

ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345; 557.79
DOI: 10.15372/KZ20240603
EDN: GRTHXO

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА
В МЕРЗЛЫХ И ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ
В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ**

Е.М. Чувилін^{1,*}, С.И. Гребенкин^{1,2}, М.В. Жмаев^{1,2}

¹Центр добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий,
121205, Москва, Большой бул., 30/1, Россия

²Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН,
119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп. 1, Россия

*Автор для контакта; e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

Криолитозона, как показывают исследования, аккумулирует значительные объемы природного газа как в свободной форме, так и в виде газогидратов. Изменение термобарических условий газосодержащей толщи мерзлых пород может сопровождаться различными газодинамическими процессами, которые приводят к активным газовыделениям из верхних горизонтов мерзлоты. Во время активизации этих процессов давление газа в газонасыщенных горизонтах может быть равным и даже превышать давление вышележащих пород, а градиенты давлений могут достигать значительной величины, которой будет достаточно для деформации льдо- и гидратосодержащих пород, возникновения фильтрации газа, его проникновения и прорыва в вышележащие слои пород. Для моделирования подобных природных условий авторами была разработана оригинальная технология, которая включала создание специального кернодержателя фильтрационной установки и разработку алгоритма проведения лабораторных испытаний на созданном оборудовании. В ходе методических опытов показано, что при фиксированном газовом давлении около 2 МПа в нагреваемом непроницаемом льдонасыщенном песчано-глинистом образце фильтрация газа может возникать в области высоких отрицательных температур. Методические эксперименты по изучению динамики газопроницаемости мерзлых и оттаивающих пород в условиях образования и диссоциации поровых гидратов метана показали закономерные изменения газопроницаемости, обусловленные фазовыми переходами лед(вода)–гидрат, а также структурными преобразованиями грунтов, вызванными фазовыми переходами.

Ключевые слова: мерзлые породы, гидратосодержащие породы, экспериментальное моделирование, фильтрация газа, методика исследования, фазовые переходы, относительная деформация, скорость упругих волн.

Ссылка для цитирования: Чувилін Е.М., Гребенкин С.И., Жмаев М.В. Экспериментальное моделирование фильтрации газа в мерзлых и гидратосодержащих породах в условиях одноосного сжатия // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 31–44. DOI: 10.15372/KZ20240603. EDN: GRTHXO.

**EXPERIMENTAL MODELING OF GAS FILTRATION IN FROZEN
AND HYDRATE-CONTAINING ROCKS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION CONDITIONS**

E.M. Chuvilin^{1,*}, S.I. Grebenkin^{1,2}, M.V. Zhmaev^{1,2}

¹Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology,
Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, 121205 Russia

²Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences,
Leninsky prosp. 38, bld. 1, Moscow, 119334 Russia

*Corresponding author; e-mail: e.chuvilin@skoltech.ru

Studies show that frozen rock strata can accumulate significant amounts of natural gas both in free form and in the form of gas hydrates. Changes in the thermobaric conditions of gas-bearing permafrost can be accompanied by various gas-dynamic processes that lead to active gas emissions from the upper horizons of permafrost. During the activation of these processes, the gas pressure in gas-saturated horizons can be equal to or even exceed the pressure of the overlying rocks, and pressure gradients can reach a significant value that will be sufficient for deformation of ice- and hydrate-containing rocks, the occurrence of gas filtration, its permeation and breakthrough into the overlying rock layers. To simulate such natural conditions, the authors developed an original technology that included the creation of a special core holder for the filtration system and the development

of an algorithm for conducting laboratory tests. In the course of methodological experiments, it was found that at a constant gas pressure of approximately 2 MPa in a heated impermeable ice-saturated sandy clay sample, gas filtration can occur in the region of high negative temperatures, below its thawing temperature. Methodological experiments to study the changes in the gas permeability of frozen and thawing rocks under conditions of the formation and dissociation of methane pore hydrates have shown regular changes in gas permeability due to ice (water)–hydrate phase transitions and structural transformation of the soils caused by these phase transitions.

Keywords: frozen sediments, hydrate-bearing sediments, experimental modeling, gas filtration, research methodology, phase transitions, relative deformation, elastic wave velocity.

ВВЕДЕНИЕ

Криолитозона Земли, характеризующаяся температурой ниже 0 °С, представлена слоями горных пород, которые различаются не только по литологическому составу, но и по содержанию льда и поровых флюидов. Некоторые горизонты мерзлых пород при невысокой насыщенности их порового пространства льдом и другими заполнителями могут быть потенциальными коллекторами природного газа, особенно если они ограничиваются слабопроницаемыми отложениями.

Накопление природного газа в таких горизонтах могло происходить как в процессе многолетнего промерзания за счет механизмов криогенного концентрирования и отжатия [Якушев, 2009; Olefeldt et al., 2013; Kraev et al., 2017; Vasiliev et al., 2022], так и за счет подтока глубинных газов по тектоническим разломам и зонам с повышенной проницаемостью [Кузин, 1990; Арэ, 1998; Бадю, 2017, 2018; Арэ, 2001; Chuvilin et al., 2020a; Lu et al., 2020]. В зависимости от термобарических условий газ в криолитозоне может быть как в свободной форме, так и в виде газовых гидратов [Истомин, Якушев, 1992; Чувиллин и др., 1999; Ривкина и др., 2006; Якушев, 2009]. При этом внутримерзлотные газовые скопления часто находятся достаточно близко (в первых десятках метров) от дневной поверхности, что подтверждается газопроявлениями из неглубоких горизонтов при бурении в криолитозоне [Буданцева, 2006; Якушев, 2009; Chuvilin et al., 2000; Kraev et al., 2019; Chuvilin et al., 2020a; Yakushev, 2023]. Возможность существования таких газовых залежей связана с практически непроницаемыми льдонасыщенными породами, которые, перекрывая их сверху, являются своеобразной газовой ловушкой, обладающей достаточно высокой прочностью [Бадю, 2017; Dvornikov et al., 2019]. Активное газовыделение из неглубоких горизонтов мерзлоты может быть связано также с поровыми газогидратными образованиями, находящимися в метастабильном состоянии. Их формирование происходило в прошлом, когда в толщах пород существовали благоприятные условия, а дальнейшая их сохранность была обусловлена геологическим проявлением эффекта самоконсервации газогидратных образований в мерзлых породах [Chuvilin et al., 2000; Yakushev, Chuvilin, 2000; Chuvilin et al., 2018].

При изменении термобарических условий толщ мерзлых газонасыщенных пород, как в процессе антропогенного воздействия, так и за счет естественных геодинамических процессов, могут возникать газовые скопления с повышенным газовым давлением. Это может привести к прорывам горизонтов мерзлых пород накопившимся газом, к активной фильтрации газа по таликовым зонам, а также к газовым выбросам в атмосферу, в том числе с образованием кратеров на суше и покмарков на шельфе арктических морей [Богоявленский и др., 2019; Хименков и др., 2021; Kizyakov et al., 2017; Shakhova et al., 2019; Chuvilin et al., 2020a,b; Semenov et al., 2020; Bogoyavlensky et al., 2022].

При изучении газодинамических процессов в породах криолитозоны необходимо в первую очередь исследовать зависимость фильтрационно-емкостных свойств мерзлых пород от содержания льда, газогидратов, жидкой фазы воды, их структурно-текстурных особенностей, а также от термобарических условий, в которых они существуют.

Экспериментальное моделирование является наиболее эффективным методом изучения фильтрационно-емкостных свойств пород, включая льдо- и газосодержащие породы. Этот метод позволяет с высокой точностью контролировать изменение термобарических условий для образцов горных пород при наличии соответствующего оборудования.

На сегодняшний день сравнительно небольшое количество авторов экспериментально определяли зависимость проницаемости мерзлых пород от льдонасыщенности [Ананян и др., 1972; Старобинец, Мурогова, 1985; Чувиллин и др., 2016; Chamberlain, Gow, 1979; Seyfried, Murdock, 1997; Kneafsey et al., 2007; Wang et al., 2014; Chuvilin et al., 2021]. В большинстве работ экспериментальное моделирование фильтрации газа в льдосодержащих породах проводилось при давлении, близком к атмосферному, при этом практически не уделялось внимания оценке влияния термобарических факторов.

В отличие от льдосодержащих пород, исследованию проницаемости пород, содержащих газовые гидраты, посвящено значительное количество работ.

