалей; верхние слои менее прочно связаны с минеральными частицами (испытываемое ими давление близко к атмосферному). Количество адсорбированного газа мало и может составлять несколько процентов от объема породы. Растворенный газ находится в жидкой составляющей породы (в пленках незамерзшей воды вокруг минеральных частиц или в поровом растворе). Свободный газ заполняет свободное поровое

Свободный газ заполняет свободное поровое пространство в виде отдельных пузырьков или каналов, его количество зависит от объема свободных пор, давления, степени водо- и льдонасыщения. Газовые гидраты (клатратные соединения газа с водой) формируются при достижении определенных соотношений температуры и давления. Считалось, что многолетнемерзлые породы непроницаемы для газа, низкие температуры подавляют активность живого вещества, и поэтому накопление газа в криолитозоне невозможно. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес.

С середины 1950-х годов начинается интенсивное освоение нефтегазовых месторождений на севере Арктики. При бурении скважин в толще мерзлых пород были отмечены многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента и шлама, промывочной жидкости и т.д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [19, 4, 31]. Таким образом, было установлено, что в мерзлых породах могут формироваться локальные газонасыщенные зоны, оказывающие неблагоприятное воздействие на проведение буровых работ.

Исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что территориям, сложенным многолетнемерзлыми породами, отводится особая роль в современном цикле СН₄, здесь сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в толщах мерзлых пород. Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г., по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса (ИФА РАН), приведут к высвобождению из многолетнемерзлых пород 1.3-1.7 млрд м³ СН₄ [14]. Оттаивание криогенных толщ ведет к деградации содержащихся в них газогидратов, что, в свою очередь, приведет к эмиссии метана. Эмиссия метана может приобрести массированный характер и достичь уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [23]. Таким образом, проблема формирования и накопления газа в мерзлых породах чрезвычайно важна и актуальна, как в теоретическом, так и в практическом отношении.

К настоящему времени сформулированы положения о различных генетических типах газа в мерзлых породах. Накоплен определенный объем данных о содержании газа в деятельном слое, в мерзлых породах различного генетического типа и различных тектонических структурах. Конкретизированы критерии выделения фоновых и повышенных значений газосодержания в породах. Разработаны механизмы криогенной концентрации газа и формирования газогидратов при эпигенетическом и сингенетическом промерзании пород. Выявлены условия и механизмы фильтрации газа в мерзлых породах. Проделанная работа позволила лучше понять процессы формирования газонасыщенных мерзлых пород и их поведение при природных изменениях и техногенных воздействиях.

Тем не менее, изученность этих геологических образований, их свойств, закономерностей распространения и истории развития явно недостаточна. Связано это, в первую очередь, с тем, что газонасыщенные мерзлые породы даже не выделены в отдельный тип образований. Они не являются целенаправленным объектом изучения ни одной из наук о Земле, включая геокриологию. При проведении инженерно-геологических изысканий газовая компонента мерзлых пород (за исключением некоторых показателей гидратосодержащих мерзлых пород) в настоящее время практически не изучается. При этом газонасыщенные мерзлые породы широко распространены в криолитозоне, они прослежены во всех генетических типах отложений и имеют различные размеры и морфологию. Развитие данных образований связано с определенной, общей для них последовательностью событий.

Цель настоящей статьи — выявление общих закономерностей формирования таких криогенных структур, как геосистемы газонасыщенных мерзлых пород, выделяемых авторами и не рассматриваемых ранее в геокриологии.

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования повышенного содержания газа в многолетнемерзлых породах. Исследованиями различных авторов установлено широкое распространение бактериального углекислого газа и метана в мерзлых отложениях и подземных льдах северных территорий и Арктического шельфа [33, 10, 24]. Г.Н. Краевым и Е.М. Ривкиной выявлена динамика криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя и эпигенетического промерзания озерных отложений [16]. В.С. Якушевым показано, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов в многолетнемерзлых породах оказало неравномерное эпигенетическое промерзание выходящих из субаквального положения морских осадков [31]. В работах С.Е. Агалакова [1], А.Р. Курчикова [18] показано, что мерзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах глубинного газа, поступающего по разломам. По мнению Б.М. Валяева [9], Р.М. Бембеля и др. [6], понижение температуры и формирование мерзлых пород над газовыми месторождениями севера Западной Сибири могут происходить за счет адиабатического расширения поднимающегося из глубин газа.

В последние годы вышел ряд статей, посвященных рассмотрению особенностей процессов, связанных с миграцией газа в мерзлых породах и льдах, в которых газонасыщенные зоны рассмот-

5

рены как газодинамические геосистемы [27, 26], на основании лабораторного моделирования изучены процессы фильтрации газа в многолетнемерзлых породах [28]. А.И. Обжиров, изучая распределение природных газов в осадках дальневосточных морей, пришел к выводу, что биогенный метан, образующийся in situ в донных отложениях, формирует только региональный фон углеводородных газов, имеющий положительную корреляционную связь с количеством органического вещества в осадках. При этом аномальные концентрации углеводородных газов связаны или с их концентрацией в ходе эпигенетического промерзания осадков, или с поступлением из внешних источников за счет миграции глубинного газа [21].

ПЕРВИЧНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

В естественных условиях содержание газа в отложениях соответствует количеству органики, присутствующей в них. По этому показателю следует выделить озерные, старичные, лагунные, дельтовые, болотные осадки, слой сезонного оттаивания. Под воздействием анаэробных бактерий происходит процесс биологического разложения органики и выделение биогаза, со средним содержанием метана 90%. При этом формируются фоновые для данного генетического типа осадков значения содержания газа (излишки газа выносятся фильтрацией в водную среду или атмосферу). Аномалии содержания газа формируются в тех случаях, когда существуют газонепроницаемый экран или приток газа извне. Для мерзлых пород такие условия создаются при эпигенетическом промерзании осадков. Промерзание и создает непреодолимый барьер для газа, и концентрирует его.

