

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Гагарин В.Е. — Подходы к изучению деформаций в многолетнемёрзлых грунтах // Арктика и Антарктика. – 2022. – № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.2.38229 EDN: EJTVLL URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=38229

Подходы к изучению деформаций в многолетнемёрзлых грунтах

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



Гагарин Владимир Евгеньевич

кандидат геолого-минералогических наук

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

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"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2022.2.38229

EDN:

EJTVLL

Дата направления статьи в редакцию:

08-06-2022

Аннотация: Объектом исследования являются процессы метаморфизма мёрзлых пород, включая структурную перестройку, а также пластические и хрупкие деформации подземных льдов. В геоэкологии многими специалистами отмечается важность рассмотрения процессов деформирования мёрзлых пород. При этом сами деформированные породы не выделяются в отдельную категорию, что затрудняет изучение развития криогенных геосистем после их формирования. Основным методом, используемым в данной статье, является анализ результатов предыдущих исследований различных авторов по рассматриваемой теме. Теоретической основой предлагаемого подхода являются положения, разработанные в рамках механики мерзлых грунтов и структурного ледоведения. Синтез анализируемых материалов осуществлялся на базе

геосистемного подхода. В предлагаемой работе впервые был проведён сравнительный анализ деформаций строения различного рода криогенных образований. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена необходимостью изучения закономерностей деформирования мёрзлых пород в естественных условиях. В теоретическом отношении, это важно для более глубокого понимания процессов происходящих в криолитозоне. Для практических целей, работы в данном направлении позволят более точно оценивать возможность развития опасных инженерно-геологических процессов при техногенных воздействиях на мёрзлые породы. Изменения строения мёрзлых пород продолжается и после формирования первичной структуры. Деформации, то есть нарушения первичного сложения, являются неотъемлемой частью строения мёрзлых пород. Данные о деформациях первичного криогенного строения несут информацию об истории развития уже сформировавшихся криогенных геосистем. Необходима разработка классификации текстурно-структурных деформаций криогенного строения мёрзлых пород, в которой следует выделять особый тип – метаморфизованных ледяных образований. Необходима разработка методов структурно-деформационного анализа позволяющих устанавливать связи между наблюдаемыми деформациями криогенного строения и процессами, происходящими в мёрзлых породах.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые породы, криогенные текстуры, пластические деформации, разрывные деформации, течение льда, диссоциация газогидратов, фильтрация газа, стадии развития, сегрегационные льды, инъекционные льды

Подходы к изучению деформаций в многолетнемёрзлых грунтах

Введение

Большая часть мёрзлых толщ, формирующих криолитозону сохраняет своё первичное криогенное строение неизменными от формирования до разрушения. Это позволяет достаточно убедительно анализировать условия льдообразования и сопровождающие его процессы. На основе данного анализа построены все генетические классификации подземных льдов и сформулированы представления о палеогеографических условиях их формирования на тех или иных территориях. При этом, встречаются многочисленные локальные криогенные образования со следами динамических процессов, деформирующих первичное криогенное строение вмещающих мёрзлых пород. Отличительной чертой данных образований является наличие многочисленных пластических и разрывных деформаций, а также признаков структурной перестройки первичного криогенного строения. Они широко распространены в мёрзлых породах всех возрастов и всех генетических типов. Тем не менее, изученность зон деформаций и структурных изменений в сформировавшихся мёрзлых породах, а также понимание их роли и значения в общей совокупности криогенных процессов явно недостаточна. Это связано, с рядом причин. Для мёрзлых пород не вполне понятны условия возникновения локальных зон повышенного внутригрунтового давления. Слабо разработаны представления о механизмах реализации напорных процессов. Не проведена систематизация деформаций криогенного строения и структурных изменений льдов и мёрзлых пород. Рассматривая лед, как минерал или горную породу, нельзя ограничиваться только вопросами формирования его первичной структуры. При определенных температурных и барических условиях, первично сформировавшаяся структура льда претерпевает существенные изменения. В данной работе рассмотрена группа, дислоцированных многолетнемёрзлых пород и метаморфизованных подземных льдов, формирующих локальные криогенные геосистемы: бугры пучения, пластовые

льды, инъекционные льды, повторно-жильные льды и др. Авторы исходят из того, что деформации или структурные изменения мёрзлых пород являются результатом взаимодействия комплекса внутригрунтовых процессов. Зоны повышенного давления в мёрзлых породах могут формироваться в результате различных причин, среди которых: криогенной концентрации воды и газа, температурных деформаций, разложения газогидратов при повышении температуры или снятия давления, гравитационного смещения грунтов, поступления напорных газов и грунтовых вод из подмерзлотных горизонтов. Давление может передаваться через литогенную составляющую породы, а также, через жидкую и газовую компоненты. Перераспределение давления может происходить в форме объёмного воздействия фрагмента породы на вмещающую толщу, или по отдельным крупным трещинам, или в виде множества мелких трещин (каналов), по которым жидкие или газовые флюиды пронизывают грунтовый массив, оставляя неизменным первичное строение. В статье рассматриваются примеры изучения деформаций ледяной, минеральной и газовой составляющих мёрзлых пород в криогенных геосистемах различного уровня. Теоретической основой предлагаемого подхода является положения, разработанные в рамках механики мерзлых грунтов (Н. А. Цытович, С. С. Вялов, Ю. К. Зарецкий, Г. В. Порхаев и др.) и структурного ледоведения (П. Н. Шумский, В. И. Соломатин и др.).

Теоретические аспекты изучения деформаций мёрзлых пород и льдов.

Многие исследователи отмечали, что криолитогенез не ограничивается актом фазовых превращений воды в лёд, а включает различные преобразования ледовых и ледогрунтовых структур после их формирования. Поэтому, при изучении истории развития криогенных пород, кроме анализа закономерностей кристаллизации грунтовых вод следует рассматривать и процессы метаморфизма уже сформированного льда. П. А. Шумским впервые были рассмотрены различные виды деформаций мёрзлых пород. Он отмечал, что при формировании инъекционных бугров пучения, под воздействием возрастающего давления промерзающей воды, кровля мёрзлых пород изгибается. Иногда в кровле образуются трещины, которые со временем могут регенерировать. У боковой поверхности повторно-жильных льдов им была выделена зона, которая под воздействием нарастающего бокового давления сминается в складки и разбивается трещинами на ряд блоков, испытывающих перемещения. В его генетической классификации ледяные горные породы были разделены на три группы: 1. конжеляционные льды (конституционные льды, включающие лёд цемент, сегрегационный лёд, инъекционный лёд, жильный лёд); 2. осадочные льды; 3. метаморфические льды. [1]. Автором было заявлено, что конжеляционные и осадочные льды после своего образования всегда в той или иной степени подвержены изменению (метаморфизму). При этом в группу метаморфических льдов рассмотренные им деформированные мёрзлые породы не вошли (туда вошли только ледниковые льды). Это значительно обеднило классификацию подземных льдов, сведя её к трем основным группам: повторно-жильным, образующимся в результате ежегодно повторяющегося заполнения льдом морозобойных трещин; сегрегационным, связанным с подтягиванием воды к слою кристаллизации и инъекционным связанным с промерзанием внедрившихся под напором воды или водонасыщенного грунта. Предложенная В. И. Соломатиним петрогенетическая классификация подземных ледяных пород практически повторяет классификацию П.А. Шумского. В ней все подземные льды разделены на три группы. Первая группа - конжеляционные льды, их строение определяется условиями внутригрунтовой кристаллизации свободной и связанной воды. Вторая группа - метаморфизованные льды (жильный и режеляционно-сегрегационный льды, подвергшиеся воздействию динамометаморфизма). Это ледяные образования со следами пластических деформаций,

течения льда, в формировании строения которых существенную роль играют процессы перекристаллизации под влиянием внешних воздействий. Третья группа, это седиментогенные (погребённые) льды, формирование которых происходит в субэдральных условиях с последующим перекрытием и консервацией осадочными породами [2, 3]. Важно, что дислоцированные ледогрунтовые образования со следами динамометаморфизма отделялись от инъекционных льдов. При этом, сам динамометаморфизм подземных льдов связывается только с повторно-жильными льдами, в которых основную роль играют преобразование структуры элементарных жилок под воздействием систематически возникающих напряжений [3]. Ш.Ш. Гасанов изучая метаморфизм газовых включений повторно жильных льдов (ПЖЛ), пришёл к важному выводу, что подземные льды, находясь при отрицательных температурах, подвергаются существенной текстурно-структурной перестройке и деформациям. Особенно интенсивно эти процессы развиваются при повышении температуры мёрзлых пород в условиях воздействия нагрузки. В этих условиях формируется группа внутригрунтовых льдов со следами пластических деформаций и течения льда. Он предположил, что деформированные ледогрунты могут иметь широкое распространение в зоне вечной мерзлоты и это должно учитываться в ходе криолитологических исследований. Для этого необходимо разработать адекватную модель процессов деформирования мёрзлых грунтов, используя в решении подобных задач опыт и достижения гляциологии [4]. В тоже время, каких-либо классификационных признаков для выделения группы деформированных льдов не было предложено. Е. А. Втюрина и Б. И. Втюрин в фундаментальной работе, посвящённой льдообразованию в горных породах, отмечали, что подземным льдам свойственны разнообразные процессы метаморфического льдообразования. Основными источниками этих процессов является либо энергия самой ледяной породы, либо внешнее влияние на неё, а чаще их сочетание. В классификации процессов метаморфизма мёрзлых пород, динамометаморфизм выделен в отдельную группу, но в генетической классификации типов льдообразования в горных породах он отражения не нашёл [5]. Обзор публикаций показывает, что многие исследователи указывали на значимость проблемы трансформации сформировавшихся подземных льдов в теоретическом и практическом отношении, но направлений для её решения не предложили. Для этого, прежде всего, следует выяснить, насколько стабильно состояние Напряжения, вызывающие деформации в мёрзлых породах и подземных льдах, связаны со многими процессами: внешним динамическим воздействием, колебанием температур мёрзлых пород, их собственным весом, возникновением зон повышенного давления внутригрунтового газа, давлением грунтовых вод в промерзающих грунтовых массивах сформировавшейся мёрзлой породы, какие условия переводят её из устойчивого состояния в динамическое, причём часто без фазовых переходов и какими процессами это напряжений сопровождается. Понимание данных вопросов также важно и для решения прикладных задач, связанных с поддержанием устойчивости инженерных сооружений расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Следствием механических в мерзлых породах являются процессы их деформирования и разрушения, включающие смещение минеральных частиц, а также частичного или полного разрушения кристаллов льда, его перекристаллизации и даже течения. Реологические процессы в мерзлых породах в отличие от других твердых тел и немерзлых пород зарождаются и развиваются практически при любых (даже очень небольших) нагрузках. Наличие перепада напряжений в мерзлых породах вызывает перемещение в них незамерзшей воды и льда из участков повышенного к участкам пониженного сжимающего напряжения или к участкам с более высокими растягивающими или сдвиговыми напряжениями. Обусловлено это, прежде всего,