Первые зависимости относительной проницаемости песчаной породы по газу от коэффициента

гидратонасыщенности порового пространства были получены еще в 70-х годах прошлого века А.С. Схаляхо и А.В. Безносиковым [Истомин, Якушев, 1992]. В дальнейшем экспериментальную оценку проницаемости гидратосодержащих пород, как природных, так и искусственно приготовленных, проводили многие исследователи [Jaiswal et al., 2004; Minagawa et al., 2005; Kneafsey et al., 2007; Johnson et al., 2011; Li et al., 2016, 2021; Wu et al., 2018; Zhao et al., 2020; Lei et al., 2022; Cheng et al., 2023]. В ходе этих работ были рассмотрены различные аспекты изменения газопроницаемости гидратонасыщенных пород при нагревании, снижении давления, закачке ингибиторов. Однако практически все исследователи моделировали условия залегания газовых гидратов в грунтовых горизонтах, характеризующихся положительной температурой.

На основе экспериментальных данных был предложен ряд математических моделей для прогнозирования снижения относительной проницаемости пород при гидратонасыщении [Masuda et al., 2002; Kleinberg et al., 2003; Minagawa et al., 2003; Rezaee et al., 2012; Ruan et al., 2012; Dai, Seol, 2014; Delli, Grozic, 2014; Daigle, 2016; Jin et al., 2016; Hauge et al., 2016; Kang et al., 2016]. Однако существенным недостатком таких моделей является их применимость только к определенным типам грунтов или условий гидратообразования, а также наличие в них коэффициентов, которые должны корректироваться вручную в каждом конкретном случае по экспериментальным данным.

Фильтрационные испытания на образцах пород, одновременно содержащих лед и гидрат, начаты недавно, однако к настоящему времени получены экспериментальные зависимости изменения газопроницаемости как в процессе перехода порового льда в гидрат [Чувиллин и др., 2020], так и в условиях диссоциации порового гидрата в мерзлых гидратонасыщенных образцах при отрицательной температуре при понижении давления ниже равновесного [Chuvilin et al., 2021].

Для изучения газодинамических процессов, возникающих в верхних горизонтах многолетне-мерзлых пород, необходимо экспериментальное моделирование таких условий, когда давление газа будет равняться или превышать давление вышележащих пород.

В настоящей работе представлена оригинальная методика экспериментального моделирования процессов фильтрации газа в льдо- и гидратосодержащих породах при различных термобарических условиях. На основе этой методики проведены исследования фильтрационных свойств грунтовых образцов в условиях фазовых переходов вода–лед–гидрат с оценкой их линейных деформаций и измерением скоростей акустических волн.

Усовершенствованная экспериментальная установка для оценки фильтрационных свойств льдо- и гидратосодержащих пород

Экспериментальное моделирование фильтрации поровых флюидов в пористых средах, которое соответствует пластовым условиям, чаще всего проводят в специальных установках высокого давления на цилиндрических кернях различных пород. Однако серьезной технической проблемой при проведении фильтрационных испытаний является герметизация образца в кернадержателе такой установки. В большинстве фильтрационных установок для фиксации образца используются резиновые манжеты, а обжим создается за счет увеличения давления масла вокруг манжеты с образцом. Примеры подобных установок приведены в [Чувиллин и др., 2020; Zhao et al., 2020; Chuvilin et al., 2021; Wang et al., 2021; Lei et al., 2022]. При работе на таких установках в условиях повышенного давления зачастую происходит деформация манжет, приводящая к разрушению образцов исследуемых пород с проникновением масла из гидравлической системы в газовую линию, что приводит к преждевременному прекращению эксперимента и ремонту самой установки.

В случае исследования неконсолидированных горных пород возможно использование установок компрессионного сжатия без применения резиновых манжет и всестороннего обжима. В таких установках герметичность образца достигается за счет бокового расширения образца под действием осевой нагрузки, а также за счет сжатия образца со стенками кернадержателя.

С учетом существующих подходов к конструкции фильтрационных установок, авторами совместно с ООО “ЭкоГеосПром” была разработана компрессионная фильтрационная установка, при помощи которой возможно моделирование пластовых условий с высокими градиентами газового давления, даже в случаях, когда газовое давление будет равняться или превышать механическое. Данная установка позволяет создавать термобарические условия в образцах грунтов в широком диапазоне температур (от -15 до $+30$ °C) и давлений (до 10 МПа), таким образом обеспечивая создание перепада давлений на торцах образца до 10 МПа (рис. 1).

Основным рабочим элементом фильтрационной установки является специальный кернадержатель с внутренним диаметром 40 мм, выполненный из полимерного материала РЕЕК, в который помещается образец горной породы длиной до 120 мм (см. рис. 1). Осевое давление на образец создается поршнем с гидравлическим приводом, подключенным к пневмогидравлическому насосу (Н), регистрация давления производится датчиком давления Д4, а перемещения – цифровым индикатором линейных перемещений ДД (см. рис. 1).

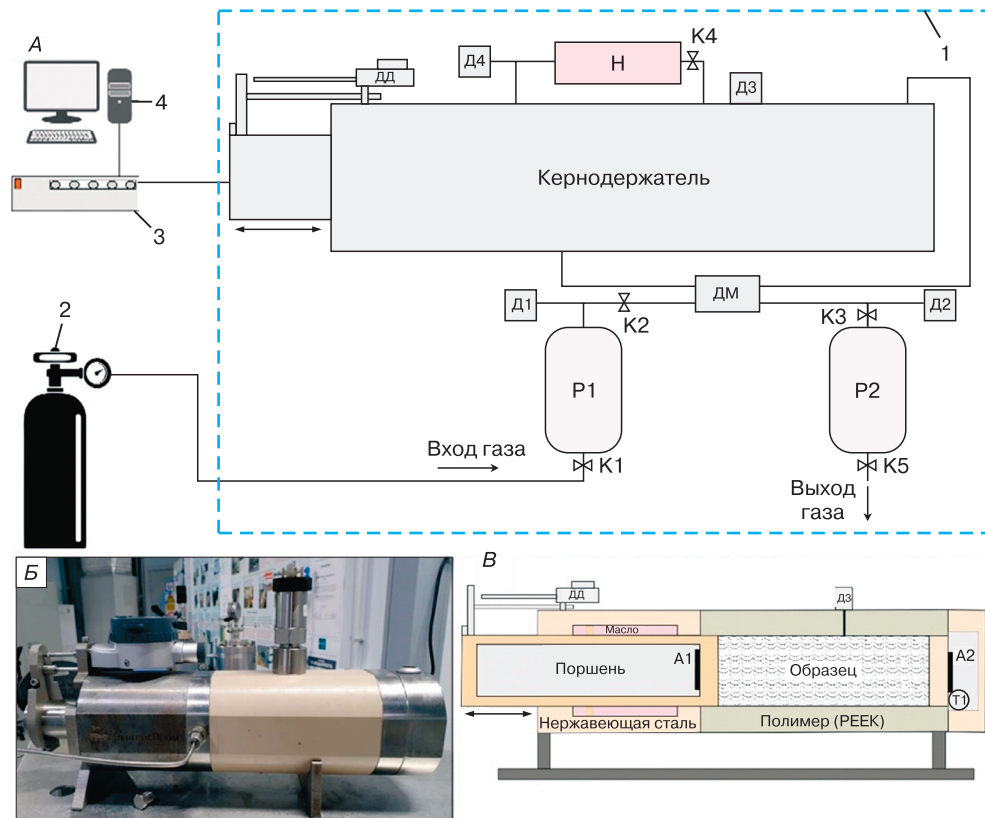


Рис. 1. Схема используемого оборудования:

А – общая схема фильтрационной установки: 1 – климатическая камера Binder, 2 – баллон с газом, 3 – АЦП (аналого-цифровой преобразователь), 4 – компьютер; Б – внешний вид кернодержателя в собранном виде; В – схема кернодержателя. Пояснения см. в тексте.

Система для изучения фильтрации газа также включает два газовых ресивера объемом 150 см^3 (P1, P2) с подключенными датчиками давления (Д1, Д2). Контроль перепада давления на образце осуществляется дифференциальным манометром ДМ, для записи значений порового давления при отключенной системе фильтрации используется датчик давления Д3. Определение коэффициента газопроницаемости образца производится методом спада импульса, для чего после подачи газа из баллона в первом ресивере создается избыток давления (до 0.5 МПа), а затем открывается мембранный кран К2 и фиксируется изменение давлений Д1, Д2, ДМ во времени. При изучении низкопроницаемых образцов коэффициент газопроницаемости определяется при закрытом клапане К3 для снижения времени фильтрации газа. Управление клапанами К2 и К3 производится через программу записи и управления, установленную на компьютер.

Все датчики давления тарируются с точностью 0.005 МПа во всем диапазоне рабочих давлений с использованием высокоточного цифрового манометра Crystall.

В поршне кернодержателя и в неподвижном торце установлены ультразвуковые приемник и генератор (A1, A2), обеспечивающие определение скоростей продольных и поперечных упругих волн (см. рис. 1, В). Также в неподвижном торце установлен температурный датчик, фиксирующий изменение температуры образца с точностью до 0.1°C .

