

Арктика и Антарктика

*Правильная ссылка на статью:*

Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Гагарин В.Е., Соболев П.А. — О фильтрации газов в многолетнемёрзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне. // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=29627](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29627)

## **О фильтрации газов в многолетнемёрзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне.**

**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](mailto:a_khimenkov@mail.ru)



**Кошурников Андрей Викторович**

кандидат геолого-минералогических наук  
Ведущий научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геокриологии,  
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [msu-geophysics@mail.ru](mailto:msu-geophysics@mail.ru)



**Карпенко Фёдор Сергеевич**

кандидат геолого-минералогических наук  
ведущий научный сотрудник, ИГЭ РАН  
101000, Россия, г. Москва, ул. Уланский Переулок, д. 13. стр.2

✉ [kafs08@bk.ru](mailto:kafs08@bk.ru)



**Кутергин Валерий Николаевич**

кандидат геолого-минералогических наук  
Заведующий Лабораторией изучения состава и свойств грунтов, ИГЭ РАН  
101000, Россия, г. Москва, ул. Уланский Переулок, д. 13. стр.2

✉ [vank@bk.ru](mailto:vank@bk.ru)



**Гагарин Владимир Евгеньевич**

кандидат геолого-минералогических наук  
Старший научный сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра геокриологии  
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ [msu-geophysics@mail.ru](mailto:msu-geophysics@mail.ru)

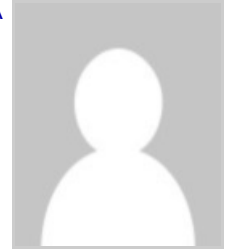


**Соболев Пётр Александрович**

Инженер, ООМГУ - 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 является проблема фильтрации газа в многолетнемерзлых породах. В настоящее время, в геокриологии, возможность движения газовых флюидов предусматривается только в оттаявших (талых) породах. Предметом исследования являются процессы, обуславливающие и сопровождающие перераспределение газа в воронках газового выброса, а также в образцах искусственного льда, при напорном воздействии газа. Рассмотрены обобщённые данные по строению воронок и условий их формирования. Причиной возникновения воронок газового выброса является: образование в толще многолетнемерзлых пород зон накопления подземного газа с аномально высоким давлением; фильтрация газа в высокотемпературные мерзлые породы и подземные льды; формирование газонасыщенных ледогрунтовых штоков и взрывное их разрушение. Особое внимание было уделено лабораторным исследованиям фильтрации газа в мерзлых породах и льдах. Основным методом исследования является сравнительный анализ данных по изменению свойств мерзлых грунтов и льдов при их нагревании в пределах отрицательных температур. При изучении образцов льда, подвергшихся напорному воздействию газа, использовались методы текстурных и структурных исследований в проходящем, отражённом и поляризованном свете. Установлено, что в мерзлых породах и подземных льдах возможна фильтрация газа при формировании соответствующих соотношений между характеристиками пород (прочностными, деформативными, структурными), зависящими от их температуры и давлением внутригрунтового газа. Выявлено, что 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:** криогенные флюидодинамические системы, флюидогеодинамика, флюиды, фильтрация газа, инъекционные льды, течение льда, пластические деформации, многолетнемерзлые породы, газовые гидраты, воронка газового выброса

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2019.3.29627

**Дата направления в редакцию:**

30-05-2019

**Дата рецензирования:**

31-05-2019

*Работа выполнена в рамках государственного задания: тема №АААА-А19-119021190077-6 и при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-05-00294), в части изучения фильтрации газа в многолетнемёрзлых грунтах.*

### **Введение**

Исследования, проведённые в последние десятилетия показали, что северным экосистемам отводится особая роль в современном цикле  $\text{CH}_4$ , в почвах этих территорий сосредоточено более 30% всего органического углерода планеты, при этом подавляющая его часть законсервирована в мерзлоте. По оценкам Г. Н. Краева объёмы  $\text{CH}_4$  в верхних 25 м разреза ММП составляют 7,8-10,0 млрд.  $\text{м}^3$   $\text{CH}_4$ , при этом основные объёмы сосредоточены в ММП, слагающих аласы. Прогнозируемые климатические изменения к 2100 г. по результатам моделирования глубины сезонного оттаивания в модели тепло- и влагопереноса в ММП (ИФА РАН), приведут к оттаиванию не более 3 м отложений (порядка 2 м на водоразделах, и 3 м на аласах). При этом увеличение глубины оттаивания приведет к высвобождению из ММП 1,3-1,7 млрд.  $\text{м}^3$   $\text{CH}_4$  [3]. Наличие мёрзлых пород является ведущим геологическим фактором, определяющим пространственно-временную изменчивость потоков метана в атмосферу. Проблемы фильтрации газа сквозь многолетнемёрзлые породы до недавнего времени не существовало. Они считались газонепроницаемыми [1]. По сложившимся представлениям, только после оттаивания в них формируются миграционные потоки в форме струй пузырьков газа, преимущественно метана ( $\text{CH}_4$ ), которые поступают в водную толщу или атмосферу. [2]. Между тем данные, полученные при изучении воронок газового выброса, обнаруженных в 2014 году на Ямале, и лабораторные исследования показали, что миграция газа в многолетнемёрзлых породах не только возможна, но и происходит при сочетании определённых условий.

### **Взрывные процессы при образовании воронок газового выброса**

В 2014 – 2015 гг. на севере Западной Сибири (Ямале, Гыдане, Тазовском) были обнаружены воронки, с вертикальными стенками, глубиной до нескольких десятков метров. Вокруг них наблюдался концентрический разброс льда и грунта на расстояние до сотен метров, что указывает на взрывной характер процессов их формирования. Рассматриваемые процессы относятся к физическим взрывам, связанным с возникновением внутреннего давления в полости, заполненной жидкостью или газом, превышающим предельно допустимые значения прочностных характеристик вмещающей среды. Физические взрывы чаще всего связаны с неконтролируемым высвобождением потенциальной энергии сжатых газов из замкнутых объёмов [4]. К настоящему времени на севере Западной Сибири обнаружено уже 8 воронок. Анализ материалов различных исследователей позволил обобщить данные об условиях формирования воронок.

1. Все воронки приурочены к так называемым "тёплым" ландшафтам: хасыреям, нижним частям склонов, днищам ложбин, поросших кустарником, поймам, долинам ручьёв, берегам водоёмов, песчаным раздувам на бровке террасовой поверхности.
2. По мнению наиболее авторитетных специалистов, занимавшихся проблемой происхождения воронок газового выброса, таких как В. И. Богоявленского [5], М. О.

Лейбман, А. И. Кизякова [6], М. И. Эпова, И. Н. Ельцова, В. В. Оленченко, [7], С. Н. Булдовича, В. Хилимонюк [8], А.Н.Хименкова, [9] и др., данные образования, обязаны своим происхождением выбросу подземного газа. При этом на происхождение самого газа единой позиции пока не выработано. По генезису он может быть катагенетическим и поступать из глубинных подмерзлотных горизонтов, биохимическим, образующимся в результате жизнедеятельности микроорганизмов и смешанным.

3. На большинстве участков непосредственно перед взрывом зафиксированы бугры пучения высотой до 5-6м. Выявленное время существования бугров составляют от 1 года до 70 лет.

4. Некоторые взрывы сопровождались возгоранием газа.

По нашим представлениям основным источником газа, обуславливающим взрывные процессы в многолетнемёрзлых, грунтах являются гидратосодержащие многолетнемёрзлые породы, а причиной нагрева, выводящего их из равновесного состояния - поверхностные озёра, широко распространённые в Западной Сибири.