наличием в мерзлых породах включений льда (в виде льда-цемента или ледяных прослоев), для которого нагрузка любой (сколь угодно малой) величины вызывает пластические течения и переориентировку кристаллов [6]. Сцепление цементации льдом обусловлено связью между кристаллами льда и минеральными частицами. Данная связь осуществляется не путем непосредственного контакта льда и минеральных частиц, а через жидкую пленку, обволакивающую твердые частицы и ледяные кристаллы. Это сцепление зависит от содержания льда, площади его контакта с минеральными частицами и температуры мерзлых грунтов. Данная структурная связь наименее стабильна и в природных условиях непрерывно меняется, в соответствии с колебанием температуры мёрзлой толщи. С повышением температуры сцепление мерзлых грунтов уменьшается, при понижении наоборот увеличивается [7]. Для льда величина критического сдвигающего напряжения, при котором возникает его пластическое течение, не превышает 0,01 МПа. Предел же длительной прочности льда при сдвиге при температуре $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет не более 0,2 МПа [6]. Даже при небольших внешних давлениях на контактах минеральных частиц и кристаллов льда могут возникать напряжения до сотен кг/см². Это вызывает плавление льда и отжатие образующейся воды в менее напряжённые области, где она вновь замерзает. При достижении достаточных напряжений, возникают пластические деформации льда и его отжатие из более напряженной зоны мёрзлой породы в менее напряжённую, за счёт вязкопластического течения льда, уже без фазовых переходов. При этом, также происходит отжатие газа и минерализованных вод, содержащихся в мерзлой породе [7]. Особенно опасно пластично-вязкое течение мёрзлых пород при повышении их температуры до величин близких к температуре фазовых переходов. Напряжение, соответствующее началу текучести для мёрзлого песка при температуре $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет около 0,2 МПа, а для мёрзлой глины при температуре $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ примерно 0,1 МПа [6].

При компрессии мерзлой породы происходит и существенная перестройка структуры (в более мёлкозернистую) шлирового и порового льда с оплавлением острых граней кристаллов льда, а также значительные по величине пластично-вязкие течения кристаллов льда и их агрегатов. Если напряжения во льду не превышают предела его упругости, то перекристаллизация является единственным способом приспособления к вынужденным деформациям. В зависимости от величины напряжений и температуры в криогенных текстурах мёрзлой породы или подземном льде может наблюдаться перекристаллизация (сублимационная или режеляционная). При наличии значительных изгибающих напряжений в отдельных кристаллах происходит полигонизация, сопровождающаяся распадом на мелкие кристаллы с кристаллографической ориентировкой, близкой к ориентировке первичного кристалла. Дальнейшее увеличение ориентированного напряжения, при котором достигается превышение сопротивления тела хрупкому разрушению, приводит к дроблению кристаллов [8]. Следует различать три основных механизма деформирования льда: 1 — течение льда при медленном сдвиге параллельно базисным плоскостям кристаллов (без изменения структуры льда); 2 — нарушение кристаллической решетки льда за счет молекулярного распада, рекристаллизации, межкристаллических сдвижек, сколов; 3 — плавление льда при высоких действующих напряжениях. Монокристалл льда является наиболее простой криогенной системой. Монокристаллы льда с точки зрения пластических свойств обладают сильно выраженной анизотропией. Пластические свойства монокристаллического льда сильно зависят от направления приложения нагрузки по отношению к базисной плоскости. П.И. Шумским [1] дается описание поведения

монокристалла льда при изгибе. При небольшой нагрузке в кристалле появляется двуосность. При этом сам кристалл остается в прежних границах. При устранении нагрузки (при температурах в пределах от -5 до -12 °C) происходит довольно быстрая релаксация и исчезновением двуосности. Сохранение двуосности после устранения нагрузки имеет место только в тех случаях, когда изгибы вызывают расхождение оптических осей не выше $7-8$ °C. При дальнейшем деформировании изогнутая часть кристалла без видимых нарушений сплошности распадается на ряд блоков с более или менее близкой друг к другу ориентировкой, достигая, таким образом, устойчивого равновесия, сохраняющегося и после освобождения от нагрузки. Возникающие в кристалле льда деформации можно объяснить с помощью теории дислокаций возникающих после приложения нагрузки. Было строго доказано, что внутри льда существуют дислокации, смещающиеся вдоль базисных плоскостей при приложении внешней нагрузки. Скорость смещения дислокации при напряжении сдвига около $0,1$ МПа равна примерно $0,5$ мкм/с (2 мм/ч). Если же увеличивать напряжение, скорость будет возрастать пропорционально ему. Таким образом, отдельная дислокация перемещается довольно медленно. Однако по мере развития деформации число дислокации все увеличивается и в результате их незначительные смещения приводят к тому, что становится возможным макроскопическое скольжение вдоль базисных плоскостей [9].

В структуру поликристаллического льда входят различно ориентированные кристаллы. Внутри каждого кристаллического зерна, если к нему приложить силу, возникнет движение дислокации и начнет развиваться скольжение вдоль базисных плоскостей. Однако главные оптические оси, а значит, и базисные плоскости разных зерен ориентированы различным образом, поэтому скольжение вдоль базисных плоскостей в каждом кристаллическом зерне ограничено соседними зернами и не может развиваться так же свободно, как в монокристалле. В результате пластические свойства поликристаллического льда оказываются сильно зависящими от величины образующих его кристаллических зерен и от ориентации их оптических осей. Процесс деформирования такой структуры включает в себя несколько этапов [7]. В первый момент после приложения нагрузки происходит упругая деформация кристаллов, а в местах наибольшей концентрации напряжений, обусловленной дефектами упаковки, на стыках различно ориентированных кристаллов возникают зоны дробления, появляются свободные от напряжений обломки за счет скалывания углов и краев кристаллов, развиваются микротрещины. Ориентация трещин на этой стадии хаотична. Если нагрузка достигает критического значения, рост трещин становится лавинообразным, образуются магистральные трещины, ориентированные по направлению максимальных растягивающих или сдвигающих напряжений, и процесс заканчивается хрупким разрушением. Длительные небольшие нагрузки, действуя в течение продолжительного времени, вызывают процесс ползучести, в ходе которого происходит существенная перестройка структуры льда. Трещины либо не возникают, либо локализованы и не определяют макроскопического поведения льда; преобладают равномерно протекающие во всем объеме процессы постепенной переориентации кристаллов, сопровождающиеся молекулярным распадом и рекристаллизацией с уменьшением их среднего размера. В силу анизотропии кристаллы стремятся течь по своим базисным плоскостям, при этом максимальная скорость течения будет у кристаллов, ориентированных по направлению максимальных сдвигающих напряжений. Развитию этого течения препятствует различная ориентация кристаллов, приводящая к пересечению полос скольжения, причем наибольшее сопротивление оказывают наиболее неблагоприятно ориентированные кристаллы. В соответствующих местах возникает концентрация напряжений,

обуславливающая трещинообразование, дробление и распад кристаллов. При длительном деформировании процессы молекулярного распада и дробления приводят к существенному уменьшению среднего размера кристаллов. Одновременно во льду протекает процесс рекристаллизации, центрами которого являются ненапряженные обломки и менее напряженные кристаллы. При этом вновь образуемые кристаллы ориентированы базисными плоскостями вдоль направления сдвига. При достаточно больших нагрузках определяющим является процесс микротрещинообразования, обуславливающий переход к блоковому механизму скольжения по системе трещин, ориентированных согласно максимальным сдвигающим напряжениям. Структура основного объема кристаллов остается при этом неизменной; переориентация приурочена к тонким граничным участкам. В предложенной П.А. Шумским [10] схеме выделено семь механизмов деформации льда, сменяющих друг друга в зависимости от характера и величины нагрузки и скорости деформации: 1) скольжение по базисным плоскостям в отдельных кристаллах; 2) небольшие изменения кристаллической решетки, увеличение среднего размера зерен в агрегате и перемещение границ между ними; 3) значительные нарушения кристаллической решетки, полигонизация и начинающаяся рекристаллизация; 4) внутрикристаллические перемещения, сопровождающиеся измельчением зерен льда и практически полным разрушением первоначальной структуры; 5) развитие хрупких разрушений по определенным плоскостям; 6) милонитизация; 7) режеляция. В И. Соломатиним рассмотрено соотношение деформаций кристаллов льда при пластических и хрупких деформациях (табл. 1)

Таблица 1 Виды деформирования кристаллов льда [2].

Пластическое	Хрупкое
Искривление граней Перемещение граней <u>Двойниковые</u> Линии скольжения Рекристаллизация (локальная зональная)	<u>Полигонизация</u> Линейные трещины (внутри- и межкристаллические) Каверны Дробление (локальное, зональное) <u>Милонитизация</u>

Рассмотренные материалы по изучению деформаций мёрзлых пород показывают, что к настоящему времени представления о том, что подземные льды могут претерпевать значительные изменения, а перекристаллизация льда в ходе его метаморфизма является важным элементом криолитогенеза, разработаны достаточно детально. При этом степень изученности процессов метаморфизма в преобразовании подземных льдов в реальных условиях, по мнению Е. А. Втюриной и Б. И. Втюрина, настолько недостаточны, что все соображения по этому вопросу носят предположительный характер [5].

Формирование деформационных структур в мёрзлых породах

Рассмотренные выше материалы показывают, что в геокриологии давно назрела необходимость оценки значения деформационных процессов, а также роли деформированных мёрзлых пород и подземных льдов в общей системе криолитогенеза. Для этого необходимо, в первую очередь, провести анализ структурно-текстурных деформаций различного рода криогенных образований. Их краткий обзор приводится ниже.

Объёмные локальные деформации в массивах многолетнемёрзлых пород.

