

УДК 551.345

ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ

© 2023 г. А. Н. Хименков^{1,*}, Е. О. Дернова^{1,**}, Ю. В. Станиловская^{2,***}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Total Energies, ул. Лесная, 7, Москва, 125196 Россия

*E-mail: a_khimenkov@mail.ru

**E-mail: dernova.eo@gmail.com

***E-mail: yulia.stanilovskaya@total.com

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.

После доработки 19.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Исследования последних десятилетий показали, что газовая составляющая играет значительную роль в строении и свойствах мерзлых пород. На это указывает значительное поступление парниковых газов в атмосферу из криолитозоны; выбросы газа, приводящие к авариям на буровых скважинах; образование воронок газового выброса и др. Эти процессы определяются соотношением характеристик газовой составляющей и показателей физико-механических свойств мерзлых пород, которые к настоящему времени изучены недостаточно. В статье рассмотрены механизмы формирования газонасыщенных зон; проведена оценка влияния газа на физико-механические свойства талых и мерзлых грунтов; проанализированы процессы, связанные с воздействием газа на грунтовый массив.

Ключевые слова: газонасыщенные мерзлые породы, криогенная концентрация, разрывные деформации, пластические деформации, газовые каналы, фильтрация газа, газовые ловушки, диссоциация газогидратов, напорная фильтрация газа

DOI: 10.31857/S0869780923010058, EDN: HSMUDJ

ВВЕДЕНИЕ

Строение и свойства мерзлых пород обусловлены взаимодействием твердых, жидких и газообразных компонентов. Основная твердая составляющая – минеральные частицы и лед, жидкая – различные категории воды (свободная, рыхло- и прочносвязанная), газообразная – вся совокупность газов и водяного пара, содержащихся в мерзлых породах. Два первых компонента изучены довольно хорошо, выявлены количественные характеристики, показывающие их влияние на формирование, строение и свойства мерзлых пород. На их основе разработаны различные классификации, проведены исследования механических свойств, закрепленные в нормативных документах, разрабатываются прогнозы поведения пород при различных сценариях изменения климата. Газовая составляющая, ее влияние на строение и свойства мерзлых пород рассмотрены гораздо слабее. При оценке свойств мерзлых грунтов газовую компоненту практически не учитывают, ее роль не рассматривается при проведении проектных и инженерно-геокриологических работ или разработке прогнозов развития

неблагоприятных процессов при изменении внешних условий. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес. В последние десятилетия отношение к оценке роли газов в криолитозоне меняется. Выяснилось, что наличие газовой составляющей мерзлых пород ухудшает их прочностные и деформационные характеристики. При повышении температуры, даже в области отрицательных значений, или изменения порового давления при техногенных воздействиях в мерзлых толщах возникает фильтрация газа. Установлено, что эмиссия метана из мерзлых пород может достигать уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [22]. При бурении скважин наблюдаются многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента, шлама, промывочной жидкости и т.д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [1, 14, 15, 28]. В последние годы на территории Западной Сибири обнаружены воронки глубиной в десятки метров, связанные с естественными выбросами под-

земных газов из мерзлых пород. Все это свидетельствует о том, что в настоящее время наблюдается значительное несоответствие между теоретическими представлениями о роли газовой составляющей криогенных толщ и происходящими в них реальными процессами.

В настоящее время для выделения различных типов мерзлых пород используются такие показатели, как: льдистость, криогенное строение, засоленность, вещественный состав, температура и др. При этом такой показатель, как газонасыщенность, полностью отсутствует, что оставляет значительную группу мерзлых пород с присущими им специфическими свойствами и процессами вне рамок специального изучения. Учитывая масштабы освоения углеводородных месторождений, расположенных в криолитозоне, и степень распространения там газонасыщенных пород, вовлеченных в хозяйственную деятельность, это выглядит анахронизмом.

Целью предлагаемой публикации является обобщение существующей разрозненной информации о формировании газовой составляющей в породах, причинах концентрации газа и локализации газонасыщенных зон, значениях газонасыщенности и морфологии газовых включений в мерзлых породах. Проанализированы имеющиеся данные по давлениям, возникающим в мерзлых толщах, а также об интенсивности процессов, связанных с перераспределением газа. Данная работа необходима для разработки различных классификационных признаков газонасыщенных мерзлых пород, а также отработки технологий проведения лабораторных испытаний, учитывающих их особенности.

НАКОПЛЕНИЕ БИОХИМИЧЕСКОГО ГАЗА

Интенсивность естественной биохимической газогенерации, являющейся источником биогенных газов, зависит от фациальных условий осадконакопления. Если выделяемые микроорганизмами газы не успевают посредством диффузионного механизма отводиться от мест генерации в атмосферу, то их концентрация становится столь велика, что превышает их растворимость, в связи с чем возникает газовая фаза, формирующаяся в виде газового пузырька. Находя пути наименьшего сопротивления и совершая колебательные движения, пузырек газа стремится в область меньших давлений. Таким образом, формируется региональный фон углеводородных газов. Если отвод газа затруднен, то могут формироваться газонасыщенные зоны, приуроченные к линзам проницаемых пород или сводам антиклинальных структур, перекрытых слабо проницаемыми породами. Давление в таких геосистемах будет непрерывно возрастать до тех пор, пока оно либо остановит жизнедеятельность бактерий, либо до-

