УДК 624.131.4

ДИНАМИКА ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗА ИЗ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Наличие газовой компоненты является важной особенностью строения мерзлых грунтов, которая при инженерных изысканиях в настоящее время практически не изучается лабораторными методами. Для оценки газосодержания и динамики газовыделения из мерзлых грунтов авторами разработаны оборудование и методика трехосных и сдвиговых испытаний образцов при различных температурах и напряженном состоянии. В результате исследований выявлено, что выделение газов начинается уже при незначительных изменениях температуры мерзлых грунтов. Действие внешних нагрузок снижает температуру начала газовыделения и влияет на его динамику при изменении температуры. Прочностные характеристики мерзлых грунтов после газовыделения изменяются в зависимости от отрицательной температуры и величины объемного сжимающего давления.

КАРПЕНКО ФЕДОР СЕРГЕЕВИЧ
Кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Института Геоэкологии им. Е.М. Сергеева (ИГЭ РАН) (Москва, Россия)

КУТЕРГИН ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ
Кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГЭ РАН (Москва, Россия)

КОТОВ ПАВЕЛ ИГОРЕВИЧ
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

СОБИН РОМАН ВАЛЕРЬЕВИЧ
Младший научный сотрудник ИГЭ РАН (Москва, Россия)

ВВЕДЕНИЕ

Исследование динамики газовыделений в мерзлых грунтах и при их оттаивании представляет огромный интерес при рассмотрении вопросов эмиссии парниковых газов в Арктических районах. Одним из самых главных вопросов является оценка эмиссии метана при изменении климата в Арктических регионах [1]. В связи с актуальностью темы разработаны международные исследовательские программы [2, 3]. Вопросы влияния газовых включений на свойства мерзлых грунтов становятся все более актуальными для объектов производственной и хозяйственной деятельности. В этих случаях влияние на свойства грунтов оказывают не только природные условия, но и изменения температурного режима и напряженного состояния грунтовых массивов в процессе строительства и эксплуатации техногенных объектов [4...7].

По своему составу мерзлые грунты представляют собой многокомпонентную систему, одной из составляющих которой, наряду с минеральной частью, льдом и водой, являются газовые включения. При этом особенности взаимодействия газовой компоненты с твердой и жидкой фазами грунта все еще остаются недостаточно изученными. Согласно современным представлениям, газообразная компонента в мерзлых породах состоит из смеси различных газов, в составе которой преобладают углеводородные газы биохимического, катагенетического происхождения и газы, захваченные атмосферой [8]. По данным Е. М. Чувилина [9] газы в мерзлых породах могут находиться в четырех основных формах: растворенной, адсорбированной, свободной и клатратных соединениях с водой.

Растворенный газ находится в жидкой компоненте грунтов (в пленках незамерзшей воды вокруг частиц органоминерального скелета, в поровом растворе охлажденных пород) и образуется за счет процессов диффузии и адсорбции. Количество растворенного газа зависит от его растворимости при заданных условиях. Растворенные газы существенно влияют на свойства мерзлых пород как физико-химической системы. Так, например, увеличение содержания углекислого газа приводит к увеличению растворимости карбонатов, сульфатов, гипса и других минеральных компонентов [8].

© Основания, фундаменты и механика грунтов, 2020

Таблица

Грунт	Гранулометрический состав, %								Влажность W, %	Плотность ρ, г/см^3	Пластичность, %		
	1,0-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,005 мм	0,005-0,002 мм	<0,002 мм			W_L	W_P	I_P
Песок пылеватый	0,1	0,9	58,4	26,6	5,2	1,6	0,5	6,7	24,3	1,90	–	–	–
Суглинок	–	0,3	1,0	6,8	38,8	16,1	14,5	22,4	21,2	2,04	28,8	18,0	10,8
	–	0,8	0,3	11,3	29,8	12,4	19,0	26,4	30,3	1,90	40,0	25,5	14,5
	–	–	0,2	5,9	25,1	15,6	13,6	39,6	23,7	1,99	35,4	20,8	14,6
	0,1	0,3	0,3	5,9	33,3	12,6	13,6	33,9	22,5	2,02	37,0	21,5	15,5

Адсорбированный газ образуется на поверхности органо-минерального скелета и на поверхности льда при превышении предела его растворимости в заданных условиях и фиксируется в воде при оттаивании образцов. Количество адсорбированного газа мало и может составлять несколько процентов от объема породы.

