

## НЕОБЫЧНАЯ МЕРЗЛОТА

Я.Б. Горелик, В.С. Колунин

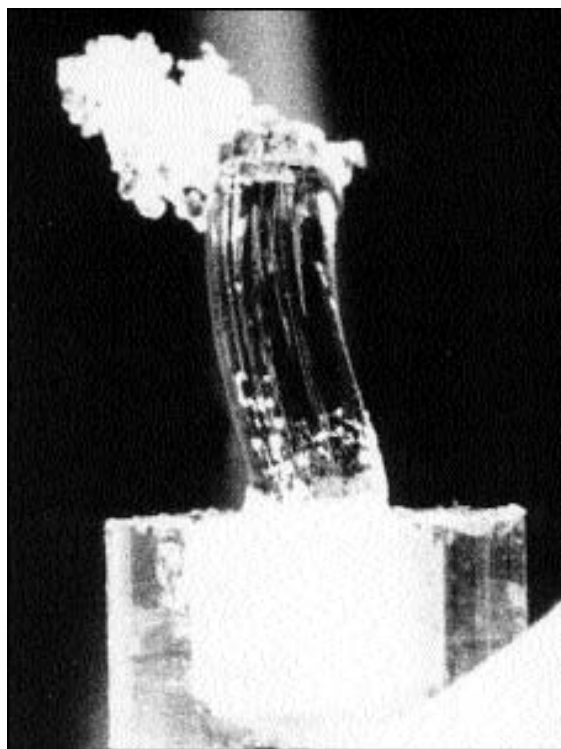
*Яков Борисович Горелик, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института криосферы Земли СО РАН (Тюмень). Руководитель проектов 97-05-65044, 00-05-64871.*

*Владимир Сергеевич Колунин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института.*

Давайте обсудим свойства удивительного природного образования — мерзлой породы. Основные компоненты рыхлых отложений — минеральные частички и вода, содержащая естественные примеси растворенных веществ. Ясно, что химический состав компонентов мерзлой породы совпадает с составом исходной талой, из которой она образовалась. Первая неожиданность возникает при анализе физического состояния воды в мерзлой породе. Оказывается, мерзлый грунт не вполне мерзлый: помимо льда в нем (вплоть до очень низких температур порядка  $70^{\circ}\text{C}$ ) всегда содержится определенное количество незамерзшей воды. Она находится в термодинамическом равновесии с внутри грунтовым льдом и способна течь, как обычная объемная жидкость. Этот факт обнаружен в конце прошлого века шведским ученым Холмквистом и имеет фундаментальное значение для понимания очень многих природных явлений, происходящих в мерзлой толще. Проще всего его объяснить наличием растворенных солей в поровой жидкости. Однако многочисленными исследованиями доказано, что присутствие солей имеет второстепенное значение. Даже в хорошо отмытых и заполненных дистиллированной водой грунтах содержится значительное количество незамерзшей воды. Главная же причина ее существования — особые силы взаимодействия молекул воды с минеральной поверхностью, а также кривизна последней. Чем более дисперсна порода, тем более развита ее внутренняя поверхность и тем большее количество незамерзшей воды остается в ней при данной отрицательной температуре. Так, количество воды растет в ряду от песков к глинам. Эти же силы приводят к тому, что грунт остается в талом состоянии при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$ .

### **Ледяное древо**

Что же может происходить с мерзлой породой, если в ней содержится незамерзшая вода? На рис.1 приведена фотография ледяного тела, растущего на поверхности керамического тонкопористого фильтра. Верхняя его часть вместе со льдом находится при отрицательной температуре, а нижняя, соединенная трубочкой с резервуаром, где находится вода при атмосферном давлении, — при положительной. Лед, подобно растению, высасывает воду из резервуара, поднимаясь все выше со скоростью несколько миллиметров в сутки. Можно попробовать воспрепятствовать росту льда, положив сверху гирьку, однако остановить движение не так просто. Оказывается, требуемая нагрузка зависит от температуры охлаждения и составляет примерно  $13 \text{ атм/град}$ . Для прекращения роста столбика льда с площадью основания  $1 \text{ см}^2$  при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  надо положить гирю в  $26 \text{ кг}$ . Проводились эксперименты, в которых рост льда продолжался при нагрузке, соответствующей давлению в  $100 \text{ атм}$ . Это огромная цифра. Она показывает, что при определенных условиях лед способен, как перышко, поднять любое мыслимое сооружение, нагрузка от которого обычно не превышает нескольких атмосфер. Не надо объяснять сколь катастрофичными могут быть (и бывают!) по следствия. Нагрузка, при которой прекращается рост, называется равновесной, поскольку лед находится в равновесии с водой в резервуаре.



