

УДК 551.345

А.Н. Хименков¹, А.В. Кошурников², П.А. Соболев³**ФИЛЬТРАЦИЯ ГАЗА В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

*Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1*

*Sergeev Institut of Environmental Geoscience RAS, 101000, Moscow, Ulansky pereulok, 13, p. 3
Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Работа посвящена лабораторному изучению фильтрации газа в образцах льда с разной соленостью и мерзлых грунтов. Для этого на специально созданной установке мерзлые образцы подвергались напорному воздействию газа. Затем с помощью методов текстурных и структурных исследований в проходящем, отраженном и поляризованном свете изучали их строение. В ходе опытов удалось выявить процессы, сопровождающие фильтрацию газа во льдах с разной засоленностью и в мерзлом грунте, а также установить температурные диапазоны ее начала.

Ключевые слова: флюиды, фильтрация газа, газовые каналы, пластические деформации, разрывные деформации, криогенные текстуры, напорная фильтрация газа, фильтрационно-деформационный механизм.

The work is devoted to the laboratory study of gas filtration in samples of ice of various salinity and frozen soils. For this, in a specially designed installation, frozen samples were subjected to pressure gas. Then, using the methods of texture and structural studies in transmitted, reflected and polarized light, a study of their structure was carried out. During the experiments, it was possible to identify the processes accompanying gas filtration in ice of various salinity and frozen soil, as well as to establish the temperature ranges of its beginning

Key words: fluids, gas filtration, gas channels, plastic deformation, breaking strain, cryogenic textures, pressure filtration of gas, filtration and deformation mechanism.

Введение Согласно господствующим в настоящее время представлениям криолитозона — экран, препятствующий выходу подземного газа на поверхность. В.С. Якушев, проанализировавший огромный материал о фильтрации газа в многолетнемерзлых породах, пришел к заключению, что высокольдистые покровные отложения криолитозоны (верхние 40–50 м) практически непроницаемы для газа, даже идущего под напором из глубины [Якушев, 2009]. Для проницаемых песчаных прослоев внутри криолитозоны критическое значение льдонасыщенности порового пространства, при котором возможна фильтрация газа, может быть принято равным 60–70% от порового объема. Если льдонасыщенность порового пространства больше этой величины, то порода становится непреодолимой для фильтрации природного газа [Якушев, 2009; Чувилин и др., 2016].

Эта позиция, несомненно, верна, если рассматривать область низких отрицательных значений температуры. Но при приближении температуры мерзлых грунтов к области фазовых переходов их свойства меняются. Уменьшается прочность, увеличивается количество незамерзшей воды

(особенно в засоленных грунтах), вследствие температурных деформаций развиваются ослабленные зоны, увеличивается давление в газовых включениях. В этом случае уже при незначительном напоре может наблюдаться фильтрация газа сквозь подземные льды и мерзлые грунты [Хименков и др., 2018; Хименков, Станиловская, 2018]. Для криолитозоны, как и для Земли в целом, возможность фильтрации газа из мерзлых пород еще до их оттаивания имеет огромное значение. Вклад выделившихся непосредственно из мерзлых пород парниковых газов, в первую очередь метана и углекислого газа, в изменение климата не учитывается, а он может быть значительным. По мере освоения Арктики техногенное тепловое воздействие на многолетнемерзлые породы будет неуклонно возрастать. При этом фильтрация парниковых газов из мерзлой толщи под отепляющим техногенным воздействием на территориях месторождений углеводородов, расположенных в арктической зоне, может быть существенной.

Исследование перераспределения газа в многолетнемерзлых породах в естественных условиях сопряжено со значительными трудностями.

¹ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, лаборатория геокриологии, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: a_khimenkov@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова геологический факультет, вед. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: msu-geophysics@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова геологический факультет, магистрант; e-mail: msu-geophysics@mail.ru

Лабораторное моделирование облегчает подбор условий, при которых возможна фильтрация газов в мерзлых грунтах

Материалы и методы исследований. Изучение фильтрации газа сквозь мерзлые породы и льды проведены совместно сотрудниками Института геоэкологии РАН и кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Программа исследований предполагала в первую очередь проведение опытов с льдами различной минерализации и последующим переходом к грунтовым образцам.

Для проведения экспериментов была создана установка, обеспечивающая подготовку образцов льда и мерзлых грунтов кубической формы размером 20×8×8 см; подачу газа под давлением в нижнюю часть образца (рис. 1), геофизическое исследование образцов до и после подачи газа. В качестве газа использовался воздух. Давление создавалось компрессором «FUBAG» DC 320/50 CM2.5, точность измерения давления 0,5 кг/см². Контроль за выходом газа с поверхности образца осуществлялся путем размещения на поверхности контейнера газонепроницаемой эластичной камеры (резиновой перчатки, рис. 1).