Свободный газ – наиболее подвижная форма газового компонента пород. Он заполняет свободное поровое пространство, и его количество зависит от давления, объема свободных пор, а также степени водонасыщения. Большая часть газов в обычных условиях находится в свободном состоянии.

Газовые гидраты (или газогидраты) – клатратные соединения газа с водой, чаще всего метана. Для образования таких соединений необходимы особые термодинамические условия.

Некоторые авторы рассматривали многолетнемерзлые породы как естественные флюидоупоры, где выделение газа маловероятно, особенно при высокой льдонасыщенности [10]. Однако есть данные, что в процессе формирования мерзлых грунтов миграция газов полностью не прекращается [11...14]. При этом решающую роль в динамике газовыделений играет степень заполнения пор льдом. В настоящее время установлены зависимости газопроницаемости от типа грунтов и льдонасыщенности, а также гидратонасыщенности [15...17].

В практике инженерно-геологических изысканий газовая компонента стандартным оборудованием не изучается. Изучается в основном содержание и состав газов с отбором методом "хэдспейс" и "большого образца" [18]; газопроницаемость на специальных экспериментальных установках [15]; а также механические свойства мерзлых гидратонасыщенных образцов методами одноосного [19] и трехосного сжатия [20, 21]. В работе предложена комплексная методика испытаний, позволяющая определять как прочностные характеристики мерзлых грунтов, так и динамику газовыделений при различном объемном давлении.

Рис. 1. Прибор трехосного сжатия в термокамере

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на грунтах южной части Ямальского полуострова, где основную роль в строении верхней части разреза играют мерзлые дисперсные грунты, преимущественно пылеватые пески и суглинки. Для изучения характера газовыделения были проведены лабораторные испытания грунтов ненарушенного сложения.

Естественная влажность пылеватых песков составляет 24...26 %, плотность – 1,90...1,91 г/см^3, степень водо-(льдо)насыщения – 0,88...0,92. Суглинки представлены тугопластичной и полутвердой разновидностями с естественной влажностью 21...30 %, плотностью 1,90...2,04 г/см^3, числом пластичности 10...15 %, степень водо-(льдо)насыщения составляет 0,91...0,93 (таблица).

Экспериментальные исследования проводились в приборах трехосного сжатия конструкции ИГЭ РАН [22, 23]. Конструкция приборов обеспечивает возможность герметизации образца грунта при проведении испытаний, приложения к нему заданного объемного давления σ_v и дренажа выделяющихся в ходе опыта газов через специальный дренажный канал. При проведении испытаний прибор