Фильтрационная установка помещается в климатическую камеру Binder МК240, позволяющую поддерживать температуру с точностью до 0.1°C в широком диапазоне температур ($-40...+180^\circ \text{C}$).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для экспериментов были разработаны процедуры проведения испытаний, включающие три основных этапа (рис. 2):

I. подготовка грунтовых образцов с необходимыми параметрами влажности/льдистости, плотности;

II. создание необходимых пластовых условий в экспериментальной установке и проведение

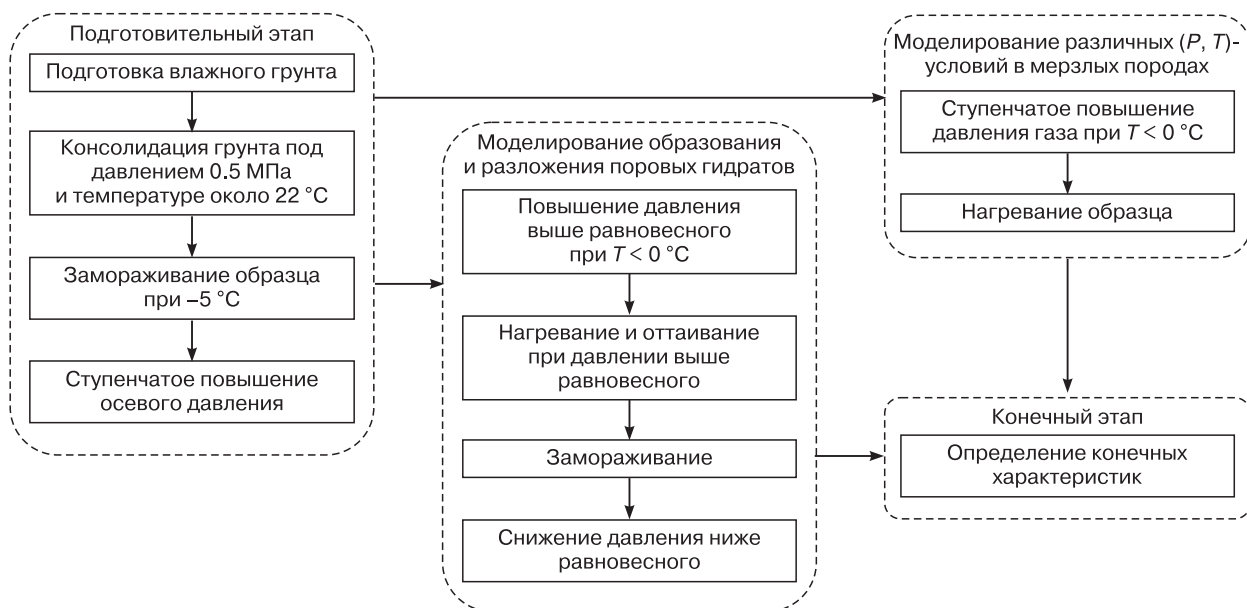


Рис. 2. Основные этапы проведения фильтрационных испытаний.

фильтрационных испытаний в условиях высоких градиентов давления;

III. завершение эксперимента и обработка экспериментальных данных.

На подготовительной стадии фильтрационных испытаний основной задачей является получение грунтового образца с требуемыми характеристиками влажности, плотности и льдистости. На начальном этапе готовится сухая навеска исследуемого грунта с известными характеристиками гранулометрического и минерального состава. Далее задается необходимая влажность путем смешивания навески грунта с определенным количеством дистиллированной воды (для песков) или ледяной крошки (для глинистых грунтов). Затем методом послойного уплотнения приготовленная навеска грунта набивается в кернодержатель, который далее помещается в климатическую камеру и подключается к установке. В процессе заморозки фиксируются изменения длины образца с помощью системы регистрации линейных деформаций, что позволяет оценить изменение некоторых грунтовых характеристик.

На этапе создания пластовых условий и проведения фильтрационных испытаний выделяются два направления: 1) исследование мерзлых образцов при различных термобарических условиях, включая их оттаивание и последующее промерзание; 2) исследование грунтовых образцов в условиях образования и разложения поровых гидратов метана.

В первом случае исследование газопроницаемости мерзлых образцов проводится в зависимости от термобарических условий, грунтовых

характеристик, в том числе содержания льда и незамерзшей воды. Измерение проницаемости грунтовых образцов происходит в условиях изменения давления, нагревания и охлаждения, при контроле деформаций образцов и изменений их пористости.

Во втором случае оценка газопроницаемости грунтовых образцов выполняется при давлениях выше равновесного, когда происходят фазовые переходы лед(вода)–гидрат метана, а также в условиях диссоциации порового гидрата метана в мерзлых образцах при понижении давления ниже равновесного, когда наблюдается самоконсервация газогидратных образований (см. рис. 2). В качестве гидратообразующего газа в этих фильтрационных испытаниях использовался метан с чистотой $\geq 99.99\%$.

Во время заключительного этапа фильтрационных испытаний давление газа постепенно снижается до атмосферного, далее понижается осевое давление на мерзлый образец, который извлекается из кернодержателя. После этого мерзлый образец раскалывается вдоль на две равные части для визуального изучения структурно-текстурных особенностей. Затем производится послойная разделка этих частей для определения влажности по всей длине образца.

В качестве объекта исследования в фильтрационных экспериментах использовались два типа грунта – природный нарушенного сложения и модельный. Природный грунт был представлен песком 1, отобранном в мерзлых морских отложениях (mQ3) в пределах Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения на Ямале (глубина отбора 36–46 м). Модельный грунт состоял из

Таблица 1. Гранулометрический и минералогический состав исследуемых грунтов

Грунт	Распределение по размеру (мм) частиц*, %						Наименование по [ГОСТ 25100-2020]	Минералогический состав, %
	1.0–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.001	<0.001		
Песок 1	0.2	29.1	62.3	2.4	5.8	1.2	Песок мелкий	Кварц 74.1 Альбит 12.8 Ортоклаз 10.0
Песок 2	0	3.1	84.8	10.8	1.3	0	Песок мелкий	Кварц >90
Монтморилло- нитовая глина	0	0	0.2	0.1	46.2	53.5	Глина тяжелая	Монтмориллонит >90

* Данные распределения частиц размером <0.001 мм приведены согласно классификации В.В. Охотина.

Таблица 2. Основные характеристики, получаемые при проведении фильтрационных экспериментов

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Методика
Относительная деформация	ε	д.е.	[Грунтоведение, 2005]
Пористость	n	%	
Водонасыщенность (степень влажности)	S_w	%	
Льдонасыщенность	S_i	%	
Гидратонасыщенность	S_h	%	PVT-метод
Коэффициент гидратности	K_h	д.е.	[Чувиллин, Гурьева, 2009]
Скорость продольных волн	V_p	м/с	[ГОСТ 21153.7-75]
Скорость поперечных волн	V_s	м/с	
Коэффициент газопроницаемости	K_g	мД	[API RP 40, 1998]

смеси кварцевого песка 2 с добавлением 25 % монтмориллонитовой глины от массы данного песка. Гранулометрический и минералогический состав грунтов, использованных в экспериментах, представлен в табл. 1.

В ходе фильтрационных испытаний для грунтовых образцов определялись и рассчитывались различные характеристики, в том числе их изменение во времени (табл. 2).

Эти характеристики описывают изменения относительной деформации грунтового образца, его пористости, степени заполнения пор водой, льдом, гидратом, а также изменения акустических параметров (V_p/V_s) и газопроницаемости в ходе эксперимента. Подробные расчетные формулы некоторых из этих характеристик представлены в работах [Чувиллин и др., 2020; Chuvilin et al., 2022].

Таким образом, появляется возможность с помощью модернизированной фильтрационной установки не только определять газопроницаемость мерзлых, талых и гидратонасыщенных отложений, но и получать информацию о линейных деформациях грунтовых образцов в ходе экспериментов. Это позволяет с более высокой точностью определять пористость и степень заполнения пор льдом, гидратом и незамерзшей водой. Скорости упругих волн также являются косвенным признаком, который помогает отслеживать изменения в образце при уплотнении, при переходе жидкой фазы воды в лед или гидрат, а также сокращение или увеличение содержания незамерзшей воды

при изменении температуры, при которой происходят фильтрационные испытания.

Разработанный алгоритм фильтрационных испытаний грунтовых образцов позволяет экспериментально моделировать широкий диапазон термобарических условий, характерных как для приповерхностного, так и для более глубинного залегания мерзлых и гидратосодержащих пород.

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

В рамках проведения методических исследований по моделированию фильтрации газа в мерзлых породах при их нагревании было выполнено два эксперимента. В качестве объекта исследования в экспериментах использовалась модельная песчано-глинистая смесь, приготовленная из кварцевого песка (песок 2) нарушенного сложения с преобладающей фракцией 0.1–0.5 мм с добавкой частиц монтмориллонитовой глины (25 %).