*Рис.1. Лед, выращенный на поверхности керамического фильтра.*

Очень интересно то, что ее величина оказывается примерно в 10 раз ниже, чем необходимо для равновесия объемных фаз воды при той же температуре (около 130 атм/град). Это прямое проявление тех же поверхностных сил, действующих вдоль минеральной поверхности. Оно имеет очень важные следствия. Отметим, например, что для плавления столбика льда при температуре  $-1^{\circ}\text{C}$  необходимо приложить нагрузку, чуть превышающую 13 атм (тогда вода потечет обратно в резервуар), вместо 130 атм для объемных фаз воды. Вернемся, однако, к фотографии. Для роста сплошного тела льда необходимо поступление воды из резервуара непосредственно к нижней поверхности столбика, находящейся на контакте с фильтром. Но ведь верхняя часть фильтра также мерзлая. Как же это происходит? Ответ для нас очевиден: вода поступает по незамерзающим коммуникациям — пленкам воды и капиллярам. Однако внимательный читатель обнаружит еще одну загадку: ледяной столбик непрерывным образом продолжается в порах фильтра, где находится его сложная корневая система — внутриводный лед. При росте масса столбика перемещается вверх, и легко сообразить, что корневая система также должна перемещаться в том же направлении и с той же скоростью. (При этом протяженность корневой системы по вертикали остается постоянной, поскольку она все время замерзает снизу.) Но как? Ведь стенки пор имеют многочисленные выступы и неровности? Здесь мы сталкиваемся еще с одним удивительным явлением, которое продемонстрировал в конце прошлого века английский ученый Дж. Батомми. Он медленно перерезал массивный блок льда с помощью обычной проволоки, но блок не распадался на куски, а оставался целым. Почему? Лед плавился на передней части проволоки, а оттекающая вода замерзала на ее тыльной стороне. Явление, при котором лед плавится в местах повышенных напряжений и затем замерзает в местах разгрузки, получило название режеляции. Так, например, движутся ледники по каменистому, шероховатому ложу. Именно благодаря этому явлению и происходит перемещение внутриводного льда вслед за ледяным телом на поверхности фильтра. Нетрудно понять, что для перетекания жидкости к тыльной стороне препятствия (например, проволоки) необходимо существование вокруг него пленки незамерзшей воды.

Мы подробно остановились на простом лабораторном эксперименте, чтобы выделить основные элементы и их причинно-следственные связи в данном процессе. Отметим их еще раз: поверхностные силы смещают точку равновесия фаз воды в грунтах по закону, отличному от объемных фаз. Это приводит к существованию равновесного содержания незамерзшей

воды при отрицательных температурах, способной течь как объемная жидкость. В свою очередь становятся возможными процессы миграции влаги и перемещения льда внутри пористой матрицы за счет режеляции. Рост ледяных тел, как на поверхности, так и внутри грунта происходит только при наличии первых двух процессов. Насосом, вызывающим движение воды в сторону растущего льда, становятся те же поверхностные силы, величина которых возрастает в направлении от теплой к холодной стороне фильтра.