При воздействии внешней нагрузки в мёрзлых грунтах может начать развиваться комплекс процессов приводящих к пластично-вязкому течению мёрзлых пород и льдов. Эти процессы сопровождаются нарушением структурных связей и перекомпоновке твердых частиц, в результате чего возникают необратимые структурные деформации. Данный вид деформаций возникают только в том случае, когда касательные напряжения превышают силы внутреннего взаимодействия, обуславливающие равновесное состояние мёрзлой породы. В зоне воздействия нагрузки вследствие уплотнения формируется ядро жёсткости. Когда нагрузка достигает предельного значения и в грунтовой массе возникают наибольшие касательные напряжения в окрестности плотного ядра начинают развиваться деформации пластично вязкого течения. На этой стадии уплотненное ядро начинает раздвигать окружающий менее плотный грунт и внедряться в него [7]. В естественных условиях данные процессы распространены достаточно широко. В качестве уплотнённого ядра может выступать ранее сформировавшееся ледяное тело или блок грунтовой массы (рис. 1). Здесь изображена антиклинальная складка сформированная блоком льда и дислоцированной льдо-грунтовой массой, внедрившейся в слоистые прибрежно-морские пески и алевриты. В центральной части складки залегает вытянутый монолитный ледяной блок. На фотографии верхней. части Ямальского кратера (рис. 2) хорошо видно, как сильно деформированный округлый блок газонасыщенного льда под воздействием слоистого, ледогрута вдавливаются в мёрзлую слоистую толщу, разрывая её клиновидными трещинами.

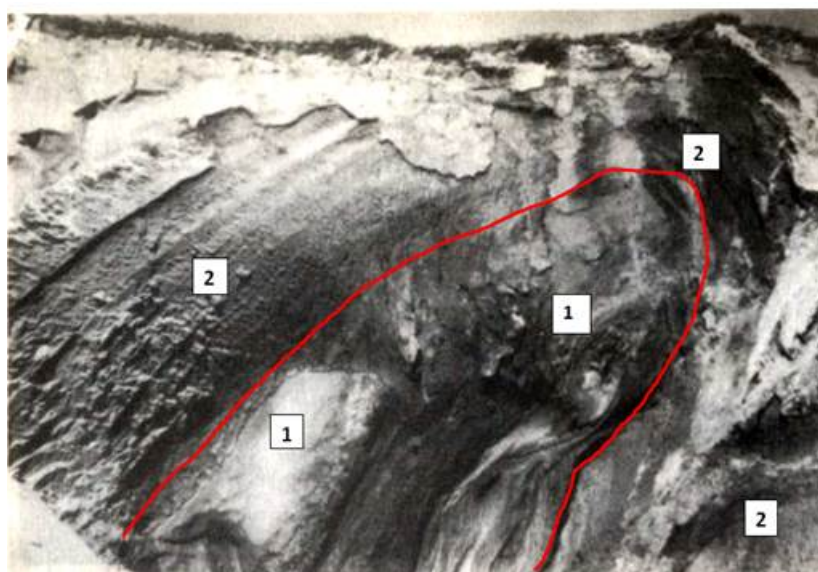


Рис.1. Внедрение монолитного блока чистого льда (1) и дислоцированной льдо-грунтовой массы (1) в слоистые прибрежно-морские пески и алевриты (2), изогнутые в антиклинальную складку (п-ов Ямал) [11].



Рис.2. Верхняя часть Ямального кратера. Воздействие ледяного блока на слоистый ледогрунтовый массив. Фото А. Лупачёва.

На рис. 3 изображена ледогрунтовая структура со следами деформаций [12]. В центральной части можно выделить ледяное тело с многочисленными дислокациями. Слева и справа к нему примыкают зоны слоистого ледогрунта со следами пластических деформаций, переходящие в деформированные песчаные слои. В верхней части разреза с резким несогласием залегают торфяной горизонт. Характер дислокаций, пластических деформаций и следов течения льда и ледогрунта свидетельствует о длительном постепенном воздействии ледяного штока на перекрывающую его ледогрунтовую толщу и перекрывающие осадки. Ледяной шток пронзает перекрывающие породы, раздвигая и деформируя их. Последующее протаивание срезает выступающую апикальную часть деформированной кровли.



Рис. 3. Парагенез субвертикальнослоистого ледяного ядра и деформированных горизонтальнослоистых пластовых льдов и перекрывающих песков в долине р. Еркутаяха на юге полуострова Ямал [12]. Во всех рассмотренных случаях, наблюдаются формирование геодинамических зон со следами движение крупных ледогрунтовых блоков в массиве мёрзлых пород. В принятой в геокриологии терминологии данные образования и процессы их формирующие принято определять как инъекционные, хотя признаки инъекций воды или водонасыщенных грунтов отсутствуют. Возможно, движущей силой данных криогенных образований являются напорные процессы, возникающие или при промерзании водоносных пород, или воздействию подземных газов, находящихся под высоким давлением. Но и в этом случае мёрзлая толща деформируется под воздействием локальных блоков мёрзлых пород. При этом наблюдаются пластические и разрывные деформации и течение льда, как в ледяных и ледогрунтовых блоках, так и во вмещающих мёрзлых породах. В большинстве случаев нижняя часть складок обнаружить не удаётся. Поэтому процессы их формирования остаются невыясненными. В некоторых случаях локальные объёмные деформации мёрзлых пород не достигают такой

интенсивности и проявляются в виде пологих антиклинальных складок. Вблизи Бованенковского ГКМ была обнаружена антиклинальная складка, деформирующая слоистый ледогрунтовый массив (рис. 4). В рельефе она не выражена, так как была «срезана» термоденудационными процессами.



Рис. 4. Деформированная слоистая ледогрунтовая толща вблизи Бованенковского ГКМ (фото Г. А. Ржаницына) [\[13\]](#)

Деформации мёрзлых пород под воздействием локальных внедрений воды или водонасыщенных грунтов

Инъекционные криогенные образования в мёрзлых породах распространены широко и выделены в отдельный тип льдообразования практически во всех классификациях. В контексте данной статьи инъекционные процессы представляют интерес, прежде всего, как причина деформаций ранее сформировавшихся льдов. Рассмотрим их на примере дислокаций пластовых льдов и перекрывающих льдистых суглинков. Данные криогенные образования изучались нами в районе оз. Ней-То, на п-ве Ямал. Здесь, на отдельных участках встречаются ледогрунтовые слоистые образования со следами интенсивных динамических процессов (рис. 5), которые деформируют пластовые льды и перекрывающие их льдистые суглинки [\[14, 15\]](#).

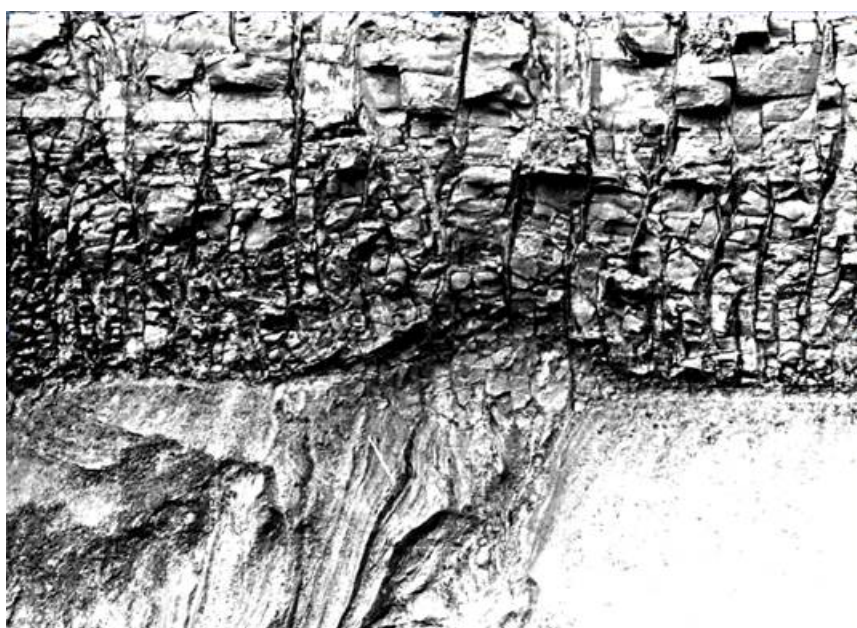


Рис.5. Локальные слоистые ледогрунтовые зоны, прорывающий пластовую залежь и

деформирующий глину с сетчатыми криотекстурами. Фото. Ю. Б. Бадю

В зонах дислокаций (рис. 5) наблюдается комплекс парагенетически связанных ледяных образований. Это сильно деформированные, резкие контакты слоистого и пластового льда. В контактном слое пластового льда кристаллы раздроблены, наблюдаются многочисленные трещины. На верхнем контакте слоистой ледогрунтовой зоны наблюдаются деформация кровли, перекрывающих пластовый лёд суглинков и криотекстур. В тех местах, где ледогрунтовые слои подходят к границе раздела льда и грунта под прямым углом, деформация наибольшая. В зоне деформаций в осевых швах вертикальных шлиров сетчатых криотекстур наблюдаются вытянутые грунтовые включения. Частично разрушенная часть суглинков погружена в слоистые ледогрунты. Такого рода деформации могут наблюдаться в том случае, когда в ещё не промерзшей части водонасыщенного грунтового массива возникнет давление достаточное для локального разрушения сформировавшегося ранее вышележащего ледяного пласта. По образовавшимся трещинам водонасыщенный грунт поднимается вверх и упирается в более прочный массив мёрзлого водонасыщенного суглинка. Воздействие инъекционных процессов на структуру сформировавшихся ранее льдов рассматривается также в разделе, посвящённом буграм пучения (см. ниже).

Деформации ледяных структур, возникающие при формировании многолетних бугров пучения

Изучение строения многолетних бугров пучения сегрегационно-инъекционного генезиса в районе Салехарда (север Западной Сибири) (рис. 6, 7, 8, 9, 10), показало наличие большого количества разнообразных деформаций, связанных со сложной историей развития данных образований. На рисунке 6. показано строение слоя сегрегационного льда, сформировавшегося в многолетнем бугре пучения, подвергшегося инъекционному воздействию. Крупные кристаллы разбиты узкими зонами трещин, к которым приурочены газовые и грунтовые включения. В слоях чистого льда наблюдаются трещины скола. Промерзание внедрившихся инъекций воды маркируется вытянутыми газовыми пузырьками ориентированными перпендикулярно фронту промерзания. К некоторым каналам приурочены цепочки каплевидных воздушных пузырьков.



Рис.6. Зона дробления ранее сформировавшегося льда инъекциями водонасыщенного грунта. Бугор пучения в районе г. Салехарда, глубина 4,75м. Фото В. Е. Гагарина.