В первом методическом эксперименте М1 моделировались условия, когда возможен газовый прорыв через мерзлый образец при давлении 2 МПа, и оценивалась критическая температура, при которой возможен такой прорыв. Исходная весовая влажность грунта задавалась равной 17.8 %. Пористость приготовленного образца составила 0.34 при плотности скелета грунта 1.76 г/см³. В мерзлом состоянии грунтовой образец имел объемную льдистость около 35 %.

Перед фильтрационными испытаниями образец замораживался при температуре -5°C с осевой нагрузкой 0.5 МПа , затем подвергался нагреванию до -3.4°C с выдерживанием при данной температуре в течение 6 ч . После этого проводилось ступенчатое нагружение образца в условиях одностороннего сжатия и поднятие давления газа до значения осевого (2 МПа). На начальной стадии эксперимента при уплотнении в процессе нагружения P_m до 0.5 МПа и последующей заморозке с дополнительным нагружением до 2 МПа происходило незначительное изменение относительной линейной деформации образца, которое не превышало 0.02% . В дальнейшем замороженный образец выдерживался при заданных термобарических условиях в течение 12 ч , в ходе которых производилось наблюдение за давлением газа. За это время исследуемый образец оставался непроницаемым для газа, так как не изменялось давление на входе (P_1) и выходе (P_2) из образца (рис. 3, а). Далее начиналось медленное нагревание образца со скоростью около $0.1^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. В ходе нагревания было установлено, что при достижении критической температуры $T_{\text{cr}} = -0.3^{\circ}\text{C}$ начался процесс фильтрации газа, который привел к снижению первоначального перепада газового давления между торцами образца P_1 и P_2 до 0.4 МПа . В этот момент давление на входе в образец (P_1) составляло 1.16 МПа , а на выходе (P_2) – 0.75 МПа . При этом была зафиксирована относительная деформация ε до 0.23% (см. рис. 3, б). Следует отметить, что фильтрация газа через мерзлый образец началась при критической тем-

пературе, которая была на 0.1°C ниже температуры оттаивания для данного грунта ($T_{\text{th}} = -0.2^{\circ}\text{C}$).

Этот процесс, по-видимому, связан с резким увеличением содержания незамерзшей воды вблизи температуры оттаивания. В этих условиях ледяной компонент в мерзлом грунте перестает быть единым жестким цементом и появляется возможность фильтрации флюидов за счет перераспределения воды в порах и формирования каналов фильтрации. С началом фильтрации фиксировались значительные деформации уплотнения образца, а дальнейшее прекращение фильтрации газа обусловлено уплотнением образца и закупориванием каналов фильтрации.

Таким образом, в ходе эксперимента М1 было выявлено, что фильтрация газа через льдонасыщенный грунт при перепаде газового давления на торцах мерзлого образца до 2 МПа возможна лишь в области высоких отрицательных температур, близких к температуре оттаивания, когда под действием газа происходит отжатие воды, появляющейся при плавлении порового льда, а также возникновение определенных структурных преобразований, приводящих к формированию некоторых каналов фильтрации газа в оттаивающей породе.

В ходе второго методического эксперимента рассматривалось влияние нагревания на изменение газопроницаемости в мерзлом образце с меньшей начальной влажностью по сравнению с образцом в опыте М1. Начальная весовая влажность образца М2 составляла 16.5% при плотности скелета $0.76\text{ г}/\text{см}^3$, пористости 0.34 и объемной льдистости около 32% .

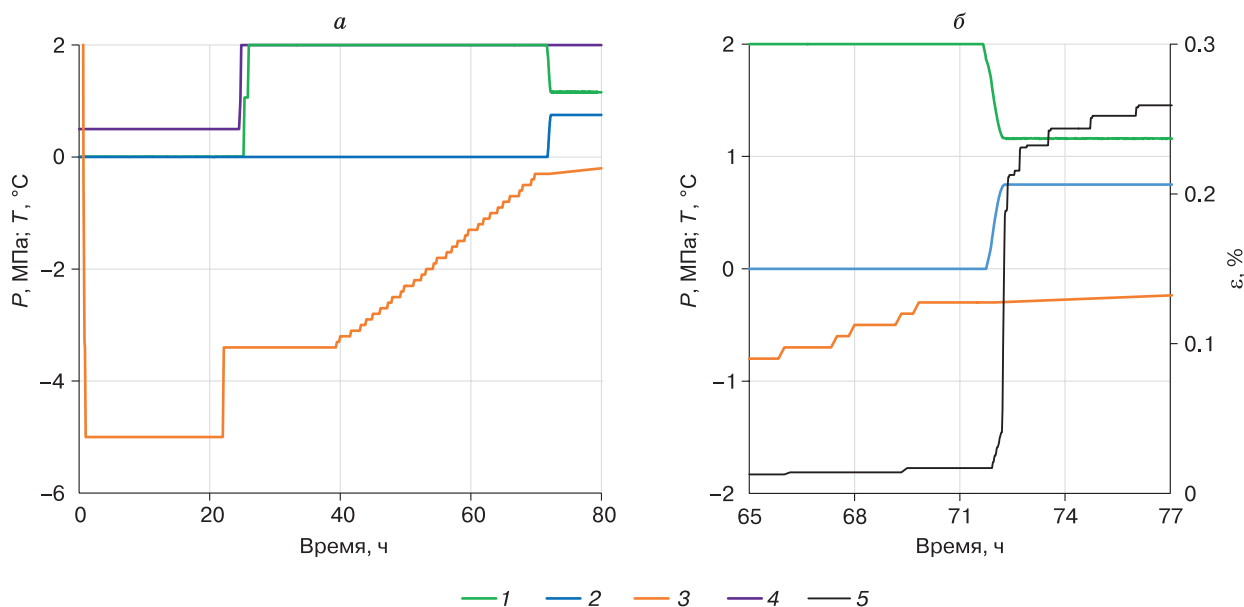


Рис. 3. Изменение термобарических условий в ходе эксперимента (а) и при достижении фильтрации газа в образце М1 (б).

1 – P_1 ; 2 – P_2 ; 3 – T ; 4 – P_m ; 5 – ε .

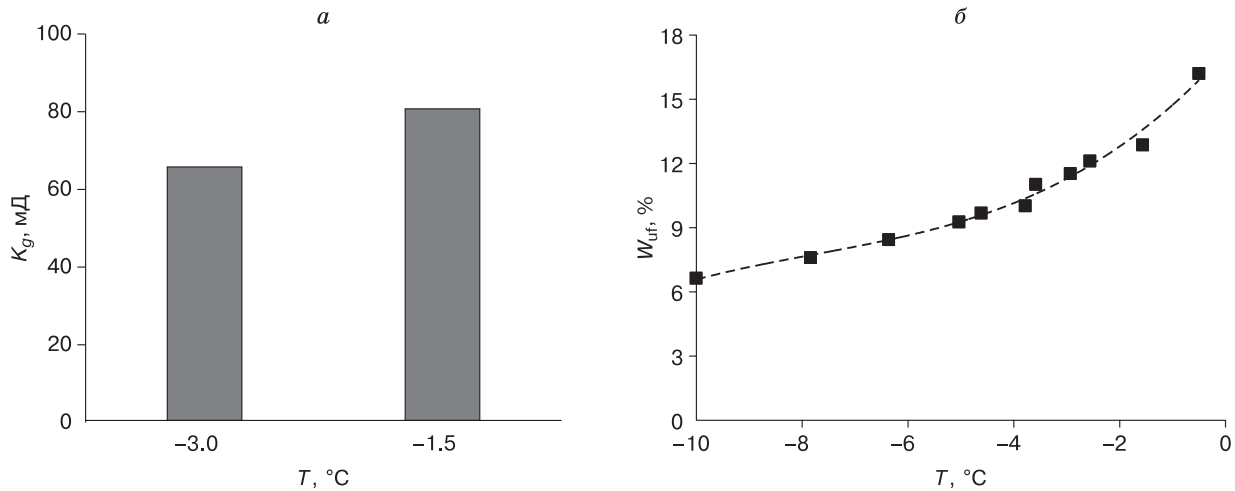


Рис. 4. Влияние повышения отрицательной температуры на изменение газопроницаемости K_g (а) и содержание незамерзшей воды W_{uf} в образце М2 (б).

Начальная стадия подготовки образца с уплотнением и заморозкой была аналогична предыдущему эксперименту. Газопроницаемость образца оценивалась при двух отрицательных температурах (-3 и -1.5 °C). При начальной температуре -3 °C газопроницаемость мерзлого образца составляла 65.26 мД. Последующий нагрев данного образца до -1.5 °C привел к повышению газопроницаемости (на 23 %) до 80.21 мД (рис. 4, а). Также при нагреве производилась оценка изменения скоростей продольных волн. Было установлено, что нагрев с -3 до -1.5 °C привел к снижению V_p с 2630 до 2420 м/с.

