

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. — Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.4.30997 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30997

Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, Уланский проезд, 13, стр. 2

✉ a_khimenkov@mail.ru



Кошурников Андрей Викторович

кандидат геолого-минералогических наук

Ведущий научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геоэкологии,

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ msu-geophysics@mail.ru



Соболев Пётр Алексеевич

Инженер, ООО МГУ - ГЕОФИЗИКА

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ msu-geophysics@mail.ru



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

Аннотация.

Объектом исследования являются процессы сопровождающие фильтрацию газа в мёрзлых породах. Предметом исследования являются образцы мерзлого грунта подвергавшиеся напорному воздействию газа. Впервые, в лабораторных условиях удалось выявить процессы сопровождающие фильтрацию газа в мёрзлом грунте. Особое внимание уделено изучению деформаций первичных криогенных текстур при фильтрации газа, находящегося под давлением. Проанализированы особенности распространения газовых флюидов в мёрзлом образце. Проведён сравнительный анализ криогенного строения мёрзлых образцов с подачей газа и без его воздействия. Сформулирован механизм напорной фильтрации газа в мёрзлых породах. При изучении образцов мёрзлого грунта, подвергшихся напорному воздействию газа, использовались методы текстурных и структурных исследований в проходящем, отражённом и поляризованном свете. Для выявления изменений происходящих в мерзлых образцах при напорном воздействии газа использовался метод сравнительного анализа. Установлено, что в мёрзлых породах фильтрация газа возможна при формировании соответствующих соотношений между характеристиками пород (прочностными, деформативными,

структурными) и давлением внутригрунтового газа. Выявлено, что эти соотношения зависят от температуры образца. При одинаковом давлении, при низких значениях температуры образцов, фильтрации не происходит. При повышении температуры до значений $-1 - -2$ °C начинается фильтрация. В природе эти соотношения определяются геологическими, ландшафтными и климатическими условиями. Впервые, в лабораторных условиях, с помощью структурных исследований удалось выявить процессы сопровождающие фильтрацию газа во льду.

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

DOI:

10.7256/2453-8922.2019.4.30997

Дата направления в редакцию:

06-12-2019

Дата рецензирования:

04-12-2019

Работа выполнена в рамках государственного задания: тема № АААА-А19-119021190077-6 и при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-05-00294).

Введение

Проблема миграции газа в мерзлых породах, еще недавно казавшаяся незначительной и имеющей только академический интерес, становится важной как в теоретическом, так и в практическом отношении. Резкое изменение температуры на Земле ученые связывают с растущей концентрацией в атмосфере парниковых газов, прежде всего углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4). В подавляющем количестве, этот газ заключен в толще многолетнемёрзлых пород в виде газогидратов [\[1\]](#). Исследования, проведенные в последние десятилетия показали, что северным территориям отводится особая роль в современном цикле CH_4 , здесь сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте. По оценкам Г. Н. Краева объемы CH_4 в верхних 25 м разреза ММП составляют 7,8-10,0 млрд. м^3 CH_4 . Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г. по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса в ММП (ИФА РАН), приведет к высвобождению из ММП 1,3-1,7 млрд. м^3 CH_4 [\[2\]](#).

В научной литературе существуют различные точки зрения на причины формирования газовой составляющей в многолетнемёрзлых породах. В работах С.Е. Агалакова, [\[3\]](#), А.Р. Курчикова [\[4, 5\]](#) показано, что мёрзлая толща является зоной локального накопления в диапировых структурах газа, поступающего по разломам. По мнению Б.М. Валяева [\[6, 7\]](#),

Р.М. Бембеля и др. [8], поднимающийся из глубин газ, сам является активным фактором, формирующим мерзлоту над газовыми месторождениями севера Западной Сибири, за счёт охлаждения при адиабатическом расширении. В.С. Якушев считает, что мощное влияние на накопление газа в форме газогидратов, этом регионе, оказало неравномерное эпигенетическое промерзание выходящих из субаквального положения морских осадков [9]. Ю. Б. Баду [10] предложена гипотеза стадийного формирования газовых скоплений в многолетнемёрзлых породах морского генезиса. На первой стадии, в субаквальных условиях, поступающий из глубин газ, адиабатически расширяясь, замораживает на локальных участках вышележащие грунты. На второй стадии, также в субаквальных условиях, эти участки сливаются между собой, а также с отрицательно температурными и содержащими лёд морскими осадками, имеющими площадное распространение и с участками мерзлоты, образовавшимися при оползании и пликативном смятии. В это время начинают формироваться экраны и локальные мерзлотные газовые «ловушки». Особенно большое развитие они получают над глубинными скоплениями газа в диапировых структурах. На третьей стадии, после того, как морские осадки переходят в субаэральное состояние, они подвергаются эпигенетическому промерзанию. При движении фронта промерзания газ фиксируется в локальных зонах, частично переходя в газогидраты. В последующем мерзлая толща становится непроницаемой для потоков газа поступающих снизу. Таким образом многолетнемёрзлые толщи морского генезиса залегающие над газоносными структурами севера Западной Сибири, представляют из себя совокупность криогенных геосистем, сформировавшихся в разное время и в различных природных обстановках.

Представления о том, что криолитозона является экраном препятствующим выходу подземного газа на поверхность, являются наиболее распространёнными в настоящее время. Согласно им, только после оттаивания мёрзлых пород формируются миграционные потоки газа (преимущественно CH_4 , CO_2), поступающие в водную толщу или атмосферу в форме потоков пузырьков газа [11]. В.С. Якушев, проанализировавший огромный материал по возможности фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах, пришёл к заключению, что высокльдистые покровные отложения криолитозоны (верхние 40-50 м) являются практически непроницаемыми для газа, идущего под напором из глубины [9]. Поскольку на пути миграции газа находятся весьма слабопроницаемые для газа мерзлые породы, то невозможна даже диффузия газа в приповерхностные отложения [11]. Е. М. Чувилиным с соавторами установлено, что мёрзлые льдонасыщенные породы являются, абсолютным упором для газовых флюидов [12]. Для песчаных прослоев, критическое значение льдонасыщенности порового пространства, при котором осуществима фильтрация газа, составляет 60-70% от порового объема. Если льдонасыщенность порового пространства больше этой величины, то порода становится непроницаемой для газового флюида [12, 13].

При всей убедительности приводимых доводов, мы считаем, что утверждение о газонепроницаемости льдистых мёрзлых пород, не вполне корректно. При оценке возможности фильтрации газа в мёрзлых породах недостаточно учитывать только степень заполнения пор льдом (льдистость). При определённых соотношениях прочности мёрзлых пород и давлений, содержащихся в них газов, могут сформироваться условия для движения газовых потоков. Имеются данные позволяющие предположить, что потоки газа могут начать формироваться и в высокотемпературных мерзлых породах ещё до их оттаивания.