Рис. 1. Установка для исследования фильтрации газа сквозь мерзлые образцы при отрицательной температуре. Резиновая перчатка, надетая на контейнер, предназначена для фиксации выделения газа с поверхности образца. Фото П.А. Соболева

Образцы готовили методом послойного промораживания при температуре $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. После промораживания образец выстаивался до температуры окружающей среды ($-9\text{ }^{\circ}\text{C}$), после чего в нижнюю часть образца подавали газ из штуцера под давлением 2 кг/см² для льда и около 4 кг/см² для грунта. При температуре $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ фильтрация газа не наблюдалась. После этого температуру повышали. При температуре около $-2\div-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для льда и $-1\div-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для грунта зафиксирован выход газа с поверхности образца. По окончании опыта проводились структурные и текстурные исследования образцов. В первой серии опытов, изучение фильтрации газа проводили на образцах льда с разной засоленностью (20 г/кг, 5 г/кг, пресный лед); при подготовке мерзлых грунтовых образцов использовали глуховецкий каолин с начальной

влажностью, незначительно превышающей верхний предел пластичности.

После фиксации выхода газа с поверхности образца, его распиливали в вертикальной плоскости по центру. После зачистки поверхности фотографировали срезы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При исследовании льда изучали структуру льда в проходящем и поляризованном свете. Грунтовые образцы фотографировали в отраженном свете. В дальнейшем путем обработки фотографий изучали структурные и текстурные особенности образцов льда и грунта. На основании этого делали выводы об особенностях фильтрации газа в образцах различного состава и строения.

Результаты исследований и их обсуждение. *Лед с минерализацией 20 г/кг.* Изучение структуры льда при промораживании раствора с минерализацией 20 г/л показало, что при подаче газа во лду формируются многочисленные субвертикальные каналы, пронизывающие образец льда на всю высоту (рис. 2). Каналы представляют собой цепочки круглых и вытянутых газовых пузырьков с поперечником около 1–2 мм.

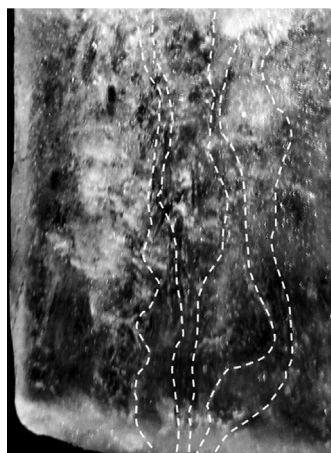


Рис. 2. Ориентировка газовых каналов в образце засоленного льда, съемка в проходящем свете, минерализация первичного раствора 20 г/кг. Фото А.Н. Хименкова

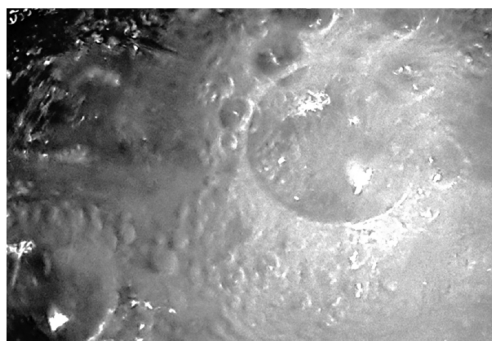


Рис. 3. Выход газа и минерализованной воды с поверхности ледяного образца с минерализацией 20 г/кг. Фото П.А. Соболева

Используя ослабленные зоны, фильтрующий- ся сквозь лед газ движется под давлением вверх и выделяется с поверхности образца в виде пузырей (рис. 3). В качестве ослабленных зон выступают рассольные ячейки, пронизывающие кристаллы льда. При движении газ выдавливает минерализованный раствор (рис. 3), на этом рисунке хорошо видно одновременное поступление газа и жидкости

на поверхность образца. Структурные исследования показали, что каналы фильтрации газа в поперечном сечении имеют округлую, угловатую и вытянутую форму. В верхней части образца они распределены довольно равномерно (рис. 2), в нижней части каналы сходятся к центру (рис. 2).