#### **Роль фильтрации газов при формировании воронок газового выброса.**

Низкотемпературные многолетнемёрзлые породы в естественных условиях газонепроницаемы. Тем не менее, в результате внешних воздействий и при определенных условиях в них могут формироваться газопроницаемые зоны. Одним из главных условий для этого является повышение температуры до значений близких к фазовым переходам. Условия подготовки взрывных процессов в многолетнемёрзлых породах формирующих воронки газового выброса подробно рассмотрены в наших публикациях [9, 10, 11, 12], поэтому в данной статье ограничимся кратким рассмотрением основных положений.

Подготовка естественного взрыва, формирующего воронку газового выброса, происходит в несколько этапов [12].

1. Исходной точкой, вызвавшей все последующие события, является локальный прогрев толщи многолетнемёрзлых пород. Под поверхностным водоёмом формируется талик и зона растепления с более высокими отрицательными температурами, чем в окружающих многолетнемёрзлых породах. Под действие локального нагрева поверхностным водоёмом в мерзлых породах, происходит повышение температуры в пределах отрицательных значений. В области локального прогрева ММП под озёрами температуры многолетнемёрзлых пород находятся в диапазоне -1 - -3 °С.

2. После того, как температуры в слое газогидратов (в случае Ямальского кратера залегающих на глубине 60-80 м [13]), превысят значения, обеспечивающие их устойчивое состояние, начинается процесс диссоциации с выделением метана, с начальным давлением 2,2 – 2,6 МПа [14].

3. Газ, находящийся под давлением, начинает фильтроваться в наименее прочные высокотемпературные мёрзлые породы. Деформация мёрзлой породы, под давлением газа, вызывает в ней пластическим и разрывные деформации (рис. 1), что создает благоприятные условия для усиления фильтрации по трещинам и ослабленным зонам.



Рис. 1. Газовые флюиды и газовые ячейки в стенках грота в нижней части Ямальского кратера. Фото В. Пушкарёва (ноябрь 2014 г).

Отвод газа (за счет фильтрации) стимулирует процесс диссоциации газогидратов и выравнивает давления газа до прежнего уровня. Данный процесс поддерживает высокое давление в фильтрующихся газовых пузырьках. Постепенно, в области единого фильтрационного пространства формируется ледогрунтовой газонасыщенный шток пронизывающий массив многолетнемёрзлых пород. По всей высоте штока давление в пузырьках газа будет соответствовать значения, наблюдающимся в зоне диссоциации. Высокое давление в массиве многолетнемёрзлых пород с одновременным давлением снизу приведёт к движению ледогрунтового штока вверх.

4. Движение газонасыщенной ледогрунтовой массы приводит к пластическим деформациям пород подошёрного талика, их выпучиванию и промерзанию. В результате формируется низкотемпературный газонепроницаемый, прочный 6-8 метровый слой многолетнемёрзлой породы, являющийся экраном для движущегося снизу газового потока. При деформации экранирующего горизонта, под воздействием давления снизу, развивается бугор пучения.

5. После того, как пластические деформации мерзлой кровли достигнут предельных значений, происходит её разрыв и выброс ледогрунтового материала насыщенного газом, находящимся под повышенным давлением [12].

Различные начальные условия, а также разнообразие и интенсивность протекающих в период подготовки взрыва процессов обуславливают различные сценарии развития воронок газового выброса, от выхода газа в подошёрный талик (в случае большого глубокого озера) до взрыва без образования бугра (в случае залегания газогидратов на небольшой глубине, и их быстрого разложения).

#### **Флюидодинамические процессы при формировании воронок газового выброса**

В независимости от генезиса газа, причин вызывающих его перераспределение, расстояния, на которое он перемещается, происходит формирование саморазвивающейся газодинамической геосистемы, состоящей из нескольких связанных между собою зон: первичного формирования газа, области транзита и области накопления. Данная геосистема имеет чёткие границы, определённую морфологию,

свойства и структурные связи определяемы индивидуальными особенностями строения многолетнемёрзлых пород и неоднородностями температурного поля. Каждая зона соответствует определенной стадии перераспределения газа в многолетнемёрзлых породах.

Двигаясь по трещинам и микропорам газ, находящийся под давлением не только фильтруется сквозь мёрзлую породу, но и деформирует её. Постепенно фильтрующийся газ, формирует единый поток, пронизывающий ледогрунтовой массив. При этом в зоне растепления формируется «единое фильтрационное пространство», в котором поры и каналы соединены между собой. И где газовый флюид из области с большим давлением, фильтруется в область с меньшим давлением (как правило, с общим направлением к поверхности). В этом потоке газовые флюиды характеризуются макропараметрами (скоростью движения, давлением, температурой и др.). Неустановившееся «единое фильтрационное пространство» неоднородно, в различных его частях возникают градиенты давления, обеспечивающие фильтрационный массоперенос в мёрзлой породе. Вследствие этого, газовый флюид оказывает силовое воздействие на стенки пор и трещин, что приводит к их расширению [15]. При достижении давлений превышающий предел длительной прочности, льдонасыщенная порода начинает течь, выдавливая вышележащие слои. Рассматривая особенности фильтрации газов в многолетнемёрзлых грунтах, следует уделить внимание последовательности связанных друг с другом процессов. Единое фильтрационное пространство формируется за счет циклической смены двух взаимосвязанных процессов фильтрации газа и деформации мёрзлых пород на локальных участках. Давление деформирует породу с образованием различного рода дислокаций. По дислокациям происходит фильтрация, воздействующая на породы и приводящая к пластическим и разрывным деформациям. Деформации в свою очередь способствуют усилению фильтрации. В целом механизм формирования воронок газового выброса можно определить как фильтрационно-деформационный. Индивидуальные особенности развития данной геосистемы и её строение определяется конкретными геологическими и ландшафтными условиями, а также определяемой ими спецификой массотеплообменных процессов.

### **Формирование зоны повышения температуры многолетнемёрзлых пород за счёт нагревания поверхностными водоёмами**

В природе наиболее эффективным "нагревателем" являются поверхностные водоёмы. Они обеспечивают как быстрый прогрев многолетнемёрзлых пород при своём появлении, так и быстрое возвращение в первоначальное температурное состояние при осушении.

На рис. 2 изображено строение температурного поля под озером при формировании несквозного талика. Данные были получены при исследовании озера Иллисарвик, расположенного в дельте р. Маккензи. Размер 300 x 600 с максимальной глубиной 4,5 метра. Среднегодовая температура мёрзлых пород в районе озера находится в диапазоне – 8 - -10°C. Мощность мерзлоты – 400 – 600м. На рис. 2 приводятся данные температурных измерений субаквальных осадков. Граница талых пород залегает на глубине около 24 м, ниже залегают высокотемпературные мёрзлые породы, температура которых понижается от -1°C на глубине около 30 и до -3°C глубине около 90 м (рис. 2) [16]. В случае формирования несквозного талика под водоёмом формируется двучленное строение пород. Непосредственно под водоёмом породы имеют положительные температуры (талики), ниже залегают высокотемпературные мёрзлые породы. Такое строение обуславливается, тепловой инерционностью области интенсивных фазовых переходов на границе талой и мерзлой зон. Мёрзлые породы, вследствие своей большей

теплопроводности, по сравнению с талыми, и слабыми фазовыми переходами прогреваются и остывают гораздо быстрее.

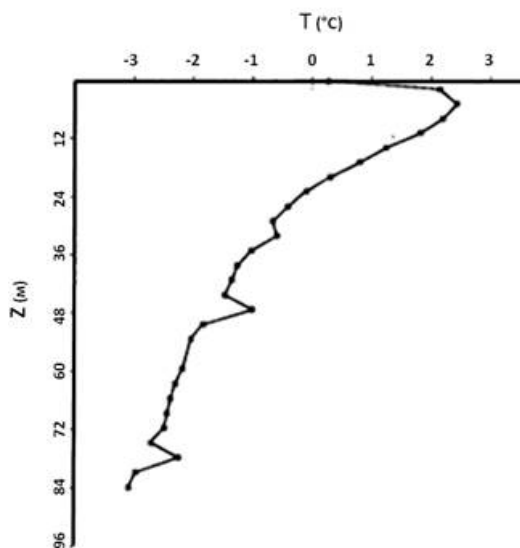


Рис. 2. Температурный профиль, в субаквальных осадках центральной, глубоководной части озера [16].