Все это представляет качественную сторону явлений. Однако чтобы прогнозировать развитие реальных процессов в природных условиях, необходимо установить строгие количественные связи между содержанием незамерзшей воды, температурой и давлением в среде, а также величинами соответствующих потоков тепла и массы. Их запись основана на тщательном анализе многочисленных экспериментов и требует привлечения фундаментальных понятий термодинамики, механики деформируемых тел, гидродинамики. В совокупности образуется целое направление, исследующее физику криогенных процессов, которые могут происходить в холодных регионах Земли и космосе. Вершина этой деятельности — математические модели этих процессов, позволяющие давать количественную оценку самых различных по масштабам и значению событий прошлого, настоящего и будущего. Роль этих моделей важна и для обоснованного проектирования инженерных сооружений.

### **Баротермический эффект**

Вернемся к мерзлоте. Хорошо известно, что обычные тела при сжатии нагреваются: энергия деформации переходит в тепло за счет внутреннего трения элементов среды. Однако взгляните на диаграммы температурного поведения двух типов мерзлых грунтов под нагрузкой (рис.2).

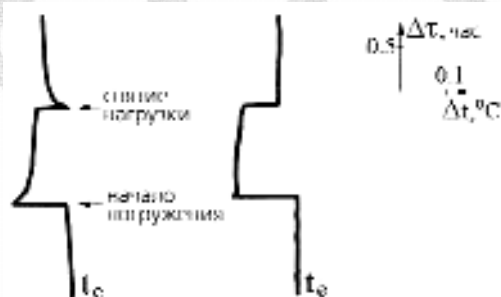


Рис.2. Изменение температуры мерзлого грунта под нагрузкой 3 МПа при начальной температуре  $t_e = -0,5^{\circ}\text{C}$  для супеси пылеватой (слева) и  $t_e = -0,75^{\circ}\text{C}$  для глины.

Они показывают, что в момент нагружения температура грунта скачкообразно понижается и восстанавливается практически до исходного значения при снятии груза. Обратим внимание, что величина его в несколько раз ниже, чем необходимо для плавления обычного куска льда при той же отрицательной температуре. Почему? Ответ легко можно получить, если мы вспомним, что на контакте с пористым телом лед плавится при существенно меньших нагрузках. Но для его плавления необходимо подвести тепло, которое может быть взято только из внутренних запасов грунта, определяемых его теплоемкостью. Происходит охлаждение всей системы. Этот эффект назван баротермическим, поскольку связывает изменения давления и температуры в мерзлом грунте. Кроме того, важно, что выделяющаяся влага протекает в специальную обойму из плотной промокательной бумаги, в которой расположен образец грунта. Бумага обладает тонкопористой структурой, и вода в ней не замерзает. Если материал обоймы более грубый, то отжимаемая вода вновь замерзает, а тепловой эффект от фазовых превращений равняется нулю. На первый план выходят силы трения — образец должен несколько повысить свою температуру. Это и происходит, например, в талых, а также мерзлых, но маловлажных грунтах. В последнем случае внутри грунта имеются многочисленные воз-

душные полости, в которые собирается отжатая вода и замерзает там вновь. Природные грунты, как правило, водонасыщены, и этот эффект проявляется в естественных условиях неожиданным образом.

Посмотрим внимательно на рис.3, где точечными символами показаны фактические данные измерения температуры мерзлых пород в специально оборудованной термометрической скважине вблизи Салехарда. Эксперимент готовился очень тщательно, что обеспечило точность измерения в  $0,01^{\circ}\text{C}$ , так что сомнения в достоверности данных отпадают. Слой мерзлого грунта, залегающий в интервале глубин ( $h$ ) от 140 до 240 м, перекрывается талым водонасыщенным прослоем толщиной около 50 м. Выше, до самой поверхности массива, лежит еще один слой мерзлой породы, который не показан на рисунке. Образование нижнего слоя мерзлоты связано с потеплением климата в прошлом, когда верхняя часть массива оттаяла. Грунт, оставшийся при этом в мерзлом состоянии, называется реликтовым. Последующее похолодание привело к образованию верхнего слоя мерзлых пород, который, однако, не достиг кровли нижнего слоя мерзлоты.