Лед с минерализацией 5 г/кг. Для предотвращения формирования рассольных зон и более быстрого формирования льда образец готовили с помощью послойного промораживания (рис. 4), таким образом удалось полностью устранить выдавливание минерализованного раствора из образца. Распределение газовых включений в образце льда с первичной минерализацией 5 г/кг значительно отличается от распределения в образце с большей минерализацией. Здесь газовые каналы более локализованы и имеют более разнообразные формы: они могут иметь форму цепочек пузырьков с диаметром 1–2 мм или быть вытянуты в виде скривленных червеобразных каналов диаметром 2–3 мм с субвертикальной ориентировкой (рис. 5). Отдельные каналы прослеживаются на всю высоту образца, но чаще они отмечаются в 1–2 слоях. Выявлены каналы сложного строения. Их нижние части имеют червеобразную форму, выше каналы делаются тоньше, еще выше продолжают в виде цепочки газовых пузырьков с диаметром несколько долей миллиметра (рис. 5).

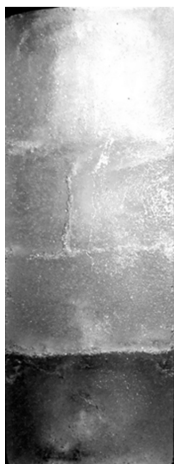


Рис. 4. Образец льда, приготовленный послойным наливом; съемка в проходящем свете. Минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото П.А. Соболева

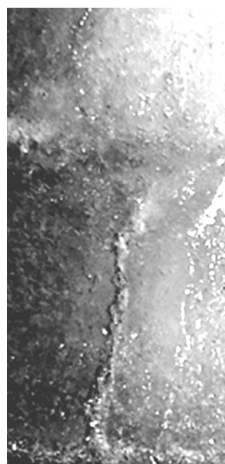


Рис. 5. Газовые каналы в массиве льда, секущие границы между слоями льда; съемка в отраженном свете, минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото А.Н. Хименкова

Лед по всей высоте образца разбит вертикально ориентированными трещинами (рис. 6), заполненными газовыми пузырьками размером до 1 мм. Трещины наблюдаются как внутри слоев, так и на их границе. Они разрушают контакты слоев сетью параллельных трещин (рис. 6), проникающих из нижнего слоя в перекрывающий.

Наряду с разрывными нарушениями во льду прослеживаются пластические деформации, которые маркируются изогнутыми и волнообразными

газонасыщенными каналами (рис. 7). Разрывные и пластические деформации часто встречаются вместе. Они сосредоточены в основном в нижней части образца.

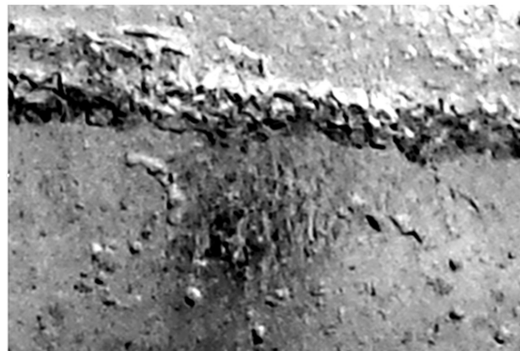
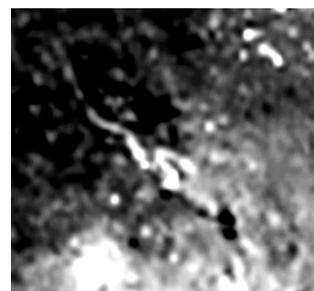


Рис. 6. Зона вертикально ориентированных трещин во льду (в массиве льда и на границе между слоями); съемка в проходящем свете, минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото А.Н. Хименкова

Рис. 7. Червеобразные газовые каналы; съемка в проходящем свете, минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото А.Н. Хименкова



На контакте со штуцером подачи газа сформировалась веерообразная газонасыщенная зона высотой около 2 см и шириной 3–4 см, к которой приурочены радиально расходящиеся трещины (рис. 8).

Съемка структуры льда нижнего слоя льда в поляризованном свете показала, наличие многочисленных следов пластических и разрывных деформаций в зоне, непосредственно примыкающей к штуцеру (рис. 9). Некоторые кристаллы вдавлены один в другой. Встречаются типичные формы будинажа, когда вытянутые кристаллы разорваны, а их отдельные фрагменты смещены. Широко развиты трещины и зоны дробления на контактах кристаллов, цепочки воздушных включений (рис. 8, 9).