Бурение скважин в многолетнемёрзлых породах сопровождается многочисленными

газовыми выбросами, часто продолжающимися длительное время [\[9, 14, 15, 16\]](#), что свидетельствует, о возможности миграции газа из прилегающих мёрзлых слоёв. При расчётах зоны поступления газа оцениваются массообменные процессы, происходящие только в зоне оттаивания. Между тем, в зоне растепления, которая превышает мощность оттаявшего слоя и в которой температуры остаются в диапазоне отрицательных значений, за счёт разложения газогидратов могут формироваться газовые потоки с высоким давлением. Потоки газа, наблюдающиеся в некоторых термокарстовых озёрах, связывают с оттаиванием гидратосодержащих мёрзлых пород. Однако и в этом случае диссоциация газогидратов и выделение газа начнётся гораздо раньше, ещё до оттаивания мерзлоты. Изучение воронок газового выброса, обнаруженных на севере Западной Сибири, показало, что в подготовке взрывных процессов, значительную роль играет напорная миграция газа в многолетнемёрзлых породах [\[17\]](#). Некоторые исследователи считают возможным проникновение глубинных газовых флюидов в поверхностные слои мёрзлых толщ, по разломам [\[18, 19\]](#).

Но на севере Западной Сибири не обнаружено локальных зон протаивания приуроченных к разломам. Следовательно, и в этом случае необходимо рассматривать условия движения газа в мёрзлых породах. Общим для всех приведённых примеров является то, что во всех случаях необходимым условием является растепление низкотемпературных многолетнемёрзлых пород. При повышении температуры до значений, приближающихся к области интенсивных фазовых переходов, они приобретают много новых свойств, в том числе увеличивается их газопроницаемость.

Лабораторные исследования по данной теме позволяют изучать процессы миграции газа в широком диапазоне температур, криогенных текстур, значений состава, льдистости и засоленности грунтов, что невозможно сделать в естественных условиях. В предлагаемой статье рассматриваются результаты изучения фильтрации газа в образцах мёрзлого грунта.

Методика проведения исследований

Изучение фильтрации газа сквозь мерзлые породы проводились совместно сотрудниками Института геоэкологии РАН и Кафедры геокриологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Для проведения экспериментов была создана установка, обеспечивающая: подготовку образцов льда и мёрзлых грунтов кубической формы, размером 20х8х8 см и подачу газа под давлением в нижнюю часть образца (рис. 1). В качестве газа использовался воздух. Давление создавалось компрессором FUBAG DC 320/50 CM2.5, с точностью измерения давления 0,5 кг/см². Выход газа с поверхности образца осуществлялся путем размещения на поверхности контейнера газонепроницаемой эластичной камеры (резиновой перчатки рис. 1)



Рис. 1. Установка для исследования фильтрации газа в
мёрзлых грунтах. Фото П.А. Соболева

В первой серии изучения фильтрации газа сквозь грунт при подготовке образцов использовался глуховецкий каолин. Грунтовые образцы, приготавливались методом послойного промораживания при температуре -9°C . После окончания промораживания и выстаивания при данной температуре, в нижнюю часть образца через штуцер подавался воздух под давлением 4 кг/см^2 . Температура постепенно повышалась до значений, при которых фиксировался выход газа с поверхности образца. После фиксации выхода газа, мёрзлый образец распиливался в вертикальной плоскости по центру и в нескольких местах в горизонтальной плоскости. Затем производилось фотографирование срезов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. По фотографиям проводилось анализ структурных и морфометрических характеристик криогенного строения образцов. Выявлялись структурные и текстурные деформации первичного строения и их распределение в массиве образца. Изучались морфология и распределение в образце новообразований, связанных с фильтрацией газа.

Результаты экспериментов

На первом этапе исследования фильтрации газа в мёрзлых грунтах при приготовлении образца использовался глуховецкий каолин с начальной суммарной влажностью около 50%, незначительно превышающей верхний предел пластичности. Мёрзлый образец подготавливался при послойном промораживании, после чего температура образца доводилось до -9°C , и начиналась подача газа под давлением 4 кг/см^2 . Выход газа с поверхности образца зафиксирован при температуре $-0,5^{\circ}\text{C}$. В мёрзлом образце наблюдается неравномерное распределение криогенных текстур: массивные - слои 1, 3, 5; слоистые - слой 2; слоистосетчатые - слой 4 (рис. 2).

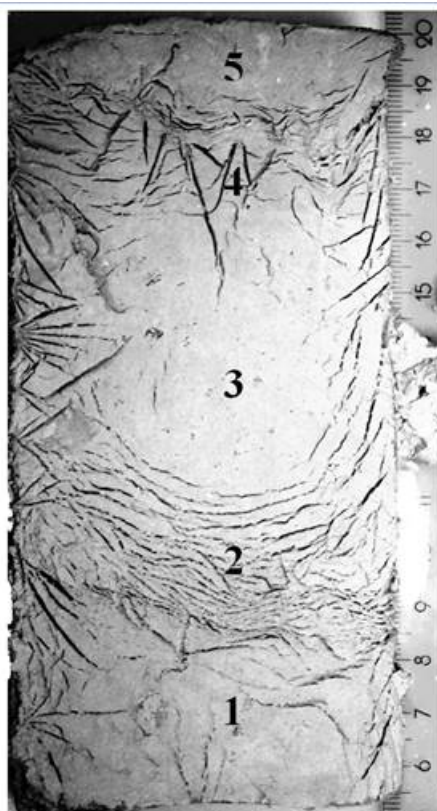


Рис. 2 . Вертикальный срез образца каолина, подготовленного методом послойного намораживания. В центре нижнего края образца располагался штуцер подачи газа. 1 - 5 слои с различным криогенным строением. Фото П.А. Соболева

В нижнем, 2 - 3 сантиметровом слое (рис. 2, слой 1) криотекстура преимущественно массивная. В районе контакта с газоподводящим штуцером наблюдаются субвертикальные, расходящиеся от центра, слоистые текстуры, неполностью заполненные сублимационным льдом (рис. 3, 4). Лед в некоторых субвертикальных шлирах 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 лёд) (рис. 3).

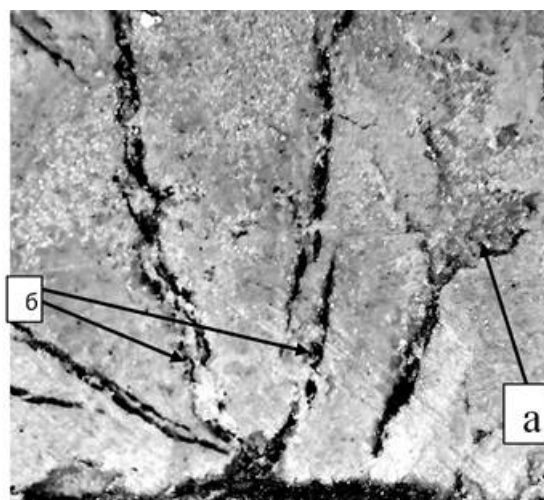


Рис. 3. Нижняя часть образца (вертикальный срез), примыкающая к штуцеру подачи газа: а) сублимационный лёд заполняющий трещину, ориентированную в плоскости среза; б) волнистые деформации вертикальных шлиров Фото А.Н. Хименкова



Рис. 4. Криогенное строение нижней части образца каолина. Фото П.А. Соболева

Выше слоя с массивной криотекстурой располагается слой толщиной 3–4 см со слоистой криотекстурой (рис. 4, 5, слой 2). Толщина шлиров льда толщиной до 1 мм, толщина грунтовых прослоев от 1 до 2–3 мм. Шлировые текстуры в центральной части образца ориентированы горизонтально. К краям угол наклона слоёв возрастает до 70–80° (рис. 2, 4). В зоне слоистых криотекстур наблюдается большое количество ветвящихся, искривлённых субвертикально ориентированных каналов толщиной в доли миллиметров (рис. 5). Каналы разрывают шлиры льда и сдвигают их, не разрушая их общую ориентацию. Прослеживается связь каналов в слоистых текстурах с аналогичными образованиями в нижележащем слое (рис. 4).