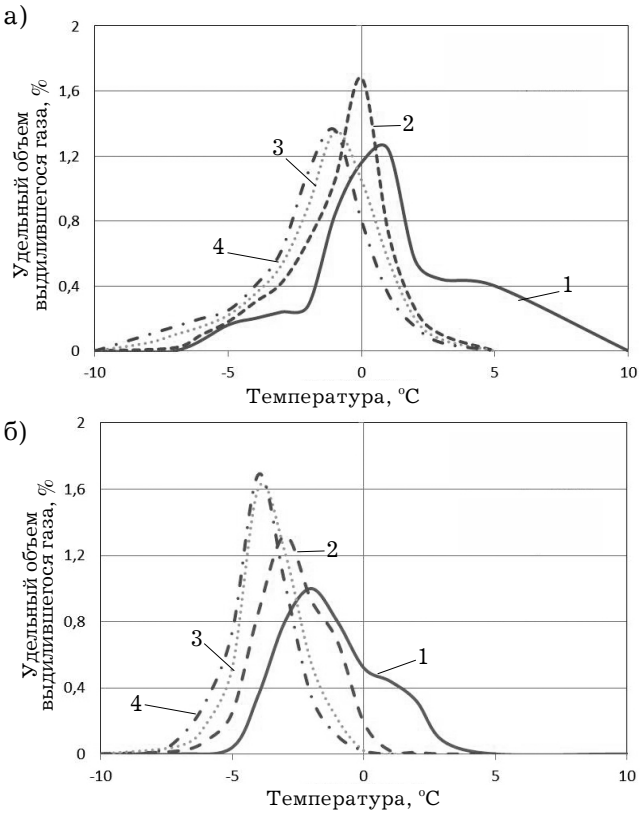

Рис. 2. Зависимость объема газа, выделившегося под действием сжимающих нагрузок (1 - 0,001 МПа, 2 - 0,05 МПа, 3 - 0,1 МПа, 4 - 0,2 МПа) от температуры: а) пылеватый песок; б) суглинок

трехосного сжатия размещается в термостатической камере, в которой поддерживается заданная температура (рис. 1).

Процесс газовыделения во время испытания контролируется датчиком давления, встроенным в дренажную систему, при этом стабилизация давления газа свидетельствует о прекращении его выделения. Выделившийся газ с помощью поршневой системы собирается в газоотборник, его объем определяется методом вытеснения жидкости в сообщающихся мерных бюретках.

После этого рассчитывается удельный объем выделившегося газа: $\Gamma = V_г / V$, где $V_г$ – объем выделившегося газа, см^3; V – объем образца, см^3.

Для изучения реакции газовой составляющей измерения проводились в диапазоне температур –10...+20°С с шагом изменения в один градус при различном объемном давлении σ_v.

Дополнительно изучалось изменение прочностных характеристик мерзлых грунтов после газовыделения при различной отрицательной температуре (–9; –7; –5; –3; –1°С). Для этого в каждом образце проводилось выделение газов при заданной температуре и давлении в приборе трехосного сжатия, равном 0,001; 0,05; 0,1; 0,2 МПа. После окончания газовыделения, которое определялось по датчику давления в верхнем дренаже, образец извлекался в термокамере из трехосного прибора, делился на три части и испытывался при той же температуре в сдвиговом приборе методом недренированного сдвига в соответствие со стандартом ИГЭ РАН [24]. Испытания проводились с постоянной скоростью деформирования при различных нормальных нагрузках (в зависимости от первоначального внешнего давления).

В ходе опыта измерялись и фиксировались температура, касательные напряжения и сдвиговые деформации грунта, по результатам серии опытов с различными нормальными нагрузками определялись показатели прочности грунта – угол внутреннего трения φ и сцепление c.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний (рис. 2) подтверждают, что внешние нагрузки оказывают влияние на процесс газовыделения в мерзлых грунтах при повышении температуры.

Результаты определения динамики выделения газов при объемном давлении 0,001 МПа (минимально возможное для данной установки трехосного сжатия), показали, что для песчаных грунтов газовыделение начинается при температуре –5°С, достигает своего максимума при +1°С, а дальше интенсивность выделения газовой составляющей снижается, и при температуре выше +5°С выделение газа прекращается. Для глинистых грунтов выделение газа начинается также при –5°С, пик наступает при температуре –2°С, а затем, как и в песчаных грунтах, интенсивность газовыделения сокращается до полного прекращения выделения газовой компоненты при достижении температуры +4°С.

Характер выделения газов в грунтах зависит от их напряженного состояния. Под действием сжимающих нагрузок снижается температура начала газовыделения, также меняется динамика этого процесса, при этом общий относительный объем выделяющихся газов остается неизменным.