Давление, оказываемое на кристаллы льда, приводит к формированию зон дробления по границам кристаллов и полигонизации крупных кристаллов. Они дробятся по трещинам на более мелкие кристаллы с близкой ориентировкой оптических осей (рис. 7).

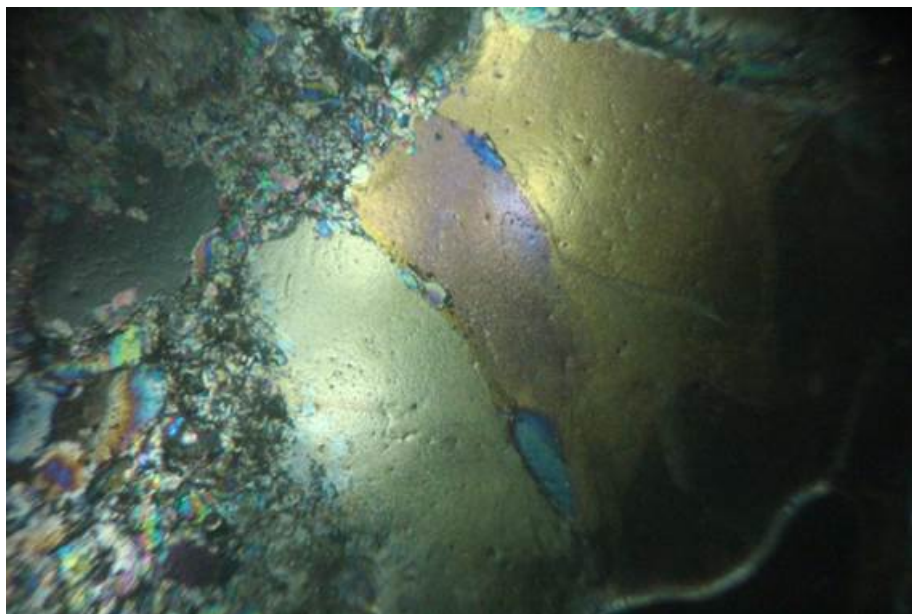


Рис. 7. Трещины, разбивающие и деформирующие крупные кристаллы, по краям кристаллов наблюдаются зоны дробления. Бугор пучения в районе

г. Салехарда глубина 7,5м. Фото В. Е. Гагарина.

При более интенсивном воздействии крупные кристаллы дробятся на отдельные блоки, между которыми расположены зоны дробления с более мелкими кристаллами, а также многочисленные газовые и грунтовые включения (рис. 8).

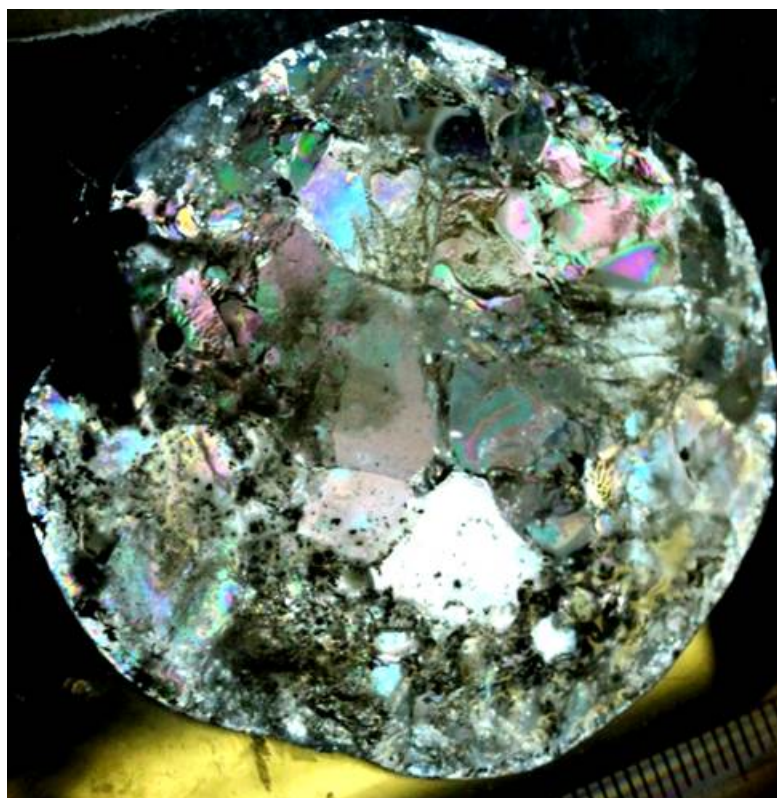


Рис. 8. Дробление крупных кристаллов массив (фотография в поляризованном свете). Бугор пучения в районе

г. Салехарда, глубина 8,6 м. Фото В. Е. Гагарина.

В массиве льда, непосредственно примыкающего к инъекционным трещинам,

наблюдаются узкие (3-5 мм) зоны деформированного льда, сформировавшиеся за счёт напряжений, возникающих при инъекциях и их последующем промерзании (рис. 9).



Рис. 9. Зоны деформаций во льду, примыкающие к инъекционным трещинам, рассекающим массив чистого крупнокристаллического льда.

Бугор пучения в районе г. Салехарда, глубина 9,9 м

Фото В. Е. Гагарина.

В строении первичных ледяных структур широко распространены пластические деформации, формирующиеся при вдавливании кристаллов друг в друга. В центре фотографии (рис. 10) наблюдается пластическая деформация во льду, сформировавшаяся под действием давления оказываемого со стороны кристалла льда клиновидной формы (тёмный кристалл клиновидной формы). Он вдавливается в блок с более светлой окраской, в котором наблюдается широкий спектр деформаций: полигонизация, дробление, пластические изменения, разрывы внутри кристаллов и по их границам.

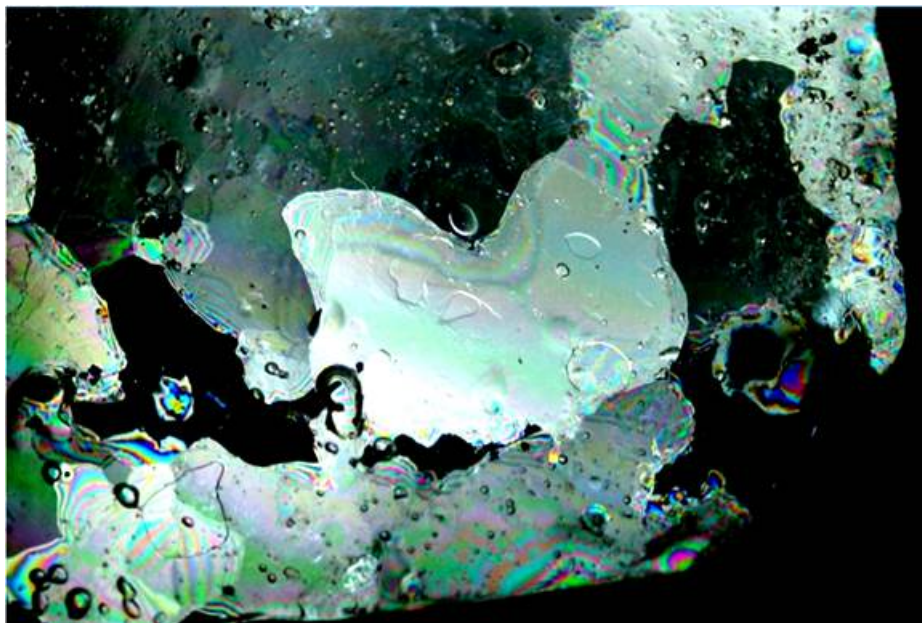


Рис. 10. Вдавливание ледяных блоков друг в друга.

Бугор пучения в районе г. Салехарда, глубина 8,4м

Фото В. Е. Гагарина.

Деформации мёрзлых пород под воздействием внутригрунтовых газов

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 50% 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 [\[16, 17\]](#). 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, а также соотношение температур и давления внутри толщи многолетнемёрзлых пород. 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? При изучении воронок газового выброса были высказаны предположения о том, что в льдистой мёрзлой толще, под давлением газовых флюидов происходит фильтрация газа. В этом случае происходит интенсивная перестройка первоначального криогенного строения, сопровождающаяся пластическими и разрывными деформациями мёрзлого субстрата [\[18\]](#). Между фильтрацией газов и пластическими деформациями устанавливается парагенетическая

связь, обуславливающая саморазвитие геосистемы. Газ под давлением проникает в мёрзлую породу, что значительно ослабляет её прочность и вызывает пластические и разрывные деформации. Появившиеся трещины и дислокации ускоряют фильтрацию газа [19]. А.Н. Курчатовой и В.В. Роговым при изучении строения мёрзлых пород южной части Тазовского и Гыданского полуостровов в образцах мёрзлого грунта и льда обнаружили широкое распространение признаков вертикальной струйной миграции газа, в том числе через породы, традиционно считающиеся непроницаемыми. Фильтрация может осуществляться за счёт трещинной проницаемости при развитии деформаций сдвига, которые диагностируются по криогенным текстурным трещинного типа с образованием системы параллельных наклонных шлиров по плоскостям скольжения (рис.11) [20, 21].

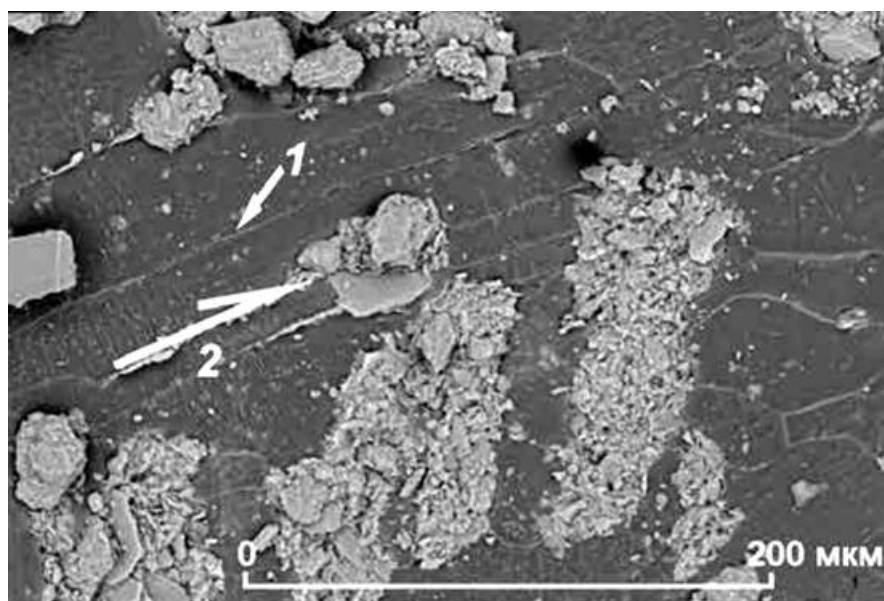


Рис. 11. Деформации сдвига в шлере льда 1 – границы кристаллов льда;

2 – направление сдвига [20].