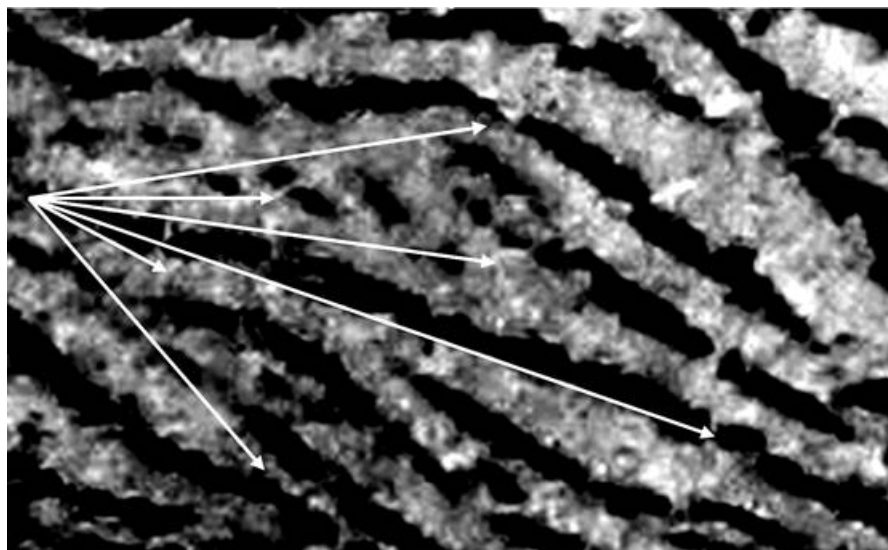


Рис. 5. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые криогенные текстуры Фотография в отражённом свете. Фото А.Н. Хименкова

Выше зоны слоистых криотекстур залегает слой с массивным криогенным строением толщиной 5–6 см (рис. 2, слой 3). После обработки снимков удалось выявить наличие многочисленных, вытянутых в вертикальном направлении, каналов, связанных с каналами из ниже залегающих слоистых криотекстур (слой 2) (рис. 6)

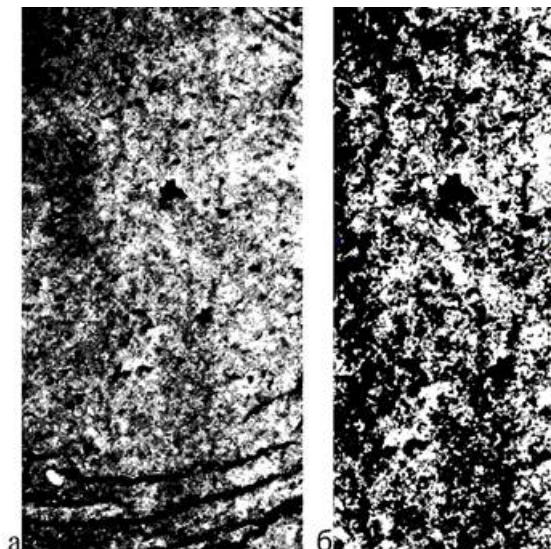


Рис. 6. Фотография слоя массивной криотекстуры (рис. 2, слой 3) после обработки: а – фото всего слоя, в нижней части фотографии горизонтальные шлиры льда (слой 2); б – увеличенный фрагмент. Фотография в отражённом свете. Фото. А.Н. Хименкова

Над слоем с массивной криотекстурой залегает слой слоисто-сетчатых криотекстур толщиной 2 - 3 см (рис. 2, 7, слой 4), перекрытый верхним слоем массивных криотекстур толщиной 1–2 см (рис. 2, 7, слой 5). Оба этих слоя пронизаны многочисленными каналами, Каналы являются продолжением аналогичных образований характерных для нижнего слоя массивной криотекстуры (рис. 7). Они пересекают границы между слоями, деформируют первичное криогенное строение. Часть из них приурочена к субвертикальным шлирам, часть представляют собой изогнутые, субвертикально ориентированные линейные образования толщиной в доли миллиметра, частично заполненные льдом или без льда (рис. 7, 8). Они подходят непосредственно на поверхность образца.



Рис. 7. Верхняя часть образца. Вертикальный срез. Слой слоисто-сетчатых криотекстур (слой 4) и перекрывающий его слой массивной криотекстуры (слой 5).

Фото. П. А. Соболева

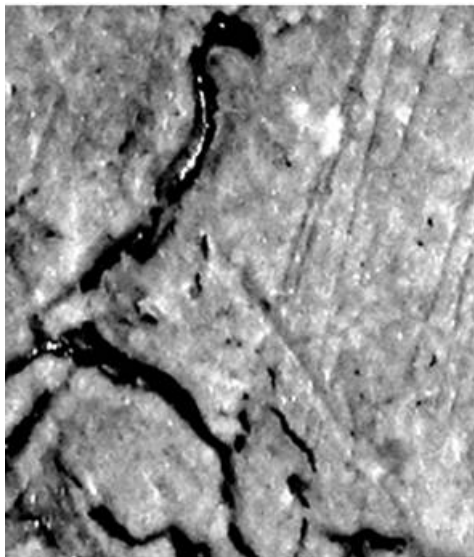


Рис. 8. Верхняя часть образца (фрагмент рис. 7). Деформированный субвертикальный шлик в верхней части образца с газовыми полостями. Фото А.Н. Хименкова

Параллельное изучение криогенного строения мёрзлых образцов подвергшихся напорному воздействию газа и без этого воздействия.

Был проведён эксперимент, при котором два образца каолина помещались в одну морозильную камеру и промораживались в одинаковых условиях. После промораживания и доведения температуры -9°C в один из них подавался газ с давлением 4 кг/см^2 . Затем температура в обоих образцах повышалась до значений, при которых начиналась фильтрация газа ($-0,5^{\circ}\text{C}$).

Текстурные исследования показали, что первичное криогенное строение в обоих мёрзлых образцах в целом совпадает и представляет из себя чередование зон слоистых, сетчатых и массивных криотекстур (рис. 9). Фильтрация газа в одном из образцов, не нарушая общий рисунок криотекстур, тем не менее, значительно повлияла на его строение.