стигнет того уровня, при котором нарушится целостность кровли [4]. Учитывая, что атмосферное давление даже в несколько сот атмосфер оказывает слабое действие на жизнедеятельность бактерий [25], пластовое давление в литологических ловушках может быть значительным, намного превосходить гидростатическое и ограничиваться только прочностными показателями вмещающих пород. Разрушение пород, перекрывающих газовые карманы, довольно частое явление для слабо литифицированных субаквальных осадков. На территории Санкт-Петербургского региона при бурении скважин на глубинах 8–40 м были зафиксированы десятки газо-грязевых выбросов, иногда сопровождавшихся возгоранием газа [13]. При бурении инженерно-геологических скважин в пределах мелководных районов Печорского и Карского морей неоднократно отмечались выбросы газовой смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. Выбросы происходили в диапазоне с глубин от 20 до 50 м ниже поверхности дна. Эти выбросы связаны с интервалами газонасыщенных осадков, имеющих аномально высокое пластовое давление [20].

НАКОПЛЕНИЕ ГАЗА В ЗОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

Содержание биогенных газов, образующихся в субаквальных осадках, соответствует, как правило, их региональному фоновому значению. При этом аномальные концентрации углеводородных газов связаны с поступлением из внешних источников за счет миграции глубинного газа [18]. В зонах тектонических нарушений газ по системе трещин и разломов мигрирует к поверхности из нижележащих горизонтов. В этом случае могут формироваться области повышенного газонасыщения, в которых концентрация газов может намного превышать фоновые значения. Например, фоновые значения содержания метана в донных осадках Карского моря составляют около 0.001 мл/кг, а в пределах газовых аномалий, как правило, приуроченных к зонам разрывных нарушений, превышение составляет более чем в 100 раз [19]. В дальневосточных морях в придонном слое воды фоновые концентрации метана обычно составляют 0.00007–0.00009 мл/л. Над месторождениями нефти и газа содержание метана в 10–100 раз превышает фоновые значения. В придонной воде над Лунской структурой (Охотское море) наблюдается содержание метана в центральной части структуры 0.011 мл/л, что на два порядка превышает фон. Столь высокая аномалия связана с сильной нарушенностью структуры — верхней части осадочного чехла [17]. На присахалинском шельфе в придонной воде фоновыми являются концентрации метана 60–90 мл/л; в районе распространения глинистых осадков

содержание метана еще меньше и не превышает 10 мл/л. Биогенный метан, образующийся в донных отложениях, не создает аномалии в придонном слое воды. Они возникают только в тех случаях, когда над формирующейся газовой залежью формируются трещиноватые зоны в перекрывающих ее породах, и возникает подток углеводородных газов. В этих районах содержание метана может превышать фоновый на порядки. В районах выхода газа в керне донных илистых осадков были обнаружены пустоты и включения газогидратов [18].

КРИОГЕННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ВНУТРИГРУНТОВЫХ ГАЗОВ

Основными причинами присутствия газа в еще не промерзших отложениях являются биохимические процессы, связанные с разложением органики в результате жизнедеятельности бактерий или поступления газа из нижележащих горизонтов. Оба механизма не могут обеспечить значительное содержание газов непосредственно в мерзлых породах. Первый, в силу того, что при отрицательных температурах жизнедеятельность бактерий значительно ослаблена; второй — потому что в мерзлых породах прекращается или значительно ослабевает фильтрация газа. В ходе эпигенетического промерзания создаются криогенные напоры, обуславливающие значительное перераспределение концентрации газа в мерзлых породах.

Эпигенетическое промерзание пород — мощный фактор перераспределения внутригрунтовых газов и включения их в состав мерзлых пород. Г.Н. Краев и соавт. [11] в ходе лабораторного моделирования миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном суглинистых и песчаных грунтов установил, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части образца за счет миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания, тогда как в нижней части содержание газа уменьшилось. В песках, наоборот, наблюдалось его отжатие к газонепроницаемой подошве. Результаты эксперимента позволили авторам сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте есть результат специфической миграции газа вместе с поровым раствором в суглинках и песках.

Полученные в лабораторных экспериментах результаты подтвердились в ходе изучения динамики криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании десятилетнего слоя. Средние значения концентрации метана у подошвы сезонно-талого слоя (СТС) — около 2 см³/кг формируются за счет биогенного продуцирования. На некоторых локальных участках концен-

трация метана достигала 15 см³/кг. Для этого потребовался биогенный метан из 11–12 соседних участков. Данный факт может быть объяснен только при допущении возможности перераспределения газа по латерали [12].

Наиболее газонасыщенные мерзлые породы расположены на участках нефтегазовых структур. В этом случае газонасыщение обуславливается совместным действием нескольких факторов:

- тектонического, связанного с деформированием пород, приуроченных к локальным тектоническим структурам, что обуславливает движение глубинного газа к поверхности;

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

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

В результате взаимодействия перечисленных факторов формируются наиболее выраженные газонасыщенные мерзлые породы.

Еще до промерзания над тектоническими структурами, в которых формируются залежи углеводородов, наблюдается повышенное содержание газов. Здесь в глинистой покрывке, в пределах контура залежи, широко распространены высоконапорные мелкие скопления углеводородов. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрывке [6]. Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведенные на территории Бованенковского и Харасавейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов оказались более чем в 2 раза выше, чем за пределами контуров [3]. Такое распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мерзлых пород в районах газовых месторождений.