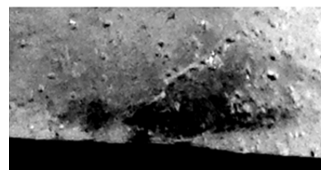


Рис. 8. Нижняя часть образца, примыкающая к штуцеру; съемка в проходящем свете, минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото А.Н. Хименкова

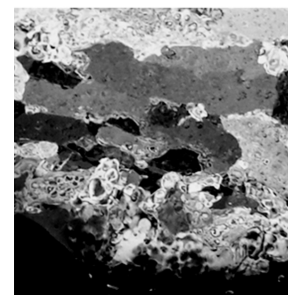


Рис. 9. Структура нижнего слоя льда в зоне контакта со штуцером подачи газа; съемка в поляризованном свете, минерализация первичного раствора 5 г/кг. Фото А.Н. Хименкова

Изучение образца льда с начальной минерализацией раствора 5 г/кг показало, что, в отличие от образца с большей минерализацией, фильтрация газа под давлением сопровождалась своим набором процессов, к которым относится формирование нитевидных и червеобразных каналов, заполненных газовыми пузырьками, многочисленные трещины, пластические и разрывные деформации льда и газовых включений, зоны дробления, перестройка структуры льда, особенно заметная на контакте со штуцером подачи газа.

Пресный лед. Подготовку образца пресного льда проводили при всестороннем промерзании дистиллированной воды. Исследования были сосредоточены на изучении нижней части образца льда, непосредственно примыкающей к штуцеру подачи газа (рис. 10, 11). Ее отличительная особенность — наличие вытянутых, радиально ориентированных пузырьков воздуха. Подача газа под напором 2,5 кг/см² вызвала коренную перестройку этого слоя льда. Сформировалась газонасыщенная зона, разрывающая первичный слой (рис. 10, 11). Особенность первичного слоя льда — наличие двух систем воздушных пузырьков. Одна из них представляет собой цепочки мелких (1–2 мм) изометричных пузырьков воздуха, расположенных параллельно поверхности промерзания. Она соответствует цикличности льдообразования при первичном промерзании (рис. 10). Вторая система выделяется в виде сплошной зоны нитевидных пузырьков, ориентированных по нормали к фронту промерзания. Подача газа резко изменила структуру первичного льда. Границы зоны воздействия газа на лед резкие, с многочисленными разрывными и пластическими деформациями. По границе наблюдаются многочисленные трещины, изогнутые вытянутые пузырьки газа, направление которых не совпадает с общим направлением газовых включений в первичном слое (рис. 10, 11). Во льду, непосредственно примыкающем к штуцеру

подачи газа, первичная структура льда полностью разрушена. В результате сформировалась насыщенная газом область без каких-либо структурных признаков. К этой бесструктурной зоне примыкает слой кристаллов со следами значительных пластических деформаций (рис. 11).

Образец каолина. При исследовании фильтрации газа в мерзлых грунтах использован глуховецкий каолин. Начальная влажность в образце незначительно превышала верхний предел пластичности (около 50%). Мерзлый образец подготавливали при послойном заполнении и замораживании. После замораживания температуру образца доводили до –10 °С, после чего начиналась подача газа под давлением 4 кг/см², затем постепенно температуру повышали. Выход газа с поверхности образца зафиксирован при температуре –0,5 °С. Криогенное строение мерзлого образца показано на рис. 12. Неоднородность криогенного строения мерзлого образца объясняется неравномерностью заполнения контейнера грунтом. На выполнение основной задачи эксперимента по изучению фильтрации газа в мерзлом образце неоднородность криогенного строения не повлияла.

В нижнем 2–3-сантиметровом слое (рис. 12, слой 1) криотекстура преимущественно массивная, с отдельными шлирами льда толщиной около 1 мм. В районе контакта с газоподводящим штуцером наблюдаются субвертикальные, расходящиеся от центра слоистые текстуры, заполненные сублимационным льдом (рис. 13, 14). Лед в субвертикальных слоях толщиной около 1 мм расположен отдельными зонами в виде мелких кристаллов размером около 0,1 мм. Наблюдается разделение субвертикальных шлиров на несколько более мелких, выраженных в виде изгибающихся полос в грунте. На участках, где плоскость субвертикального шлира совпадает с плоскостью среза образца, видна поверхность, покрытая мелкими угловатыми кристаллами (сублимационный лед) (рис. 13).