Нижняя граница фронта промерзания всегда неоднородна из-за различий в поверхностных условиях, составе и влажности отложений. Газ от выступающих частей фронта промерзания начинает отжиматься в сторону вогнутых, и там образуется очаг концентрации газа, т.е. формируется своеобразная ловушка, обусловленная не литологией, а сугубо криогенными причинами. Такому же процессу подвергаются и грунтовые воды вместе с растворенными газами. При льдообразовании происходит дополнительное выделение газа. Таким образом, формируются геосистемы газонасыщенных зон в многолетнемерзлых породах.

В организации криогенных газонасыщенных геосистем можно выделить три уровня:

- сезонномерзлые породы;

 – генетический, включающий совокупность фаций одного генетического типа; структурно-геологический, включающий парагенетические комплексы пород в пределах геоструктур.

Геосистемы газонасыщенных пород деятельного слоя распространены в тонком верхнем слое литосферы (десятки сантиметров), ежегодно промерзающем и оттаивающем. Отличительными особенностями деятельного слоя в пределах распространения многолетнемерзлых пород являются повышенная увлажненность, большие градиенты температур при промерзании, значительная неоднородность температурного поля, обусловливающая неравномерность промерзания. Подстилается он газо- и водонепроницаемым слоем многолетнемерзлых пород. Все это приводит к тому, что во время сезонного промерзания в незначительном слое породы создаются условия для существенного перераспределения воды и газа. Процессы, происходящие при формировании сезонномерзлого слоя, являются моделью процессов, реализующихся при эпигенетическом промерзании пород в больших объемах и на больших площадях.

Г.Н. Краевым [15] был поставлен лабораторный эксперимент по изучению миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном пород (рис. 1). В промерзшем песке аллаиховской свиты в верхних трех срезах метан содержался в концентрации 0-0.5 мл/кг, а в нижнем заметно больше – 2.3 мл/кг. Концентрация СН₄ в суглинках в верхних 10 см составляла 3.8 ± 0.2 мл/кг. Ниже, у основания контейнера концентрация была заметно меньше -2.5 ± 0.1 мл/кг. Результаты эксперимента показали, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части разреза, в нижней части за счет миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания содержание газа даже уменьшилось. В песках наблюдалось его отжатие к газонепроницаемой подошве. Полученные данные позволили автору сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте близкое к наблюдаемому в природе – результат миграции метана вместе с поровым раствором при промерзании сверху и отжима при промерзании снизу, со стороны мерзлых синкриогенных отложений [15].

В сезонномерзлом слое, несмотря на его незначительные вертикальные размеры и кратковременность существования, формируются локальные зоны повышенного содержания газа [16]. Метан с первого дня промерзания равномерно накапливался в талых горизонтах почвы, перекрытых промерзшим слоем, со скоростью порядка 0.015 см³/(кг сут). В течение зимы в почвах Северо-Востока Сибири формируется 2–3 г/м² метана при мощности сезонноталого слоя (СТС) 50–60 см и около 1 г/м² в слое мощностью 30 см. Авторы приходят к выводу, что средние значения



Рис. 1. Распределение метана в песках (*1*) и суглинках (*2*) в результате промораживания одинаково и однородно насыщенных талых грунтов [15].

концентрации метана у подошвы СТС – около 2 см³/кг могут формироваться лишь за счет локального продуцирования. Но наблюдаемые местами локальные максимумы, многократно превышающие эти значения, могут быть объяснены только при допущении возможности перераспределения газа по латерали. Это происходит из-за неровностей фронта промерзания. В вогнутых частях подошвы слоя сезонного промерзания формируются своеобразные газовые микроловушки. Например, для формирования концентрации $15 \text{ см}^3/\text{кг}$ (24 см $^3/\text{дм}^3$ в пределах 1 дм 2) на одном из изученных участков потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм³, но еще из 11-12 соседних. Данные закономерности перераспределения газа при промерзании СТС не зависят от генезиса отложений. В естественных условиях содержание метана в нижней части СТС составляло в среднем 1.4 см³/кг.

Криогенные газонасыщенные геосистемы генетического типа формируются при эпигенетическом промерзании пород определенного генетического типа. Количество органики и, соответственно, содержание газа определяются фациальными условиями, что позволяет оценить вероятность распределения газонасыщенных зон в пределах генетического типа. Для примера рассмотрим формирование газонасыщенной зоны в осадках старичного озера [16] (рис. 2). Разложение органики при недостатке кислорода приводит к образованию и накоплению метана в молодых озерных отложениях. Эпигенетическое промерзание озера начинается после заполнения его осадками или осушения при дренировании. Промерзание верхнего слоя осадков приводит к формированию газонепроницаемого слоя и повышению давления в талой зоне. Под слоем мерзлого грунта, в более глубоких слоях талых осадков метаногенез продолжает развиваться. Продолжающееся промерзание вытесняет большую часть метана вниз в грубозернистые слои с значительным объемом свободных пор, где он накапливается в свободном виде. Исходя из полевых наблюдений, данных радиоуглеродного датирования и лабораторных исследований, авторы предполагают, что в зависимости от природных условий и динамики замерзания метан, содержащийся в талых осадках, может при их эпигенетическом промерзании сместиться вниз на десятки метров и накапливаться в литологических карманах [32].

Следует добавить, что существование карманов, в которых при промерзании талых осадков могут накапливаться отжимающиеся газы, может быть обусловлено не только литологией, но и морфологией фронта промерзания. Кроме того, газ может накапливаться не только в свободной форме, но и в виде газогидратов, поскольку возникающие давления до 30 кг/см², большое количество воды и газа при отрицательных температурах создают для этого условия.