Для указанного грунта было оценено содержание незамерзшей воды в широком интервале отрицательных температур (-10 ... -0.5 °C) потенциометрическим методом (см. рис. 4, б) [Chuvilin et al., 2022]. На основе полученных результатов можно отметить, что нагревание от -10 до -0.5 °C приводит к значительному увеличению незамерзшей воды в исследуемом образце с 6.6 до 16 %. В диапазоне температур, при которых сделана оценка K_g и V_p , увеличение W_{uf} составило с 11 до 13 %.

Таким образом, в данном эксперименте рост газопроницаемости и снижение скоростей продольных волн при нагревании мерзлого образца в области отрицательных температур связаны с уменьшением в поровом пространстве содержания льда, блокирующего каналы фильтрации газа.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ

Были выполнены методические исследования по оценке изменения газопроницаемости песчаного образца при образовании и разложении порового гидрата. Они сопровождались определением деформаций образца, а также измерением ско-

ростей продольных волн в образце. Для приготовления образца использовался песчаный грунт (песок 1), который характеризовался низкой степенью засоленности (не более 0.05 %). Влажность грунтового образца задана 14 %. На начальной стадии фильтрационного эксперимента навеска песка с заданной влажностью помещалась в кернодержатель установки и уплотнялась при осевом давлении 0.5 МПа и комнатной температуре. Полученный песчаный образец имел плотность скелета 1.69 г/см³ и пористость 0.36. Потом образец замораживался при температуре -5 °C, после чего он дополнительно уплотнялся при осевом давлении 4.5 МПа. В мерзлом состоянии насыщенность образца льдом (S_i) составляла 64 %.

Гидратонасыщение в мерзлом образце началось при температуре -5 °C и медленной закачке охлажденного CH_4 до достижения давления 3.5 МПа. При данной температуре образец выдерживался в течение 24 ч и далее производился его нагрев до $+1$ °C. Положительная температура ($+1$ °C) поддерживалась в течение 3 ч, после чего образец замораживался при -5 °C, и гидратообразование происходило при этой температуре в течение 16 ч.

Следующая стадия эксперимента характеризовалась плавным снижением давления CH_4 в образце до атмосферного при фиксированной температуре -5 °C, при этом осуществлялось наблюдение за кинетикой диссоциации порового гидрата с периодической оценкой газопроницаемости исследуемого образца. После затухания процесса диссоциации порового гидрата песчаный образец извлекался из кернодержателя и определялись конечные характеристики.

На начальном этапе эксперимента, после заморозки и нагружения образца, скорости продоль-

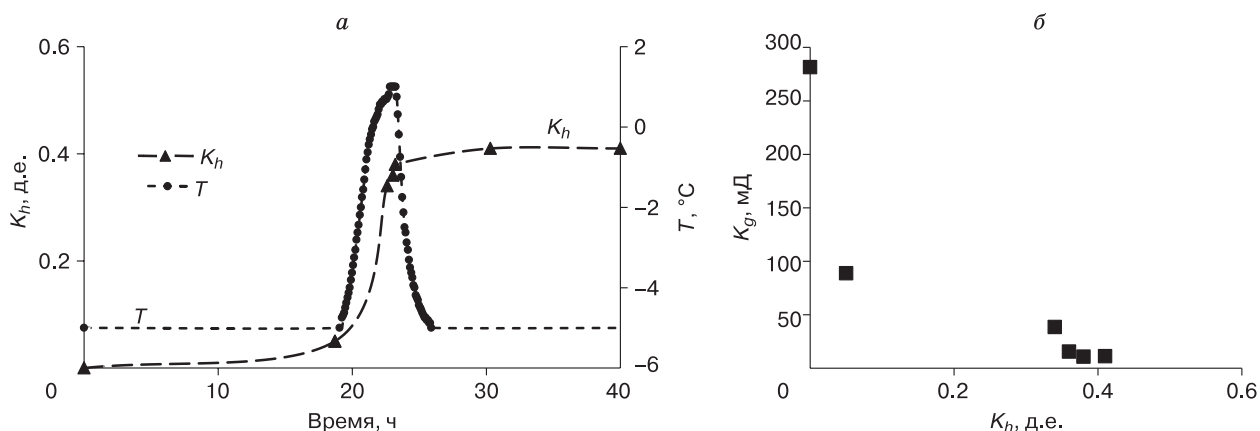


Рис. 5. Изменение температуры T и коэффициента гидратности K_h во времени (а) и зависимость газопрооницаемости K_g от степени перехода поровой воды в гидрат (б) на стадии гидратонасыщения.

ных волн составляли 3690 м/с, а газопрооницаемость нагруженного мерзлого образца до стадии гидратонасыщения равна 281.46 мД.

Спустя 24 ч после закачки метана в мерзлый образец до давления 3.5 МПа при постоянной температуре -5°C отмечалось снижение газопрооницаемости в 2.6 раза до значений 88.88 мД при переходе в гидрат 5 % порового льда. На данном этапе относительная линейная деформация образца увеличилась до 0.6 %, а V_p немного снизилась и составила 3480 м/с. Дальнейшее нагревание образца до $+1^\circ\text{C}$ привело к активизации процесса перехода поровой воды в гидрат (рис. 5, табл. 3).

В первый час нагревания степень перехода поровой воды в гидрат увеличилась практически на порядок, т. е. коэффициент гидратности составил 0.38 (см. рис. 5, а). Оттаивание также привело к дополнительному уплотнению образца и к относительной деформации около 0.7 % (см. табл. 3). Далее, при гидратонасыщении талого образца и после заморозки, коэффициент гидратности и относительная деформация образца практически не менялись. При переходе порового льда в воду наблюдалось снижение V_p на 32 %. Некоторое увеличение гидратонасыщенности образца в талом состоянии практически не повлияло на значение скорости продольных волн, которое перед заморозкой составляло 2340 м/с.

Таблица 3. Изменение характеристик песчаного образца во времени в условиях гидратонасыщения

Время, ч	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \%$	K_h , д.е.	K_g , мД	V_p , м/с
0	-5.0	0	0	281.46	3690
18.7	-5.0	0.6	0.05	88.88	3480
22.6	0.7	0.69	0.34	38.60	2370
23.03	0.9	0.69	0.36	15.62	2320
23.2	0.9	0.69	0.38	10.85	2340
30.3	-5.0	0.73	0.41	11.21	3800

Оттаивание образца привело к росту линейных деформаций и активизации перехода поровой воды в гидрат, что выражалось в значительном снижении газопрооницаемости (см. рис. 5, б). После оттаивания образца газопрооницаемость снизилась до 38.6 мД при $K_h = 0.34$, далее проницаемость снизилась более чем в 3 раза и составила 10.85 мД при $K_h = 0.38$. Дальнейшее замораживание гидратонасыщенного образца практически не повлияло на проницаемость. В конце этапа гидратонасыщения газопрооницаемость образца при температуре -5°C составляла 11.21 мД при переходе 41 % поровой воды в гидрат, при этом скорость продольных волн немного увеличилась по сравнению с начальными значениями и составила 3800 м/с (см. табл. 3).

На следующем этапе давление газа в барокамере снижали до атмосферного (0.1 МПа) и наблюдали за характеристиками образца в условиях диссоциации порового гидрата при постоянной отрицательной температуре -5°C (табл. 4).

На стадии диссоциации скорость разложения порового гидрата в мерзлом песчаном образце

Таблица 4. Изменение газопрооницаемости и скорости продольных волн в мерзлом гидратонасыщенном песчаном образце при диссоциации порового гидрата

Время, ч	K_h , д.е.	K_g , мД	V_p , м/с
0	0.41	37.58	3800
0.65	0.37	42.60	3890
1.32	0.35	49.38	3890
1.77	0.33	50.40	3890
3.72	0.31	45.03	3900
4.73	0.29	41.86	3900
23.17	0.10	11.05	3800

Примечание. Атмосферное давление и температура -5°C .