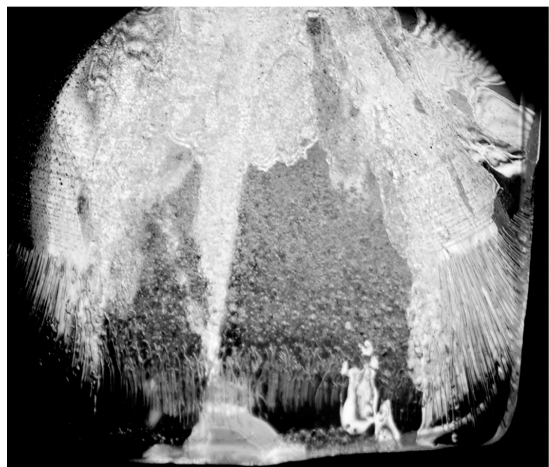


Рис. 10. Нижняя часть образца; съемка в проходящем свете, пресный лед. Фото А.Н. Хименкова

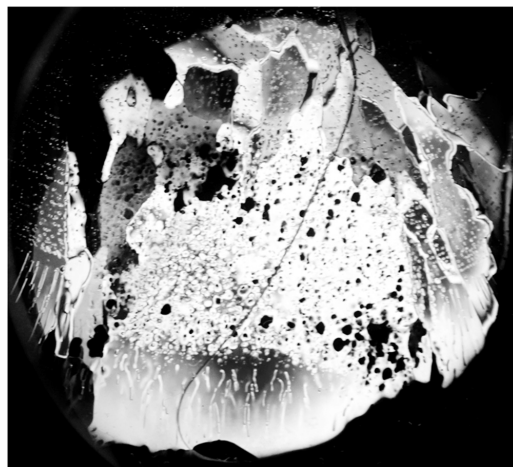


Рис. 11. Разрушение первичной структуры льда в зоне контакта со штуцером подачи газа; съемка в поляризованном свете, пресный лед. Фото А.Н. Хименкова

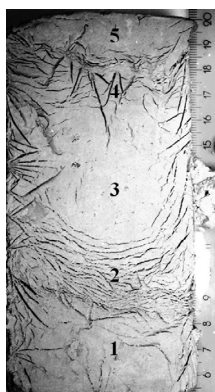


Рис. 12. Криогенное строение образца каолина, подготовленного при послойном намораживании. В центре нижнего края образца находился штуцер подачи газа; 1–5 — слои с разным криогенным строением; съемка в отраженном свете. Фото П.А. Соболева

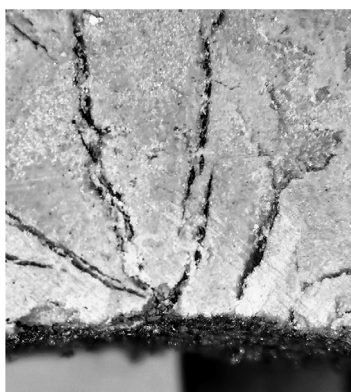


Рис. 13. Нижняя часть образца, примыкающая к штуцеру подачи газа (слой 1). Трещины, частично заполненные сублимационным льдом; съемка в отраженном свете. Фото А.Н. Хименкова

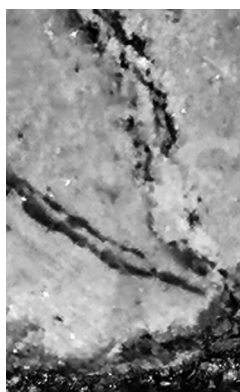


Рис. 14. Строение шлиров, расходящихся от нижней части образца каолина (слой 1, штуцера подачи газа 2); съемка в отраженном свете. Фото А.Н. Хименкова

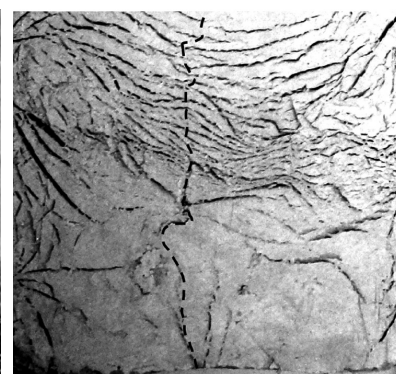


Рис. 15. Криогенное строение нижней части образца каолина (слой 1, штуцера подачи газа 2); съемка в отраженном свете. Фото П.А. Соболева

Выше слоя с массивной криотекстурой находится слой толщиной 3–4 см со слоистой криотекстурой (рис. 12, 15, слой 2). Толщина шлиров льда до 1 мм, толщина грунтовых прослоев от 1 до 2–3 мм. Шлировые текстуры в центральной части образца ориентированы горизонтально. В крайних частях угол наклона слоев возрастает до 70–80°, что свидетельствует о влиянии бокового промерзания. В зоне слоистых криотекстур наблюдается большое количество ветвящихся, искривленных, субвертикально ориентированных каналов толщиной несколько долей миллиметра (рис. 16). Каналы разрывают шлиры льда, не разрушая их общую ориентацию. Прослеживается связь каналов в слоистых текстурах с аналогичными образованиями в нижележащем слое (рис. 15).