В ходе проведённых лабораторных экспериментов удалось зафиксировать фильтрацию газа сквозь льды и мерзлые грунты, а также 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 кг/см², при которых проводились эксперименты, фильтрация не наблюдалась. Только при повышении температуры до значений близких к области фазовых переходов, она начинала проявляться. Во льду фильтрация происходит в виде газовых каналов. 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. 12). Важно отметить, что границы, намораживаемых при подготовке образца слоёв, не являются преградой для выделяемых каналов, они без разрывов переходят из слоя в слой.



Рис. 12. Газовый канал пересекающий границы слоёв льда.

Съёмка в проходящем свете. Фото А.Н. Хименкова [\[22\]](#).

В ходе лабораторного изучения фильтрации газа под давлением во льдах, наблюдались пластические деформации кристаллов, волнообразные границы, вдавливание кристаллов друг в друга, трещины и зоны дробления, на контактах кристаллов, цепочки воздушных включений (рис. 13).

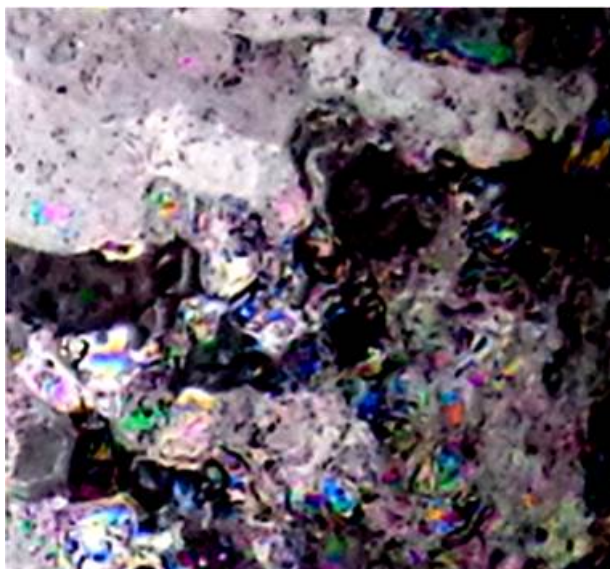


Рис. 13. Зона дробления и пластических деформаций.

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

При пропускании газа под давлением через образец мёрзлого грунта также наблюдалась фильтрация газа. Рассмотрим этот процесс на примере фильтрации газа сквозь мёрзлый образец со слоистой криотекстурой. Толщина шлиров льда до 1 мм,

толщина грунтовых прослоев от 1 до 2 – 3 мм. В зоне слоистых криотекстур наблюдается большое количество ветвящихся, искривлённых субвертикально ориентированных газовых каналов толщиной в доли миллиметров (рис. 14). Каналы разрывают шлиры льда и сдвигают их, не разрушая их общую ориентацию. Прослеживается связь каналов в слоистых текстурах с зоной подачи газа в мёрзлый образец. При всем разнообразии форм, каналы во всех мёрзлых образцах образуют единую систему неравномерно пронизывающую образцы снизу доверху.

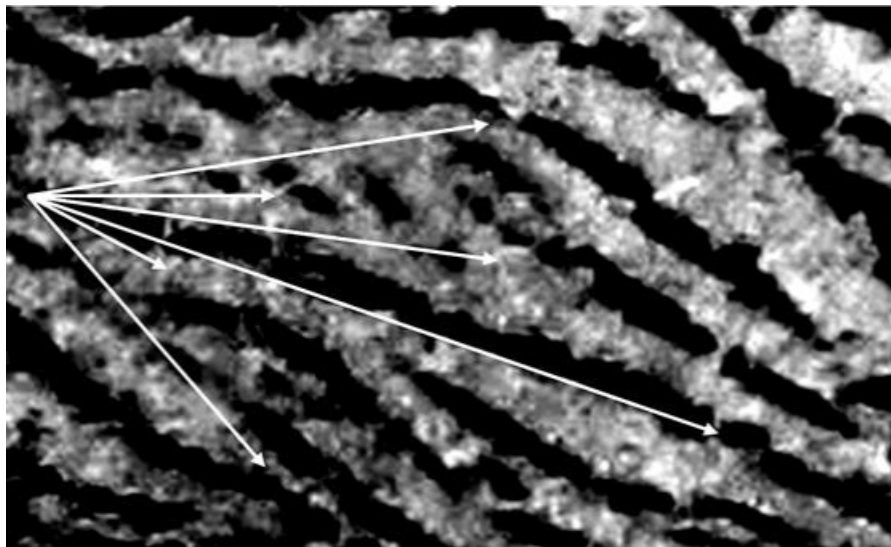


Рис. 14. Фильтрационные каналы, прорывающие первичные слоистые криогенные Текстуры. Фотография в отражённом свете.

Фото А.Н. Хименкова [\[23\]](#)

Проведённые исследования позволяют сделать некоторые предварительные выводы. Подача газа под давлением приводит к возникновению локальных деформаций, по которым разрозненные потоки газ в виде мелких газовых каналов (до миллиметра в диаметре) расходится от центра подачи газа, к краевым частям образца, распространяясь по всему массиву образца. Движение газовых каналов представляется в виде хаотических колебаний, соответствующих выбору наиболее ослабленных зон в мёрзлом грунте (рис. 15).

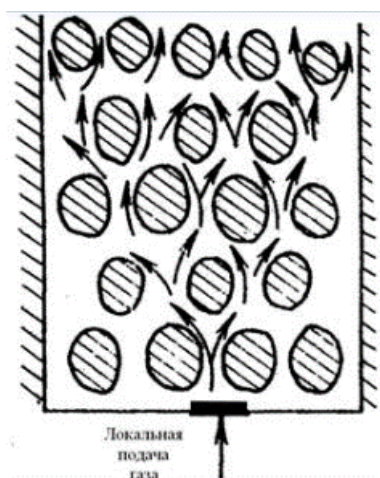


Рис. 15. Рассеяние газа в мёрзлом грунтовом образце, подаваемого из локального источника [\[23\]](#).

Деформации мёрзлых грунтов, связанные с формированием воронок газового выброса

Воронки газового выброса представляют из себя новые формы криогенных образований, впервые зафиксированных в 2014 году на п-ве Ямал вблизи Бованенковского ГКМ. К настоящему времени обнаружено 17 подобных объектов. Во всех из них обнаружены различного рода деформации мёрзлых пород, свидетельствующие о плавном нарастании напряжений в период предшествующий взрыву. Наиболее вероятной причиной образования воронок является напорное воздействие подземного газа. В 2 воронках, в которых удалось проанализировать газовый состав, обнаружен метан. Содержание метана составляет 98,4-99,9% [24]. О наличии углеводородных газов свидетельствуют и случаи возгорания, сопровождающие взрывы. Анализ криогенного строения стенок воронок показывает, что непосредственно взрывам предшествовала серия сменяющих друг друга стадий развития мёрзлых пород, каждая из которых отличается индивидуальным набором процессов и присущих им образований [19]. Перед пневматическим взрывом, формирующим воронку, на поверхности развивается бугор пучения. На рис. 16 представлен разрез такого бугра в районе Ямальского кратера. Хорошо заметно нарушение первичной слоистости. Высшая точка куполообразной складки приурочена к центру воронки.

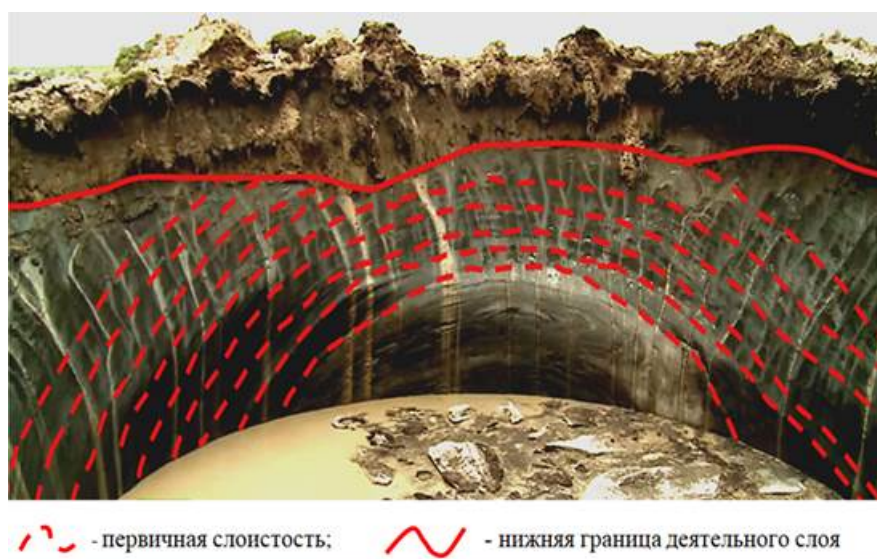


Рис. 16. Куполовидная деформация первичной слоистости над газонасыщенным ледогрунтовым штоком. Скриншот с видео «тайна Ямальского кратера» 26 июля 2015 [25].

При изучении воронок газового выброса обнаружены специфические образования, представляющие из себя кольцевые слоистые структуры, формирующие стенки кратера

(рис. 17, 18) [19].