СТЕПЕНЬ ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ГАЗА В НИХ

Степень газонасыщенности мерзлых пород и морфология газовых включений — важные характеристики для изучения роли газовой компонен-

ты в строении мерзлых толщ. Таких данных немного и сосредоточены они в основном в местах расположения месторождений углеводородов. По данным Ф.Э. Арэ [1], изучавшим газонасыщенные мерзлые породы в районе трассы железной дороги Обская-Бованенково, в кернах многих инженерно-геологических скважин зафиксированы горизонтально ориентированные макропустоты чечевицеобразной формы толщиной до 12 мм. Иногда наблюдались скопления мелких субгоризонтальных ломанных пустот толщиной до 1 мм. Наблюдаемая газовая пористость в суглинках в среднем составляла 5–7%, достигая 10%, а в некоторых случаях до 50%. В песках средняя величина газовой пористости составляла 0.5%. Было установлено, что верхние слои многолетнемерзлых пород (до 100 м) над нефтегазовыми месторождениями содержат значительное количество свободного газа под избыточным давлением. Вместилищем свободного газа в многолетнемерзлых породах могут служить горизонты мелкозернистых песков прибрежно-морского генезиса с повышенной газовой микро- и макропористостью, перекрытых глинистыми осадками. В них наблюдались многочисленные выбросы газа, длительность которых иногда прослеживалась до месяца и более. Продолжительные выделения газа из скважин, пробуренных в многолетнемерзлых породах, свидетельствуют о их существенной газопроницаемости и возможности фильтрации через них [1].

Газонасыщенные мерзлые породы широко распространены на территории Бованенковского НГКМ. Многолетнемерзлые породы здесь представлены преимущественно глинами с песчаными прослоями различной мощности. К песчаным слоям и линзам приурочены газопроявления различной интенсивности и продолжительности. Газ находится в свободной форме или в виде газогидратов.

По содержанию газа выделяются два типа мерзлых пород. Первый соответствует горизонтам, где газовыделение отсутствует. В них содержание газа незначительно и составляет $0.005 \text{ см}^3/\text{г}$. Удельная пористость, свободная ото льда и незамерзшей воды, либо равна, либо превышает газосодержание, что свидетельствует о свободной форме газовых включений. Второй тип приурочен к горизонтам газопроявлений. Отличительной особенностью данных пород является наличие каверн изометричной формы диаметром 5–8 мм и глубиной до 7 мм. Стенки каверн гладкие, сами каверны часто заполнены фирноподобным снегом. Газосодержание в грунтах в этих условиях достигает $0.5 \text{ см}^3/\text{г}$. Количество газа в них превышает свободную пористость на 2–3 порядка. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$ при средних значениях порядка

$800\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Объемы газа достигают значительных размеров. В одной из скважин (64-П-2) в интервале 72–80 м запас газа был оценен в 490 тыс. м^3 , а площадь газовой залежи в 80 тыс. м^2 [3, 14]. Такие дебиты и размеры залежей свидетельствуют о том, что в мерзлых породах существует или формируется мощная сеть каналов, по которым осуществляется фильтрация газа к скважине.

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

В целом влияние газовой составляющей на инженерно-геологические условия для талых и мерзлых грунтов изучено недостаточно. Отсутствуют классификации газонасыщенных грунтов, не разработаны нормативные документы, регламентирующие применение данных грунтов в качестве оснований инженерных сооружений, нет методик оценки возможных рисков. При этом даже отдельные фрагментарные наблюдения свидетельствуют о важности данной проблемы. Рассмотрим некоторые материалы по данной теме, большинство из которых относится к талым породам.

Из теории фильтрационной консолидации известно, что даже незначительное газонасыщение предопределяет повышение порового давления и замедление процесса консолидации грунтов. В тонкодисперсных грунтах газовые включения перекрывают капилляры, что существенно замедляет процессы их консолидации под нагрузками. Например, метан, образующийся на болотах, а также в морских и озерных осадках, может скапливаться в виде мелких газовых пузырьков, повышая поровое давление и снижая водопроницаемость отложений. С этим, во многом, связана низкая плотность молодых осадков [26]. Наличие газа в грунтах может приводить к увеличению порового давления до 0.4 МПа и более. Это ведет к взвешиванию грунта, уменьшению сил трения, ослаблению связей между частицами грунта, переходу в псевдопастозное состояние [21]. Накопление малорастворимых газов (CH_4 , N_2 , H_2) в песчаноглинистых породах вызывает изменение их напряженно-деформированного состояния. Существенно возрастает тиксотропность, снижается угол внутреннего трения грунтов вплоть до их перехода в псевдопастозное состояние даже при незначительных динамических и вибрационных воздействиях [5]. С.И. Рокосом проведен анализ изменения физико-механических свойств газонасыщенных осадков Арктических морей с аномально высоким внутрипластовым давлением [20]. Было установлено, что повышенное пластовое давление снижает литостатическое (бытовое) и влияет на напряженно-деформированное состояние грунтового массива. Это выражается в сниже-

нии прочности и плотности при одновременном увеличении текучести, сжимаемости и пористости, что делает газонасыщенные грунты с избыточным внутривластным давлением неустойчивыми к внешним динамическим нагрузкам и служит одной из причин многочисленных естественных деформаций. Когда давление в газонасыщенном горизонте достигает некоторого критического значения, вероятно сопоставимого с сопротивлением недренированному сдвигу осадков (около 5–30 КПа), происходит деформация данной толщи. В грунтах, где давление газа близко к гидростатическому, существенного изменения свойств не наблюдалось. При снижении внешнего давления или повышении температуры газ, скопившийся в “мини-ловушках”, расширяется. Это вызывает смятие и выжимание к поверхности вмещающих и вышележащих отложений. При бурении происходят выбросы газовой смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. Автором было отмечено, что при изучении физико-механических свойств газонасыщенных грунтов следует учитывать дегазацию при подготовке образцов, что изменяет их свойства относительно условий естественного залегания (*in situ*) [20].