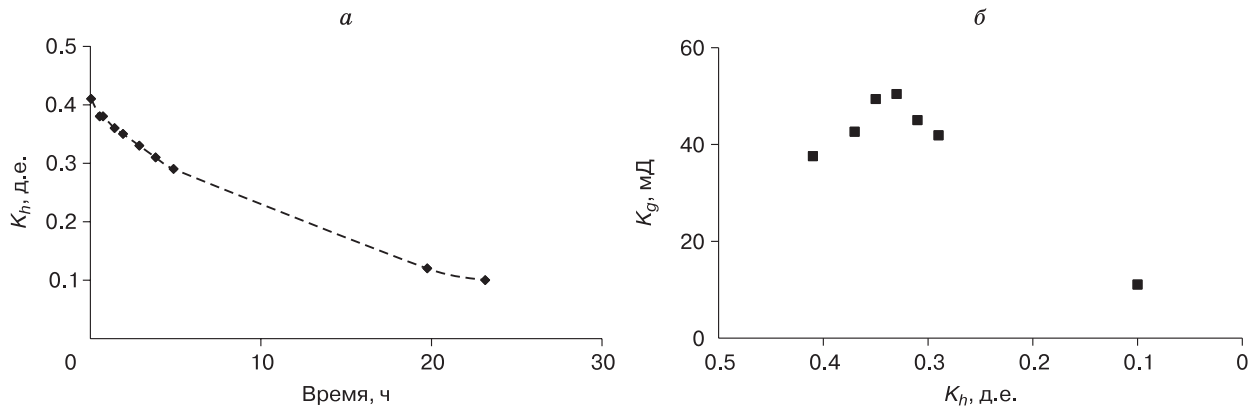


Рис. 6. Изменение коэффициента гидратности K_h во времени (а) и зависимость газопроницаемости K_g от K_h (б) в гидратосодержащем образце в процессе диссоциации при температуре -5°C и атмосферном давлении.

имела экспоненциальный характер (рис. 6, а). Так, в течение первого часа коэффициент гидратности снизился на 10 %, через 4 ч падение составило 25 %, а через сутки K_h снизился на 75 % и составил 0.1.

При этом за период наблюдений коэффициент относительной линейной деформации несколько увеличивался с 0.73 до 0.80 %, а пористость образца практически не изменилась.

Измерения газопроницаемости образца в процессе диссоциации после сброса давления CH_4 до 0.1 МПа показали, что в течение первых двух часов фиксировался рост газопроницаемости (на 34 %) с 37.58 до 50.40 мД (см. табл. 4). Через сутки наблюдений коэффициент газопроницаемости снизился в 4.6 раза и составил 11.05 мД при остаточной доле воды в гидратной форме (K_h) около 0.1 (см. рис. 6, б). При этом указанное снижение газопроницаемости происходило по экспоненциальной кривой начиная с $K_h = 0.33$. Подобный характер изменения газопроницаемости в процессе диссоциации порового гидрата может быть связан, с одной стороны, с увеличением пустотности мерзлого образца при переходе гидрата в лед, что особенно проявляется на начальной стадии диссоциации [Chuvilin et al., 2021], а с другой – с некоторым уплотнением грунтового образца под действием осевой нагрузки и смыканием межпоровых каналов фильтрации. Однако это предположение требует дальнейших исследований, например, с использованием микротомографических наблюдений.

ВЫВОДЫ

Разработана оригинальная методика экспериментального моделирования процессов фильтрации газа в льдо- и гидратосодержащих породах при различных температурах и давлениях, кото-

рая включает: создание специального кернодержателя с одноосным сжатием образца и с возможностью контроля его деформаций, измерения скоростей акустических волн, а также работы при высоких градиентах газового давления; создание алгоритма и отработка на фильтрационной установке оптимальных условий проведения эксперимента, моделирующих широкий диапазон глубин залегания мерзлых и гидратосодержащих пород и возникающих перепадов давлений.

Разработанный экспериментальный комплекс позволяет исследовать фильтрационные процессы в льдо- и гидратосодержащих грунтах в условиях фазовых переходов и структурных преобразований.

В рамках методических исследований были выполнены работы по оценке фильтрации газа в мерзлых породах с различной начальной влажностью (льдистостью) в спектре отрицательных температур. Было показано, что при перепаде газового давления на торцах мерзлого грунта около 2 МПа изначально непроницаемый мерзлый грунт с высокой влажностью становится проницаемым при высоких отрицательных температурах, близких к температуре оттаивания. Фильтрационные испытания на песчано-глинистом образце с неполной степенью заполнения пор льдом показали, что при повышении температуры от -3 до -1.5°C наблюдается рост газопроницаемости на 23 %, который связан с увеличением содержания незамерзшей воды и освобождением каналов фильтрации ото льда.

При исследовании газопроницаемости мерзлого гидратосодержащего песка в цикле оттаивания и промерзания в условиях гидратообразования было отмечено закономерное ее снижение более чем в 8 раз. При диссоциации порового гидрата метана в мерзлом песке при отрицательной температуре выявлено разнонаправленное изме-

нение газопроницаемости во времени: возрастание в начальной период и экспоненциальное снижение в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (гранты № 22-77-00074, 22-67-00025).

Литература

- Ананян А.А., Арутюнян Н.А., Мазуров В.А., Сильвестров Л.К. О проницаемости мерзлых пород // Мерзлот. исслед., 1972, № 12, с. 205–209.
- Арз Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 42–50.
- Бадю Ю.Б. Основы концепции субаквального криолитоге-неза морских отложений газоносных структур полуострова Ямал // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 76–84.
- Бадю Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М., Науч. мир, 2018, 232 с.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В. и др. Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика, 2019, № 4 (36), с. 52–68.
- Буданцева Н.А. Газопроявления в мерзлых породах // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 1. Криосфера Харасавейского газоконденсатного месторождения. Тюмень; СПб., Недра, 2006, с. 235–248.
- ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. М., Изд-во стандартов, 1975, 15 с.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2020, 41 с.
- Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 1024 с.
- Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. М., Недра, 1992, 236 с.
- Кузин И.Л. О приоритете в изучении поверхностных газопоявлений в Западной Сибири // Геология и геофизика, 1990, № 3, с. 142–144.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др. Метан в вечномерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 3, с. 23–41.
- Старобинец И.С., Мурогова Р.Н. Экранирующая и проводящая роль пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам // Геология нефти и газа, 1985, № 1, с. 24–27.
- Хименков А.Н., Власов А.Н., Брушков А.В. и др. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород. М., Геоинфо, 2021, 288 с.
- Чувиллин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 3, с. 70–79.
- Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И., Давлетшина Д.А., Жмаев М.В. Влияние гидратообразования на изменение газопроницаемости мерзлых песчаных пород // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 2, с. 40–47.
- Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И., Сакле М. Влияние влаго-содержания на газопроницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 3, с. 71–78.
- Чувиллин Е.М., Якушев В.С., Перлова Е.В., Кондаков В.В. Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (п-ов Ямал) // Докл. РАН, 1999, т. 369, № 4, с. 522–524.
- Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
- API RP 40. Recommended practices for core analysis. API, Washington DC, USA, 1998, 200 p.
- Are F.E. The problem of the emission of deep-buried gases into the atmosphere. In: Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources / R. Paeppe, V.P. Melnikov, E. van Overloop, V.D. Gorokhov (eds.). Dordrecht, Netherlands, Springer, 2001, p. 497–509.
- Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Seyakha catastrophic blowout and explosion of gas from the permafrost in the Arctic, Yamal Peninsula // Cold Reg. Sci. Technol., 2022, vol. 196, 103507.
- Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // Eng. Geol., 1979, vol. 13, p. 73–92.
- Cheng F., Wu Z., Sun X. et al. Compression-induced dynamic change in effective permeability of hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation by depressurization // Energy, 2023, vol. 264, 126137.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost // Geosciences, 2018, vol. 8 (12), p. 431.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Mukhametdinova A.Z. et al. Freezing point and unfrozen water contents of permafrost soils: Estimation by the water potential method // Cold Reg. Sci. Technol., 2022, vol. 196, 103488.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Zhmaev M.V. Gas permeability of sandy sediments: Effects of phase changes in pore ice and gas hydrates // Energy & Fuels, 2021, vol. 35 (9), p. 7874–7882.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian arctic // Geosciences, 2020a, vol. 10 (10), p. 383.
- Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A gas-emission crater in the Erkuta river valley, Yamal Peninsula: Characteristics and potential formation model // Geosciences, 2020b, vol. 10 (5), p. 170.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia // Polarforschung, 2000, vol. 68, p. 215–219.
- Dai S., Seol Y. Water permeability in hydrate-bearing sediments: A pore-scale study // Geophys. Res. Lett., 2014, vol. 41 (12), p. 4176–4184.
- Daigle H. Relative permeability to water or gas in the presence of hydrates in porous media from critical path analysis // J. Petrol. Sci. Eng., 2016, vol. 146, p. 526–535.
- Delli M.L., Grozic J.L.H. Experimental determination of permeability of porous media in the presence of gas hydrates // J. Petrol. Sci. Eng., 2014, vol. 120, p. 1–9.
- Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas – emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes // Permafr. Periglac. Process., 2019, vol. 30, p. 146–162.
- Hauge L.P., Gautepluss J., Høyland M.D. Pore-level hydrate formation mechanisms using realistic rock structures in high pressure silicon micromodels // Int. J. Greenh. Gas Control., 2016, vol. 53, p. 178–186.