Важнейшей геологической особенностью верхних горизонтов субмаринной части литосферы является широкое распространение газосодержащих грунтов. Выделяются следующие элементы геосистемы системы — газонасыщенные морские осадки [2, 29, 20]:

– газ (биогенный, термогенный и биогеннотермогенный); в осадках (породах) он находится в виде пузырьков, окруженных водой (кристаллами льда, соли), в растворенном (в поровом пространстве) или в свободном виде, а также в твердом состоянии (газогидраты);

 осадки, включающие минеральные и органические компоненты, а также соли и воду;

газовыделяющие структуры (зоны генерации): поверхностные газогенерирующие осадки (биогенный газ), глубинные газогенерирующие породы (катагенный газ), гидратосодержащие породы;

 – газовые потоки в осадочной толще (зоны транзита): газовые "трубы" ("столбы", "колонны");

 – газовые ловушки (зоны накопления газа), газогидратные толщи, газовые карманы, обшир-



Рис. 2. Палеоэкологическая реконструкция участка на Колымской пойме: а – талые осадки под пойменным озером с потенциальным образованием метана; б – промерзание обогащенных метаном осадков после осушения озера; в – метан, захваченный в порах и полостях мерзлой породы после полного замерзания талика. *1* – пойма; *2* – речные и озерные воды; *3* – русловой гравийный слой; *4* – речной аллювий, слой песка; *5* – пойменный аллювий, иловый слой; *6* – озерные отложения, торфяные илы; *7* – граница вечной мерзлоты; *8* – свободный метан; *9* – захваченный метан; *10* – скважина 3.4-07 глубиной 25 м [32].

ные скопления свободного газа в приповерхностных осадках под региональными флюидоупорами, в том числе под подводными реликтовыми многолетнемерзлыми породами ("газовые фронты"), домы (невысокие придонные купольные структуры), купола газового вспучивания, трещины растяжения;

 флюидопроводящие структуры (на донной поверхности): линейные (зоны тектонических разломов, трещины), борозды выпахивания айсбергов (плугмарки).

Фоновые значения концентрации метана в эпигенетических мерзлых породах различного генезиса приведены в табл. 1. Даже в одном генетическом типе наблюдается значительный разброс значений содержания газа. Минимальные и максимальные значения могут отличаться на порядок (для прибрежно-морских глин). При этом, основную роль играет криогенная концентрация газов в ходе эпигенетического промерзания.

Криогенные газонасыщенные геосистемы структурно-геологического типа формируются при совместном взаимодействии нескольких факторов:

- тектонического, связанного с образованием локальных тектонических структур, обусловлива-

ющих движение газа к поверхности и накопление их в куполах;

 – гидрологического, связанного с движением мощных потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности;

 – геологического, связанного с формированием мощной водонасыщенной, слоистой разновозрастной, полигенетической толщи;

– криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной, водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез криогенных образований, включающий пластовые льды, льдистые мерзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и "карманы" напорных свободных газов.

В результате взаимодействия перечисленных и иных факторов формируются наиболее мощные криогенные газонасыщенные геосистемы. Основа их развития уже не промерзание отдельных генетических типов отложений. Общая геологическая история, связанная с локальными тектоническими структурами, и общая направленность криогенного воздействия обусловливают развитие комплекса парагенетически связанных друг с другом мерзлотно-геологических формаций.

Возраст	МИС 1		МИС 2		МИС 2-3		МИС 5					
			Генезис			Болотный, озерно- аллювиальный, эоловый		Морской, при- брежно-морской				
Состав	Пески (6)*		Пески, супеси (7)			Пески, супеси, суглинки (10)		Глины, суглинки (8)				
CH ₄	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.
Динамический метод		_	_	115	217	14	3329	5248	104	1682	2215	1148
Метод "head space"	68	212	18	186	460	15	1009	1969	97	2884	5515	585

Таблица 1. Концентрация метана (ppmV) в мерзлых породах [10]

* В скобках количество образцов



Рис. 3. Распределение повышенных поровых давлений в ореоле вторжения над углеводородной залежью [3].

Скопления газа в виде свободного газа и газогидратов, являются элементами (подсистемой) этой закономерно построенной геосистемы. При изучении зон повышенной газонасыщенности в мерзлых породах их можно рассматривать как самостоятельные криогенные геосистемы [25]. Они имеют все признаки, позволяющие это делать, а именно наличие естественных границ, морфологию, определенное положение в пространстве, пространственно-временную упорядоченность структуры, внутренние связи, свойства.

Для понимания особенностей распределения газа в мерзлых породах следует рассмотреть модель изменения по вертикали пластового давления внутри залежей газовых месторождений, предложенную К.А. Аникеевым [3]. Важнейший элемент этой модели - ореол вторжения, который возникает в результате интенсивного проникновения в глинистую покрышку высоконапорных флюидов из залежи. Вторгающиеся флюиды порождают аномально высокие давления как в порах глинистых пород, так и в песчаных линзах, секущих трещинах и "карманах", особенно мобильных в зонах проводящих разломов. Изобары сверхвысоких давлений в ореолах вторжения зависят от высоты залежи. В своде залежи избыточное давление максимально, а к периферии ослабевает (рис. 3).

Существует пространственная связь местоположения зоны газонасыщенных мерзлых пород с антиклинальными поднятиями. Наибольшее содержание газа в многолетнемерзлых породах севера Западной Сибири приурочено к приподнятым блокам в виде тектонических валов и сводов. В осадочном чехле севера Западной Сибири эти своды и мегавалы образуют структуры размерами в десятки и сотни километров и амплитудой в сотни метров (рис. 4) [17].

Приуроченные к газоносным структурам пластовые воды имеют повышенную газонасыщенность. По данным изучения разреза неокомских отложений на 39 площадях в северных районах Западно-Сибирского мегабассейна, концентрация метана в них колеблется от 78% до 98%. В большинстве случаев газонасышенность более 3 см³/см³ указывает на наличие в пластовых условиях свободной газовой фазы, что подтверждается получением фонтанов газа с водой [7]. Геофизические исслелования арктического шельфа показали прямую пространственную связь местоположения газонасыщенных зон, в том числе и в виде газогидратов, с антиклинальными поднятиями в осадочном чехле. Таким образом, еще до промерзания над тектоническими структурами, в которых формируются залежи углеводородов, наблюдается закономерное распределение газов. Высоконапорные мелкие скопления углеводородов распространены в глинистой покрышке лишь в пределах контура залежи. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрышке [12]. При промерзании, вследствие криогенной концентрации газов и формировании мерзлотного экрана, эта зависимость вероятно будет выражена еще сильнее.

Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведенные на территории Бованенковского и Харасавейского ГКМ, показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов значительно выше, чем за пределами контуров (табл. 2). При близких процентных содержаниях метана в контурах газоносных структур и за их пределами непосредственно над месторождениями содержание данного газа более чем в 2 раза превышает значения законтурной части. Данное распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мерзлых пород в районах газовых месторождений.

Бугры пучения. К газонасыщенным криогенным геосистемам следует отнести и многолетние бугры пучения (гидролакколиты). Размеры их изменяются в больших пределах: диаметр основания от 20 до 250 м, а высота – от 2 до 70 м. Кровля бугров обычно состоит из переслаивающихся льдистых суглинков и супесей мощностью 2–10 м, под которыми залегает ледяное ядро мощностью до десятков метров. Данные образования формируются при эпигенетическом промерзании озерных отложений (чаще всего термокарстовых).



Рис. 4. Фрагмент карты "Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция" [11].

В этих условиях промерзание происходит по типу "закрытых систем", характерной особенностью которых является возникновение криогенного напора, приводящего к концентрации воды и

Таблица 2. Средние значения газохимических показа	a-
телей поверхностных отложений Бованенковского	И
Харасавейского ГКМ [8]	

Углеволоролный	Содержание УВГ, см ³ /кг					
газ (УВГ)	в контуре	за контуром				
	газоносности	газоносности				
CH_4	338.18	141.84				
C_2H_6	0.4225	0.2703				
C_3H_8	0.23148	0.2471				
$C_{4}H_{10}$	0.0671	0.0398				
C ₅ H ₁₂	0.0782	0.0719				
$C_{6}H_{14}$	0.005	0.0003				
$\rm CH_4$ (в % от суммы УВГ)	98.72	98.63				

растворенного газа в локальной зоне под растущим бугром. Бугры вырастают в промерзающих озерных котловинах постепенно в течение длительного времени, поднимаясь со скоростью от едва заметной до превышающей 0.5 м/год. Апикальные части ядра ледяных бугров бывают обогащены крупными воздушными включениями за счет выделения воздуха при льдообразовании, в результате чего здесь образуются обширные воздушные полости [30]. Перекрывающие газонасыщенные зоны низкотемпературные льдистые мерзлые породы не позволяют газам, находящимся под давлением, поступать в атмосферу. Растущие бугры подстилаются талыми водоносными горизонтами или водяными линзами мощностью до 2 м, обладающими гидравлическим напором.

ВТОРИЧНЫЕ ГЕОСИСТЕМЫ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Вторичные газонасыщенные геосистемы формируются при разрушении первичных систем,

которое, в первую очередь, связано с растеплением мерзлых пород и диссоциацией газогидратов в естественных условиях или в результате техногенных воздействий. В стабильных геокриологических условиях газовая составляющая находится в равновесном "законсервированном" состоянии. Газовые карманы в многолетнемерзлых породах, в которых газ находится в свободном состоянии, гидратосодержащие мерзлые породы, газонасыщенные субаквальные осадки – все эти геосистемы существуют столетия и тысячилетия. Выход геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород или хотя бы части ее из устойчивого термодинамического состояния запускает процессы ее адаптации к новым условиям, выражающиеся в повышении давления в газовой составляющей. Увеличение давление газа в мерзлых породах возникает при повышении их температуры, за счет чего начинается разложение газогидратов, или при расширении свободного газа, а также при снятии внешней нагрузки (например, при таянии ледника или уменьшения глубины моря). В свою очередь, увеличение давления газа приводит к деформациям мерзлого массива, газ начинает фильтроваться в сторону меньших давлений, в большинстве случаев к поверхности.

В результате фильтрационно-деформационного механизма [26] формируется локальная газонасыщенная зона, пронизывающая мерзлый массив, в которой газ находится при повышенном давлении. Низкотемпературные мерзлые породы, слагающие верхнюю часть разреза, до определенного момента сдерживают рвущийся вверх поток газа, но по достижению определенного предела прочности, происходят разрыв кровли и взрыв, формирующий воронку газового выброса. При диссоциации газогидратов выделяется свободный газ, находящийся под давлением, который начинает фильтроваться сквозь высокотемпературные мерзлые породы в область меньших гидростатических и литостатических давлений.

При разработке математических или феноменологических моделей вторичных геосистем газонасыщенных мерзлых пород, следует учитывать, что с начала своего зарождения и на протяжении всего жизненного цикла они представляют из себя локальные саморазвивающееся геодинамические геосистемы, развитие которых имеет вероятностный характер.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Следует отметить, что имеются лишь единичные данные о связи прочностных характеристик мерзлых грунтов с их газонасыщенностью. Публикации по данной теме только начинают появляться в последнее время. В результате исследований, проведенных специалистами ИГЭ РАН [13], выявлено, что уже при незначительных повышениях температуры в мерзлых грунтах начинается выделение газов. При внешнем давлении 0.001 МПа (минимально возможное для установки трехосного сжатия) газовыделение начинается при отрицательной температуре -5°C, достигает своего максимума при +1°С для песчаных грунтов и -2°C для суглинка, затем интенсивность выделения газовой составляющей снижается. Выявлено, что температура начала выделения газа с ростом объемного сжимающего давления постепенно снижается до -8°С (при давлении 0.2 МПа). Исследования прочностных характеристик мерзлых грунтов после газовыделения при различных отрицательных температурах показали, что величина объемного сжимаюшего давления оказывает значительное влияние на сцепление и угол внутреннего трения, особенно при температурах от -5° C до -7° C. Причем это влияние выражено по-разному для песка и суглинка, что связано с особенностями фазового состава влаги в этих грунтах [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время газовая составляющая многолетнемерзлых пород, как структурный элемент мерзлых пород практически не изучена. Есть лишь единичные работы, посвященные данной теме. Прежде следует выделить публикации Ю.Б. Баду [5], в которых рассматриваются мерзлые породы газоносных структур севера Западной Сибири. Он выделяет криогенную толщу в газоносной структуре, как многокомпонентную и многофазную криолитологическую систему в виде составной части газоносной структуры (ГС) (рис. 5).