В песчаных грунтах температура начала выделения газовых включений при увеличении величины объемного сжимающего давления постепенно снижается до –8°С (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает также при температуре 0°С при давлении 0,05 МПа, –1°С при 0,1 МПа и –1,5°С при 0,2 МПа. При этом динамика выделения газа при

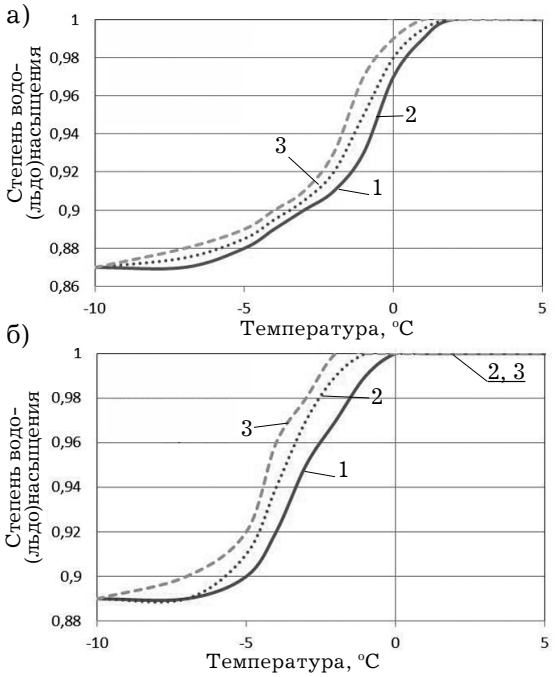

Рис. 3. Зависимость изменения степени водо-(льдо) насыщения под действием сжимающих нагрузок (1 - 0,05 МПа, 2 - 0,1 МПа, 3 - 0,2 МПа) от температуры: а) пылеватый песок; б) суглинок

действии сжимающих нагрузок имеет более выраженный пик максимальной интенсивности газовыделения, и газовыделение прекращается при более низкой температуре.

В суглинках температура начала выделения газа также постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от –7°С при давлении 0,05 МПа до –8°С (при давлении 0,2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре ниже температуры замерзания-оттаивания грунта: –3°С при давлении 0,05 МПа, –4°С при 0,1 и 0,2 МПа. При этом максимум объема выделяющихся газов возрастает при увеличении сжимающего давления. Так же, как и в песчаных грунтах, процесс газовыделения в суглинках под действием нагрузок прекращается при более низкой температуре.

При повышении температуры под нагрузкой происходит процесс деформирования мерзлых грунтов, сопровождающийся рядом теплофизических, механических, физико-химических процессов: деформация грунта за счет упругого сжатия его компонентов; деформация, обусловленная закрытием свободных пор и, как следствие, отжатием газовой составляющей; деформация, обусловленная фазовым переходом лед-незамерзшая вода, а также за счет оттока незамерзшей воды из образца [25]. Деформация, обусловленная закрытием свободных пор, может быть значительной лишь при неполной степени заполнения пор мерзлого грунта. При повышении температуры в таких мерзлых грунтах происходит изменение фазового состава, начинают происходить объемные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны на границах распределения фаз, увеличивается содержание незамёрзшей воды, газовые включения, расширяясь, образуют систему фильтрационных каналов между собой. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего из непроницаемых мерзлых грунтов может происходить выделение газа до достижения полного заполнения пор водой (льдом), когда процесс выделения газа прекращается.

Приведенные данные (рис. 3) показывают, что уплотнение песков начинается при температуре около - 6°С и продолжается до достижения положительной температуры, а при увеличении давления скорость достижения полного заполнения пор водой (льдом) увеличивается, что в целом соответствует динамике газовыделения. В глинистых грунтах наблюдаются те же закономерности, но достижение полного заполнения пор водой (льдом) происходит в области отрицательных температур. Это свидетельствует о практически полном извлечении газовой компоненты из исследуемого грунта уже в мерзлом состоянии, поэтому газовыделения при дальнейшем повышении температуры не происходит.