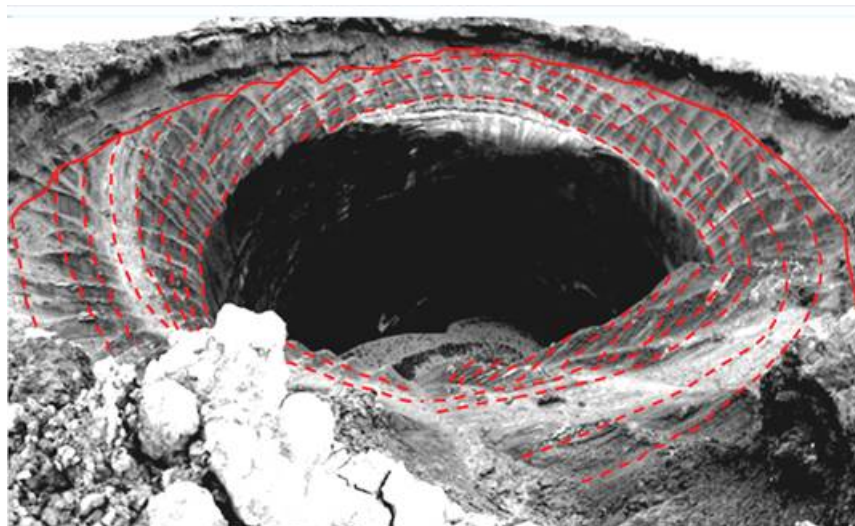


Рис. 17. Ямальский кратер, вид сверху. Штриховкой обозначено направление субвертикальных слоёв в зоне, прилегающей к стенкам кратера, сплошной линией нижняя граница деятельного слоя Фото В. В. Оленченко,

Исследование Э.И. Галеевой с соавторами показали, что слоистость обусловлена вязкопластическим течением льда. Сдвиговые деформации приводят к формированию складок, вторичной слоистости (кливажа), ориентированной под углом до 60° к горизонтально залегающей первичной слоистости [\[26\]](#).



Рис.18. Субвертикальная слоистость льда кольцевой структуры, окаймляющей

Ямальский кратер Июль 2014 г [\[27\]](#).

Данные материалы свидетельствуют о том, что в многолетнемёрзлых породах формировались локальные газонасыщенные зоны с повышенным давлением газа, Под действием которого льдистые породы выжимались вверх, с образованием бугров пучения. После того, как предел длительной прочности мёрзлой кровли был преодолен, происходил взрыв и выброс обломков мёрзлых пород и льдов на расстояние до сотен метров [\[19\]](#).

Пластично-вязкое течение мёрзлых грунтов на склонах

Н. А. Цитовичем было высказано предположение о том, что в массивах многолетнемёрзлых горных пород, расположенных на склонах, возможны пластично-вязкое течение, подобные тем, которые наблюдаются в ледниковых льдах [\[6\]](#). Оно было подтверждено в работах Ш. Ш. Гасанова и Н. Н. Романовского, описавших данные образования для условий склонов, сложенных высокольдистыми породами, где

наблюдается веерообразный наклон верхних частей сингенетических повторно-жильных льдов (рис. 19) [\[28, 29\]](#).

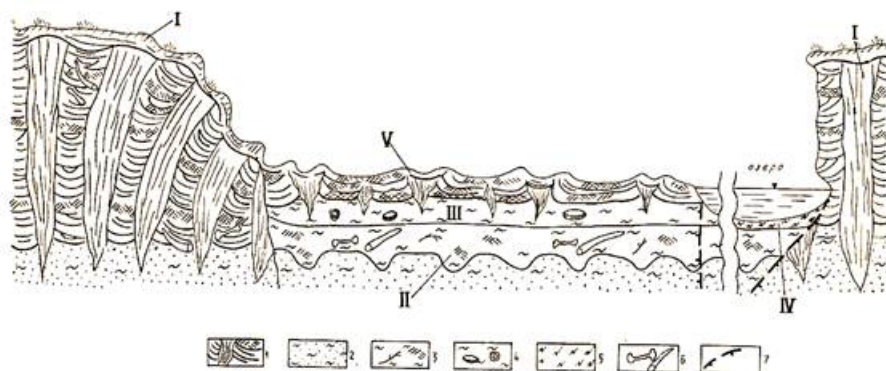


Рис. 19. Схема деформации «ледового комплекса» в аласной котловине: I - ледовый комплекс, II - таберальные отложения, III - отложения термокарстовых озёр, IV - оползневые отложения, V - аласные отложения; 1 - сингенетические повторно-жильные льды и вмещающие их пылеватые супеси; 2 - пески пылеватые к массивной криогенной текстурой; 3 - пылеватые супеси с прослоями торфа; 4 - супеси с включениями малакофауны; 5 - супеси с включениями дернины; 6 - костные остатки мамонтовой фауны; 7 - границы ММП [\[29\]](#).

На скальных склонах формируются курумы - подвижные каменные образования [\[30\]](#). Нижние части некоторых из них представляют из себя ледогрунтовый слой, пластические деформации которого приводят к перемещению курума вниз по склону. Д. О. Сергеевым, исследовавшим курумы в Забайкалье, выделены курумо-глетчеры, сформировавшиеся в нижних частях склонов в результате пластических деформаций ледогрунтового слоя. Поверхность этих образований осложнена серповидными валами. Им зафиксирована среднемноголетняя (за 20 лет) скорость перемещения курумо-глетчера 14 см/год [\[31\]](#).

А.И. Поповым выделен особый тип мерзлых пород, связанный с перемещением потоков субаквальных морских осадков на подводных склонах шельфов арктических морей [\[32\]](#). В этих условиях осадки накапливаются при отрицательных температурах. При возникновении оползней, в слаболитифицированных морских отложениях происходит тиксотропное разжижение с выделением свободной воды. Замерзание выделившейся воды формирует ледяные шлиры со следами пластических деформаций. Пликативные дислокации прослеживаются на десятки и сотни метров по простиранию и до сотни метров по вертикали. Их размеры различны: от мелких - длиной от 0,5 - 1 м и высотой такого же порядка до крупных - длиной в 100 - 200 м и более и высотой в несколько десятков метров. Следует отметить, что в отложениях Арктического шельфа криогенные образования формируются и без динамического воздействия оползней [\[33\]](#), а оползневые процессы лишь деформируют уже образовавшиеся криотекстуры.

Деформации мёрзлых грунтов и льдов связанные с формированием повторно-жильных льдов

Повторно-жильные льды формируются в результате многократно повторяющегося заполнения льдом, возникающих в мерзлых породах морозобойных трещин. Такие льды характеризуются наличием вертикальной и наклонной полосчатости. Структура жильного льда аллотриоморфно-зернистая, пластинчатая и гипидиоморфно-зернистая.

Ориентировка главных оптических осей чаще всего хаотическая, в редких случаях упорядоченная - параллельная тепловому потоку, который имеет субгоризонтальное направление. Размеры кристаллов льда закономерно уменьшаются в жилах сверху вниз (рис. 20) [\[34\]](#).

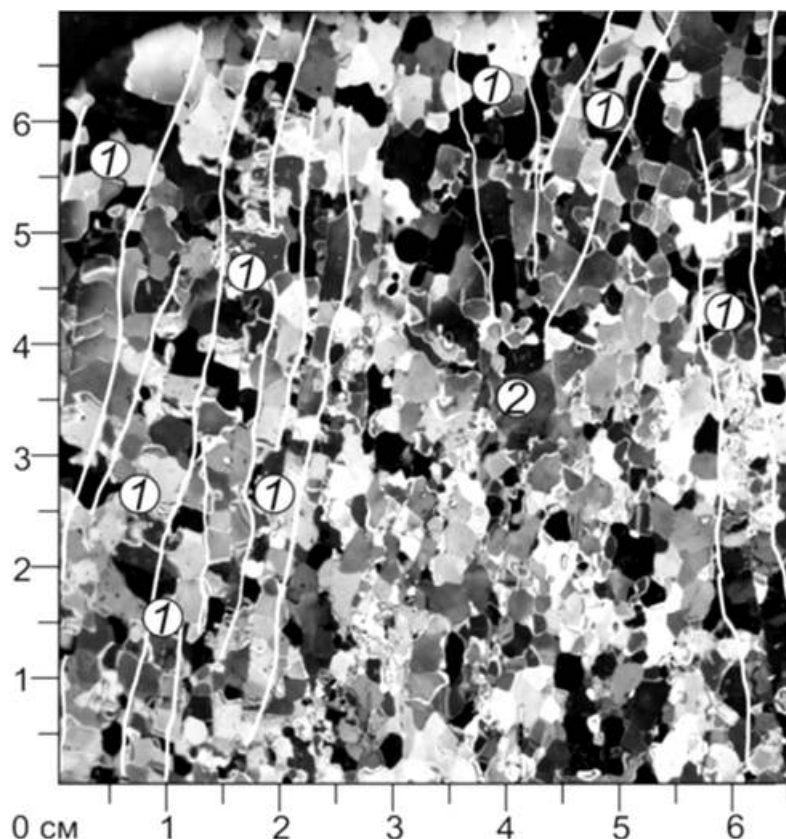


Рис. 20. Текстура и структура полигонально-жильного льда (фото: Я.В. Тихонравовой, 2018 г): 1- элементарные жилки с осевым швом; 2-перекристаллизованные элементарные жилки [\[34\]](#).

Ведущий деформационный механизм формирования жил – ежегодное образование морозобойных трещин, формирует сложно построенную криогенную геосистему, включающую: саму жилу, состоящую из множества элементарных деформированных жилок и зон перекристаллизованного льда; режеляционную кайму по краям вертикальных стенок, соответствующую зоне течения льда под давлением, линзы прозрачного льда, перекрывающего жилу, формирование которых связано с миграционными процессами. Непосредственно к стенкам жилы примыкает зона деформированных смещающих отложений со следами пластических (рис. 21, 22, 23) и разрывных деформаций. Перечисленный набор парагенезов в зависимости от состава вмещающих отложений, их температуры, льдистости может меняться. Некоторые элементы могут быть слабо выражены или совсем отсутствовать. Ведущим процессом формирования парагенезов ПЖЛ является ежегодное морозобойное растрескивание, поступление воды в трещину и её замерзание. Нарастающее внутреннее давление приводит к существенной перекристаллизации льда, и динамометаморфизму, связанного, в некоторых случаях, с выжиманием конжеляционного льда, заполнявшего морозобойные трещины [\[21\]](#). При этом формируются полосы режеляционного льда. В других случаях выдавливается примыкающая к жиле мёрзлая порода, которая при этом сминается в складки, а иногда разбивается трещинами на ряд блоков, испытывающих взаимное перемещение (рис. 21, 22) [\[15\]](#).