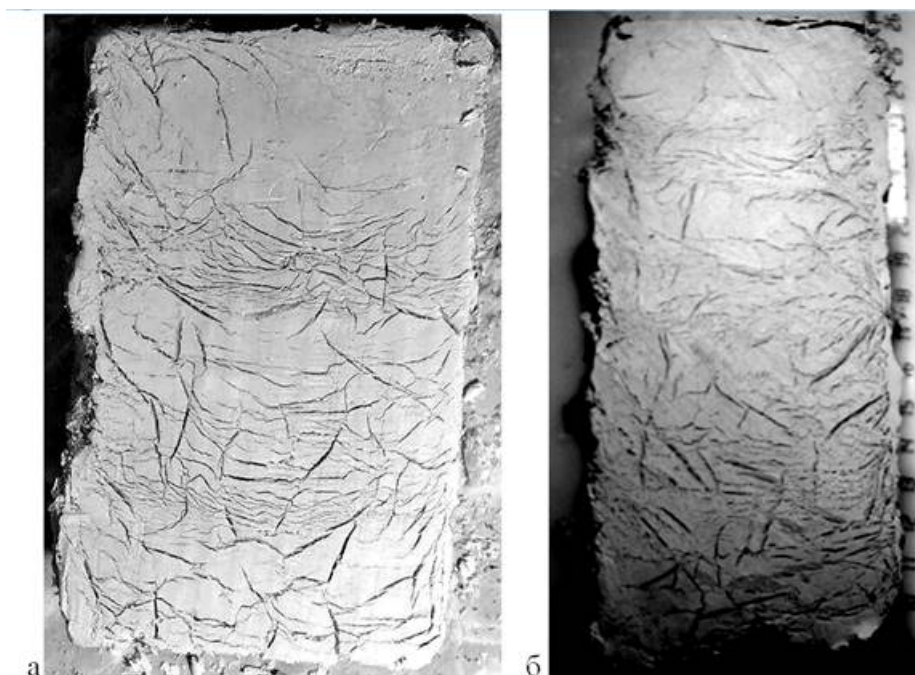


Рис. 9. Мерзлые образцы каолина.

а – образец без газа; б – образец с газом. Фото. П. А. Соболева

В образцах без газа шлиры льда имеют чёткие ровные границы с вмещающим грунтом (рис. 9а, 10).



Рис. 10. Вертикальный срез нижняя часть образца без газа

Фото. П. А. Соболева

В нижней части газонасыщенного образца, вблизи штуцера подачи газа общий рисунок ледяных шлиров сохраняется (рис. 9б). При этом в грунте наблюдаются зоны пластических и разрывных деформаций, дробящих массив на отдельные блоки; вытянутые в субвертикальном направлении каналы, частично заполненные льдом (рис. 11). В нижней части образца, примыкающей к штуцеру подачи газа грунт разрушен на отдельности размером 2-3 мм (рис. 12). Сам грунт усеян мелкими (доли мм) ячейками (рис. 13), представляющими из себя углубления различной морфологии глубиной доли мм. В местах разрывных и пластических деформаций плотность распределения ячеек увеличивается (рис. 13).

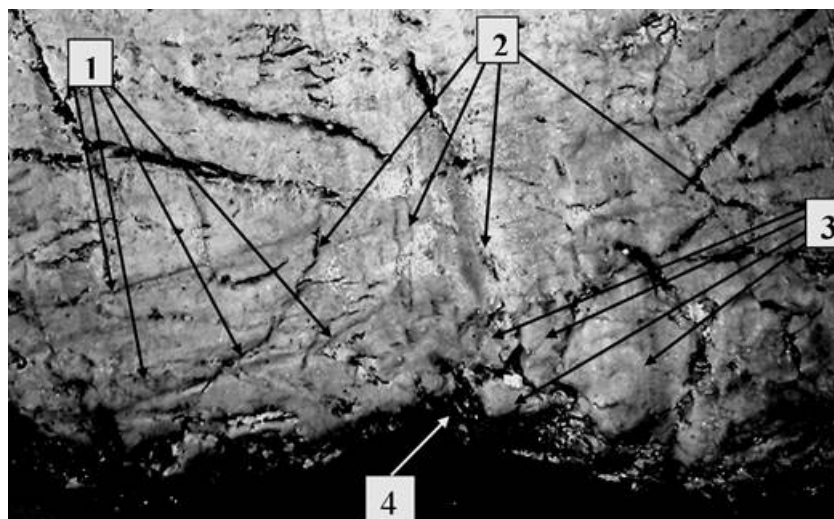


Рис. 11. Вертикальный срез. Нижняя часть образца. Деформационные образования грунта вблизи штуцера подачи газа: 1-трещины, 2-пластические деформации, 3-грунтовые блоки разделённые трещинами, 4-место контакта штуцера с грунтом. Фото А.Н. Хименкова.

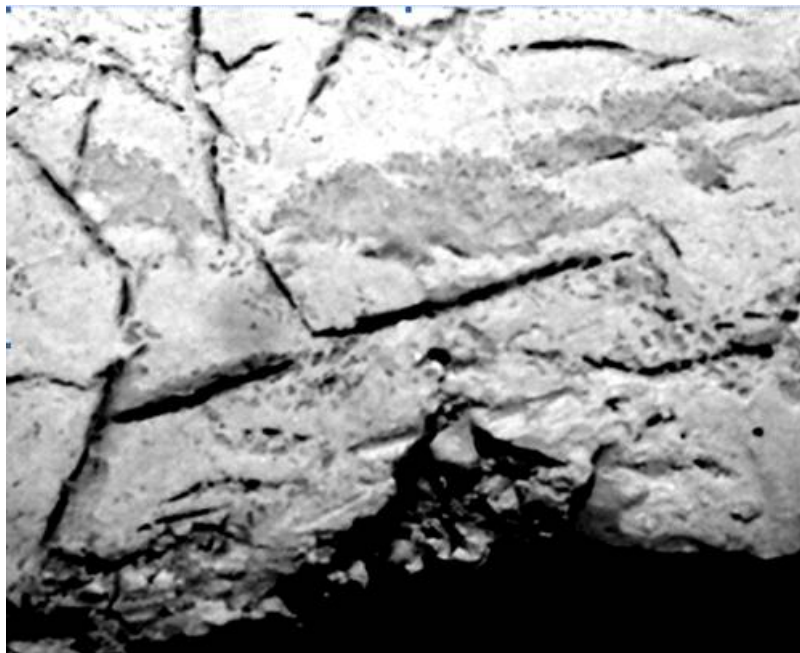


Рис. 12. Вертикальный срез, раздробленный грунт в зоне контакта образца со штуцером подачи газа. Фото А.Н. Хименкова

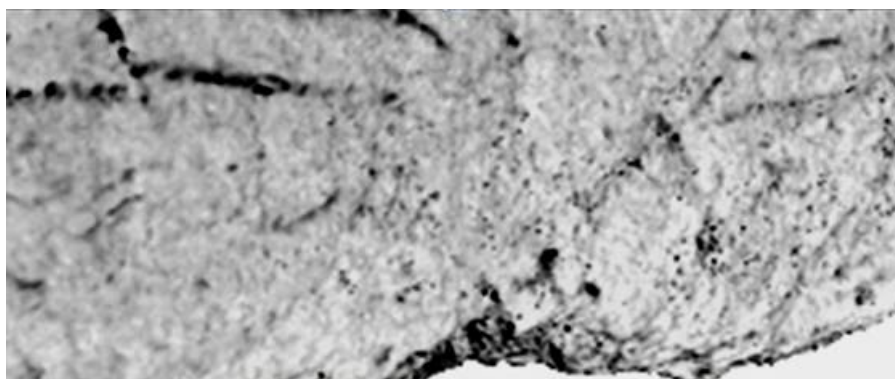


Рис. 13. Тот же снимок после обработки, видно сгущение газовых пузырьков в зонах трещин. Фото А.Н. Хименкова

На участках, где плоскость вертикального среза совпадает с плоскостью субвертикальных шлиров (рис. 12), наблюдается повышенное содержание ячеек. Форма многих ячеек имеет коническую форму, при этом заострённая часть направлена вверх (рис. 14). И сгущение ячеек и их форма и ориентация, свидетельствует о том, мелкие газовые пузырьки вдавливались в грунт под давлением снизу.