Она состоит из яруса мерзлых пород и яруса охлажденных пород. Подошва криогенной толщи отбивается по положению нулевой изотермы, а подошва мерзлой — по изотерме температуры начала замерзания. При выделении ГС предлагается учитывать: ее геотектоническое положение, возраст и генезис отложений, геоморфологическое устройство поверхности, фациальную обстановку осадконакопления, вещественный состав мерзлых пород, а также распределение по разрезу их температуры, мощности, льдистости и газонасыщенности.

В данной редакции формулировка "газоносной структуры" полность поглощает понятие "криогенная толща". При этом в определении ГС основное внимание уделено литогенной основе. Ни в геосистеме ГС, ни в ее подсистеме – "криогенной толще", газовая составляющая в виде структурного элемента не рассматривается. Тем не менее, формирование газонасыщенных зон мерзлых пород, даже совпадающих со структурами газовых месторождений, осуществляется в



Рис. 5. Элементы газоносной структуры и криогенной толщи [5].

особом режиме. Этот режим только частично связан с общими закономерностями формирования ГС, и во многом определяется спецификой криогенной истории, включая криогенную концентрацию газа.

По нашим представлениям, геосистемы газонасыщенных мерзлых пород являются структурным элементом криогенных геосистем [25] и представляют из себя локальные зоны повышенного, относительно фоновых значений, содержания газа (в свободном виде или в виде газогидрата). Они имеют особую историю развития, определенное положение в пространстве, естественные границы, морфологию, структуру, внутренние связи, свойства, Структура газовой составляющей геосистем газонасыщенных мерзлых пород отражает историю накопления и преобразования газа при переходе геологического объекта из талого состояния в мерзлое.

Критериев выделения газонасыщенных мерзлых пород пока не разработано. В качестве предварительного обсуждения можно предложить следующие: содержание газа в породах, превышающее фоновое;

 содержание газа в мерзлых породах, которое существенным образом изменяет их физико-механические свойства.

Геосистемы газонасыщенных мерзлых пород отличаются большим разнообразием сценариев развития и комплексов процессов, обусловливающих их формирование, структуру и морфологию. Тем не менее, можно выделить некоторую общую последовательность стадий их развития. Каждая газонасыщенная геосистема в многолетнемерзлых породах проходит 4 основных стадии развития: 1 - генерация газа; 2 - перераспределение или транзит газа; 3 – накопление газа. Локальная зона содержащая газ под давлением крайне неустойчива и со временем начинает разрушаться, это обусловливает необходимость выделения 4 этапа – ее разрушение. Выделенные стадии отражают направленность и стадийность развития геосистем газонасыщенных мерзлых пород.

На первой стадии происходит генерация и первичное накопление в тех или иных геологических условиях (сезонноталый слой, талики, область повышения температуры или снижения внешнего давления в гидратосодержащих породах, зоны разломов, связанные с газовыми флюидами из нижележащих горизонтов и др.).

Вторая стадия соответствует перераспределению газа из областей первичного накопления в смежные области, которое происходит под воздействием возникающего давления, обусловленного различными причинами (криогенная концентрация, перепад давлений в различных частях порового пространства). Движение газа может происходить по пористым, трещиноватым, водонасыщенным горизонтам и зонам таликов, повышенных тепловых потоков, аномально высоких давлений и высокотемпературных мерзлых пород. Для таликов в многолетнемерзлых породах при промерзании и возникновения криогенного напора зона транзита совпадает с областью первичного накопления газа.

На третьей стадии формируются зоны накопления газовых флюидов (газовые ловушки, газовые карманы, горизонты газогидратов). Эти зоны могут развиваться на небольшой глубине, под кровлей низкотемпературных или льдонасыщенных многолетнемерзлых пород, являющихся экраном, препятствующим движению газовых флюидов. Кроме того, формирование газовых ловушек обусловлено литологическим фактором, наличием газонепроницаемых глинистых горизонтов. В зонах накопления газы находятся под повышенным давлением.

На четвертой стадии на контакте области накопления газовых флюидов и перекрывающих мерзлых пород формируются пластические и разрывные деформации. В некоторых случаях они проявляются в виде бугров пучения. После того как давление преодолеет прочность кровли могут наблюдаться взрывные процессы с выбросами мерзлой породы и формированием воронок газового выброса. В других случаях газ может фильтроваться по образовавшимся трещинам и просачиваться на поверхность, что наблюдается в осадках и водах некоторых озер на севере Западной Сибири.

Выделенные стадии соответствуют жизненному циклу геосистем газонасыщенных мерзлых пород и отражают общую последовательность смены формирующих их процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По содержанию газа выделяются две группы мерзлых пород. В одной содержание газа близко к средним значениям в талых породах (фоновое значение); во второй – содержание газа достигает аномальных значений, значительно превышающих фоновые. Повышенное содержание газа формируется в результате различных процессов (криогенная концентрация, поступление глубинного газа по трещинам и различным зонам тектонических деформаций, выделение газа при разложении газогидратов).

Газонасыщенные мерзлые породы представляют из себя геосистемы, имеющие историю развития, определенное положение в пространстве, естественные границы, морфологию, структуру, внутренние связи, свойства. Структура геосистемы газонасыщенной мерзлой породы отражает историю накопления и преобразования газа при переходе геологического объекта из немерзлого состояния в мерзлое.