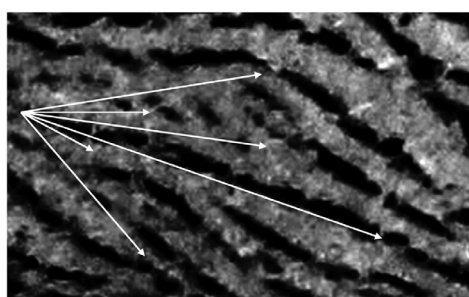


Рис. 16. Субвертикальные каналы, прорывающие первичные слоистые криогенные текстуры (слой 2); съемка в отраженном свете. Фото А.Н. Хименкова

Выше зоны слоистых криотекстур залегает слой с массивным криогенным строением толщиной 5–6 см (рис. 12, слой 3). После обработки снимков удалось выявить наличие многочисленных вытянутых в вертикальном направлении каналов, связанных с каналами из нижележащих слоистых криотекстур (рис. 17).

Над слоем с массивной криотекстурой залегают слоисто-сетчатые криотекстуры толщиной 2–3 см (рис. 12, 18, слой 4), перекрытые верхним слоем массивных криотекстур толщиной 1–2 см (рис. 12, 18, слой 5). Оба этих слоя пронизаны многочисленными каналами. Часть из них приурочена к субвертикальным шлирам, часть — представляет собой изогнутые, субвертикально ориен-

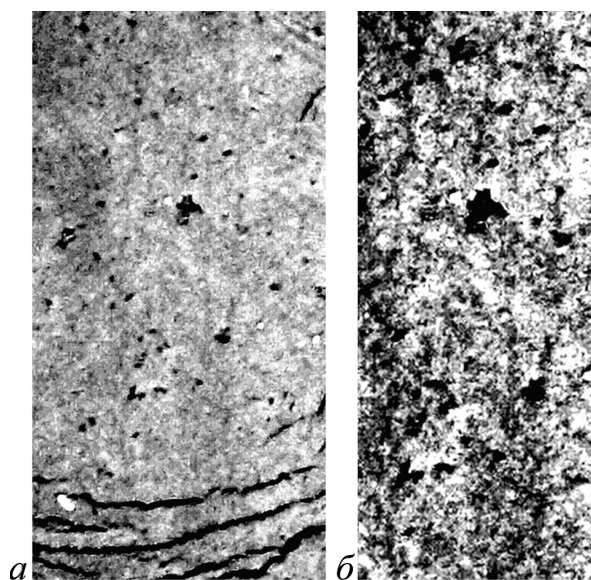


Рис. 17. Субвертикальные каналы в слое массивной криотекстуры (слой 3); а — фото всего слоя, в нижней части фотографии горизонтальные шлиры льда из слоя 2; б — увеличенный фрагмент рис. 17; съемка в отраженном свете. Фото А.Н. Хименкова

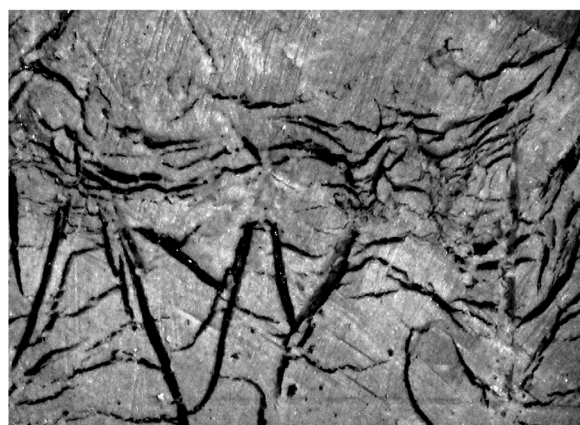


Рис. 18. Слой слоисто-сетчатых криотекстур и перекрывающий его слой массивной криотекстуры (слои 4, 5); съемка в отраженном свете. Фото. П. А. Соболева

тированные трещины шириной несколько долей миллиметра, частично заполненные льдом или не содержащие льда. Они подходят непосредственно к поверхности образца.