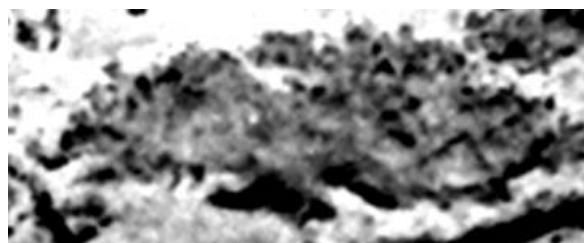


Рис. 14. Фрагмент рис.12. Срез в плоскости субвертикального шлира.

Фото А.Н. Хименкова

Срез грунта, сделанный в горизонтальной плоскости показал, что непосредственно вблизи штуцера наблюдается уменьшение ячеек по мере удаления от штуцера.

Конические ячейки ориентированные острой частью по направлению от штуцера сменяются веерообразными структурами (рис. 15). Данное распределение и морфология ячеек также иллюстрирует вектор давления газа в горизонтальном направлении направленный в сторону от штуцера.

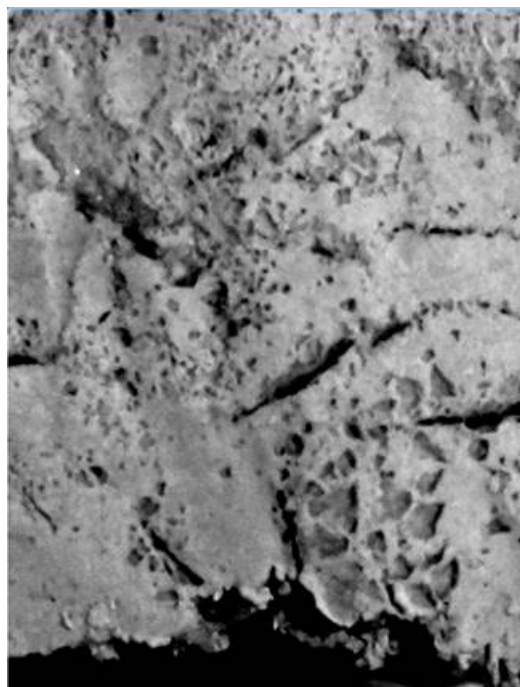


Рис. 15. Горизонтальный срез в нижней части образца в зоне, примыкающей к контакту штуцера подачи газа и грунта

Образец с газом Фото А.Н. Хименкова

На расстоянии 3-5 см количество газовых включений резко возрастает (рис. 16). Ячейки равномерно распространены как вблизи шлиров, так и по всему массиву образца.



Рис. 16. Вертикальный срез на расстоянии 3 - 5 см от нижнего края.

Фото. А.Н. Хименкова

На расстоянии 4 см от нижнего края образца в горизонтальном срезе помимо прямолинейных ледяных шлиров наблюдаются многочисленные извилистые каналы, фрагментарно заполненные льдом со следами пластических деформаций, к которым

приурочены мелкие ячейки (рис. 17, 18)



Рис. 17. Горизонтальный срез в нижней части образца 4 см от штуцера подачи газа
Образец с газом. Фото А.Н. Хименкова.

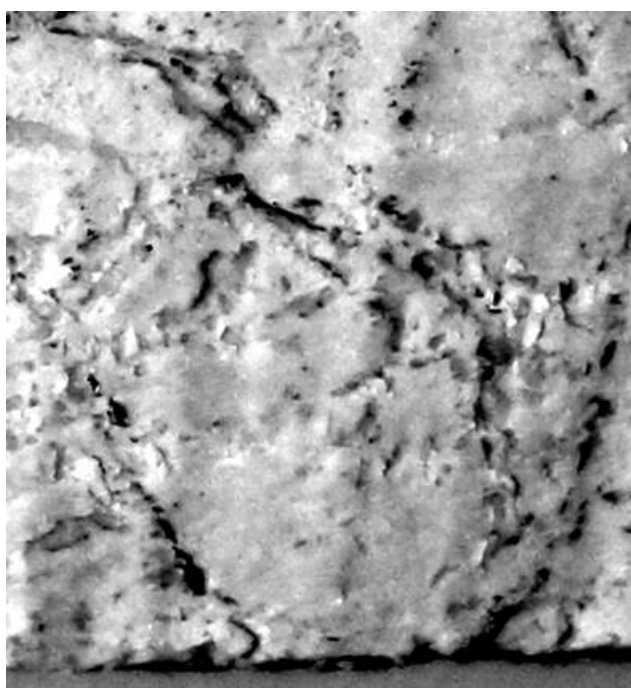


Рис. 18. Увеличенный фрагмент рис. 17. Горизонтальный срез.

Извилистые каналы и мелкие шлиры со следами пластических деформаций.

Фото А.Н. Хименкова

В средней части образца насыщенного газом наблюдается дифференциация в распределении ячеек. Содержание газовых включений в центральной зоне уменьшается, в краевых частях остаётся высоким (рис. 19).



Рис 19. Вертикальный срез. Средняя часть образца с газом Фото П.А. Соболева

В образце без газа, в средней части ледяные шлиры сохраняют ту же морфологию что и в нижней части. Границы шлиров ровные, чёткие (рис. 20). Какие-либо ячеистые структуры не наблюдаются.

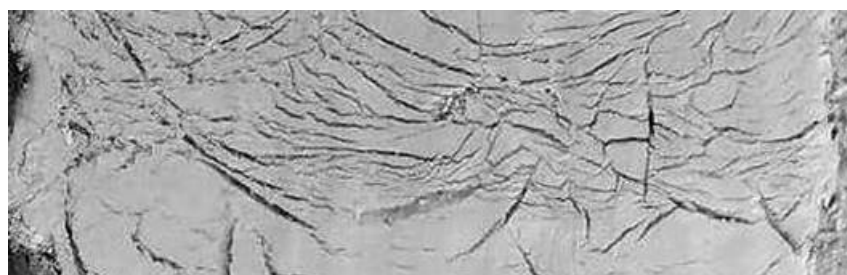


Рис. 20. Вертикальный срез. Средняя часть образца без газа. Вертикальный срез

Фото П.А. Соболева

В образце с газом миграция газа происходит по ветвящимся извилистым каналам, пронизывающим образец и деформирующим первичные криогенные текстуры (рис. 21). Наблюдаемые в данном образце каналы аналогичны образованиям, изученным в образцах, полученных ранее (см. рис. 5). Наблюдаемые текстурные особенности свидетельствуют о деформации первичных криотекстур под напорным воздействием газа, продавливающим себе извилистые каналы в толще мёрзлого грунта.