- Jaiswal N.J., Westervelt J.V., Patil S.L. et al.** Phase behavior and relative permeability of gas-water-hydrate system // *Aapg. Hedberg. Conf. "Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards"* (Vancouver, BC, Canada, Sept. 12–16, 2004). Vancouver, 2004, p. 26–35.
- Jin G., Xu T., Xin X. et al.** Numerical evaluation of the methane production from unconfined gas hydrate-bearing sediment by thermal stimulation and depressurization in Shenhu area, South China Sea // *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, vol. 33, p. 497–508.
- Johnson A., Patil S., Dandekar A.** Experimental investigation of gas-water relative permeability for gas hydrate bearing sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope // *Mar. Pet. Geol.*, 2011, vol. 28, p. 419–426.
- Kang D.H., Yun T.S., Kim K.Y., Jang J.** Effect of hydrate nucleation mechanisms and capillarity on permeability reduction in granular media // *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, p. 9018–9025.
- Kizyakov A.I., Zimin M.V., Sonyushkin A.V. et al.** Comparison of gas emission crater geomorphodynamics on Yamal and Gydan peninsulas (Russia), based on repeat very-high-resolution stereopairs // *Remote Sens.*, 2017, vol. 9 (10), p. 1023.
- Kleinberg R.L., Flaum C., Griffin D.D.** Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, 2508.
- Kneafsey T.J., Tomutsa L., Moridis G.J. et al.** Methane hydrate formation and dissociation in a partially saturated core-scale sand sample // *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2007, vol. 56, p. 108–126.
- Kraev G., Rivkina E., Vishnivetskaya T. et al.** Methane in gas shows from boreholes in epigenetic permafrost of Siberian Arctic // *Geosciences*, 2019, vol. 9 (2), p. 67.
- Kraev G., Schulze E., Kholodov A. et al.** Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // *Atmosphere*, 2017, vol. 8, p. 105.
- Lei X., Yao Y., Sun X. et al.** Permeability change with respect to different hydrate saturation in clayey-silty sediments // *Energy*, 2022, vol. 254, 124417.
- Li D., Ren S., Zhang L., Liu Y.** Dynamic behavior of hydrate dissociation for gas production via depressurization and its influencing factors // *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2016, vol. 146, p. 552–560.
- Li G., Xu Z.L., Li X.S. et al.** Permeability investigation and hydrate migration of hydrate-bearing silty sands and silt // *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2021, vol. 89, 103891.
- Lu Z., Tang S., Luo X. et al.** A natural gas hydrate–oil–gas system in the Qilian Mountain permafrost area, northeast of Qinghai-Tibet Plateau // *China Geol.*, 2020, vol. 3, p. 511–523.
- Masuda Y., Kurihara M., Ohuchi H.** A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates // *Proc. of the 4th Int. Conf. on Gas Hydrates* (Yokohama, 19–23 May 2002). Yokohama, Japan, 2002, p. 40–46.
- Minagawa H., Ohmura R., Kamata Y.** Water permeability measurements of gas hydrate-bearing sediments // *Proc. of the 5th Int. Conf. on Gas Hydrates* (Trondheim, 13–16 June 2005). Trondheim, Norway, 2005, p. 398–401.
- Minagawa H., Ohmura R., Takahashi T. et al.** Water permeability measurements of natural gas hydrate-bearing sediments obtained from Mallik 5L-38 // *Proc. of Mallik Int. Symposium: From Mallik to the Future* (Makuhari, 8–10 December 2003). Makuhari, Japan, 2003, p. 398–401.
- Olefeldt D., Turetsky M.R., Crill P.M., McGuire A.D.** Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones // *Glob. Change Biol.*, 2013, vol. 19, p. 589–603.
- Rezaee R., Saeedi A., Clennell B.** Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data // *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2012, vol. 88–89, p. 92–99.
- Ruan X., Song Y., Liang H. et al.** Numerical simulation of the gas production behavior of hydrate dissociation by depressurization in hydrate-bearing porous medium // *Energy & Fuels*, 2012, vol. 26, p. 1681–1694.
- Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A. et al.** Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: Implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission // *Geosciences*, 2020, vol. 10 (11), p. 450.
- Seyfried M.S., Murdock M.D.** Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil // *J. Hydrol.*, 1997, vol. 202, p. 95–107.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.** Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*, 2019, vol. 9 (6), p. 251.
- Vasiliev A.A., Melnikov V.P., Zadorozhnaia N.A. et al.** Methane content and emission in the typical tundra and the southern tundra of the Western Russian Arctic // *Dokl. Earth Sci.*, 2022, vol. 505, p. 506–511.
- Wang H., Liu W., Sun X. et al.** Experimental study on the gas permeability of marine sediments with various hydrate saturations and effective stresses // *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35 (21), p. 17479–17489.
- Wang P., Zhang X., Zhu Y. et al.** Effect of permafrost properties on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountains, Qinghai, Northwest China // *Environ. Science: Proc. Imp.*, 2014, vol. 16, p. 2711–2720.
- Wu Z., Li Y., Sun X. et al.** Experimental study on the gas phase permeability of montmorillonite sediments in the presence of hydrates // *Mar. Pet. Geol.*, 2018, vol. 91, p. 373–380.
- Yakushev V.** Environmental and technological problems for natural gas production in permafrost regions // *Energies*, 2023, vol. 16, 4522.
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M.** Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2000, vol. 31, p. 189–197.
- Zhao J., Zheng J., Li F., Yang M.** Gas permeability characteristics of marine sediments with and without methane hydrates in a core holder // *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2020, vol. 76, 103215.

References

- Ananyan A.A., Arutyunyan N.A., Mazurov V.A., Silvestrov L.K. On permeability of permafrost. *Merzlotnue Issledovaniya* [Permafrost Studies], 1972, No. 12, p. 205–209.
- Are F.E. The problem of hypogene gas-emission into atmosphere. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 1998, vol. II, No. 4, p. 42–50.
- Badu Y.B. Foundations of the conception of subequal cryolithogenesis of marine deposits of gas-bearing structures on the Yamal Peninsula. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, p. 65–72.
- Badu Y.B. *Kriogennaya tolshcha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyaniy gazovykh zalezhej na formirovanie i razvitie kriogennoj tolshchi* [Cryogenic thickness of Yamal gas-bearing structures. On the influence of gas deposits on the formation and development of cryogenic strata]. Moscow, Nauchnyi mir, 2018, 232 p. (in Russian).