Изменение строения (уплотнение) грунтов при газовыделении вызывает изменение их прочностных свойств при соответствующих температурных режимах и напряженном состоянии. Результаты определений угла внутреннего трения и сцепления мёрзлых грунтов (рис. 4,5) показывают, что газовыделение в мерзлых грунтах при повышении температуры приводит к снижению их прочностных свойств. Характер и интенсивность этого процесса зависит от напряженного состояния, в котором находится грунт. Так при температуре –9°С, при которой не происходило выделение газа, прочностные характеристики практически не отличаются, вне зависимости от того при каком внешнем давлении они испытывались первоначально.

При температуре –7°С начинается процесс выделения газа, который вызван уплотнением грунта под действием различных действующих нагрузок. В результате в образце происходит изменение количества льда и незамерзшей воды, миграция и перераспределение влаги, перемещение и переупаковка минеральных частиц, возникновение микротрещин, которые могут перейти в макротрещины. В связи с этим в образцах, которые испытывались в приборе трехосного сжатия

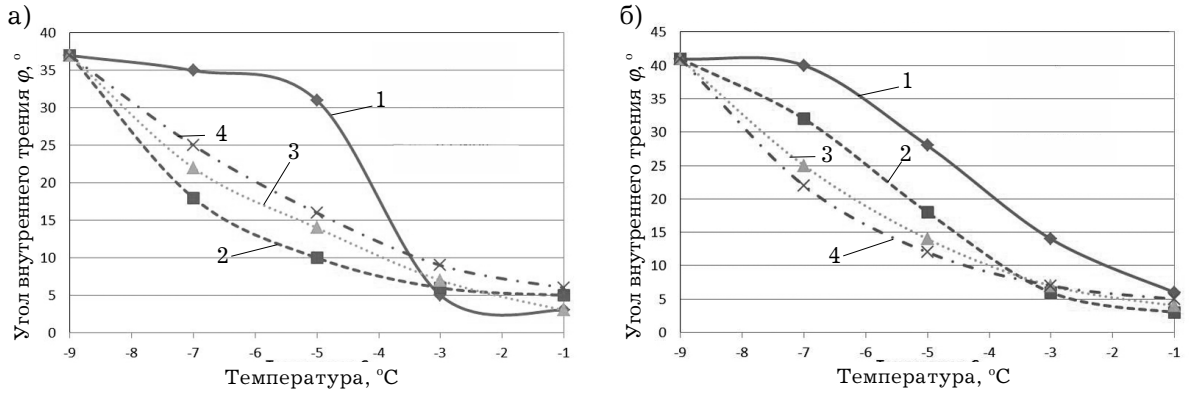

Рис. 4. Изменение угла внутреннего трения грунтов после газовыделения: а) - пылеватые пески; б) суглинки; 1 - 0,001 МПа, 2 - 0,05 МПа, 3 - 0,1 МПа, 4 - 0,2 МПа

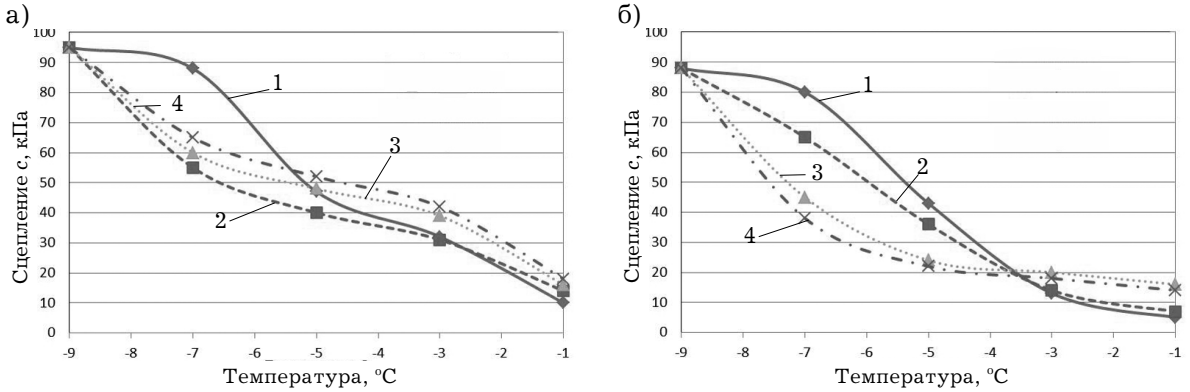

Рис. 5. Изменение сцепления грунтов после газовыделения: а) - пылеватые пески; б) суглинки; 1 - 0,001 МПа, 2 - 0,05 МПа, 3 - 0,1 МПа, 4 - 0,2 МПа