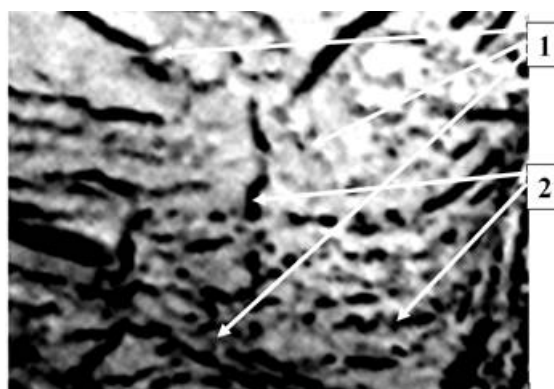


Рис. 21. Средняя часть образца с газом. Вертикальный срез. 1 - Извилистые газовые каналы, частично заполненные ледяными включениями. 2 - деформированные первичные криотекстуры. Фотография в отражённом свете.

Фото А.Н. Хименкова

В верхней части образца с газом ячеек становится значительно меньше, они приурочены в основном к вертикальным ледяным шлирам.

Обсуждение результатов

В ходе проведённых серии экспериментов впервые удалось зафиксировать фильтрацию газа сквозь льды и мерзлые грунты и изучить некоторые сопровождающие её процессы. Установлено что фильтрация газа во льдах и грунтах происходит только при определённых соотношениях давлений и температур. При температурах $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне давлений газа $2 - 4\text{ кг/см}^2$, при которых проводились эксперименты, фильтрация не наблюдалась. Только при повышении температуры до значений близких к области фазовых переходов, она начинала проявляться. Изучение мерзлых образцов каолина, подвергшихся напорному воздействию газа, показало, что в них при пропускании газа под давлением формируются многочисленные разрывные и пластические деформации. Наиболее выражены они вблизи штуцера подачи газа (рис. 3, 11, 12). При этом по всей высоте образцов формируется сеть субвертикально ориентированных каналов, берущих своё начало из зоны примыкания штуцера к грунту. Отдельные каналы прослеживаются на всю высоту образцов, большинство прослеживается фрагментарно. Морфология каналов различна, в некоторых случаях, они представляют из себя полости, частично заполненные мелкими кристаллами льда (рис. 3), в других, выражаются в виде вытянутых углублений на поверхности образца (рис. 8), иногда они выделяются в виде более светлых или тёмных полос, вытянутых в вертикальном направлении (рис. 6). Каналы могут рассекать ледяные шлиры (рис. 5, 21) или формировать вытянутые газовые полости вдоль ледяного шлира (рис. 8).

При всем разнообразии форм, каналы образуют единую систему неравномерно пронизывающую образцы каолина снизу доверху. Важно отметить, что границы, намораживаемых при подготовке образца слоёв, не являются преградой для выделяемых каналов, они без разрывов переходят из слоя в слой.

Проведённые исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы. Подача газа под давлением приводит к возникновению локальных деформаций, по которым разрозненные потоки газ в виде мелких пузырьков (в доли мм) расходится от центра, где находится штуцер, к краевым частям образца. От сформировавшейся системы субветрикальных ветвящихся каналов, пузырьки газа распространяются по всему массиву образца. Движение газовых пузырьков представляется в виде хаотических колебаний, способствующих выбору наиболее ослабленных зон. Поэтому образовавшиеся каналы имеют изогнутую, червеобразную форму (рис. 5, 18, 21). В высокотемпературных условиях, (температура образца около $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) лед, является более твёрдым компонентом по сравнению с мёрзлым грунтом, поэтому первичный рисунок ледяных шлиров в целом сохранился, хотя первичные ледяные элементы частично и были деформированы. При этом на контактах ледяных шлиров с грунтом наблюдается увеличение количества газовых ячеек

Механизм распределения газового потока в мёрзлом грунте подобен механизму гидравлической дисперсии, процессу рассеивания вещества в пористой или трещиноватой среде на границе жидкостей с разными концентрациями [\[20\]](#). Оба процесса обусловлены неоднородностью поля скоростей движения вещества обусловленной извилистостью поровых каналов в породе и разной площадью их реального сечения (рис. 22). Можно предположить, что при движении газа сквозь мёрзлые образцы, будет развиваться схожие процессы.

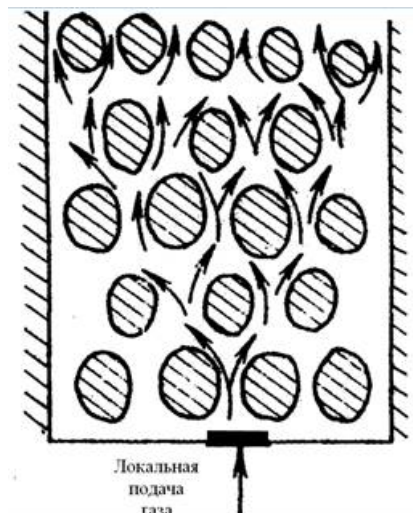


Рис. 22. Рассеяние газа в мёрзлом грунтовом образце,

подаваемого из локального источника (с использованием материалов [\[20\]](#)

Повышение температуры в тонкодисперсном грунте, до значений близких к фазовым переходам, приведёт к резкому возрастанию в них незамёрзшей воды. Вследствие этого, воздействие газа находящегося под давлением, вызовет не только локальные деформации мёрзлого грунта и ледяных элементов, но может воздействовать и на рыхлосвязанную связанную воду. Согласно представлениям В.М. Гольдберга и Н.П. Скворцова в глинах связанная вода заполняет весь объем мелких пор и большую часть крупных. Под воздействием приложенного давления связанная вода "продавливается". Такое продавливание начинается в крупных порах, т. е. той части воды, которая наименее связана с твердой поверхностью. По мере увеличения перепада давления в движение будут вовлекаться и более связанная вода в мелких порах [\[21\]](#). Данный механизм объясняет некоторые элементы криогенного строения образцов подвергшихся воздействию напорного газа. Возможно, ледяные прерывистые, волнистые образования, частично заполняющие вертикальные трещины сформировались при отжати и замерзании рыхлосвязанной воды (рис. 15, 17, 18) в области сброса давления. В низкотемпературных образцах количество незамёрзшей воды минимально и применяемые в опытах давления ($2 - 4 \text{ кг/см}^2$) не в состоянии протолкнуть газ сквозь грунт. При повышении температуры до значений близких к фазовым переходам количество незамёрзшей воды резко возрастает, и используемые давления позволяют газу, выжимая наименее связанную воду, по сформировавшимся каналам, двигаться в объеме мёрзлой породы. В этом случае следует предположить формирование вытянутых или ветвящихся каналов.

Наши эксперименты хорошо коррелируются с данными полученными исследователями Кафедры геофизиологии МГУ им. М.В. Ломоносова. К мерзлоте образцу льдонасыщенного суглинка (при $t = -1^\circ\text{C}$), который был жестко закреплен и не имел возможности деформироваться (распучиваться) подводилась под давлением вода. В этом случае при гидростатическом давлении инъецируемой воды $2-3 \text{ кг/см}^2$ на противоположном верхнем конце образца наблюдалось выдавливание пленочной (незамёрзшей) воды, которая затем замерзала, образовав на поверхности образца прослой льда толщиной до 1 см за период эксперимента 3 - 5 сут [\[22\]](#).