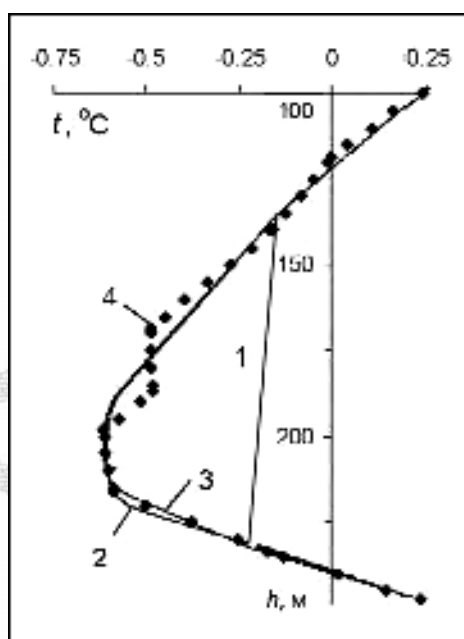


Рис.3. Изменение температуры мерзлых пород в скважине 11 около Салехарда. 1 — начальное распределение (равновесное), 2 — через 100 лет, 3 — через 500 лет, 4 — фактические данные.

Климатические трансформации продолжались несколько тысячелетий. За столь значительное время температура внутри реликтового слоя должна была установиться в соответствии с условиями термодинамического равновесия в толще. Равновесная кривая (1) на рис.3 имеет наклон из-за влияния гидростатического давления на точку фазового равновесия воды в мерзлом грунте. Значительное отклонение фактических данных от кривой равновесия представляется совершенно неожиданным. Реликтовый слой оказывается охлажденным ниже равновесной температуры, несмотря на то, что расположен между двумя талыми образованиями, имеющими положительную температуру пород. В этом можно было бы усмотреть даже нарушение второго начала термодинамики. Объяснить же такое распределение температуры традиционными способами практически нельзя. Например, предположим какое-либо необычное распределение концентраций растворенных солей в поровом растворе, смещающих точку равновесия в пласте. Однако авторы наблюдений специально отмечают, что минерализация грунтовой воды чрезвычайно мала и не влияет на кривую равновесия. Не проходят и иные объяснения, основанные на колебаниях температуры поверхности массива в силу существования мощного талика над реликтовым слоем.

Ответ на вопрос содержится в диаграммах рис.2 и анализе образования этого слоя. В период потепления, когда верхний слой грунта оттаивал, нижний мерзлый — нагревался. В ка-

кой-то момент нагрузка от вышележащей толщи стала превышать равновесное значение для внутригрунтового льда, который при более низких температурах находился в термодинамическом равновесии с окружающей породой. С этого момента лед начал таять, что и привело к охлаждению массива. Плавление льда во всем объеме реликтового слоя протекает очень медленно, и наблюдаемое распределение температуры может сохраняться многие сотни и тысячи лет.

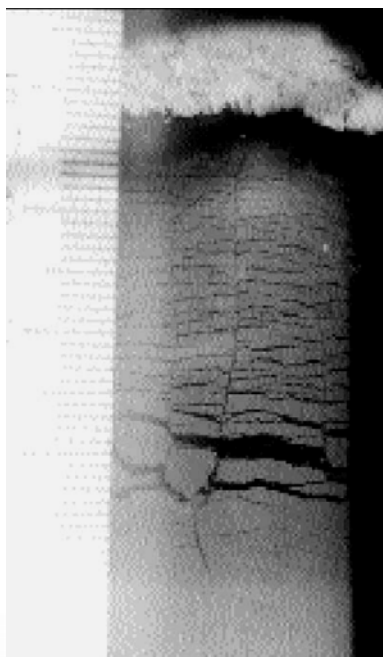
Строгие уравнения, которые переводят наши рассуждения в плоскость количественных расчетов, подтверждают этот вывод. Кривые 2—4 на рис.3, полученные расчетным путем, показывают, сколь длительным может быть этот процесс. Важно здесь и то, что выделяющаяся жидкость движется по не замерзающим коммуникациям мерзлого грунта в талые образования по обе стороны реликтового слоя. Интересно, как чутко реагирует мерзлый массив на изменение внешних условий в соответствии с общим принципом Ле Шателье. Потепление климата вызывает охлаждение массива!