Для севера Западной Сибири, где были обнаружены кратеры газового выброса, отепляющее влияние озера на многолетнемёрзлые породы можно оценить, анализируя температуры в скважинах, пробуренных на хасыреях – днищах осушившихся озёр. Температуры, замеренные на поверхности хасыреев, на глубине 60-80м находятся в диапазоне: -3 - -2,5°C, для III морской террасы и --1,8 - -1,6°C для поймы. Температуры многолетнемёрзлых пород вне зоны озёр на глубине 60-80м, находятся для III морской террасы и поймы в диапазоне -5,5 - -5°C [17].

Данные материалы получены американскими геофизиками исследовавшими таликовые зоны под озёрами позволили выявить форму зон растеплённых многолетнемёрзлых пород под водоёмами. Они имеют специфическую форму в виде перевернутого конуса или цилиндра (рис. 3) [18]. Наиболее широкая часть конуса соответствует диаметру озера. сужение прослеживается на глубину 100 м и более. По материалам исследования полученная конфигурация конусов соответствует области пониженных скоростей связанных с тем, что при повышении температуры увеличивается количество незамёрзшей воды, газовых пузырьков, а в засоленных грунтов появляется свободная минерализованная вода (криопэг). Очевидно, что все эти признаки появляются при нагревании многолетнемёрзлых пород. Под небольшими озёрами иногда конусов не видно, но на срезах, проведённых через 100 м, выделяются округлые пятна, соответствующие изменению свойств мерзлых пород. Под воздействием температуры. Это является свидетельством того, что даже небольшие озёра оказывают значительное отепляющее воздействие на многолетнемёрзлые породы.

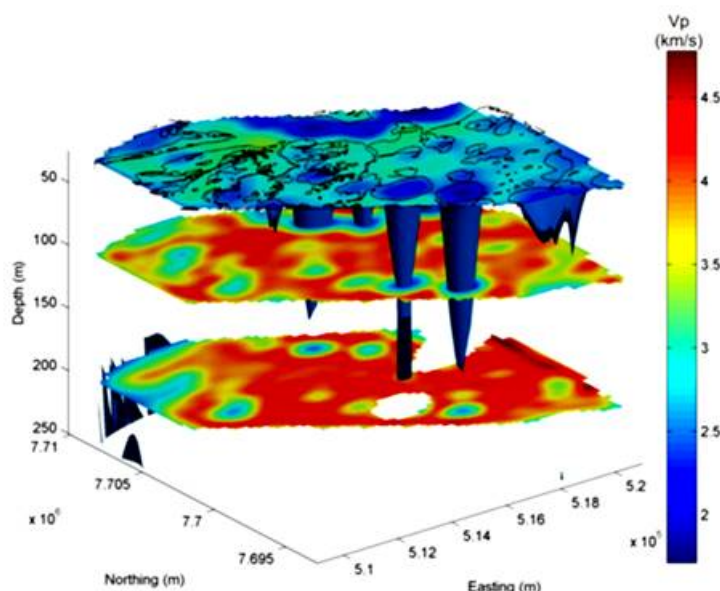


Рис. 3. Трёхмерное распределение областей пониженных скоростей под озерами по данным томографии [18].

Рассмотренные материалы показывают, что под поверхностными водоёмами формируются локальные зоны относительно рыхлых и соответственно менее прочных высокотемпературных мёрзлых пород, окруженных более прочными низкотемпературными массивами. В том случае, когда растеплению подвергнутся гидратосодержащие породы, в них могут создаваться условия для диссоциации газогидратов и выделения газа.

#### **Формирование зон аномально высокого давления в растеплённых многолетнемёрзлых породах при разложении газогидратов**

Моделирование процесса разложения газовых гидратов в пористых средах при нагревании указывает на возможность возникновения высоких пластовых давлений, значительно превышающих давление гидроразрыва пласта. В этом случае произойдёт разрыв сплошности пород с образованием трещин [19]. Для метана, при температурах в диапазоне 268,15 К (-5 °С) ÷ 273,15 К (0 °С) равновесное давление в системе газ — вода (лед) — гидрат находится в диапазоне 2,2 – 2,6 МПа [14]. В естественных условиях газ, содержащийся в субаквальных осадках, состоит в основном из метана с примесью диоксида углерода, поэтому реальные равновесные значения будут отличаться [20]. Если учесть, что на глубине 60-80 метров гидростатическое давление имеет значение около 0,7 МПа, то начнётся фильтрация газа и пластические деформации в перекрывающих горизонт газогидратов высокотемпературных многолетнемёрзлых породах.

#### **Изменение свойств гидратосодержащих многолетнемёрзлых пород при диссоциации газогидратов**

При разложении газогидратов в мерзлом грунте система из конденсированного (твёрдого) состояния переходит двухфазное (метан и вода). При этом высвобождается энергия сжатого газа в виде энергии ударных волн и теплового движения (температуры) молекул. Эти процессы резко повышают поровое давление, что приводит к образованию микротрещин. Прорастая, под достаточно высоким давлением высвобождаемого газа, они образуют субвертикальные каналы и вытянутые поры. В результате образуется



трещиновато-пористая структура мерзлого грунта [11].

И.А. Гарагаш отмечает, что диссоциация газогидратов изменяет плотность и механические свойства породы. Выделение газов приводит к резкому росту внутривещного давления и снижению прочности мёрзлого массива. Вблизи включений газогидратов начинают развиваться локальные пластические деформации. Этот процесс, по мере разложения газогидратов, ускоряется и постепенно вся область диссоциации оказывается охваченной зонами локальных пластических деформаций, ориентированных под углом 45° к горизонту. В результате массив породы разбивается на отдельные блоки, разделенные узкими зонами повышенной трещиноватости, создающими возможность появления фильтрационных потоков в виде пузырьков газа [21].

Исследования Е. М. Чувилина и С. И. Гребёнкина показали, что диссоциация порового гидрата, сопровождается увеличением объёма свободного порового пространства. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего ранее практически непроницаемые мёрзлые гидратосодержащие породы могут становиться проницаемыми [22]. Для образцов с суммарной степенью заполнения пор (около 69%) газопроницаемость выросла более чем на порядок. Для образцов с высокой гидрато- и льдонасыщенностью (около 95%), который был в исходном состоянии практически непроницаемым (менее 0,01 мД), в процессе диссоциации порового гидрата зафиксирована газопроницаемость до 0,06 мД. В ходе экспериментов было установлено, что снижение гидратонасыщенности мерзлых образцов в условиях диссоциации порового гидрата сопровождается уменьшением их прочности [22].

Экспериментальные исследования, проведённые В.С. Якушевым показали, что вещественный состав пород оказывает значительное влияние на температуры при которых начинается диссоциация газогидратов. В песчаных породах с низкой минерализацией поровых разложение гидратов имеет массовый характер при температурах вблизи -1 °С. В более дисперсных породах (супеси, суглинки), температура полного разложения реликтовых гидратов понижается вплоть до -3 - -4 °С. Во влажных засоленных глинах разложение реликтовых гидратов может происходить при разных температурах и даже небольшое (доли градуса) повышение температуры может приводить к массовому выделению газа из разлагающихся гидратов [23].