Полный цикл развития газонасыщенная геосистема в многолетнемерзлых породах включает 4 основных стадии: 1 — генерации газа; 2 — транзита газа; 3 — накопления газа; 4 — разрушения. В зависимости от природных условий сценарии развития отдельных геосистем могут отличаться, что отражается в их морфологии, строении, условиях залегания.

Выделяются 5 типов криогенных газонасыщенных геосистем:

1) деятельного слоя, в которых газ концентрируется за счет криогенного напора при неравномерном промерзании;

2) генетического типа (озерные, лагунные, морские); в них газ концентрируется за счет криогенного напора при эпигенетическом промерзании или за счет поступления с глубины;

3) структурно-геологического типа, которые приурочены к месторождениям углеводородов и связаны тектоническими структурами (купола, валы, разломы); газ поступает с более глубоких горизонтов по системе трещин и может смешиваться с газом, присущим генетическому типу, вследствие чего формируются смешанные криогенные газонасыщенные геосистемы;

4) вторичного типа, формирование которых связано с разложением газогидратов в естественных условиях из-за растепления многолетнемерзлых пород и последующей миграции выделившегося газа из области диссоциации по зоне транзита в область накопления; причиной растепления может быть, как изменение поверхностных условий (поверхностные водоемы, смена растительности, увеличение толщины снежного покрова), так и потепление климата;

5) техногенного типа, формирование которых обусловлено тепловым или механическим воздействием инженерных сооружений на газонасыщенные мерзлые породы.

Геосистемы газонасыщенных мерзлых пород встречаются на всей территории криолитозоны, отличаясь между собой масштабами проявлений, которые зависят от геолого-тектонических и мерзлотных условий накопления газа.

Недостаточная изученность не позволяет в настоящее время создать общую теорию их образования, это дело будущего. Для этого потребуются нетривиальные и инновационные подходы, не укладывающиеся в русло традиционных представлений, существующих в геокриологии.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1997. № 3. С. 16–21.
- 2. Андреев В.М., Туголесов Д.Д., Хренов С.Н. Грязевые вулканы и нефтегазопроявления российского сектора Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 2. С. 50–59.
- 3. *Аникеев К.А.* Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствование глубокого бурения на нефть и газ. М.: Недра, 1971. 168 с.
- Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 42–50.
- Баду Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М.: Научный мир, 2018. 232 с.
- Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б. Связь очагов активного нефтегазонакопления и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 193–199.
- 7. Беспалова С.Н. Оценка перспектив нефтегазоносности неокомских отложений севера Западной Сибири по геохимическим показателям // Геология нефти и газа. 1984. № 12. С. 22–26.
- Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Облеков Г.И. и др. Геохимические методы при обнаружении и локализации залежей углеводородных газов (УВГ) в надпродукгивных отложениях газоконденсатных месторождений полуострова Ямал // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 11. С. 17–22.
- Валяев Б.М. Приповерхностный интервал нефтегазонакопления: специфика и масштабы утилизации углеводородных флюидов // Геология морей и океанов: матер. XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 92–95.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // ДАН. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607.
- 11. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.

- Дурмишьян А.Г. Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // Газовая промышленность. 1961. № 7. С. 1–3.
- Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Собин Р.В. Динамика выделения газа из мерзлых грунтов при изменении температуры и давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020. № 4. С. 15–20.
- 14. *Краев Г.Н.* Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: ЦЭПЛ РАН, 2010. 20 с.
- 15. *Краев Г.Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е.М.* Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // ДАН. 2013. Т. 451. № 6. С. 684–687.
- 16. *Краев Г.Н., Ривкина Е.М.* Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 3. С. 173–184.
- 17. *Курасов И.А., Ступакова А.В.* Тектоническое строение северной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 56–64.
- Курчиков А.Р. Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 11–12. С. 1846– 1853.
- Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В. и др. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1989. № 2. С. 118–128.
- 20. *Миронюк С.Г., Отто В.П.* Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск. 2014. № 2. С. 8–18.
- Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Окулов А.К. Газогеохимические поля и распределение природных газов в дальневосточных морях // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1 (25). С. 66–74.
- 22. Попов А.И. Криолитология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 239 с.
- 23. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей восточной Арктики как возможная причина "метановой катастрофы": некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
- 24. Стрелецкая И.Д., Ванштейн Б.Г., Васильев А.А., Облогов Г.Е. Содержание и генезис метана в мерзлых отложениях и подземных льдах на побережье и шельфе Карского моря // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 4 (23). С. 67–72. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art67
- 25. Хименков А.Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 2. С. 74–82.
- 26. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового

выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 1–25. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524

- Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Ч. 2. Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 48–70. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.2.26377
- Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемерзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019. № 4. С. 52–73. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2019.4.30997
- 29. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИО РАН, 2010. 44 с.

- Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
- 31. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
- Kraev G., Schulze E-D., Yurova A., Kholodov A., Chuvilin E., Rivkina E. Cryogenic Displacement and Accumulation of Biogenic Methane in Frozen Soils // Atmosphere. 2017. 8 (6). https://doi.org/10.3390/atmos8060105
- Leibman M.O., Hubberten H.-W., Lein A.Yu., Streletskaya I.D., Vanshtein B.G. Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotopegeochemical reconstruction of conditions for its formation // Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2003. V. 1. P. 645–650.