### ***Слоистость – память о прошлом***

Рассмотрим еще одно интереснейшее явление, сопутствующее процессу промерзания грунта. На рис.4 показана колонка грунта после промерзания в лабораторных условиях. Нижнее основание колонки во время опыта находилось в контакте с источником воды. Талый грунт сохранился в нижней части колонки и был совершенно однородным. Промерзшая же часть сильно изменилась: образовалась четко выраженная слоистость. Слои мерзлого грунта перемежаются линзами чистого льда, толщина которых закономерно увеличивается с глубиной.

Картина слоистости — текстура мерзлого грунта — оказывается связанной со свойствами грунта и условиями его промерзания. При некоторых, вполне определенных условиях, для данного типа грунта толщина ледяных линз достигает размеров, превышающих высоту начальной талой колонки. По текстуре мерзлого грунта можно в принципе восстановить температурные условия его промерзания. Ту же самую слоистость мы видим в природных толщах мерзлой породы. Она прослеживается до весьма значительных глубин 100—150 м. Максимальная же толщина ледяных линз наблюдается в верхних 10—40 м. Ниже их толщина монотонно снижается, а расстояние между линзами увеличивается. Довольно часто в верхних слоях мерзлого грунта обнаруживаются слои льда, толщиной от единиц до нескольких десятков метров.

Застывшая картина слоистости в промерзших рыхлых отложениях напрямую связана с климатом прошлых тысячелетий. Познать же закономерности изменения климата означает обрести ключ к разгадке многих тайн, которые волнуют человечество. Каким же образом возникает слоистость? Можно сразу сказать, что рост отдельных линз вполне аналогичен картине, которую мы описали для ледяного тела на поверхности керамического фильтра. Но чем вызвано их возникновение в данном конкретном месте и почему они прекращают свой рост спустя какое-то время? Ответ на эти вопросы требует анализа внутренних напряжений в промерзающем грунте, а точнее в той зоне, где расположена корневая система растущей линзы. В отличие от стационарного роста льда на поверхности фильтра при промерзании грунта длина этой зоны все время увеличивается, и внутренние напряжения в отдельных компонентах грунта также меняются.



*Рис.4. Криогенная текстура грунта, полученная в лаборатории.*

По законам механики, в каждом поперечном сечении зоны корневой системы величина внешней нагрузки всегда должна быть равна сумме напряжений в отдельных компонентах грунта. Иными словами, влияние нагрузки равно сумме внутривещных напряжений (обусловленных внутренним давлением во льду и незамерзшей воде) и напряжений в скелете минеральных частиц грунта. Этот баланс подразумевает, что при постоянной общей нагрузке увеличение давления внутри пор вызывает уменьшение напряжений в скелете. В некоторый момент времени в определенном сечении зоны корневой системы поровое давление, монотонно нарастая, достигает значения внешней нагрузки. В этот момент в данном сечении в скелете грунта начинают возникать растягивающие напряжения. Однако рыхлые отложения не обладают прочностью на разрыв и минеральные частички начинают расходиться в пространстве, которое немедленно заполняется льдом. Так образуется новая линза льда, перекрывающая все поперечное сечение образца и лишаящая питания водой предыдущую линзу. Последняя в этот же момент прекращает свой рост. Далее процесс повторяется, что и приводит к образованию слоистой текстуры. Количественно ее параметры (размеры ледяных линз и расстояний между ними) определяются математической моделью текстуробразования, учитывающей в уравнениях весь комплекс факторов, оказывающих влияние на этот процесс.