### **Изменения свойств многолетнемерзлых пород и льдов при повышении их температуры**

При локальном нагреве поверхностным водоёмом в мерзлых породах начинают происходить объёмные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны по границам кристаллов, увеличивается содержание незамёрзшей воды, газовые включения, расширяясь, образуют каналы между собой. Прочность мерзлых пород и льдов уменьшается, увеличивается пористость, формируется достаточно развитая система фильтрационных каналов, связывающих между собой поры. Таким образом, в зоне нагрева происходит своего рода разгрузка пластового давления, а вместе с этим увеличивается его газопроницаемость.

В работе Ю.К. Зарецкого [24] дана структурная схема фазовых зон мёрзлой породы, при переходе её из твердомерзлого в талое состояние. В этом случае помимо твердомерзлой и талой зон, выделяются промежуточные - оттаивающая и пластичномерзлая зоны (рис. 4). Оттаивающая зона по своим свойствам приближается к талым породам, но формально относится к мёрзлым, поскольку при температуре около 0°С в ней присутствуют

кристаллы льда, хотя и не скрепляющие породу.

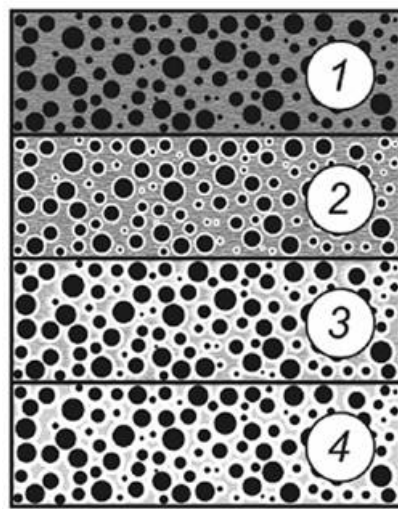


Рис. 4. Модель оттаивания мерзлой породы: схема расположения зон оттаивания,

1 – талая зона, 2 – оттаивающая зона, 3 – пластичномерзлая зона,

4 – твердомерзлая зона [24].

Мёрзлые грунты в зависимости от их температуры, величины и времени внешнего воздействия могут вести себя как твёрдые или пластичные. При отрицательных температурах около 0°C, значения их прочностных и деформационных характеристик резко уменьшаются [25, 26]. Л. Т. Роман выявлено закономерное увеличение температурных деформаций в газонасыщенных многолетнемерзлых породах при изменении их температуры. Это относится не столько к объёмным изменениям защемлённых газов, сколько к деформациям их оболочки, образованной скелетом или льдом. С увеличением температуры "защемленного" газа давление в порах будет расти. Это приводит к дополнительным деформациям скелета [27]. Локальный нагрев многолетнемерзлых пород, как бы "рыхлит" ранее газонепроницаемую толщу.

Распределение деформаций в мёрзлой породе при повышении температуры и постоянном давлении аналогично увеличению трещиноватости в образцах скальных пород при повышении температуры в условиях постоянного гидростатического давления (рис. 5).

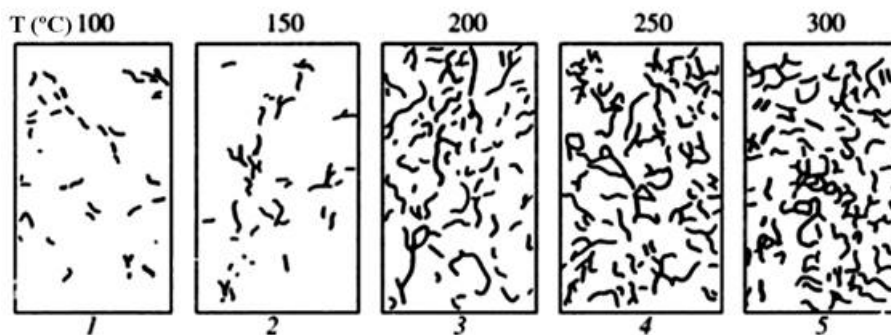


Рис. 5. Развитие межзерновой трещиноватости в образцах амфиболита

при повышении температуры, постоянном гидростатическом

давлении 180 МПа и постоянном сжатии 45 МПа [28].

Как видно на рис. 5, количество трещин в массиве образца постоянно увеличивается при повышении температуры.

Подводя итог рассмотрению роли фильтрации газа в формировании воронок газового выброса, отметим, что исследование данной темы в полевых условиях крайне затруднительно в силу того, что взрывные процессы происходят случайно, и заранее подготовить полноценные научные исследования невозможно. Скорости изменения, образовавшихся объектов, чрезвычайно высоки. В течение одного - двух летних месяцев стенки воронок сильно оттаивают, а сами воронки могут быть полностью заполнены водой. Всё это предопределило необходимость проведения изучения фильтрации газа в мерзлых породах в лабораторных условиях.

### **Лабораторное изучение фильтрации газа в многолетнемёрзлых грунтах**

Изучение фильтрации газа сквозь мерзлые породы и льды проводились совместно сотрудниками Института геоэкологии РАН и Кафедры геокриологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Программа исследований предполагает проведение опытов, как на льдах различной минерализации, так и на грунтовых образцах различного гранулометрического и минералогического состава и засоленности. Для проведения экспериментов была создана установка, обеспечивающая: подготовку образцов льда и мёрзлых грунтов кубической формы, размером 20x8x8; подачу газа под давлением в нижнюю часть образца; проведение геофизических исследований образцов до и после подачи газа. [\[29\]](#).

Первая серия экспериментального изучения фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах проводилась на образцах льда различной засоленности (10 г/л, 5г/л, пресный лёд). После промораживания, температура льда понижалась до - 9°С и снизу подавался газ из штуцера под давлением около 2 атм. При температуре - 9°С фильтрации газа сквозь лёд не наблюдалось. После этого температура повышалась. При температурах около -3°С фиксировался выход газа с поверхности образца. По окончании опыта проводились структурные исследования образцов.

#### **Лёд с минерализацией 10 г/л**

Изучение структуры льда при промораживании раствора с минерализацией 10 г/л показало, что при подаче газа во лёду формируются многочисленные субвертикальные каналы, пронизывающие образец льда на всю высоту (рис. 6, 7). Каналы представляют из себя цепочки круглых и вытянутых газовых пузырьков около 1-2 мм в поперечнике. Используя ослабленные зоны, фильтрующийся сквозь лёд газ движется под давлением вверх (рис. 7). В качестве ослабленных зон выступают рассольные ячейки пронизывающие кристаллы льда. При своём движении газ выдавливает минерализованный раствор. На рисунке хорошо видно одновременное поступление газа и жидкости на поверхность образца (рис. 6). Структурные исследования показали, что каналы фильтрации газа в поперечном сечении имеют округлую, угловатую и вытянутую формы. В верхней части образца они распределены довольно равномерно, наблюдаются локальные неоднородности в виде линейных образований. В нижней части образца каналы концентрируются в центральной части, поблизости от штуцера подачи газа. Образец пересекают несколько трещин без видимой ориентировки, которые возникли в результате деформации льда под воздействием давления оказываемого газом.