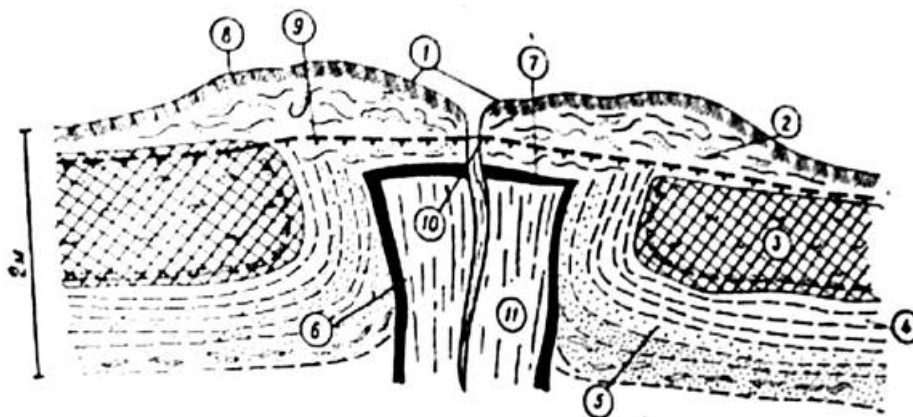


Рис. 21. Деформации выжимания около боковых контактов растущих ледяных жил (р. Яна). 1 – валики выжимания; 2 – материал, выжатый снизу и испытавший деформации в условиях деятельного слоя; 3 – заиленный торф; 4 – суглинок; 5 – переслаивание песка и алевроита; 6 – режеляционная кайма; 7 – линза прозрачного льда, лишённая признаков вертикальной полосчатости; 8 – дернина; 9 – кровля вечной мерзлоты; 10 – молодой росток ледяной жилы; 11 – ледяная жила [35].

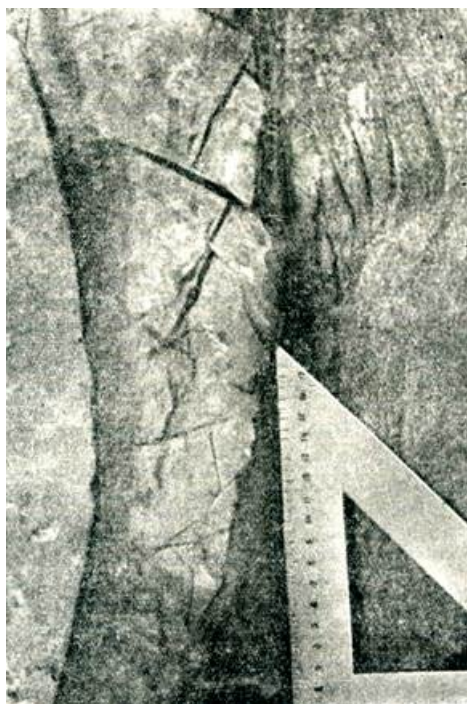


Рис. 22. Вертикальное сечение контакта ПЖЛ с вмещающей мёрзлой породой. Справа – лёд, слева – мёрзлая порода Фото Б.И. Втюрина [1].



Рис. 23. Смятие вмещающих пород у контакта с повторно-ледяной жилой. Фото. Е.М. Катасонова [\[36\]](#).

Обсуждение

Рассмотренные выше материалы показывают, что различного рода нарушения сформированного криогенного строения, широко распространены в мёрзлых породах. Такого рода нарушения прослеживаются как в отдельных кристаллах льда, так и в нарушениях первичных криотекстур. Деформации в массивах мерзлых пород являются не только наложенными структурами, изменяющими их первичное строение. В некоторых случаях они являются основным элементом, формирующим целостные локальные криогенные геосистемы. Например, повторно жильные льды начинают формироваться с температурных разрывов массивов мёрзлых пород. Ежегодно повторяясь, этот механизм обуславливает дальнейший рост жильных льдов и развитие связанных с ним многих деформационных парагенезов. Рост бугров пучения осуществляется только при деформации кровли, а также при развитии скалывающих деформаций на контакте формирующегося ледяного ядра и вмещающего массива мёрзлых пород. Фильтрация газа в мёрзлых породах невозможна без образования серии локальных разрывов, трещин, сдвиговых деформаций. Формирование ледников, курумов и каменных глетчеров невозможно без пластических и разрывных деформаций, обеспечивающих смещение данных криогенных геосистем по склону. Формирование локальных ледогрунтовых образований со следами течения, деформирующих вмещающие мёрзлые породы, обусловлено, пластическими деформациями, возникающими в результате появления в грунтовом массиве очагов повышенного давления.

Перечислим некоторые из причин образования деформаций в мерзлых породах:

- неравномерность промерзания обуславливает формирование криогенного напора и латерального перемещения подмерзлотных вод и газов в область меньших давлений (образование сезонных и многолетних бугров пучения);

- промерзание замкнутых таликов и возникновение зон высокого внутригрунтового давления;
- сужение сечения внутригрунтового водного потока при его промерзании с одновременным ростом давления ;
- возникновение повышенных давлений под мёрзлой кровлей над зонами восходящих внутригрунтовых водных потоков;
- повышение температуры и уменьшение прочностных свойств льдистых мёрзлых пород, залегающих на склонах (течение смещение мёрзлых пород по склону);
- развитие температурных разрывов мёрзлых пород обуславливающих формирование повторно-жильных льдов, в массиве растущей жилы возникает повышенное давление, деформирующее лед самой жилы и мёрзлую породу вблизи неё;
- образование областей растепления мёрзлых грунтов под поверхностными водоёмами. Формируется область высокотемпературной мерзлоты, вложенная в массив низкотемпературных мерзлых пород. На их границе возникает неустойчивое состояние сходное с состоянием склонов (возможно возникновение внутригрунтовых конвективных потоков);
- разложение газогидратов в области растепления мёрзлых пород под поверхностными водоёмами. Создание в области диссоциации газогидратосодержащих мёрзлых пород избыточного давления;
- формирование криогенного напора биогенного газа в промерзающих породах, его латерального перераспределения и накопления в локальных областях;
- формирование аномальных давлений газа под многолетнемёрзлыми породами за счёт его поступления с нижележащих горизонтов.

При всём разнообразии причин и проявлений развития деформаций прослеживаются некоторые общие признаки. При возрастании внутригрунтового давления до определённого значения, какой бы причиной оно не обуславливалось, начинают развиваться локальные сдвиговые пластические деформации, разбивающие мёрзлый массив на отдельные блоки, разделенные узкими зонами повышенной трещиноватости. Это, в свою очередь приводит к снижению прочности и дальнейшему развитию процесса деформирования массива и перераспределения вещества в твердом, жидком или газообразном виде.

В настоящее время, в геокриологии, при анализе проблем, связанных с выявлением истории развития мёрзлых пород, в первую очередь, рассматриваются процессы льдообразования. На основе изучения структурно-текстурных особенностей сформировавшихся криотекстур делается вывод о происхождении подземного льда и условиях его формирования. Наблюдаемые деформации криогенного строения рассматриваются, как наложенный дополняющий фактор и при выделении генетического типа льда, не учитывается. Поскольку основной объём подземных льдов попадает в категорию сегрегационных, инъекционных или жильных льдов то и процессы их формирующие сводятся к этим трем основным типам. Миграция связанной воды к фронту промерзания, внедрение напорных вод в зону льдообразования и формировании трещин при резком охлаждении мёрзлых пород. Если для выявления процессов и условия формирования первичного криогенного строения мёрзлых пород такой подход может

быть применим, то в отношении процессов, влияющих на уже сформированные криогенные образования он мало информативен. Рассмотренные материалы показывают, что более продуктивным может оказаться анализ деформаций ледяных образований, с последующим выявлением процессов и условий их вызывающих. Второй подход более объективен, он основан, как на фиксации параметров первичного строения, так и на учёте его изменений при деформировании. При этом есть возможность измерения морфологических показателей самих деформаций, что устраняет субъективность при исследованиях изменения строения уже сформированных мёрзлых пород. Облегчается выявление процессов, формирующих деформации, поскольку можно использовать данные анализа структуры и морфологии ледяных образований, грунтовых и газовых включений, а также знания о прочностных и деформационных характеристиках мёрзлых пород. В. И. Соломатиным выделена последовательность изменения структурных механизмов динамометаморфизма льда, основанная на учёте изменений величины и скорости нагрузки. К данным механизмам относятся: *пластические механизмы* (искривление граней и границ кристаллов, двойникование, линии скольжения), *рекристаллизация* (локальная, объёмная, сублимация, режеляция), *хрупкие механизмы* (полигонизация, внутрикристаллические трещины) [31]. Экстраполируя данный вывод на мёрзлые грунты в целом, можно выделить ряды изменений в мёрзлых породах, отражающих смену деформационных процессов на фоне увеличивающейся нагрузки.

1. Внешние изменения ещё не проявились, но внутренние связи ослабевают, наблюдается полигонизация внутри кристаллов, милонитизация на контактах кристаллов.
2. Первичная структура в целом сохраняется, при этом наблюдаются отдельные микроразрывы сплошности без смещения.
3. Нарушение первичной слоистости пород в зонах возникновения повышенных давлений.
4. Фиксируются незначительные смещения отдельных фрагментов криогенного строения, но структура в целом сохраняется
5. Наблюдается локальные смещения в виде отдельных зон, внутри которых происходит полная перестройка первичной структуры.
6. Формируются объёмные потоковые слоистые ледогрунтовые структуры, внутри которых могут наблюдаться отдельные блоки с первичным строением.

На каждой стадии могут наблюдаться структуры и процессы, соответствующие более ранним стадиям.

Переход криогенной геосистемы или ее частей из одного состояния в другое сопровождается полной или частичной перестройкой элементов её строения. Понять закономерности развития конкретной криогенной геосистемы можно лишь определив её начальное строение, выявив промежуточные стадии и оценив конечное состояние, как результат всех предыдущих трансформаций. Это возможно, поскольку в элементах криогенных структур содержится полная запись событий, отражающих, как этапы формирования, так и этапы перестройки криогенных геосистем. Учитывая роль метаморфизованных льдов среди других типов криогенных образований, следует каким-то образом, ввести их в существующие генетические классификации. Значение данного типа льдов ранее отмечалась многими исследователями, тем не менее они в явном виде, при изучении истории развития мёрзлых пород, не выражены. Совершенно необходимо существующие типы льдов дополнить ещё одним - «метаморфизованные льды», с

делением его на подтипы по степени метаморфизованности. Данный подход позволил бы выйти из терминологической неопределённости, при которой текстурообразующие льды делятся только на два основных типа: сегрегационные и инъекционные. При этом все специалисты, занимающиеся изучением подземных льдов, понимают, что значительное количество криогенных образований имеющих следы динамических процессов связано не с инъекциями воды или водонасыщенного грунта, а с динамометаморфизмом ранее сформировавшихся криотекстур или внутригрунтовых ледяных массивов.