Сотрудниками лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН было проведено изучение выделения газов из мерзлых грунтов при повышении их температуры [9, 10]. Испытания проводились на твердых и тугопластичных суглинках, а также песках. Содержание газов в образцах (растворенных, адсорбированных и свободных) достигало 4–5%. В результате исследований выявлено, что выделение газов начинается уже при незначительных изменениях температуры мерзлых грунтов. При объемном давлении 0.001 МПа для песчаных грунтов газовыделение начинается при температуре -5°C , достигает своего максимума при $+1^{\circ}\text{C}$. Для глинистых грунтов выделение газа начинается также при -5°C , пик наступает при температуре -2°C , а затем, как и в песчаных грунтах, интенсивность газовыделения сокращается.

Действие внешних нагрузок снижает температуру начала газовыделения и влияет на его динамику при изменении температуры. В песчаных грунтах температура начала выделения газовых включений при увеличении величины объемного сжимающего давления постепенно снижается до -8°C (при давлении 0.2 МПа). В суглинках температура начала выделения газа также постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от -7°C при давлении 0.05 МПа до -8°C (при давлении 0.2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре ниже температуры заморзания-оттаивания грунта: -3°C при давлении 0.05 МПа, -4°C при 0.1–0.2 МПа. При повыше-

нии температуры в таких мерзлых грунтах происходит изменение фазового состава влаги, начинают происходить объемные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны на границах распределения фаз, увеличивается содержание незамерзшей воды; расширяясь, газовые включения образуют систему фильтрационных каналов между собой. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего из непроницаемых мерзлых грунтов может происходить выделение газа [9]. При повышении температуры грунтов толщина пленок связанной воды увеличивается, часть ее может переходить в свободную. В таких условиях, при повышении температуры в мерзлых грунтах может происходить выделение газов, содержащихся в слоях гидратных пленок, при том, что свободная вода в этих условиях остается заморзшей [10].

С этими результатами согласуются данные о фильтрации газа сквозь мерзлые образцы, полученные в ходе лабораторных исследований на кафедре геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова. Газ подводился по замороженному в образец штуцеру, под давлением около 0.3 МПа. Испытания проводились на образцах льда различной солёности и содержанием каолина с начальной влажностью, близкой к верхнему пределу пластичности, что обеспечило высокую льдистость после промораживания. Температура образцов повышалась от -9°C до значений, близких к 0°C . При температуре около -1°C в образцах пресного льда и льдистого каолина наблюдалась фильтрация газа. Структурные исследования показали, что газ фильтруется в виде разрозненных потоков мелких вытянутых пузырьков диаметром в доли миллиметров. Газовые пузырьки приурочены к локальным деформациям [27]. В обоих случаях при повышении температуры мерзлых образцов в них наблюдается фильтрация газа. В первом удаляется газ, содержащийся в самом образце; во втором – перераспределяется газ, подаваемый извне.

ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени выявлена зависимость механических свойств мерзлых пород от многих факторов (засоленности, льдистости, гранулометрического и минералогического составов), однако влиянию газовой составляющей на их прочностные и деформационные свойства должного внимания уделено не было. Рассмотренные материалы показали, что наличие газов оказывает значительное влияние на физико-механические свойства как талых, так и мерзлых грунтов. Наличие газа в грунтах приводит к перекрытию капилляров, увеличению порового давления, ослаблению консолидации грунта, ослаблению связей между частицами. Это, в свою очередь, выражается в снижении прочности и плотности при

одновременном увеличении сжимаемости и пористости, что делает газонасыщенные грунты неустойчивыми к внешним естественным и техногенным нагрузкам и возникновению деформаций в грунтовой массе.

Газовыделение в условиях повышения температуры мерзлых грунтов приводит к их разуплотнению и соответствующему снижению прочности. Наиболее интенсивное снижение показателей деформационных свойств суглинков (угла внутреннего трения ϕ и сцепления C) соответствует наиболее интенсивному выделению газа (в опытах без нагрузок при температурах -2 — -3°C), при сжимающих нагрузках 0.1 – 0.2 МПа в диапазоне температур от -7 до -4°C). При дальнейшем повышении температуры (но в пределах отрицательных значений) интенсивность выделения газа падает, одновременно снижается интенсивность изменения прочностных свойств [8]. Результатом выделения газа из мерзлых пород будут уменьшение их пористости и уплотнение.

Различия в газонасыщенности мерзлых грунтов определяется историей и даже предысторией их формирования. Как было рассмотрено выше, накопление газа в грунтах связано и с жизнедеятельностью бактерий, и с перемещением газа из нижележащих пород. Рассеянный грунтовой газ накапливается в так называемых “ловушках” или “карманах”, формирование которых определяется литологическими или тектоническими причинами. Давление газа в местах их локализации даже на глубинах в несколько десятков метров может достигать значительных величин, приводящих к выбросам и взрывам. Таким образом, еще до промерзания в распределении газа наблюдаются значительные неоднородности. Эпигенетическое промерзание грунтов, особенно субаквальных осадков, является мощным фактором перераспределения и концентрации приповерхностных грунтовых газов. Газонасыщение мерзлых грунтов варьируется в больших диапазонах: от незначительного, когда газовая пористость составляет 5 – 7% [1], 4 – 5% [10], а содержание газа составляет порядка 0.005 см³/г, до очень большого, когда газосодержание составляет 0.5 см³/г, а количество газа превышает свободную пористость на 2 – 3 порядка [14], при этом показатель пористости может достигать 50% [1]. Если в первом случае газ при увеличении температуры мерзлого грунта начинает перемещаться без нагрузки, то во втором давление в нем настолько большое, что может приводить к катастрофическим выбросам из скважин или формированию взрывных воронок газового выброса.