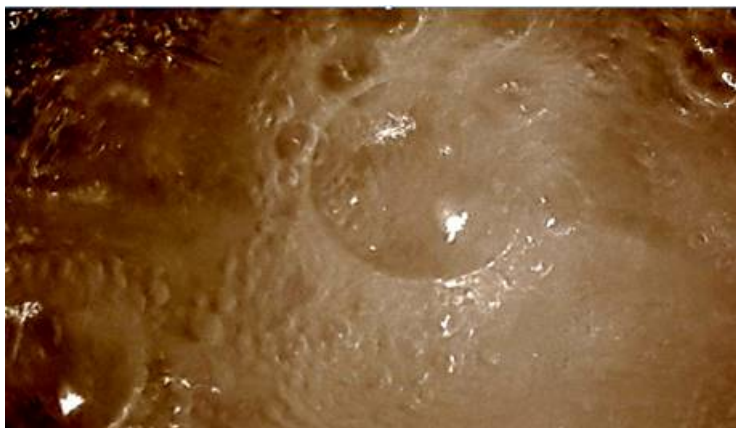


Рис. 6. Фотография поверхности ледяного образца с минерализацией 10г/л в ходе процесса фильтрации газа под давлением. Фото П.А. Соболева

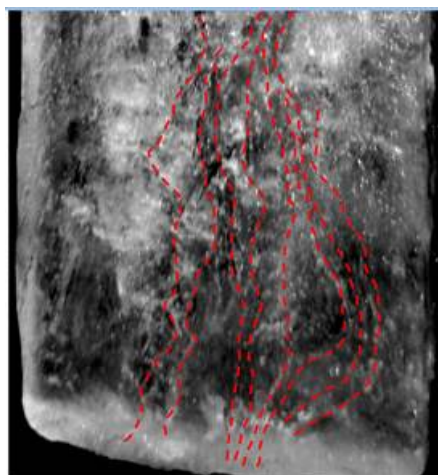


Рис. 7. Ориентировка газовых каналов в нижней части образца.

Съёмка в проходящем свете. Фото А. н. Хименкова

#### **Лёд с минерализацией 5 г/л**

Для предотвращения формирования рассольных зон и более быстрого формирования льда образец подготавливался с помощью послойного налива. Таким образом, удалось устранить формирование рассольных зон в образце льда.

Для первичного строения образца характерны скопления газовых пузырьков в центральных частях каждого заливаемого слоя и на контактах слоёв (рис. 8). Эксперимент показал, что подача газа под давлением привела к значительным изменениям первичного строения образца. Обнаружены многочисленные свидетельства фильтрации газа. В первую очередь это связано с формированием каналов с газовыми включениями субвертикальной ориентировки, пронизывающие образец или на всю высоту или прослеживающиеся в нескольких слоях.



Рис. 8. Фотографии образца в трех параллельных плоскостях: а) и в) внешние плоскости, б - разрез образца по центру. Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова.

Газовые каналы представляют из себя цепочки пузырьков с диаметром 1 - 2 мм. Наряду с цепочками пузырьков встречаются червеобразные каналы заполненные газом шириной 2 -3 мм. Выявлены каналы сложного строения, нижняя часть которых имеют червеобразную форму толщиной до 2-3 мм, затем переходит в трещину рассекающую лёд и выше продолжают в виде цепочки газовых пузырьков около 1 мм в диаметре.(рис. 9).



Рис. 9. Газовый канал пересекающий границы слоёв льда.

Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова

На контактах слоёв наблюдаются значительные деформации кристаллов льда,

представляющие из себя сколы и трещины. Они ориентированы вертикально и разрушают контакты слоёв на прямоугольные блоки (рис. 10). К субвертикально ориентированным трещинам приурочены вытянутые пузырьки воздуха.



Рис. 10. В массиве льда наблюдаются сколы и трещины отражающие напряжения во льду. Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова

К некоторым газовым каналам приурочены ветвящиеся трещины (рис. 8в, 11). При этом все трещины заполнены газовыми пузырьками размером до 1мм. К границам слоёв приурочены неравномерные скопления газовых пузырьков. Утолщение газонасыщенных зон на контактах слоёв связано с подходящими газонасыщенными каналами (рис. 11)



Рис. 11. Газовые каналы пересекающие слои льда. Неравномерное газовыделение на контактах слоёв. Ветвящиеся трещины в центральной части образца.

Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова

Наряду с разрывными нарушениями во льду прослеживаются пластические деформации, которые маркируются вытянутыми изогнутыми и волнообразными газовыми включениями (рис. 12). Разрывные и пластические деформации часто встречаются вместе. Они преимущественно сосредоточены в нижней части образца, но прослеживаются и в верхних слоях.

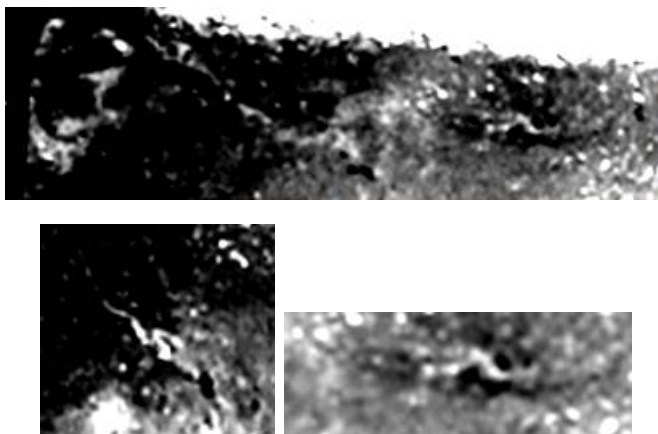


Рис. 12. Пластические деформации, газовых включений.

Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова.

В нижней части образца на контакте со штуцером подачи газа сформировалась веерообразная газонасыщенная зона высотой около 2см и шириной 3-4 см., к которой приурочены радиально расходящиеся трещины (рис. 13).

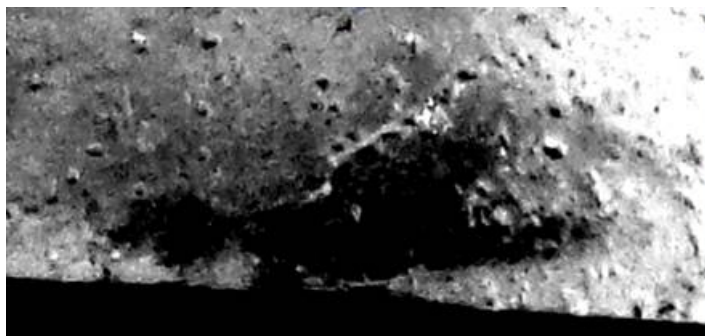


Рис. 13. Нижняя часть образца примыкающая к штуцеру.

Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова

Съёмка структуры льда нижнего слоя льда в поляризованном свете показала, наличие многочисленных следов пластических и разрывных деформаций (рис. 14). В нижней части образца непосредственно прилегающей к штуцеру подачи газа, сформировалась зона деформации льда с сильнодислоцированными, перемятыми и раздробленными кристаллами, к этой зоне с внешней стороны приурочена зона кристаллов с пластическими деформациями. Видны пластические деформации кристаллов, волнообразные границы, вдавливание кристаллов друг в друга, трещины и зоны дробления, на контактах кристаллов цепочки воздушных включений) (рис. 15).

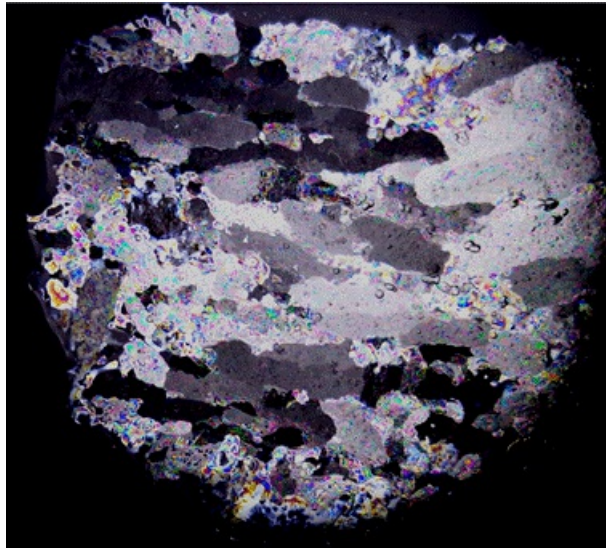


Рис.14. Структура льда в нижнем слое льда.

Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова.