Полигенетичность и стадийность процессов деформирования мёрзлых пород обуславливает необходимость разработки соответствующего метода исследования, который мы определяем как структурно-деформационный анализ. Структурно-деформационный анализ основывается на выявлении последовательности структурно-текстурных изменений криогенного строения и пространственного распределения этих изменений при возникновении напряжений в толще многолетнемёрзлых пород. Разработка и применение данного анализа позволит определить интенсивность, направленность и последовательность процессов структурной перестройки мёрзлых пород и льдов, выявить величины возникающих давлений, темпы их изменения, оценить масштабы и морфологию зоны деформаций (пластических и разрывных) и структурных преобразований, механизмы их развития. Это даст возможность выявить причины возникновения локальных динамических криогенных геосистем и восстановить историю их развития. Можно предложить следующую последовательность проведения структурно-деформационного анализа.

На первом этапе проводится фиксация неоднородностей криогенного строения. Выделяются первичные криогенные текстуры, выявляются пространственные изменения их морфологии. Затем определяются вторичные изменения структурно-текстурных особенностей, анализируются новообразования их взаимодействие с первичными криогенными образованиями. При выявлении неоднократных преобразований первичных и наложенных криотекстур, выявляется количество и последовательность трансформаций.

На втором этапе проводится выделения стадий развития криогенного строения на локальном уровне и в объёме доступного для изучения геологического пространства. Для этого анализируются и выделяются связи первичного криогенного строения с последующим наложенным, проводится оценка изменчивости и устойчивости структурно-текстурных изменений, изучаются функциональные связи между сменой состояний на локальном уровне и пространственной структурной организацией геосистемы в целом.

На третьем этапе выявляются группы процессов соответствующих выделенным ранее стадиям изменения криогенного строения. При этом, важно определить, какой процесс запускает развитие геодинамической криогенной геосистемы и насколько велика его роль на различных этапах её развития.

На четвёртом этапе разрабатывается сценарий развития геодинамической криогенной геосистемы, для чего: проводится сопоставление данных, полученных при изучении строения криогенной толщи и различных вариантов внешних воздействий, а также внутренних преобразований, определяющих последовательность этапов развития криогенного строения; анализируются данные по минералогическому, гранулометрическому составу пород, минерализации поровых вод, физико-механическим свойствам, температурному режиму и др.

Выводы.

Изменения строения мёрзлых пород продолжается и после формирования их первичной структуры. Данные о деформациях первичного криогенного строения несут информацию об истории развития уже сформировавшихся криогенных геосистем.

Деформации в массивах мерзлых пород являются не только нарушениями их первичного строения, часто они сопутствуют и даже являются необходимым элементом формирования тех или иных локальных криогенных геосистем.

Напряжения, вызывающие деформации в мёрзлых породах и подземных льдах, связаны со многими процессами: внешним динамическим воздействием, колебанием температур мёрзлых пород, их собственным весом, возникновением зон повышенного давления внутригрунтового газа, давлением грунтовых вод в промерзающих грунтовых массивах

Широкое распространение метаморфизованных льдов ранее отмечалось многими исследователями, тем не менее, как классификационный тип, в явном виде, при изучении истории развития мёрзлых пород, они не выделены.

Необходима разработка классификации текстурно-структурных деформаций криогенного строения мёрзлых пород, в которой следует выделять особый тип – метаморфизованных ледяных образований.

Необходима разработка методов структурно-деформационного анализа позволяющих устанавливать связи между наблюдаемыми деформациями криогенного строения и процессами, происходящими в мёрзлых породах.

Библиография

1. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения / М.: Изд-во АН СССР. 1955.
2. Соломатин В. И. Петрогенез подземных льдов / Новосибирск: Наука. 1986. 216 с.
3. Соломатин, В.И. Физика и география подземного оледенения: учеб. пособие для вузов / Новосибирск: Академическое изд-во "Гео". 2013.
4. Гасанов Ш.Ш. Криолитологический анализ / Ш.Ш. Гасанов. М. Наука. 1981а.
5. Втюрина Е. А., Втюрин Б. И. Льдообразование в горных породах / М.: Наука. 1970.
6. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов: учеб. Пособие / М., Высшая школа. 1973.
7. Вялов С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / М., Изд-во АН СССР. 1959.
8. Е|ршов Э. Д. Основы геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии / М.: Изд-во МГУ, 1995.
9. Маэно Н. Наука о льде. / М. : Мир. 1988.
10. Шумский П.А. Механизм деформирования и перекристаллизации льда // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 129–136.
11. Данилов И. Д. Методика криолитологических исследований / М., Недра. 1983. 200 с.
12. Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. Часть 2. Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. Том 1 / М.: Издательство Московского университета, 2012. 472 с.
13. Васильчук Ю.К. Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инженерная геология. 2010. №. 3. С. 48–65.
14. Хименков А.Н. Формирование криогенного строения мор-ских отложений: Автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. / М. 1985.

15. Корейша М. М., Хименков А. Н., Брыксина Г. С. О происхождении пластовых залежей подземного льда на севере Западной Сибири // Материалы гляциол. исслед. Хроника, обсуждения, вып. 41. М.: Изд – во МГК АН СССР. 1981. С. 62–67.
16. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. / М.: ВНИИГАЗ. 2009.
17. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И., Сакле М. Влияние влагосодержания на проницаемость песчаных пород в мерзлом и талом состояниях // Криосфера Земли. 2016, т. XX. № 3. С. 71–78.
18. 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. 2017. № 4. С. 13 - 37. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.4.25094
19. 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: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=27524
20. Курчатова А. Н., Рогов В.В. Формирование геохимических аномалий при миграции углеводородов в криолитозоне Западной Сибири // Лёд и Снег. 2018. • Т. 58, • No 2. С 199-212.
21. Курчатова А.Н., Рогов В.В. Стратиграфия и строение криолитозоны юга Гыданского полуострова, "Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике" Сб. Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике /Под ред. В.П.Мельникова и М.Р. Садуртдинова/ Салехард. 2021. С. 239-242.
22. 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. 2019а. № 3. С. 16-38. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29627.
23. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Соболев П.А. — Лабораторное моделирование фильтрации газа в многолетнемёрзлых породах // Арктика и Антарктика. 2019б. № 4. С. 52-72 DOI: 10.7256/2453-8922.2019.4.30997 URL:https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30997.
24. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / под общ. ред. Ю. Б. Бадю, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. М., ООО Газпром экспо. 2013. 424 с.
25. <https://russian.rt>.
26. Галеева Э.И., Курчатова А.Н., Рогов В.В., Слагода Е.А., 2016. Сравнительный анализ строения полигонально-жильных и пластовых льдов. Материалы Пятой конференции геокриологов России. Москва. 2016. С. 291–297.
27. Лейбман М.О., Кизяков А.И., 2016. Новый природный феномен в зоне вечной мерзлоты // Природа. № 2. С. 15–24.
28. Гасанов Ш.Ш. Деформации течения вечномерзлых льдогрунтовых систем // Материалы гляциологических исследований. 1981б. № 41. С. 55-58.
29. Романовский Н. Н. Основы криогенеза литосферы: Учеб. пособие / М., Изд-во Моск. ун-та. 1993. 336 с.

30. Тюрин А. И., Романовский Н. Н., Полтев Н. Ф. Мерзлотно-фациальный анализ курумов / М.: Наука. 1982. С. 149.
31. Сергеев Д. О. Формирование и эволюция курумов в гольцовом поясе гор (на примере хр. Удокан, Северное Забайкалье) : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. / М. 1991. 20 с.
32. Попов А.И. О субмаринном типе криодиагенеза. // Инженерная геология, 1991, № 6. с. 49–55.
33. Хименков А.Н., Брушков А.В. Океанический криолитогенез / М.: Наука. 2003. 336 с.
34. Тихонравова Я. В. Особенности строения полигонально-жильных льдов севера Гыданского полуострова и Пур-Тазовского междуречья: дис ... кандидата геол.-мин. наук / Тюмень Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова 2019.
35. Попов А.И. Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. М., Изд-во Моск. ун-та. 1985. 239 с.
36. Основы геокриологии (мерзлотоведения). Часть первая / М., Изд-во АН СССР. 1959. 457 с.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом исследований являются генезис подземных льдов криолитозоны. В частности исследования изменения структуры льда под действием различных нагрузок при изменении температурного режима, приводящих к метаморфизму. Статья является, практически, полностью компилятивной и содержит известные сведения из различных литературных источников. Может рассматриваться как небольшой аналитический обзор по теме. Авторская структура статьи является спорной, но на то она и авторская, чтобы донести до читателя субъективный взгляд на проблему. Основные выводы корректны. Основные результаты аналитического обзора заключаются в следующем. 1.Изменения строения мёрзлых пород продолжается и после формирования их первичной структуры. Данные о деформациях первичного криогенного строения несут информацию об истории развития уже сформировавшихся криогенных геосистем. 2.Деформации в массивах мерзлых пород являются не только нарушениями их первичного строения, часто они сопутствуют и даже являются необходимым элементом формирования тех или иных локальных криогенных геосистем. 3.Напряжения, вызывающие деформации в мёрзлых породах и подземных льдах, связаны со многими процессами: внешним динамическим воздействием, колебанием температур мёрзлых пород, их собственным весом, возникновением зон повышенного давления внутри грунтового газа, давлением грунтовых вод в промерзающих грунтовых массивах. 4.Широкое распространение метаморфизованных льдов ранее отмечалась многими исследователями, тем не менее, как классификационный тип, в явном виде, при изучении истории развития мёрзлых пород, они не выделены. Целями дальнейших исследований автор видит следующие. Необходима разработка классификации текстурно-структурных деформаций криогенного строения мёрзлых пород, в которой следует выделять особый тип – метаморфизованных ледяных образований.

Необходима разработка методов структурно-деформационного анализа позволяющих устанавливать связи между наблюдаемыми деформациями криогенного строения и процессами, происходящими в мёрзлых породах. Эти цели следует считать обоснованными, вытекающими из выполненного автором аналитического обзора. По

всей вероятности эта научная ниша будет заполняться автором в своих последующих исследованиях. Необходимо, в качестве замечания, отметить, что автор дает только направление дальнейших исследований, но не указывает конкретные пути и задачи, а также методы достижения целей. Данное замечание является скорее пожеланием и не снижает ценности собственно аналитического обзора.

Стиль изложения статьи ясный, понятный как специалистам, так и широкой читательской аудитории. Статья представляет интерес для людей, интересующихся проблемами возникновения и развития криолитозоны на территории страны. В качестве серьезного замечания следует указать на почти полное отсутствие ссылок и анализа результатов исследований зарубежных, в том числе современных ученых, по рассматриваемой научной проблеме. В целом, статья будет представлять интерес для читательской аудитории и может быть рекомендована к печати в авторской редакции.