После начала фильтрации в образце формируется постепенно увеличивающаяся зона непрерывного фильтрационного потока общей направленности, в котором газ движется

из области с большим давлением в область с меньшим давлением. Сформировавшееся фильтрационное пространство неоднородно, в различных его частях возникают локальные градиенты давления, обуславливающие изменения направления движения отдельных газовых струй. При этом формируется сеть расходящихся от центра (точка нахождения штуцера подающего газ) веерообразных каналов (рис. 3, 4, 11). Подобные образования наблюдаются при воздействии газа на вязкую жидкость. А.В. Шнайдером описано формирование в модели пористой среды «языков» - древовидных структур, образуемых газовой фазой при вытеснении газом жидкости. В этом случае формируются вытянутые газовые «ветвящиеся отростки», возникающие за счет неустойчивости фронта вытеснения вязкой жидкости газом [23]. В ходе проведения экспериментов в горизонтальных срезах была обнаружена сеть остроконечных ячеек, сформировавшихся вблизи штуцера, ориентированных вершинами острых углов в направлении от штуцера. Размеры ячеек по мере удаления от штуцера уменьшаются, а затем сменяются веерообразными образованиями, состоящими из тонких расходящихся каналов (рис. 5). Аналогичные остроконечные ячейки, тоже ориентированные острым углом в противоположную от штуцера сторону обнаружены и в вертикальном шлере (рис. 14). Рисунок газовых ячеек иллюстрирует движение газовых пузырьков под давлением проталкиваемых сквозь мёрзлый грунт. Газ, подаваемый в нижнюю часть мёрзлого грунтового образца вследствие извилистости поровых каналов и разной площади их реального сечения, будет рассеиваться, искать наиболее слабые зоны и продавливаться по ним. При этом формируются ветвящиеся отростки и древовидные формы аналогичные, описанному выше воздействию газа на вязкую жидкость.

В изучении фильтрации газа получены первые результаты, которые позволяют сформулировать некоторые предварительные выводы.

Газ начинает фильтроваться, если обеспечены определённые соотношения давления газа и прочности вмещающих пород. Вопрос о возможности фильтрации газа сводится в конечном итоге к анализу условий возникновения давлений газа, обеспечивающих деформацию породы хотя бы на локальном участке. Как известно, прочность многолетнемёрзлых пород и льдов в значительной мере определяется температурой. Свойства высокотемпературных мёрзлых пород резко отличаются от низкотемпературных. При повышении температуры в мерзлых породах, в них начинают развиваться система парагенетически связанных процессов: увеличение содержания незамёрзшей воды, появление рассольных ячеек, формирование микротрещин за счёт неравномерных тепловых деформаций минерального скелета и льда, объёмного изменения газовых включений. С увеличением температуры, давление, «защемлённого газа» в порах, будет расти. Это приведёт к дополнительным деформациям минерального скелета или льда [24, 25]. Установлено, что при повышении температур в мерзлых породах одна и та же величина относительной деформации достигается при более малом напряжении. Например при повышении температуры от -20 до -5 °C аналогичных величин деформаций можно достичь при напряжениях меньших в 3-4 раза [26]. Породы переходят из категории твердомёрзлых в пластичномёрзлые, при этом газопроницаемость многолетнемёрзлых пород и льдов резко возрастает. Возникающие под воздействием повышающегося внутреннего давления пластические и разрывные деформации создают в толще породы ослабленные зоны, по которым начинается перемещение газового флюида. Проникая в породу газ, находящийся под давлением продолжает процесс её разрушения и деформирования. Постепенно формируется фильтрационно-деформационная зона, продвигающаяся от зоны повышенного давления вглубь массива породы.

Миграция газа в мёрзлых породах осуществляется путем фильтрационно-деформационного механизма. Он заключается в совместном взаимодействии двух групп процессов. Под воздействием повышенного давления газа, сформированном в силу различных причин, в массиве мёрзлой породы (льда), под воздействием комплекса процессов, развивается система парагенетически связанных деформаций (ослабленных зон). Газ под давлением проникает вглубь породы, расширяет ослабленные зоны. Это приводит к образованию трещин и зон локальных пластических деформаций, 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 в местах разрывов немного сдвинуты, но общий рисунок криогенного строения не изменился (рис. 5, 21).

Если мёрзлая порода содержит газ, находящийся под давлением, то, как показали наши лабораторные исследования, он начинает фильтроваться даже сквозь льдонасыщенный грунт. В результате проведённых экспериментов было установлено, что фильтрация газа в мерзлых образцах обусловлена различными процессами и реализуется при разных давлениях. Фильтрационно-деформационный механизм может реализовываться при незначительных давлениях газа (в наших опытах 2 – 4 кг/см²).

Ранее нами были изложены результаты опытов по изучению фильтрации газов во льдах различной засолённости [27]. В образцах льда с засолённостью 20 г/кг фильтрация начиналась при температуре -3 °C и давлении 1 кг/см². В этом случае фильтрация осуществлялась в виде газлифтового механизма. При высокой минерализации воды во льду формируются многочисленные рассольные ячейки. При низких отрицательных температурах ячейки разъединены, поэтому фильтрации газа, при используемых в экспериментах давлениях, не происходит. При повышении температуры рассольные ячейки начинают сливаться, образуя сеть соединяющихся каналов. Двигающийся пузырёк газа, толкая перед собой жидкость, выдавливает её наверх. Формируется газово-жидкостной поток, переносящий жидкость в область меньшего давления. Вследствие этого механизма на поверхности образца из выдавленной воды сформировался слой рыхлого засолённого льда [27].

В образце с засолённостью менее 5 г/кг и образце пресного льда фильтрация проходила при температуре около -2 °C давлении 2,0 – 2,5 кг/см². В этом случае давление газа приводило к развитию многочисленных разрывных и пластических деформаций, зон дробления, сколов, трещин. Структура кристаллов локально была значительно перестроена. При удалении от источника газа фильтрация осуществляется преимущественно в виде искривлённой цепочки газовых пузырьков. Пузырьки газа, находящегося под давлением выбирают ослабленные зоны и проникают по ним вглубь образца. По проделанному каналу поступают следующие пузырьки. В результате формируется сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление вверх. В местах, где движение газовых пузырьков затруднено, происходит их накопление и развитие каналов и полостей червеобразной формы [27].

В образце каолина давление газа при котором была зафиксирована фильтрация составляло 4 кг/см², при этом температура образца была - 0,5 °C. В результате формируются сеть многочисленных изгибающихся, соединяющихся и ветвящихся газовых каналов, имеющих общее направление, пронизывающих мёрзлый массив и

деформирующих ранее сформировавшиеся криотекстуры. Сами газонасыщенные зоны имеют различную морфологию: вытянутые цепочки газовых пузырей, изометричные скопления газовых пузырей, вытянутые газовые полости, сотовые газовые структуры, разделённые ледогрунтовыми оболочками.

При высоком содержании незамёрзшей воды, газ, находящийся под давлением может выдавливать наименее связанную воду, в область меньших давлений, где она замерзает, после чего процесс повторяется. В результате формируются извилистые каналы, к которым приурочены вытянутые изогнутые ледяные элементы, чередующиеся с газонасыщенными участками (рис. 8, 18, 21)

Если в засоленных льдах, или грунтах в результате повышения температуры (но в диапазоне отрицательных значений) выделяется минерализованная вода (расольные ячейки во льду, криопэги в мерзлых грунтах), миграция газа реализуется путем газлифтового механизма. Двигающийся пузырёк газа толкает перед собой жидкость, при этом формируется газово-жидкостной поток, переносящий жидкость в область меньшего давления [\[27\]](#).