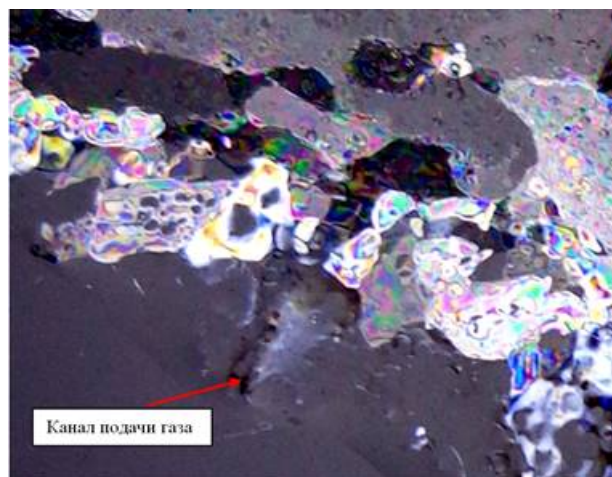


Рис. 15. Структура льда зоны льда, непосредственно примыкающего к штуцеру подачи газа . Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова

Изучение образца льда с начальной минерализацией раствора 5 г/л показало, в отличие от образца с большей минерализацией, фильтрация газа под давление сопровождалась своим набором процессов. Это формирование нитевидных и червеобразных каналов заполненных газовыми пузырьками, многочисленные трещины, пластические и разрывные деформации льда и газовых включений, зоны дробления, вдавливания, перестройка структуры льда, особенно заметная на контакте со штуцером подачи газа. Пластические деформации переходят в течение льда.

#### **Лёд с минерализацией 0 г/л**

Подготовка образца пресного льда проводилась при всестороннем промерзании дистиллированной воды в контейнере. Данная технология обусловила формирование центрального газонасыщенного ядра, протянувшегося на всю высоту образца. Концентрация газа в центре образца обуславливает формирование здесь ослабленной зоны при подаче газа под давлением. Поэтому исследования были сосредоточены на изучении нижней части образца льда, непосредственно примыкающей к штуцеру подачи газа (рис. 16). Нижняя часть образца сформировалась при промерзании воды от днища контейнера. Отличительной особенностью строения этой зоны являются крупные



кристаллы льда и вытянутых, ориентированных перпендикулярно к стенкам пузырьков воздуха. Вытянутые пузырьки около стенок соответствующие быстрому направленному промерзанию в глубине массива сменяются медленным циклическим промерзанием формирующим слоистость. Подача газа под напором около 2 атм., вызвала коренную перестройку строения данного слоя льда. Сформировалась газонасыщенная зона разрывающая первичный слой (рис. 16). Границы зоны разрыва резкие, с многочисленными трещинами и пластическими деформациями. К трещинам, и пластическим деформациям приурочены изогнутые вытянутые пузырьки газа, направление которых не совпадает с общим направлением газовых включений в первичном слое (рис. 16, 17 )

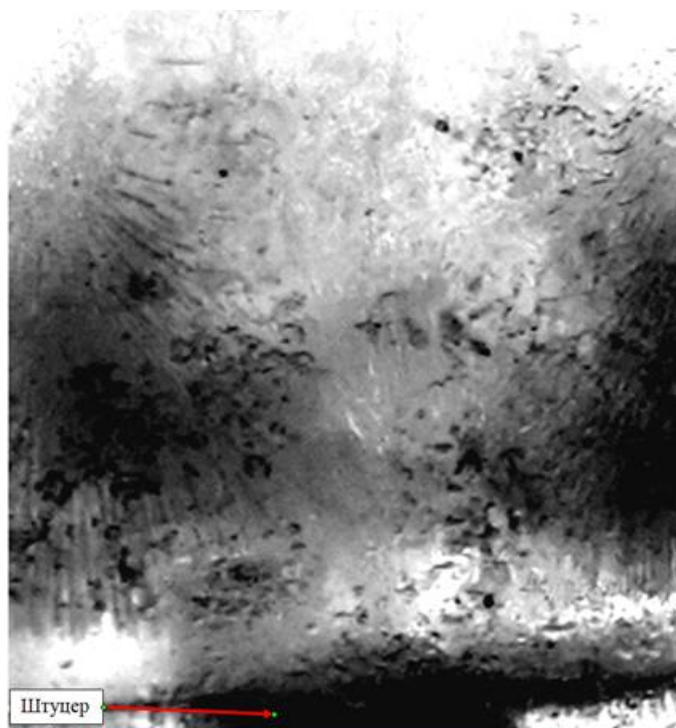


Рис. 16. Морфологии зоны фильтрации газа, примыкающей к штуцеру подачи газа. Фотография шлифа в проходящем свете.

Фото А.Н.Хименкова

На рис. 17 показана структура льда на контакте со штуцером подачи газа. Она резко отличается от структуры первичного льда. Первичная параллельная слоистость, соответствующая цикличности льдообразования при первичном промерзании, наблюдающаяся в левой и правой, а также в нижней частях фотографии нарушена (рис. 17 ). В центральной части фотографии расположена зона соответствующая проникновению газа. Здесь первичные кристаллы разрушены, как и первичная слоистость (рис. 17). К данной зоне приурочены многочисленные, хаотично расположенные включения воздуха. В прилегающих кристаллах наблюдаются значительные пластические деформации. В центре фотографии обширная зона фильтрации газа и перестройки первичной структуры льда. В правой и левой части снимка видна первичная слоистость, связанная со всесторонним промерзанием воды в контейнере. В центре нижней части снимка остатки первичного льда. Как и в предыдущем образце, фильтрация газа во льду сопровождается частичной и избирательной перестройкой структуры льда, пластическими и разрывными деформациями.

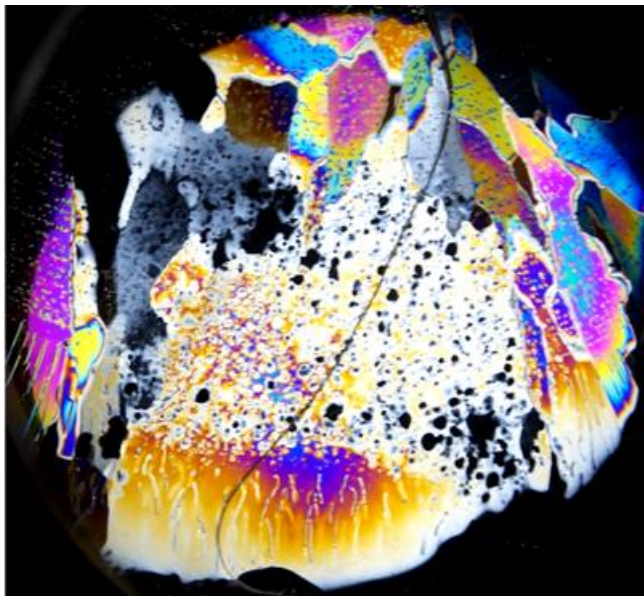


Рис. 17. Строение льда в нижней часть образца на контакте со штуцером подачи газа  
Съёмка в поляризованном свете. Фото А.Н. Хименкова.

#### **Исследование реакции газовой составляющей мерзлых грунтов на повышении температур в области отрицательных и положительных температур**

В лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН были проведены исследование реакции газовой составляющей мерзлых грунтов на повышении температуры в области отрицательных и положительных температур. Исследования, проведённые Ф. С. Карпенко и В. Н. Кутергиным показали, что выделение газов из мёрзлых грунтов начинается уже при незначительных изменениях их температуры. Действие внешних нагрузок снижает температуру начала газовыделения и влияет на его динамику при изменении температуры.