при давлении 0,001 МПа, практически не происходит никаких изменений (в том числе льдистости), поэтому они имеют лучшие прочностные характеристики. При этом при отрицательной температуре (близкой к 0°С), когда грунт полностью уплотняется, прочностные характеристики практически не меняются вне зависимости от уплотняющего давления.

В случае воздействия внешнего давления больше 0,05 МПа происходит изменение льдистости. Причем, в песках и суглинках этот процесс происходит по-разному. В песках при низких отрицательных температурах практически не содержится незамерзшей воды. Под воздействием нагрузки в местах концентрации напряжений – на контактах минеральных частиц песка и льда, где давление очень велико, равновесное состояние нарушается, происходит плавление льда–цемента, а образовавшаяся влага пополняет незамерзшую воду. Под воздействием возникшего градиента давлений пленочная влага, пополненная оттаянным льдом, перемещается из места повышенного давления в менее напряженную зону, где и замерзает вновь, достигнув нового равновесного состояния при данной температуре и давлении. Таким образом, чем больше давление, тем сильнее уплотнится грунт и повысятся прочностные характеристики песка (рис. 5а). В суглинке даже при температуре –7°С будет содержаться незамерзшая вода, поэтому плавление льда-цемента приведет к увеличению количества незамерзшей воды. Тем самым увеличение давления приведет к снижению сцепления (рис. 5б).

Изменение прочностных свойств грунтов в этих условиях происходит в полном соответствии с динамикой газовыделения и изменением строения грунтов. Под действием нагрузок снижение угла внутреннего трения и сцепления начинается при температуре от -7°С и наиболее активно протекает до температуры –3°С, при этом интенсивность изменения прочности зависит от величины сжимающей нагрузки.

ВЫВОДЫ

В ходе выполнения экспериментальных работ разработано новое оборудование и методика проведения трехосных испытаний, которая позволяет проводить стандартные испытания для определения показателей механических свойств грунтов и одновременно оценивать динамику выделения газа из образцов мерзлых и оттаивающих грунтов.

Результаты определения динамики выделения газов при давлении 0,001 МПа (минимально возможное для данной установки трехосного сжатия), показали, что газовыделение начинается при отрицательной температуре –5°С, достигает своего максимума при +1°С для песчаных грунтов и –2°С для суглинка, дальше 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). При этом динамика выделения газа при действии сжимающих нагрузок имеет более выраженный пик максимальной интенсивности и этот процесс прекращается при более низкой отрицательной температуре, что обусловлено более быстрым закрытием свободных пор и, как следствие, отжатием газовой составляющей.