Заключение

В ходе лабораторных исследований было установлено:

- газонепроницаемые при низких отрицательных температурах мёрзлые грунты, в ходе повышении температуры до определённых границ (для каждого вида грунта границы, будут индивидуальны) оставаясь в мёрзлом состоянии, начинают пропускать газ под давлением;
- фильтрация газа сквозь мёрзлые грунтовые образцы сопровождается различными процессами деформации первичного криогенного строения;
- в ходе фильтрации в мёрзлых грунтах формируются новообразования, представляющие из себя газовые включения различной морфологии и размеров;
- изучаемые в лабораторных условиях процессы миграции газа в образцах мёрзлого грунта обусловлены фильтрационно-деформационным механизмом, заключающимся в совместном действии процессов деформации пород под давлением и фильтрации газа по формирующимся при этом ослабленным зонам;
- комплекс парагенетически связанных фильтрационно-деформационных процессов, создавая локальные зоны повышенной проницаемости, обуславливают резкое усиление миграции газовых флюидов в мерзлых породах;
- миграция газов, при повышении температуры в образцах мёрзлых грунтов (в диапазоне отрицательных значений), может происходить при различной льдистости и различных параметрах криогенного строения.

Результаты, полученные в ходе лабораторного изучения фильтрации газа в мёрзлом грунте хорошо коррелируются с данными о мерзлотных образованиях, связанных с фильтрацией газа в многолетнемёрзлых породах при формировании воронок газового выброса [\[17, 28\]](#).

Полученные результаты имеют важное теоретическое и практическое значение в понимании процессов, происходящих в криолитозоне при локальном или глобальном повышении температуры за счёт естественных или техногенных воздействий. В этом

случае, в многолетнемёрзлых породах, получают развитие две группы процессов. Одна, уменьшает прочность пород за счёт увеличения количества связанной воды, появления рассольных ячеек, развития деформаций при тепловом расширении и др. Другая, связана с усилением воздействия на мерзлые породы содержащихся в них газов, имеющих различный генезис: биохимический газ, содержащийся в газовых карманах; газ, выделяющийся при разложении газогидратов (биохимический, катагенетический (термогенный) или смешанный); катагенный газ поступающий с больших глубин и др. При достижении давлений, превышающих предел прочности высокотемпературных многолетнемёрзлых пород, в них развиваются деформации, по которым и происходит фильтрация газа. Данные процессы ещё не изучены в полной мере. Проведённые эксперименты показали, что лабораторное моделирование фильтрации газа в мерзлых породах является эффективным методом изучения данного природного явления. Дальнейшие исследования позволят продвинуться в понимании проблем, связанных с развитием взрывных процессов (выбросов газа) при бурении скважин в многолетнемёрзлых породах, выбросов углеводородных газов на шельфе Арктических морей, формированием воронок газового выброса, поступления парниковых газов в атмосферу в Арктической зоне.

Библиография

1. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дисс.... д.г.-м.н. М.: Дальнаука, ДВО РАН. - 2010. 48 с.
2. Краев Г. Н. Закономерности распространения метана в многолетнемёрзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу. Автореф дисс 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 Арктика и Антарктика, 2019 - 3 36 канд. геогр. М.: ЦЭПЛ РАН. 2010. 20 с.
3. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в туронских отложениях на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа, 1997, № 3, с. 16–21.
4. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности / А.Р. Курчиков. М., Недра, 1992, 231 с. Kurchikov, A.R., 1992. Hydrogeothermal Criteria of Oil and Gas Bearing. Nedra, Moscow, 231 p. (in Russian)
5. Курчиков А.Р. Гидрогеотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 11–12, с. 1846–1853.
6. Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений // Геология нефти и газа, 1997, № 9, с. 30–37.
7. Валяев Б.М. Приповерхностный интервал нефтегазонакопления: специфика и масштабы утилизации углеводородных флюидов // Геология морей и океанов: Материалы XVII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М., ГЕОС, 2007, т. 1, с. 92–95
8. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б. Связь очагов активного нефтегазонакопления и глубинных криогенных источников // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Сб. науч. тр. Новосибирск, Наука, 1997, с. 193–199.
9. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ. 2009. 192 с.
10. Бадю Ю. Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи М.: Научный мир. 2018. 232 с.
11. Якушев В.С. Одна из возможных причин газовых выбросов в толщах

- многолетнемерзлых пород // Геология нефти и газа - 1989. - №4. - С. 45-47
12. Чувилин Е. М., Гребенкин С. И., Сакле М. Влияние влагосодержания на газопроницаемость пород в мёрзлом и талом состояниях. // Криосфера Земли. - 2016, т. XX. - № 3. - С. 71-78
13. Чувилин Е.М., Соколова Н.С., Спасенных М.Ю. метан в мерзлоте – ресурс или опасность? 2019. <https://goarctic.ru/work/metan-v-merzlote-resurs-ili-opasnost/>.
14. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли, т. II, № 4, 1998, с. 42-50.
15. Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В., Мизулина Н.Б., Попов А.П., Березняков А.И., Свечников А.М. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР, Серия геологическая, № 2, 1989. С.118-128.
16. Чабан П.Д. О газовых гидратах в вечномерзлых россыпях. Колыма, № 6, 1991, с.18-19.
17. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // Арктика и Антарктика. - 2018. - № 3. - С. 1-25. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27524. URL: http://e-notabene.ru/arctic/article_27524.html
18. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Никонов Р.А., Сизов О. С. Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озёрах // Арктика: экология и экономика № 2 (34), 2019. С. 31 – 47.
19. Эпов М. И., Ельцов И. Н., Оленченко В. В., Потапов В. В., Кушнаренко О. Н., Плотников А. Е., Синицкий А. И. Бермудский треугольник Ямала // Наука из первых рук. Вып. 5(59), 2014. С. 14-23
20. Ленченко Н.Н. Динамика подземных вод. М.: МГУ. 2004. 65с.
21. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах М.: Недра, 1986. 160 с.
22. Основы геокриологии Ч. 1 : Физико-химические основы геокриологии. М.: Изд-во МГУ. 1995. 368 с.
23. Шнайдер А.Течения двухфазных смесей в пористой среде при волновом воздействии: автореф. к. ф.-м.н. н.н. Тюмен. гос. ун-т. - Тюмень, 2006. - 19 с.
24. Роман Л. Т., Мерзляков В.П., Малеева А.Н. Влияние степени водогазонасыщения на температурные деформации мёрзлых грунтов. // Криосфера Земли, 2017. т. XXI. № 3. С. 24-31.
25. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов М.: МАИК. 2002. 426 с.
26. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра. 1990. 2002г. 450с.
27. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. О фильтрации газов в многолетнемерзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне. // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 3. – С. 16 - 38. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29627
28. Хименков А.Н., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В. Флюидодинамические геосистемы в криолитозоне. 2 Часть Криолитодинамические и криогазодинамические геосистемы. // Арктика и Антарктика. - 2018. - №2. - С. 48-70. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.2.26377. URL: http://e-notabene.ru/arctic/article_26673.html