Рассмотрим некоторые оценки величин давлений, зафиксированных в мерзлых породах, и возможные причины их формирования. В 1986 – 1990 гг. на полуострове Ямал при бурении масси-

ва мерзлого грунта в районе мостового перехода через р. Юрибей с глубины 26 м произошел выброс бурового инструмента весом около 150 кг на высоту 12 м. По расчетам Р.Г. Кальбергена (устное сообщение), необходимое давление составляло 2.5 МПа. Согласно расчетам В.И. Богоявленского и И.А. Гарагаша [2], для разрушения мерзлой покрышки воронки газового выброса “Ямальский кратер” мощностью 8 м достаточно давления в 1.25 МПа. Близкие значения (1.74 МПа) были получены В.П. Мерзляковым [27]. По оценкам С.Н. Булдовича [29], давление 1.5 МПа и температур ниже -1.4°C достаточно для образования стабильных углекислых газогидратов. Это означает, что повышение температуры выше данных значений приведет к разложению газогидрата и формированию соответствующих давлений углекислого газа в толще мерзлых пород. Для метана при температурах в диапазоне от -5°C до 0°C равновесное давление в системе газ–вода (лед)–гидрат находится в диапазоне 2.2 – 2.6 МПа [7]. То есть максимально возможное давление при разложении газогидрата метана будет находиться около 2.6 МПа. Для Бованенковского НГКМ установлено, что объем выделившихся газов в горизонтах активного газовыделения на 2 – 3 порядка превосходит пространство в порах пород, которое газ мог занимать в свободной форме [24]. Используя известные соотношения давлений и объемов газа (закон Бойля Мариотта), можно определить, что давление газа в порах должно достигать значений 2 – 3 МПа, это вполне соответствует предположениям, что он находился в клапратной форме.

Каких-либо классификаций мерзлых пород, которые основывались бы на оценке газовой составляющей, к настоящему времени не разработано. В качестве предварительного предложения можно рассмотреть 3 группы насыщенных углеводородными газами мерзлых пород, в которых основным компонентом является метан. Эти группы выделены по степени газонасыщенности мерзлых пород и форме нахождения газовой составляющей.

В *первую группу* входят отложения, в которых наблюдается фоновое распределение газа перед промерзанием. В глинисто-суглинистых отложениях свободный газ содержится в диспергированной форме (в виде отдельных пузырьков в пористом пространстве). В песчаных образованиях он встречается в виде локализованных скоплений [20]. Значительного перераспределения газовой составляющей в ходе промерзания и ее криогенной концентрации не происходит. Газонасыщенность мерзлых пород составляет не более 5% объема порового пространства. Газ находится в свободной форме в виде зашемленного в грунтовых порах и капиллярах. Давление газа соответствует гидростатическому. При повышении температу-

ры мерзлых пород выше -3°C возможны перераспределение и фильтрация газа без нагрузки. При нагрузках фильтрация газа начинается при более низких температурах.

Во *вторую группу* входят мерзлые породы, в которых газонасыщенность достигает 50% и более. Газ может находиться под давлением больше гидростатического, но менее 2.5 МПа. В этих условиях он в свободной форме рассеян по грунтовому массиву или сконцентрирован в “газовых карманах”. При повышении температуры возможны напорная фильтрация газа, развитие деформаций и уменьшение прочностных характеристик мерзлых пород, что может приводить к уплотнению мерзлых пород и осадкам инженерных сооружений. При вскрытии пород в процессе бурения могут происходить выбросы газа, объемы которого определяются величиной их газонасыщенности.

В *третью группу* входят мерзлые породы, где газ находится в клатратной форме в метастабильном состоянии. В предшествующий период эти газонасыщенные породы проходили этап развития, когда создавались условия гидратообразования, т.е. определенные соотношения температур и давлений. Источниками соответствующих давлений могли быть ледниковые покровы, достаточно глубокое залегание морских осадков или промерзание в условиях криогенных напоров. В ненарушенном состоянии газ в твердой форме соответствует ледяным образованиям мерзлой толщи, аномальных давлений при этом не наблюдается. При снятии давления или повышении температуры мерзлых пород может наблюдаться разложение газогидратов. При этом создается давление около 2.5 МПа, которое приводит к интенсивной фильтрации газа.

Газогидраты могут выходить из стабильного состояния и начать разлагаться при увеличении минерализации поровых растворов мерзлых пород. Данный процесс связан с тем, что при промерзании засоленных осадков происходит отжатие солей из зоны льдообразования. При наличии песчаных слоев отжатые соли накапливаются в них, формируя криопэги. При повышении температуры мерзлых пород толщина пленок связанной воды с меньшей концентрацией солей увеличивается, ионы солей за счет диффузии мигрируют в мерзлый грунт. Интенсивность миграции ионов химических элементов в мерзлых грунтах зависит от их температуры, состава отложений, градиента концентрации [23]. Взаимодействие содержащихся в мерзлых отложениях газогидратов с растворами солей приводит к их разложению. Установлено, что в процессе переноса и накопления солей формируются два фронта: протавивания мерзлых отложений и разложения газогидратов. При этом фронт разложения газо-

гидрата опережает фронт оттаивания [30]. То есть газогидраты начнут разлагаться и выделять свободный газ под большим давлением еще до оттаивания мерзлой породы.