В распределении субвертикальных каналов, пронизывающих мерзлый образец, наблюдаются определенные закономерности. В слое 1 каналы приурочены к центральной части и радиально расходятся от места примыкания штуцера подачи газа. В слое 2 субвертикальные каналы наиболее выражены. Они распространены по всей толще слоя. В вышерасположенных слоях каналы менее выражены. В слоях 4 и 5 наблюдаются лишь их единичные проявления.

Результаты исследований и их обсуждение.

Таким образом, в ходе исследований впервые удалось зафиксировать фильтрацию газа сквозь льды и мерзлые грунты и изучить сопровождающие ее процессы. Установлено, что фильтрация газа во льдах и грунтах происходит только при определенных соотношениях давления и температуры. При температуре -9°C в диапазоне давления газа $2-4\text{ кг/см}^2$, при которых проводились эксперименты, фильтрация не наблюдалась. Она начинала проявляться только при повышении температуры. Соотношение давления газа и температуры образца, при которых начиналась фильтрация газа, у каждого грунта было разным. В образцах льда с засоленностью 20 г/кг фильтрация происходила при температуре -3°C и давлении 1 кг/см^2 . В образце с засоленностью 5 г/кг и в образце пресного льда фильтрация начиналась при давлении $2,0-2,5\text{ кг/см}^2$ и температуре около -2°C . В образце каолина давление газа, при котором была зафиксирована фильтрация, составляло 4 кг/см^2 , при этом температура образца была $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Установлено, что фильтрация газа в мерзлых образцах обусловлена различными процессами. В засоленном льду при промерзании формируются многочисленные рассольные ячейки, ориентированные преимущественно в субвертикальном направлении. Двигающийся пузырек газа толкает перед собой жидкость, выдавливая ее вверх (рис. 3). Формируется газово-жидкостный поток, переносящий жидкость в область меньшего давления. Во льду с малой засоленностью и в пресном льду давление газа приводило, особенно в нижних частях образцов, примыкающих к штуцеру, к развитию многочисленных разрывных и пластических деформаций, зон дробления, сколов, трещин. Структура кристаллов локально была значительно перестроена. Пузырьки газа, находящиеся под давлением, выбирают ослабленные зоны и проникают по ним в глубь образца. По проделанному каналу поступают следующие пузырьки. В результате формируется сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление вверх (рис. 4–8). В местах, где движение газовых пузырьков за-

труднено, происходит их накопление и развитие червеобразных газовых полостей.

Изучение мерзлого образца каолина, подвергнутого напорному воздействию газа, показало, что по всей высоте образца наблюдаются субвертикально ориентированные каналы, берущие начало от зоны примыкания штуцера, подающего газ к нижней поверхности образца (рис. 12–17). Морфология каналов различна, в некоторых случаях они представляют полости, частично заполненные мелкими кристаллами льда, в других — выражаются в виде вытянутых углублений на поверхности образца, иногда они выделяются в виде более светлых или темных (рис. 15–17) узких, ориентированных субвертикально ломаных линий. При всем разнообразии морфологии каналы образуют единую систему, пронизывающую образец каолина. Отметим, что границы слоев, намораживаемых при подготовке образца, не служат преградой для выделяемых каналов, они без разрывов переходят из слоя в слой.

Каналы пронизывают образец каолина с разным криогенным строением на всю высоту, деформируют первичные криотекстуры и приурочены к штуцеру подачи газа. Все это позволяет сделать следующие выводы:

- обнаруженные каналы — результат напорной фильтрации газа сквозь мерзлый образец;
- фильтрация газа вызывает деформации первичного криогенного строения.

В изучении фильтрации газа сделаны первые шаги. Какие-либо обобщения делать пока рано, исследования продолжаются. Но некоторые предварительные соображения можно уже сформулировать.

При повышении температуры в мерзлых породах в них начинает развиваться система парагенетически связанных процессов: увеличение содержания незамерзшей воды, появление рассольных ячеек, формирование микротрещин за счет неравномерной тепловой деформации минерального скелета и льда, объемного изменения газовых включений. С увеличением температуры давление «защемленного» газа в порах растет. Это ведет к дополнительным деформациям минерального скелета или льда [Роман, 2002; Роман и др., 2017]. Все это выражается в значительном ослаблении деформационных свойств мерзлой породы. Установлено, что при повышении температуры в мерзлых породах одна и та же величина относительной деформации достигается при меньшем напряжении. Например, при повышении температуры от -20 до -5°C аналогичных величин деформации можно достичь при напряжении в 3–4 раза меньше [Ершов, 2002].