На рисунках 18, 19 представлены графики зависимости объема выделившегося газа от температуры для песчаных грунтов и глинистых грунтов соответственно. Было определено, что выделение газовой составляющей происходит уже при незначительном повышении температуры, когда грунт находится еще в мерзлом состоянии. Для песчаных грунтов газовыделение начинается при отрицательной температуре  $-7^{\circ}\text{C}$ , достигает своего максимума при  $+1^{\circ}\text{C}$ , дальше интенсивность выделения газовой составляющей снижается и при температуре  $+5^{\circ}\text{C}$  выделение газа прекращается. Для глинистых грунтов выделение газа начинается также при  $-7^{\circ}\text{C}$ , пик наступает при отрицательных температурах  $-2^{\circ}\text{C}$ , затем, как и в песчаных грунтах, интенсивность газовыделения сокращается до полного прекращения выделения газовой компоненты при  $+4^{\circ}\text{C}$ .

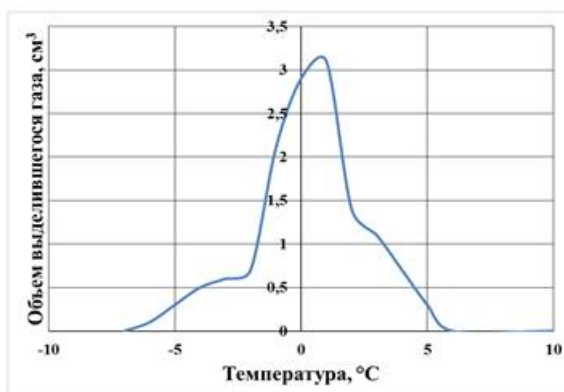


Рис. 18. График зависимости объема выделившегося газа от температуры для пылеватых песков.

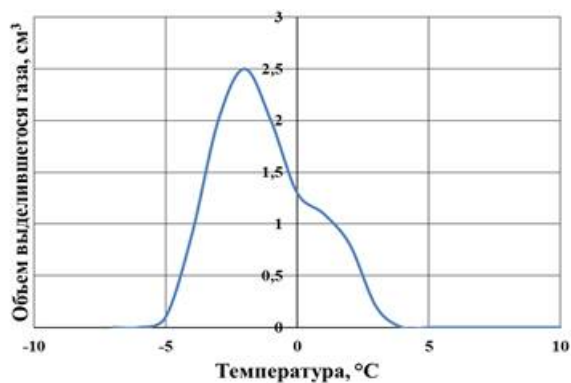


Рис. 19. График зависимости объема выделившегося газа от температуры для тугопластичных и полутвердых суглинков

Очевидно, что описанный процесс выделения газа может происходить за счет его фильтрации через грунт, в целом остающийся в мерзлом состоянии. Сам механизм фильтрации требует своего дальнейшего изучения, но важность уже полученных в настоящее время результатов трудно переоценить.

В ходе лабораторных исследований было установлено:

- газонепроницаемые при низких температурах льды и мёрзлые грунты при повышении температуры до определённых границ (для каждого вида льда и грунта границы, вероятно будут индивидуальны) оставаясь мёрзлыми и при отрицательных температурах начинают пропускать газ под давлением;
- фильтрация газа сквозь многолетнемёрзлые льды сопровождается комплексом процессов деформации первичного строения;
- изучаемые в лабораторных условиях процессы миграции газа во льдах аналогичны фильтрационно-деформационному механизму, который был использован при анализе процессов, происходящих при формировании воронок газового выброса.
- выделение газов при повышении температуры образцов мёрзлых грунтов начинается и происходит при отрицательной температуре.

### Заключение

Согласно господствующим в настоящее время представлениям криолитозона является экраном, препятствующим выходу подземного газа на поверхность. В.С. Якушев, проанализировавший огромный материал по возможности фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах, приходит к заключению, что высокольдистые покровные отложения криолитозоны (верхние 40-50 м) являются практически непроницаемыми для газа, даже идущего под напором из глубины. Для проницаемых песчаных прослоев внутри криолитозоны критическое значение льдонасыщенности порового пространства, при котором осуществима фильтрация газа может быть принята как 70% от порового объема. Если льдонасыщенность порового пространства больше этой величины, то порода становится непригодной для фильтрации природного газа, если меньше – можно ожидать проявления миграции и аккумуляции природных газов в свободном состоянии [1]. При всей убедительности доводов, подтверждающих данную позицию, мы считаем, что она не совсем корректна. При оценке возможности фильтрации газа следует учитывать не

только их льдистость, но также и их строение, свойства и давления внутри толщи многолетнемёрзлых пород. Рассмотренные в статье материалы показывают, что связи, определяющие прочностные и деформативные свойства многолетнемёрзлых пород резко ослабевают при их нагревании. Одновременно повышение температуры мёрзлых пород создают условия для диссоциации содержащихся в них газогидратов, что обуславливает резкое и значительное повышение внутригрунтового давления в локальных зонах. В породах, остающихся по всем критериям мёрзлыми, создаются условия для фильтрации газа. Следует учитывать, что фильтрация газа предваряется и сопровождается значительными внутригрунтовыми пластическими и разрывными деформациями. Таким образом, вопрос о том происходит или не происходит фильтрация в многолетнемёрзлых породах, должен звучать по-другому. Какие термобарические условия обеспечивают фильтрацию в конкретных ландшафтных, геологических и климатических условиях?

Рассмотренные в статье материалы показывают, что формирование поверхностных водоёмов является наиболее эффективным фактором, обеспечивающим повышение температуры в многолетнемёрзлых породах. Жизненный цикл развития большинства озёр в криолитозоне незначителен. Озёра быстро или заполняются осадками или дренируются. За период их существования они оказывают значительный тепловой эффект на подстилающие многолетнемёрзлые породы. Зона оттаивания, под поверхностными озёрами, составляет от нескольких метров до первых десятков метров, а зона прогрева многолетнемёрзлых пород может превышать сотни метров.

Зона прогрева представляет из себя цилиндрический канал, с прочными стенками из низкотемпературных многолетнемёрзлых пород. Если в этом канале залегают гидратосодержащие породы, то создаются условия для их диссоциации. Выделяющиеся газы, находящиеся под высоким давлением, начинают отжиматься и фильтроваться в сторону наименьшего давления, при этом деформируя вмещающие породы. Сформировавшийся фильтрационно-деформационный механизм обуславливает формирование газонасыщенного ледогрунтового штока. Верхний слой низкотемпературных многолетнемёрзлых пород не позволяет газу удаляться в атмосферу. Давление газонасыщенного штока обуславливает формирование бугров пучения. Разрыв кровли приводит к резкому сбросу давления и послойному выбросу газонасыщенного ледогрунтового материала. В рассмотренном механизме развития взрывных процессов в криолитозоне фильтрация в многолетнемёрзлых породах является одним из основных процессов.

Проведённые лабораторные исследования моделировали процессы воздействия газа, находящегося под давлением, на лед при повышении его температуры. Эксперименты показали, что если при низких температурах (-9 °C) фильтрации газа не наблюдалось, то при нагревании до -3 °C во льду происходят процессы аналогичные наблюдаемым в воронках газового выброса, такие как: пластические и разрывные деформации льда, образование трещин, газонасыщенных зон различной формы от цепочек газовых пузырьков до червеобразных сплошных газовых каналов. Газовые каналы часто деформированы вместе с вмещающим их льдом. Наблюдаемые в образцах льда образования подтверждают предложенный для условий формирования воронок газового выброса тезис о совместном фильтрационно-деформационном механизме, обуславливающим перераспределение газа в многолетнемёрзлых породах.

Описанный авторами процесс выделения газа свидетельствует о возможности его фильтрации сквозь мёрзлую породу. Этот вопрос является крайне важным при создании модели газовых выбросов и требует дальнейшего изучения.

Рассмотренные в статье материалы позволяют сделать вывод о том, что в многолетнемёрзлых породах могут создаваться условия, когда они перестают быть экраном для внутригрунтовых газов. При этом, газы, находящиеся под достаточно большим давлением, могут интенсивно, иногда даже в виде естественных взрывных процессов, поступать в атмосферу.