На рис.5 приведены отдельные примеры вычислений для промерзающего в естественных условиях грунта. Рис.5 левый подтверждает общую закономерность немонотонного распределения размеров ледяных линз с глубиной. Рис.5 правый демонстрирует возможность образования мощного слоя льда в верхней части разреза. Достоинство же данной математической модели заключается в том, что она указывает ясные причины и конкретные условия, при которых формируются те или иные картины распределения льда в массиве. Так, уменьшение размеров льдинок, начиная с некоторой глубины, обусловлено весом вышележащей толщи, гасящего процесс выделения льда. Образование же массивного ледяного тела происходит при достаточно мягких условиях промерзания и высокой проницаемости исходного талого вещества. Насколько полезным инструментом исследования может оказаться рассматриваемая модель показывает следующий пример. Замечено, что расположение ледяных линз по разрезу иногда не вполне регулярно. Они то сближаются, то вновь разбегаются, напоминая неравномерно растянутую гармошку. Это наблюдается и в сравнительно однородных по составу и свойствам отложениях. До недавнего времени объяснить такие аномалии мы не могли даже качественно. Если попытаться объяснить этот факт колебаниями температуры на поверхности массива, то окажется, что короткопериодные гармоники с большой амплитудой, обусловлен-

ной сезонными процессами, не проникают в глубь Земли больше чем на 10—15 м. Следовательно, они не могут изменить картину распределения ниже этого уровня.

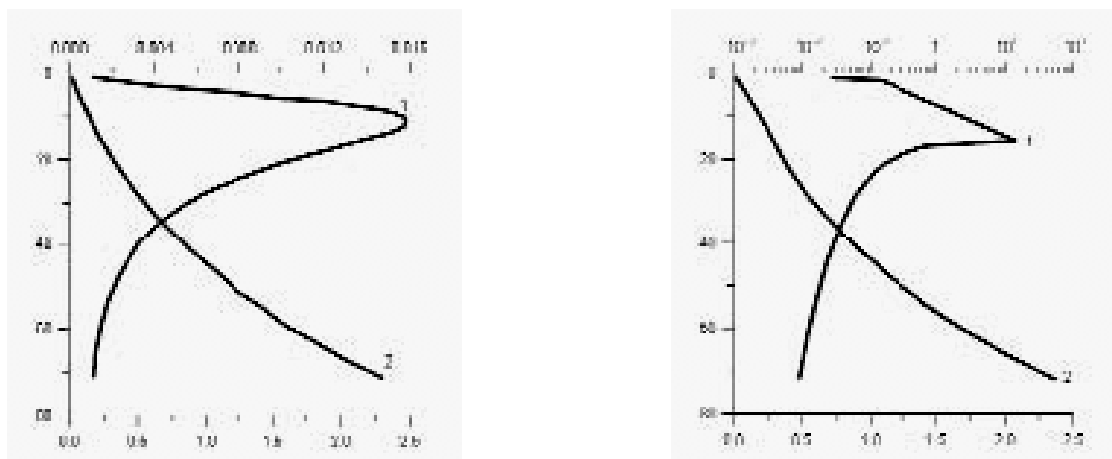


Рис.5. Зависимость параметров слоистой криогенной текстуры от глубины при коэффициенте гидрорепроводности  $10^{-10}$  (слева) и  $10^{-11}$  кг/м с. 1 — размеры ледяных шлиров, 2 — расстояние между шлирами.

Длиннопериодные же колебания (в пределах десятков лет), обусловленные изменением климата, имеют очень малую амплитуду и также не оказывают существенного влияния на этот процесс. Какие же еще возмущения способны нарушить плавные изменения параметров криотекстуры? Вспомним, что естественно залегающие грунты, как правило, имеют гидравлическую связь с открытыми водоемами, колебание уровня которых так же естественно, как и колебание температуры на поверхности. Однако в отличие от температуры изменение давления в грунтовой воде, вызванное колебанием уровня, распространяется на большие расстояния практически без затухания. Насколько серьезно такое влияние на процесс образования криотекстуры?