Влияние свободного газа на физико-механические свойства грунтов проявляется по-разному. Там, где имеются условия для формирования аномально высоких давлений, характерна тенденция к разупрочнению, уменьшению плотности и прочности при одновременном повышении пористости, текучести и сжимаемости (разупрочнение). Это происходит в случае наличия покрывающих, перекрывающих газонасыщенную толщу. При вскрытии таких интервалов газ улетучивается, пластовое давление падает, что и вызывает разупрочнение грунта. В газонасыщенных горизонтах, не экранированных слабопроницаемыми слоями, давление газа незначительно отличается от гидростатического. При вскрытии этих интервалов скважинами существенного снижения давления не происходит и, соответственно, свойства грунтов изменяются лишь в зависимости от вещественного состава и степени диагенетических преобразований [20].

Изменения внешних факторов, определяющих состояние грунтового массива, могут приводить к тому, что газ выходит из стабильного состояния и начинает перераспределяться внутри мерзлой породы. К таким факторам относятся повышение отрицательных температур до значений, близких к значениям фазовых переходов; уменьшение давлений ниже давлений, обеспечивающих стабильное существование газогидратов; увеличение минерализации поровых растворов, приводящее к разложению газогидратов. При переходе в нестабильные состояния свойства мерзлых пород меняются. Резко усиливается фильтрация газов, возрастает пористость, возникают разрывные и пластические деформации, в грунтовом массиве на локальных участках возможно течение мерзлого грунта и даже пневматические взрывы газа.

Например, на некоторых газовых скважинах Бованенковского и Харасавэйского НГКМ отмечается увеличение сжимаемости многолетне-мерзлых пород при повышении их температуры без перехода через границу оттаивания. Это повлекло за собой развитие деформаций грунтового основания с риском перехода в недопустимое состояние. Отмечается, что добывающие предприятия в Арктическом регионе ранее не сталкивались с данным процессом [16]. Можно обоснованно допустить, что возникновение просадок при повышении температуры газонасыщенных мерзлых пород, широко распространенных на данных территориях, может быть связано с выдавливанием газа из зоны воздействия инженерных сооружений. Гораздо большие негативные последствия

наблюдаются при фомировании высоких давлений внутригрунтовых газов в мерзлых толщах. В этих случаях при бурении наблюдаются интенсивное газовыделение и даже взрывные процессы.

В заключение следует выделить основные направления изучения влияния газа на механические свойства мерзлых грунтов:

- выявление условий генерации и накопления газов до промерзания и в процессе промерзания;
- изучение морфологии газовых включений в зависимости от газонасыщенности;
- анализ взаимосвязи величин газонасыщения, возникающих давлений и процессов деформирования при повышении температуры мерзлых пород;
- лабораторные исследования влияния газов на механические свойства мерзлых пород с учетом возможности их фильтрации.

При лабораторных испытаниях мерзлых грунтов следует учитывать то, что газ в них может находиться под давлением. По-видимому, в ходе лабораторных испытаний работы следует проводить в 2 режимах: с возможностью оттока газа и без такой возможности. В первом случае необходимо фиксировать динамику выделения газа и увязывать ее с показателями механических характеристик мерзлых грунтов.

ВЫВОДЫ

1. К настоящему времени влияние газообразной составляющей на поведение мерзлых пород при воздействии на них различных силовых нагрузок изучено недостаточно.

2. Существуют критические зоны температур, давлений, минерализации порового раствора, которые приводят к нарушению термодинамического равновесия. Даже при незначительной газонасыщенности нахождение мерзлых грунтов в этих зонах может приводить к ухудшению их механических характеристик и, как следствие фильтрации газа, деформациям, просадкам.

3. Механические характеристики газонасыщенных грунтов могут меняться в зависимости от того, происходит отток газа или нет. В ходе лабораторного изучения влияния газа на механические свойства мерзлых пород необходимо это учитывать.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 42–50.
2. Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Обоснование процесса образования кратерогазового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 12–17.
3. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И. и др. Газохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 5. С. 22–34.
4. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // ДОСйГИК. 2012. Т. 3. № 3. С. 54–63.
5. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
6. Дурмишьян А.Г. Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // Газовая промышленность. 1961. № 7. С. 1–3.
7. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А. и др. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42.
8. Кальбергенов Р.Г., Карпенко В.С., Кутергин В.Н., Собин Р.В. Влияние газовой компоненты на свойства мерзлых грунтов и динамика ее выделения при изменении температуры // Матер. 5-й конференции “День науки 2020”. М.: “КДУ”, “Добросвет”. 2020. С. 10–17. [электронное издание сетевого распространения].
9. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Собин Р.В. Динамика выделения газа из мерзлых грунтов при изменении температуры и давления // Строительство на многолетнемерзлых грунтах. 2020. № 4. С. 15–20.
10. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 70–79.
11. 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.
12. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 3. С. 173–184.
13. Краснов И.И. Газы четвертичной толщи предглинтовой полосы Ленинградской области // Природные газы СССР. М.–Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935.

14. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения М.: ООО "Газпром Экспо", 2013. 424 с.
15. 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.
16. Мельников И.В., Нерсесов С.В., Осокин А.Б., Николайчук Э.В. и др. Геотехнические решения для строительства газовых скважин в особо сложных геокриологических условиях полуострова Ямал // Газовая промышленность. 2019. № 12. С. 64–71.
17. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
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.
19. Портнов А.Д., Семенов П.Б., Рекант П.В. Комплекс высокочастотных сейсмоакустических исследований и морской газо-геохимической съемки как метод обнаружения и локализации углеводородов // Геология морей и океанов: матер. XIX Междунар. научной конф. (школы) по морской геологии. 2011. Т. II. М.: ИО РАН, С. 97–100.
20. Рокос С.И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: автореф. дис. канд. геогр. н. Мурманск, 2009. 21 с.
21. Руденко Н.С. К вопросу о биохимическом газообразовании в подземном пространстве Санкт-Петербурга // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 1. С. 101–107.
22. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов на шельфе Восточно-арктических морей как потенциальная причина метановой катастрофы: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 1. С. 1132–1137.
23. Смирнова О.Г. Миграция ионов химических элементов в мерзлых породах и льдах: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. н. М., 1997. 23 с.
24. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
25. Сутин И.А., Финн Г.Р., Зеленская Л.Н. Микробиология. М.: Медицина, 1973. 368 с.
26. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. М.: Недра, 1985. 288 с.
27. Хименков А.Н., Власов А.Н., Брушков А.В., Кошурников А.В. и др. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород. М.: Геоинфо, 2021. 288 с.
28. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
29. Buldovich S., Khilimonyuk V., Bychkov A., Ospennikov E. et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 23 June–1 July 2018, Chamonix, France. P. 97–98.
30. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin S. et al. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling // Geosciences. 2019. V. 9 (4), P. 188. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040188>

APPROACHES TO STUDYING THE EFFECT OF GAS COMPONENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FROZEN SOILS

A. N. Khimenkov^{a,#}, E. O. Dernova^{a,##}, and Yu. V. Stanilovskaya^{b,###}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b *Total Energies, Lesnaya ul., 7, Moscow, 125196 Russia*

[#] *E-mail: a_khimenkov@mail.ru*

^{##} *E-mail: dernova.eo@gmail.com*

^{###} *E-mail: yulia.stanilovskaya@total.com*

Studies of recent decades have shown that the gas component plays a significant role in the structure and properties of frozen soils. This is indicated by a significant influx of greenhouse gases into the atmosphere from the permafrost; gas emissions leading to accidents at boreholes; the formation of gas emissions craters, etc. These processes are determined by the mutual influence between the characteristics of the gas component and the indicators of the physical and mechanical properties of frozen soils, which have not been studied enough to date. The formation mechanisms of gas-saturated zones are considered; the influence of gas on the physical and mechanical properties of thawed and frozen soils is assessed; and the processes associated with the impact of gas on the soil massif are analyzed.

Keywords: *gas-saturated permafrost, cryogenic concentration, rupture deformations, plastic deformations, gas channels, gas filtration, gas traps, gas hydrate dissociation, pressure gas filtration*