Данный подход имеет большое значение для оценки выбросов парниковых газов на обширных территориях криолитозоны Земли. Общеизвестно, что выделение парниковых газов в атмосферу обусловлено оттаиванием многолетнемёрзлых пород. Приведённые в статье материалы показывают, что данный эффект может наблюдаться и в мёрзлом состоянии. Даже при незначительном повышении температуры в толщах гидратосодержащих многолетнемёрзлых пород может начаться разложение газогидратов, возникновение естественных взрывных процессов и выделением парниковых газов. Появляется все больше данных о том, что многолетнемёрзлые породы не являются экраном для мигрирующих из залежей углеводородных газов. Исследования геохимических полей в криолитозоне западной части Енисей-Хатангского прогиба показали, что в результате субвертикального массопереноса углеводородные газы проникают по разрезу в верхние пласты многолетнемёрзлых пород. Здесь на Пеляткинском газовом месторождении в районе распространения ММП отмечалось образование газовых грифонов в непосредственной близости от залежи [\[30, 31\]](#).

Наблюдающееся в последние десятилетия потепление климата может сказаться и на увеличении поступления парниковых газов за счёт взрывных процессов в толще многолетнемёрзлых пород. Следует учитывать, что при потеплении климата понижении кровли мерзлоты может составлять несколько сантиметров или десятков сантиметров, при этом повышение температуры многолетнемёрзлых пород будет проникать на глубину в десятки метров. Это может привести к значительной активизации процессов диссоциации газогидратов содержащихся в верхних слоях криолитозоны.

Для криолитозоны, да и для Земли в целом, возможность выделения газа при разложении газогидратов при отрицательных температурах, даже при их небольших изменениях [\[23\]](#), имеет важное значение. Вклад выделившихся при этом парниковых газов, в первую очередь метана и углекислого на изменение климата ещё никто не учитывал, а он может быть значительным. Все современные расчёты строятся на представлениях о выбросах газов после оттаивания многолетнемёрзлых пород, а это может происходить и из мёрзлых массивов.

По мере освоения Арктики будет возрастать техногенное тепловое воздействие на многолетнемёрзлые породы, при этом возрастает опасность воздействия выбросов газов на инженерные сооружения. Тем не менее, данная группа процессов, не только не учитывается при разработке проектных решений и прогнозах взаимодействия инженерного сооружения с многолетнемёрзлыми грунтами, но даже не включена в группу опасных геологических процессов.

## Библиография

1. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ. 2009. 192 с.
2. Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дисс.... д.г.-м.н. М.: Дальнаука, ДВО РАН, 2010. 48 с.
3. Краев Г. Н. Закономерности распространения метана в многолетнемёрзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу. Автореф дисс

- канд. геогр. М.: ЦЭПЛ РАН. 2010. 20 с.
4. Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва. Практикум: учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
  5. Богоявленский В. И. Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // БУРЕНИЕ И НЕФТЬ, № 6. 2015. С. 4-10.
  6. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. № 2, 2016, с. 15-24.
  7. 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.
  8. Buldovich S., Khilimonyuk V. , Vyckov A., Ospennikov E., Vorobyev S., Gunar A., Gorshkov E., Chuvilin E., Cherbunina M., Kotov P., Lubnina N., Motenko R., Amanzhurov R. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling 5 th European Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 23 June - 1 July 2018, Chamonix, France. 97-98.
  9. Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Власов А.Н., Волков – Богородский Д.Б. Газовые выбросы в криолитозоне, как новый вид геокриологических опасностей // Геориск №3, 2017а. С. 58-65.
  10. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В., Сергеев Д.О., Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мерзляков В.П., Типенко Г.С. Развитие взрывных процессов в криолитозоне в связи с формированием Ямальского кратера // Арктика и Антарктика. 2017б. № 4. С.13-37. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25094. [http://e-notabene.ru/arctic/article\\_25094.html](http://e-notabene.ru/arctic/article_25094.html)
  11. Власов А.Н., Хименков А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Левин Ю.К. Природные взрывные процессы в криолитозоне // Наука и технологические разработки. 2017. Том 96. № 3. С. 41-56.
  12. Хименков А.Н., Станиловская Ю.В. Феноменологическая модель формирования воронок газового выброса на примере Ямальского кратера. // Арктика и Антарктика. — 2018. № 3. С.1-25.
  13. Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю, Ельцов И.Н., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В, Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли, 2015. Т. XIX, № 4. С. 94-106.
  14. Истомин В. А., Чувилин Е. М., Сергеева Д. В., Буханов Б. А., Станиловская Ю. В., Бадец К. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. №2, 2018. С. 33-42.
  15. Трофимов, В. А. Определение давления газа в угольном пласте // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. Отд. вып. 1: Труды Международного научного симпозиума "Неделя горняка-2012". С. 324-345.
  16. Burges, M.; Judge, A.S.; Taylor, A.; Allen, D.V. Ground temperature studies of permafrost growth at a drained lake site, Mackenzie Delta (MD). In Proceedings of the 4th Canadian Permafrost Conferences, Calgary, AB, Canada, 2-6 March 1982; pp. 3-11.
  17. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М.: ООО Газпром экспо. 2013. 424 с.
  18. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Models of Talik, Permafrost and Gas Hydrate

- Histories—Beaufort Mackenzie Basin, Canada Energies 2015, 8, 6738-6764; doi:10.3390/en8076738, Received: 17 March 2015 / Accepted: 23 June 2015.
19. Максимов А. М., Якушев В. С., Чувиллин Е. М. Оценка возможности выбросов газа при разложении газовых гидратов в пласте // Доклады Академии наук. т. 352, № 4. 1997. С. 532–534.
  20. Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра. 1992. 236 с.
  21. Гарагаш И.А. Моделирование геомеханических процессов при эксплуатации месторождений газа в многолетнемерзлых и гидратосодержащих породах // Электронный научный журнал "Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. 2(6), 2012 <http://www.oilgasjournal.ru/>
  22. Чувиллин Е.М., Гребёнкин С. И. Изменение газопроницаемости мёрзлых гидратонасыщенных песчаных пород при диссоциации газовых гидратов // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII, № 1. С. 44-50.
  23. Якушев В.С. Влияние литологии криолитозоны на устойчивость реликтовых газогидратов в Арктике. Труды ИПНГ РАН (Москва): серия «Конференции». Вып. 2(1). 2017. С. 172-173.
  24. Зарецкий Ю. К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 352 с.
  25. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. Здания и сооружения на крайнем севере. Ленинград: Госстройиздат. 1963. С.492.
  26. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. Учебн. пособие. М., «Высш. школа», 1973. 448.
  27. 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.
  28. Абдрахимов М.З., Траскин В.Ю., Перцов Н.В. и др. Исследование разуплотнения кристаллических пород сверхглубоких скважин методами физико-химической механики // Глубинное строение и геодинамика кристаллических щитов европейской части СССР. Апатиты. 1992. С. 128-136.
  29. Соболев П.А., Аниськова А.М., Скосарь В.В., Гунар А.Ю., Трушников Я. О., Желтенкова Н. В., Гагарин В.Е., Хименков А.Н., Кошурников А. В., Семилетов И. П. Моделирование процессов газовой выделености на шельфе морей Российской Арктики. Материалы X международной научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков «Анализ, прогноз и управление природными рисками с учётом глобального изменения климата». М.: РУДН. 2018. С. 250-254.
  30. Бордуков Ю. К. . Геохимические поля в криолитозоне западной части Енисей-Хатангского прогиба в связи с поисками нефти и газа Автореф. к. г.- м. н. М.: ВНИИЯГГ . 1985. 24 с.
  31. Старобинец И.С., Мурогова Р.Н. Экранирующая и проводящая роль пород криолитозоны по отношению к миграционным углеводородам. // ГЕОЛОГИЯ НЕФТИ И ГАЗА № 1. 1985. С. 24-27.