Нагревание образца приводит к ослаблению его внутренних связей и появлению комплекса микродеформаций и ослабленных зон. При достижении определенного соотношения между нагрузкой, создаваемой газом, который находит-

ся под давлением, и прочностью образца, газ по ослабленным зонам начинает проникать в образец. Это приводит к образованию трещин и зон локальных пластических деформаций уже за счет воздействия фильтрующегося газа, что в свою очередь вызывает усиление фильтрации и т.д. При этом массив грунта в целом сохраняет первичное строение, поскольку при фильтрации газа происходит только локальное смещение и трансформация его отдельных элементов. Например, в образце каолина шлировые текстуры оказались локально разорваны и немного сдвинуты в местах разрывов, но общий рисунок криогенного строения не изменился.

Заключение. В ходе лабораторных исследований установлено:

- газонепроницаемые при низкой отрицательной температуре льды и мерзлые грунты в ходе повышения температуры до определенных границ (для каждого вида льда и грунта границы будут индивидуальны), оставаясь в мерзлом состоянии, начинают пропускать газ под давлением;

- фильтрация газа сквозь многолетнемерзлые льды сопровождается различными процессами деформации первичного криогенного строения;

- в ходе фильтрации в мерзлых грунтах формируются новообразования, представляющие собой газовые включения различной морфологии и размеров;

- комплекс парагенетически связанных фильтрационно-деформационных процессов, создавая локальные зоны повышенной проницаемости, обуславливает резкое усиление миграции газовых флюидов в мерзлых породах;

- изучаемые в лабораторных условиях процессы миграции газа в образцах льда и мерзлого грунта обусловлены фильтрационно-деформационным механизмом, заключающимся в совместном действии процессов деформации пород под давлением и фильтрации газа по формирующимся при этом ослабленным зонам;

- миграция газов при повышении температуры в образцах мерзлых грунтов (в диапазоне ее отрицательных значений) может происходить при

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра, 1990; 2002. 450 с.

Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов М.: МАИК, 2002. 426 с.

Роман Л.Т., Мерзляков В.П., Малеева А.Н. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 3. С. 24–31.

Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. и др. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. Ч. 2. Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 48–70. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26377.

Хименков А.Н., Станиславская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера // Арктика и

различных льдистости и параметрах криогенного строения.

Утверждение, что льдистые мерзлые породы газонепроницаемы, и полученные нами результаты не противоречат друг другу. Если порода сцементирована льдом и в ней не развиваются деформации, то фильтрация газа не происходит, если же в силу тех или иных причин в мерзлой породе ослабнут внутренние связи и в ней возникнет источник газа, находящегося под повышенным давлением, то при достижении определенных соотношений между давлением газа и прочностью мерзлой породы фильтрация возможна.

Результаты лабораторного изучения фильтрации газа в образцах льда и мерзлом грунте хорошо коррелируют с данными о мерзлотных образованиях, связанных с фильтрацией газа в многолетнемерзлых породах при формировании воронок газового выброса [Хименков и др., 2018; Хименков, Станиславская, 2018]. Полученные нами данные имеют важное теоретическое и практическое значение для понимания процессов, происходящих в криолитозоне при локальном или глобальном повышении температуры за счет естественных или техногенных воздействий. Даже при незначительном повышении температуры в толщах гидратосодержащих многолетнемерзлых пород может начаться разложение газогидратов и выделение внутригрунтового газа, находящегося под высоким давлением. Все современные расчеты строятся на представлениях о фильтрации газов после оттаивания многолетнемерзлых пород. Однако этот процесс может происходить и в мерзлых массивах. Вклад парниковых газов, выделившихся из толщи мерзлых пород, в первую очередь метана и углекислого газа, в изменение климата еще никто не учитывал, а он может быть значительным. Лабораторное моделирование позволяет создавать различные комбинации вещественных и термобарических условий и может быть важным методом изучения фильтрации газа в мерзлых породах.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № АААА-А19-119021190077-6).

Антарктика. 2018. № 3. С. 1–25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524.

Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И., Сакле М. Влияние влагосодержания на газопроницаемость пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли. 2016. Т. 20, № 3. С. 71–78.

Чувиллин Е.М., Соколова Н.С., Спасенных М.Ю. Метан в мерзлоте — ресурс или опасность? URL: <https://goarctic.ru/work/metan-v-merzlote-resurs-ili-opasnost/> (дата обращения: 04.10.2019).

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.

Поступила в редакцию 11.12.2019

Поступила с доработки 15.01.2020

Принята к публикации 15.01.2020