GAS-SATURATED FROZEN SOILS IN THE PERMAFROST ZONE

A. N. Khimenkov^{*a*,#}, A. V. Koshurnikov^{*b*,##}, D. O. Sergeev^{*a*}, and P. A. Sobolev^{*b*}

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia ^b Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

[#]E-mail: a khimenkov@mail.ru

##E-mail: msu-geophysics@mail.ru

The article focuses on the processes of formation and destruction of zones with increased gas content in frozen soils. Currently, the theoretical basis for this topic has not been developed enough, although its theoretical and practical importance has sharply increased during the last decade. Significantly grown importance is explained by gas emission during drilling of many wells in frozen soils, a huge volume of greenhouse gases emitted in the Arctic region and the discoveries of previously unknown processes in permafrost zone, such as the formation of gas-blow-out craters. This article is the first to show that gas-saturated zones in seasonally frozen or permafrost formations have all signs of geosystems: they have localization space, boundaries, morphology, individual structure and properties, formation history, and hierarchy. The main structural elements of geosystems in gas-saturated frozen soils are also considered in this article. Five types of such geosystems were identified: the first type for seasonally thawed or frozen layer, the second one is structural, the third is related to geological structures, the fourth type is related to decomposition of gas hydrates in natural conditions, and the fifth is the technogenic type (due to thermal or mechanical impact on hydrate-saturated and gas-saturated permafrost).

Keywords: frozen soil, gas funnels, gas filtration, fluids, geosystems of gas-saturated soils, gas hydrates dissociation, pressured gas filtration, stages of development

REFERENCES

- 1. Agalakov, S.E. *Gazovye gidraty v turonskikh otlozheniyakh na severe Zapadnoi Sibiri* [Gas hydrates in the Turonian sediments in the north of Western Siberia]. *Geologiya nefti i gaza*, 1997, no. 3, pp. 16–21. (in Russian)
- Andreev, V.M., Tugolesov, D.D., Khrenov, S.N. Gryazevye vulkany i neftegazoproyavleniya rossiiskogo sektora Chernogo morya [Mud volcanoes and oil and gas manifestations in the Russian sector of the Black Sea]. Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana, 2006, no. 2, pp. 50–59. (in Russian)
- Anikeev, K.A. Prognoz sverkhvysokikh plastovykh davlenii i sovershenstvovanie glubokogo bureniya na neft'i gaz [Prediction of super-high reservoir pressures and im-

provement of deep drilling for oil and gas]. Moscow, Nedra, 1971, 168 p. (in Russian)

- 4. Are, F.E. *Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu* [The problem of deep gas emission to the atmosphere]. *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50. (in Russian)
- 5. Badu, Yu.B. *Kriogennaya tolshcha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyanii gazovykh zalezhei na formirovanie i razvitie kriogennoi tolshchi* [Cryogenic strata of gasbearing structures in Yamal. The influence of gas deposits on the formation and development of cryogenic strata]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2018, 232 p. (in Russian)
- 6. Bembel, R.M., Bembel, S.R., Kashin, A.E., Laskovets, E.B. *Svyaz' ochagov aktivnogo neftegazonakopleniya i glubinnykh kriogennykh istochnikov* [Relationship of active oil and gas accumulation foci and deep

cryogenic sources]. *Itogi fundamental'nykh issledovanii kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1997, pp. 193–199. (in Russian)

- Bespalova, S.N. Otsenka perspektiv neftegazonosnosti neokomskikh otlozhenii severa Zapadnoi Sibiri po geokhimicheskim pokazatelyam [Assessment of the prospects for the oil and gas potential of the Neocomian deposits in the north of Western Siberia by geochemical indicators]. Geologiya nefti i gaza, 1984, no. 12, pp. 22–26. (in Russian)
- Bondarev, V.L., Mirotvorskii, M.Yu., Oblekov, G.I. et al. *Geokhimicheskie metody pri obnaruzhenii i lokalizatsii* zalezhei uglevodorodnykh gazov (UVG) v nadproduktivnykh otlozheniyakh gazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal [Geochemical methods for the detection and localization of hydrocarbon gas (HCG) deposits in the overproductive deposits of gas condensate fields in the Yamal Peninsula]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2005, no. 11, pp. 17–22. (in Russian)
- Valyaev, B.M. Pripoverkhnostnyi interval neftegazonakopleniya: spetsifika i masshtaby utilizatsii uglevodorodnykh flyuidov [Near-surface interval of oil and gas accumulation: specificity and scale of utilization of hydrocarbon fluids]. Geologiya morei i okeanov: Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoi geologii [Geology of seas and oceans. Proc. XVII Internat. Sci. Conference (School) on marine geology]. Moscow, GEOS, 2007, vol. 1, pp. 92–95. (in Russian)
- Vasil'ev, A.A., Streletskaya, I.D., Mel'nikov, V.P., Oblogov, G.E. *Metan v podzemnykh l'dakh i merzlykh chet-vertichnykh otlozheniyakh Zapadnogo Yamala* [Methane in underground ice and frozen Quaternary sediments of Western Yamal]. DAN, 2015, vol. 465, no. 5, pp. 604–607. (in Russian)
- Gornaya entsiklopediya [Encyclopedia of mining]. Moscow, Sovetskaya entsklopediya Publ., vol. 2, 1986, 575 p. (in Russian)
- 12. Durmish'yan, A.G. Znachenie anomal'no vysokikh plastovykh davlenii pri poiske gazovykh i gazokondensatnykh zalezhei [The value of abnormally high reservoir pressures in the search for gas and gas condensate deposits]. Gazovaya promyshlennost', 1961, no. 7, pp. 1–3. (in Russian)
- Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin, R.V. Dinamika vydeleniya gaza iz merzlykh gruntov pri izmenenii temperatury i davleniya [Dynamics of gas release from frozen soils under temperature and pressure changes]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, 2020, no. 4, pp. 15–20. (in Russian)
- 14. Kraev, G.N. Zakonomernosti rasprostraneniya metana v mnogoletnemyorzlykh porodakh na Severo-Vostoke Rossii i prognoz ego postupleniya v atmosferu [Regularities of methane distribution in permafrost rocks in the North-East of Russia and forecast of its entry into the atmosphere]. Extended abstract of Cand. Sci. (Geography) Dissertation. Moscow, TsEPL RAN, 2010, 20 p. (in Russian)
- Kraev, G.N., Schulze, E.D., Rivkina, E.M. *Kriogenez* kak faktor raspredeleniya metana v gorizontakh merzlykh porod [Cryogenesis as a factor of methane distribution in the horizons of frozen rocks]. *Doklady Akademii* Nauk, 2013, vol. 451, no. 6, pp. 684–687. (in Russian)