Исследование прочностных характеристик мерзлых грунтов после газовыделения при различных отрицательных температурах показали, что величина объемного сжимающего давления оказывает значительное влияние на сцепление и угол внутреннего трения, особенно при температурах –5°С до –7°С. Причем это влияние выражено по разному для песка и суглинка, что связано с особенностями фазового состава этих грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christensen T. R., Arora V. K., Gauss M, Hoglund-Isaksson L, Parmentier F. W. Tracing the climate signal: mitigation of anthropogenic methane emissions can outweigh a large arctic natural emission increase // Scientific Reports. - 2019. - 9(1):1146. https://doi.org/10.1038/s41598-018-37719-9.
2. Arctic Climate Impact Assessment ACIA. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. - Cambridge University Press, UK, 2004. - 86 p.
3. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) Assessment 2015: Methane as an Arctic climate forcer. - Oslo, Norway, 2015. - 139 p.
4. Богоявленский В. И. Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. -2015. - №7-8. - С. 8-13.
5. Перлова Е. В. Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части полуострова Ямал. Дисс. на соискание звания канд. г.-м. н.. - М.: МГУ, 2001. - 178 с.
6. Ривкин Ф. М. О распределении метана в мерзлых породах на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения на полуострове Ямал // В сб.: "Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике". - Новосибирск: Наука, 1997. - С. 168-173.
7. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю.Б., Кондаков В. В., Осокин А. Б., Якушев В. С. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. - М.: Геос, 2007. - 136 с.
8. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Якушев В. С. Классификация газового компонента пород криолитозоны // Криосфера Земли. -2005. - № 3. - С. 73-76.
9. Чувилин Е. М., Перлова Е. В. Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород // Вестник Московского университетата.- Серия 4: Геология. - 1999. - № 5. - С. 57-59.
10. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. - М., ВНИИГАЗ, 2009. - 192 с.
11. Арэ Ф. Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. -1998. - Т. II. - № 4. - С. 42-50.
12. Глотов В. Е. Естественные источники атмосферного метана в криолитозоне // Материалы Третьей конф. геокриологов России. - М.: МГУ, 2005. - Т. 1. - С. 236-240.
13. Хименков А. Н., Кошурников А. В., Карпенко Ф. С., Кутергин В. Н., Гагарин В. Е., Соболев П. А. О фильтрации газов в многолетнемёрзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. - 2019. - № 3. - С. 16-38.
14. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson ?. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. - 2010. - Vol. 327. - Pp. 1246-1250.
15. Чувилин Е. М., Гребенкин С. И., Сакле М. Влияние влагосодержания на проницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли. 2016. - № 3. - с. 71-78.
16. Чувилин Е. М., Гребенкин С. И. Изменение газопроницаемости мерзлых гидратонасыщенных песчаных пород при диссоциации газовых гидратов // Криосфера Земли. -2018. - Т. 22. - № 1. - С. 44-50.
17. Kneafsey T. J., Gupta A., Seol Y., Tomutsa L. Permeability of laboratory-formed methane hydrate-bearing sand, OTC- 19536-PP, SPE // Offshore Technology Conf. - Houston, USA, 2008. -Pp. 21-34.
18. Чербунина М. Ю., Шмелев Д. Г., Кривенок Л. А. Влияние способов дегазации мерзлых образцов на результаты определения концентрации метана // Инженерная геология. -2018. - Том XIII. - № 3. - С. 62-73.
19. Chuvilin E. M., Bukhanov B. A., Grebenkin S. I., Doroshin V. V., Iospa A. V. Shear strength of frozen sand with dissociating pore methane hydrate: An experimental study // Cold Regions Science and Technology. 2018. - Vol. 153. - Pp. 101-105.
20. Pinkert S., Grozic J.L.H. Prediction of the mechanical response of hydrate-bearing sands. J. of Geophys. Res.: Solid Earth. - 2014. - 119. - Pp.4695-4707.
21. Song Y., Yu F., Li Y., Liu W., Zhao J. Mechanical property of artificial methane hydrate under triaxial compression // J. of Nat. Gas Chemistry. - 2010. - Vol. 19. - Iss. 3 - Pp. 246-250.
22. СТО 93.020-2013/6 Лабораторные определения длительной прочности глинистых грунтов методом релаксации напряжений при трехосном сжатии. - М.: ИГЭ РАН, 2013. - 11 с.
23. Kal'bergenov R.G., Kotov P.I., Tsarapov M.N. Determination of the deformation characteristics of thawing soils by the triaxial compression method // Soil Mechanics and Foundation Engineering. - 2019. -Vol. 56. - Iss. 1. - Pp. 65-69.
24. СТО 93.020-2013/7 Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренированного одноплоскостного среза с замером порового давления. - М.: ИГЭ РАН, 2013. - 17 с.
25. Роман Л. Т., Царапов М. Н., Котов П. И., Волохов С. С., Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костоусов А.И. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. - М.: Изд-во "Книжный дом "Университет", 2018. - 188 с.