- Bogoyavlensky V.I., Sizov O.S., Bogoyavlensky I.V. et al. Earth degassing in the Arctic: Comprehensive studies of the distribution of frost mounds and thermokarst lakes with gas blowout craters on the Yamal peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: ecology and economy], 2019, No. 4, p. 52–68.
- Budantseva N.A. Gas shows in permafrost. In: *Cryosphere of the Oil and Gas Condensate Fields of the Yamal Peninsula*. St. Petersburg, Nedra, vol. 1, p. 235–247 (in Russian).
- State Standard GOST 21153.7–75. Rocks. Method for determination of elastic longitudinal and diametrical waves rate spreading. Moscow, Izd-vo Standartov, 1975, 8 p. (in Russian).
- State Standard GOST 25100–2020. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2020, 41 p. (in Russian).
- Gruntovedenie [Soil Science]. V.T. Trofimov (ed.). Moscow, Moscow Univ. Press, 2005, 1024 p. (in Russian).
- Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Nature]. Moscow, Nedra, 1992, 236 p. (in Russian).
- Kuzin I.L. On the priority in the studies of land gas shows in Western Siberia. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1990, vol. 31, p. 142–144.
- Rivkina E.M., Kraev G.N., Krivushin K.V. et al. Methane in permafrost of Northeastern Arctic. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2006, vol. X, No. 3, p. 23–41.
- Starobinets I.S., Murogova R.N. Screen and conductive role of permafrost in respect to migrating hydrocarbons. *Geologiya Nefti i Gaza* [Oil and Gas Geology], 1985, No. 1, p. 24–27.
- Khimenkov A.N., Vlasov A.N., Brushkov A.V. et al. *Geosistemy gazonasyschennykh mnogoletnemorzlykh porod* [Geosystems of gas-saturated permafrost]. Moscow, Geoinfo, 2021, 288 p. (in Russian).
- Chuvilin E.M., Guryeva O.M. Experimental investigation of CO₂ gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2009, vol. XIII, No. 3, p. 70–79.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Davletshina D.A., Jmaev M.V. Influence of hydrate formation on gas permeability variations in frozen sands. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 2, p. 34–40.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Sacleux M. Influence of moisture content on permeability of frozen and unfrozen soils. *Earth's Cryosphere*, 2016, vol. XX, No. 3, p. 66–72.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V., Kondakov V.V. Gas component of permafrost within the Bovanenkovo gas condensate field (Yamal Peninsula). *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Earth Sciences], 1999, vol. 369, p. 522–524.
- Yakushev V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural Gas and Gas Hydrates in Permafrost]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (in Russian).
- API RP 40. Recommended practices for core analysis. API, Washington DC, USA, 1998, 200 p.
- Are F.E. The problem of the emission of deep-buried gases into the atmosphere. In: *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. R. Paepe, V.P. Melnikov, E. van Overloop, V.D. Gorokhov (eds.). Dordrecht, Netherlands, Springer, 2001, p. 497–509.
- Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R. et al. Seyakha catastrophic blowout and explosion of gas from the permafrost in the Arctic, Yamal Peninsula. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2022, vol. 196, 103507.
- Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Eng. Geol.*, 1979, vol. 13, p. 73–92.
- Cheng F., Wu Z., Sun X. et al. Compression-induced dynamic change in effective permeability of hydrate-bearing sediments during hydrate dissociation by depressurization. *Energy*, 2023, vol. 264, 126137.
- Chuvilin E., Bukhanov B., Davletshina D. et al. Dissociation and self-preservation of gas hydrates in permafrost. *Geosciences*, 2018, vol. 8 (12), p. 431.
- Chuvilin E.M., Bukhanov B.A., Mukhametdinova A.Z. et al. Freezing point and unfrozen water contents of permafrost soils: Estimation by the water potential method. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2022, vol. 196, 103488.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I., Zhmaev M.V. Gas permeability of sandy sediments: Effects of phase changes in pore ice and gas hydrates. *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35 (9), p. 7874–7882.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of gas emissions from permafrost in the Russian arctic. *Geosciences*, 2020a, vol. 10 (10), p. 383.
- Chuvilin E., Stanilovskaya J., Titovsky A. et al. A gas-emission crater in the Erkuta river valley, Yamal Peninsula: Characteristics and potential formation model. *Geosciences*, 2020b, vol. 10 (5), p. 170.
- Chuvilin E.M., Yakushev V.S., Perlova E.V. Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. *Polarforschung*, 2000, vol. 68, p. 215–219.
- Dai S., Seol Y. Water permeability in hydrate-bearing sediments: A pore-scale study. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, vol. 41 (12), p. 4176–4184.
- Daigle H. Relative permeability to water or gas in the presence of hydrates in porous media from critical path analysis. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2016, vol. 146, p. 526–535.
- Delli M.L., Grozic J.L.H. Experimental determination of permeability of porous media in the presence of gas hydrates. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2014, vol. 120, p. 1–9.
- Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas – emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes. *Permafr. Periglac. Process.*, 2019, vol. 30, p. 146–162.
- Hauge L.P., Gauteplass J., Høyland M.D. Pore-level hydrate formation mechanisms using realistic rock structures in high pressure silicon micromodels. *Int. J. Greenh. Gas Control.*, 2016, vol. 53, p. 178–186.
- Jaiswal N.J., Westervelt J.V., Patil S.L. et al. Phase behavior and relative permeability of gas-water-hydrate system. In: *Aapg. Hedberg. Conf. "Gas Hydrates: Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards"* (Vancouver, BC, Canada, Sept. 12–16, 2004). Vancouver, 2004, p. 26–35.
- Jin G., Xu T., Xin X. et al. Numerical evaluation of the methane production from unconfined gas hydrate-bearing sediment by thermal stimulation and depressurization in Shenhu area, South China Sea. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, vol. 33, p. 497–508.
- Johnson A., Patil S., Dandekar A. Experimental investigation of gas-water relative permeability for gashydrate-bearing sediments from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. *Mar. Pet. Geol.*, 2011, vol. 28, p. 419–426.
- Kang D.H., Yun T.S., Kim K.Y., Jang J. Effect of hydrate nucleation mechanisms and capillarity on permeability reduction in granular media. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, p. 9018–9025.
- Kizyakov A.I., Zimin M.V., Sonyushkin A.V. et al. Comparison of gas emission crater geomorphodynamics on Yamal and Gydan peninsulas (Russia), based on repeat very-high-resolution stereopairs. *Remote Sens.*, 2017, vol. 9 (10), p. 1023.

- Kleinberg R.L., Flaum C., Griffin D.D. Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, 2508.
- Kneafsey T.J., Tomutsa L., Moridis G.J. et al. Methane hydrate formation and dissociation in a partially saturated core-scale sand sample. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2007, vol. 56, p. 108–126.
- Kraev G., Rivkina E., Vishnivetskaya T. et al. Methane in gas shows from boreholes in epigenetic permafrost of Siberian Arctic. *Geosciences*, 2019, vol. 9 (2), p. 67.
- Kraev G., Schulze E., Kholodov A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere*, 2017, vol. 8, p. 105.
- Lei X., Yao Y., Sun X. et al. Permeability change with respect to different hydrate saturation in clayey-silty sediments. *Energy*, 2022, vol. 254, 124417.
- Li D., Ren S., Zhang L., Liu Y. Dynamic behavior of hydrate dissociation for gas production via depressurization and its influencing factors. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2016, vol. 146, p. 552–560.
- Li G., Xu Z.L., Li X.S. et al. Permeability investigation and hydrate migration of hydrate-bearing silty sands and silt. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2021, vol. 89, 103891.
- Lu Z., Tang S., Luo X. et al. A natural gas hydrate–oil–gas system in the Qilian Mountain permafrost area, northeast of Qinghai-Tibet Plateau. *China Geol.*, 2020, vol. 3, p. 511–523.
- Masuda Y., Kurihara M., Ohuchi H. A field-scale simulation study on gas productivity of formations containing gas hydrates. In: *Proc. of the 4th Int. Conf. on Gas Hydrates* (Yokohama, 19–23 May 2002). Yokohama, Japan, 2002, p. 40–46.
- Minagawa H., Ohmura R., Kamata Y. Water permeability measurements of gas hydrate-bearing sediments. In: *Proc. of the 5th Int. Conf. on Gas Hydrates* (Trondheim, 13–16 June 2005). Trondheim, Norway, 2005, p. 398–401.
- Minagawa H., Ohmura R., Takahashi T. et al. Water permeability measurements of natural gas hydrate-bearing sediments obtained from Mallik 5L-38. In: *Proc. of Mallik Int. Symposium: From Mallik to the Future* (Makuhari, 8–10 Dec. 2003). Makuhari, Japan, 2003, p. 398–401.
- Olefelt D., Turetsky M.R., Crill P.M., McGuire A.D. Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones. *Glob. Change Biol.*, 2013, vol. 19, p. 589–603.
- Rezaee R., Saeedi A., Clennell B. Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2012, vol. 88–89, p. 92–99.
- Ruan X., Song Y., Liang H. et al. Numerical simulation of the gas production behavior of hydrate dissociation by depressurization in hydrate-bearing porous medium. *Energy & Fuels*, 2012, vol. 26, p. 1681–1694.
- Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A. et al. Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: Implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission. *Geosciences*, 2020, vol. 10 (11), p. 450.
- Seyfried M.S., Murdock M.D. Use of air permeability to estimate infiltrability of frozen soil. *J. Hydrol.*, 1997, vol. 202, p. 95–107.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost–hydrate system and associated methane releases in the East Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*, 2019, vol. 9 (6), p. 251.
- Vasiliev A.A., Melnikov V.P., Zadorozhnaia N.A. et al. Methane content and emission in the typical tundra and the southern tundra of the Western Russian Arctic. *Dokl. Earth Sci.*, 2022, vol. 505, p. 506–511.
- Wang H., Liu W., Sun X. et al. Experimental study on the gas permeability of marine sediments with various hydrate saturations and effective stresses. *Energy & Fuels*, 2021, vol. 35 (21), p. 17479–17489.
- Wang P., Zhang X., Zhu Y. et al. Effect of permafrost properties on gas hydrate petroleum system in the Qilian Mountains, Qinghai, Northwest China. *Environ. Science: Proc. Imp.*, 2014, vol. 16, p. 2711–2720.
- Wu Z., Li Y., Sun X. et al. Experimental study on the gas phase permeability of montmorillonite sediments in the presence of hydrates. *Mar. Pet. Geol.*, 2018, vol. 91, p. 373–380.
- Yakushev V. Environmental and technological problems for natural gas production in permafrost regions. *Energies*, 2023, vol. 16, 4522.
- Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2000, vol. 31, p. 189–197.
- Zhao J., Zheng J., Li F., Yang M. Gas permeability characteristics of marine sediments with and without methane hydrates in a core holder. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2020, vol. 76, 103215.

*Поступила в редакцию 16 апреля 2024 г.,
после доработки – 21 августа 2024 г.,
принята к публикации 29 сентября 2024 г.*