- 16. Kraev, G.N., Rivkina, E.M. Nakoplenie metana v promerzayushchikh i merzlykh pochvakh kriolitozony [Accumulation of methane in freezing and frozen soils of the permafrost zone]. Arctic Environmental Research, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 173–184. (in Russian)
- 17. Kurasov, I.A., Stupakova, A.V. *Tektonicheskoe stroenie* severnoi chasti Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo basseina [Tectonic structure of the northern part of the West Siberian oil and gas basin]. *Vestnik Moskovskogo* universiteta. Seriya 4: Geologiya, 2014, no. 4, pp. 56–64. (in Russian).
- Kurchikov, A.R. *Gidrogeotermicheskii rezhim uglevodorodnykh skoplenii Zapadnoi Sibiri* [Hydrogeothermal regime of hydrocarbon accumulations in Western Siberia]. *Geologiya i geofizika*, 2001, vol. 42, no. 11– 12, pp. 1846–1853. (in Russian)
- Mel'nikov, P.I., Mel'nikov, V.P., Tsarev, V.P., Degtyarev, B.V., Mizulina, N.B., Popov, A.P., Bereznyakov, A.I., Svechnikov, A.M. *O generatsii uglevodorodov v tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod* [On the generation of hydrocarbons in strata of permafrost rocks]. *Izvestiya AN SSSR, Seriya geologicheskaya*, 1989, no. 2, pp. 118–128. (in Russian)
- Mironyuk, S.G, Otto, V.P Gazonasyshennye morskie grunty i estestvennye gazovydeleniya uglevodorodov: zakonomernosti rasprostraneniya i opasnost' dlya inzhenernykh sooruzhenii [Gas-saturated marine soils and natural gas release of hydrocarbons: distribution patterns and danger for engineering structures]. Georisk, 2014, no. 2, pp. 8–18. (in Russian)
- Obzhirov, A.I., Telegin, Yu.A., Okulov A.K. Gazogeokhimicheskie polya i raspredelenie prirodnykh gazov v dal'nevostochnykh moryakh [Gas geochemical fields and distribution of natural gases in the Far Eastern seas]. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika, 2018, no. 1 (25), pp. 66–74. (in Russian)
- 22. Popov, A.I. *Kriolitologiya* [Cryolithology]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1985, 239 p. (in Russian).
- Sergienko, V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov, I.P. et al. Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov shel'fa morei vostochnoi Arktiki kak vozmozhnaya prichina "metanovoi katastrofy": nekotorye rezul'taty kompleksnykh issledovanii 2011 goda [Degradation of submarine permafrost and destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of complex studies in 2011]. Doklady Akademii Nauk, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. (in Russian)
- Streletskaya, I.D., Vanshtein, B.G., Vasil'ev, A.A., Oblogov, G.E. Soderzhanie i genezis metana v merzlykh otlozheniyakh i podzemnykh l'dakh na poberezh'e i shel'fe Karskogo morya [Content and genesis of methane in frozen sediments and underground ice on the coast and shelf of the Kara sea]. Aktual'nye problemy nefti i gaza, 2018, no. 4 (23), pp. 67–72 (in Russian)
- 25. Khimenkov, A.N. *Geosistemnyi podkhod v geokriologii* [Geosystem approach in geocryology]. *Kriosfera Zemli*, 2013, vol. 17, no. 2, pp. 74–82. (in Russian)
- 26. Khimenkov, A.N., Stanilovskaya, Yu.V. Fenomenologicheskaya model' formirovaniya gazovogo vybrosa na primere Yamal'skogo kratera [Phenomenological model of the formation of gas outburst craters by the example of the Yamal crater]. Arktika i Antarktika, 2018, no. 3,

pp. 1-25.

https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.3.27524 (in Russian).

- Khimenkov, A.N., Vlasov, A.N., Volkov-Bogorodskii, D.B., Sergeev, D.O., Stanilovskaya, Yu.V. *Flyuidodinamicheskie geosistemy v kriolitozone. Ch. 2. Kriolitodinamicheskie i kriogazodinamicheskie geosistemy* [Fluidynamic geosystems in cryolithozone. Part2. Cryolithodynamic and cryogasodynamic geosystems]. *Arktika i Antarktika*, 2018, no. 2, pp. 48–70. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.2.26377 (in Russian)
- Khimenkov, A.N., Koshurnikov, A.V., Sobolev, P.A. Laboratornoe modelirovanie fil'tratsii gaza v mnogoletnemerzlykh porodakh [Laboratory modeling of gas filtration in permafrost rocks]. Arktika i Antarktika, 2019, no. 4, pp. 52–73. (in Russian)
- 29. Shakhova, N.Ye. *Metan v moryakh Vostochnoi Arktiki* [Methane in the Eastern Arctic seas]. Extended ab-

stract of Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation.. Moscow, IO RAN, 2010, 44 p. (in Russian)

- Shumskii, P.A. Osnovy strukturnogo ledovedeniya [Fundamentals of structural ice science]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955, 492 p. (in Russian)
- 31. Yakushev, V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian)
- 32. Kraev, G., Schulze, E., Yurova, A., Kholodov, A., Chuvilin, E., Rivkina, E. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. Atmosphere, 2017, no 8(6).
- Leibman, M.O., Hubberten, H.W., Lein, A.Yu., Streletskaya, I.D., Vanshtein, B.G. Tabular ground ice origin in the Arctic coastal zone: cryolithological and isotopegeochemical reconstruction of conditions for its formation. In: Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost (Zurich, Switzerland). Lisse, Netherlands, A.A. Balkema Publishers, 2003, vol. 1, pp. 645–650.