REFERENCES

1. Are, F.E. *Problema emissii glubinykh gazov v atmosferu* [The problem of deep gas emission to the atmosphere]. *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50. (in Russian)
2. Bogoyavlenskii, V.I., Garagash, I.A. *Obosnovanie protsessy obrazovaniya kraterov gazovogo vybrosa v Arktike matematicheskim modelirovaniem* [Substantiation of the formation of gas-ejection craters in the Arctic by mathematical modeling]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 3 (19), pp. 12–17. (in Russian)
3. Bondarev, V.L., Mirotvorskii, M.Yu., Oblekov G.I. et al. *Gazokhimicheskaya kharakteristika nadsenomanskikh otlozhenii poluostrova Yamal (na primere Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya)* [Gas and chemical characteristics of above Cenomanian Senoman deposits in the Yamal Peninsula (by the example of Bovanenkovo oil and gas condensate field)]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2008, no. 5, pp. 22–34. (in Russian)
4. Glagolev, M.V., Kleptsova, I.E. *K voprosu o mekhanizme vykhoda puzyr'kov metana iz torfyanka* [On the issue of the mechanism of release of methane bubbles from a peat bog]. *DOSiGIK*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 54–63. (in Russian)
5. Dashko, R.E., Aleksandrova, O.Yu., Kotyukov, P.V., Shidlovskaya, A.V. *Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh uslovii Sankt-Peterburga* [Peculiarities of engineering geological conditions of St. Petersburg]. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2011, no. 1, pp. 1–47. (in Russian)
6. Durmish'yan, A.G. *Znachenie anomal'no vysokikh plastovykh davlenii pri poiske gazovykh i gazokondensatnykh zalezhei* [Importance of abnormally high reservoir pressures in the search for gas and gas condensate deposits]. *Gazovaya promyshlennost'*, 1961, no. 7, pp. 1–3. (in Russian)
7. Istomin, V.A., Chuvilin, E.M., Sergeeva, D.V., Bukhanov, B.A. et al. *Vliyanie komponentnogo sostava i davleniya gaza na l'do- i gidratoobrazovanie v gazonasyshchennykh porovykh rastovarkh* [Effect of gas component composition and pressure on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions]. *Neftegazokhimiya*, 2018, no. 2, pp. 33–42. (in Russian)
8. Kal'bergenov, R.G., Karpenko, V.S., Kutergin, V.N., Sobin, R.V. *Vliyanie gazovoi komponenty na svoystva merzlykh gruntov i dinamika ee vydeleniya pri izmenenii temperatury* [Influence of the gas component on the properties of frozen soils and the dynamics of its release with temperature change]. Proc. 5th conference "Science Day 2020". Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2020, pp. 10–17. (in Russian)
9. 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]. *Stroitel'stvo na mnogoletnemerzlykh gruntakh*, 2020, no. 4, pp. 15–20. (in Russian)
10. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., Sobin, R.V. *Vliyanie na prochnost' glinistykh gruntov izmenenii svoystv gidratnykh plenok pri temperaturnykh vozdeistviyakh* [Influence of changes in the properties of hydrated films on the strength of clay soils under temperature influences]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 70–79. (in Russian)
11. 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)
12. 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)
13. Krasnov, I.I. *Gazy chetvertichnoi tolshchi predglintovoi polosy Leningradskoi oblasti* [Gases of the Quaternary pre-glint zone of the Leningrad region]. *Prirodnye gazy SSSR* [Natural gases of the USSR]. Moscow-Leningrad, ONTI NKTP USSR Publ., 1935. (in Russian)
14. *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. T.2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field]. Moscow, OOO Gazprom Expo, 2013, 424 p. (in Russian)
15. Mel'nikov, P.I., Mel'nikov, V.P., Tsarev, V.P., Degtyarev, B.V., et al. *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)
16. Melnikov, I.V., Nersesov, S.V., Osokin, A.B., Nikolai-chuk, E.V., et al. *Geotekhnicheskie resheniya dlya stroitel'stva gazovykh skvazhin v osobo slozhnykh geokriologicheskikh usloviyakh poluostrova Yamal* [Geotechnical solutions for the construction of gas wells in especially difficult geocryological conditions of the Yamal Peninsula]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2019, no. 12, pp. 64–71. (in Russian)
17. Obzhairov, A.I. *Gazogeokhimicheskie polya pridonnoogo sloya morei i okeanov* [Gas geochemical fields of the bottom layer of seas and oceans]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 139 p. (in Russian)
18. Obzhairov, 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)
19. Portnov, A.D., Semenov, P.B., Rekant, P.V. *Kompleks vysokochastotnykh seismoakusticheskikh issledovaniy i morskoi gazo-geokhimicheskoi s'emki kak metod obnaruzheniya i lokalizatsii uglevodorodov* [A complex of high-frequency seismoacoustic studies and marine gas-geochemical survey as a method for detecting and localizing hydrocarbons]. // *Geology of Seas and Oceans: Proc. XIX Int. Sci. Conf. (School) in Marine Geology*. 2011, Moscow, IO RAN Publ., pp. 97–100. (in Russian)
20. Rokos, S.I. *Gazonasyshchennyye otlozheniya verkhnei chasti razreza Barentsovo-Karskogo shel'fa* [Gas-saturated sediments of the upper part of the Barents-Kara

- shelf section]. Extended abstract Cand. Sci. (Geogr.) Diss., Murmansk, 2009. 21 p. (in Russian)
21. Rudenko, N.S. *K voprosy o biokhimicheskom gazoobrazovanii v podzemnom prostranstve Sankt-Peterburga* [On the issue of biochemical gas formation in the underground space of St. Petersburg]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe srtoitel'stvo*, 2000, no. 1, pp. 101–107. (in Russian)
 22. Sergienko, V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov, I.P. *Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov na shel'fe Vostochno-Arkticheskikh morei kak potentsial'naya prichina metanovoi katastrofy: nekotorye rezul'taty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda* [Degradation of underwater permafrost and destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of a methane catastrophe: some results of comprehensive studies in 2011]. *Doklady Akademii nauk*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. (in Russian)
 23. Smirnova, O.G. *Migratsiya ionov khimicheskikh elementov v merzlykh porodakh i l'dakh* [Migration of ions of chemical elements in frozen rocks and ice]: Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss., Moscow, 1997, 23 p. (in Russian)
 24. *Stroenie i svoystva porod krilitozony yuzhnoi chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Structure and properties of rocks in the permafrost zone of the southern part of the Bovanenkov gas condensate field]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 137 p. (in Russian)
 25. Sutin, I.A., Finn, G.R., Zelenskaya, L.N. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. Moscow, Meditsina Publ., 1973, 368 p. (in Russian)
 26. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoi geologii. Fiziko-khimicheskie osnovy* [Theoretical foundations of engineering geology. Physicochemical bases]. E.M. Sergeev, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1985. 288 p.
 27. Khimenkov, A.N., Vlasov, A.N., Brushkov, A.V., Koshurnikov, A.V. et al. *Geosistemy gazonasyshchennykh mnogoletnemerzlykh porod* [Geosystems of gas-saturated permafrost rocks]. Moscow, Geoinfo Publ., 2021. 288 p.
 28. Yakushev, V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural gas and gas hydrates in the permafrost zone]. Moscow, VNIIGAZ Publ., 2009, 192 p. (in Russian)
 29. Buldovich, S., Khilimonyuk, V., Bychkov, A., Oспенников, E. et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 23 June – 1 July 2018, Chamonix, France, pp. 97–98.
 30. Chuvilin, E., Ekimova, V., Bukhanov, B., Grebenkin, S. et al. Role of salt migration in destabilization of intra permafrost hydrates in the Arctic shelf: experimental modeling. *Geosciences*, 2019, vol. 9 (4), pp. 188.