Результаты расчета конкретного примера показаны на рис.6, на котором для сравнения приведены аналогичные данные в условиях постоянства уровня водоема. Распределение льдистости разительно изменилось. «Гармошка» отражает в первую очередь периодическое изменение промежутков между ледяными шлирами. Но и размеры шлиров также существенно изменились. Интересно, что периодичность в расположении льда не вполне соответствует периодичности накладываемых возмущений. Здесь идет сложный процесс интерференции колебаний давления и изменения поровых напряжений, который приводит к образованию структур, схожих с застывшей картиной биений, известной в колебательных процессах. Для подтверждения влияния гидростатики водоема на параметры криотекстуры необходимо сравнение с конкретным геологическим материалом. Однако уже на основании выполненных расчетов можно высказать предположение, что криогенные текстуры консервируют ритмику гидрологической обстановки прошлых эпох и могут служить ее палеоклиматическим индикатором.

Математическая модель текстурообразования дает объяснение и другим интересным фактам, которые подмечены в натурных и лабораторных исследованиях. Например, известно, что если в тонкодисперсной толще находился песчаный слой, то после промерзания зона в 1,5—2 м над ним практически не содержит ледяных линз. Объясняется это касанием корневой системы очередной растущей линзы песчаного пласта и быстрым замерзанием последнего. Все дело в протяженности зоны корневой системы, которая на глубинах более чем 15—20 м имеет длину около метра.

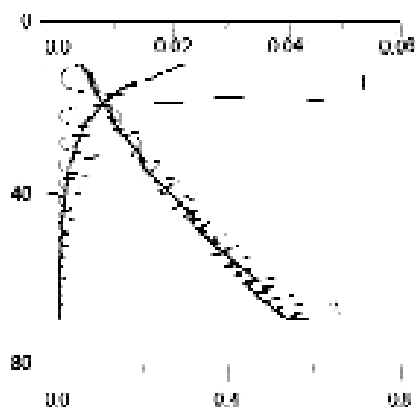


Рис.6. Влияние колебания уровня водоема на параметры криогенной текстуры. Толстые линии — постоянный уровень воды, тонкие — амплитуда колебания уровня 10 м. 1 — размер ледяных иширов, 2 — расстояние между иширами.

Другой пример взят из практики лабораторных экспериментов. На рис.7 показано изменение скорости роста льда в зависимости от температуры охлаждения. Проведены два опыта. Непонятным образом в первом случае скорость растет с понижением температуры, а в другом — падает. Объяснить это можно только применяя точные уравнения. Оказывается, что при одних и тех же внешних условиях возможно существование двух устойчивых режимов роста, отличающихся протяженностью корневой системы и по-разному реагирующих на изменение температуры.

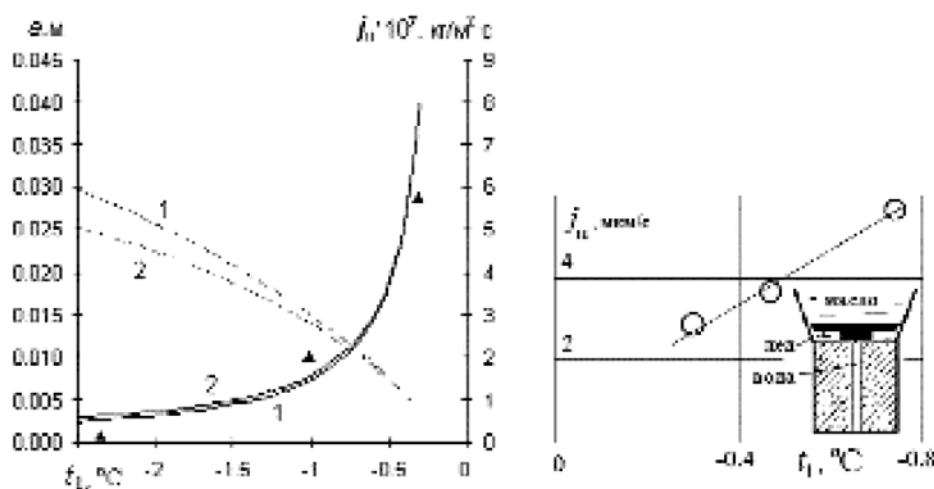


Рис.7. Зависимость потока массы  $j_u$  от температуры охлаждения  $t_1$  (два измерения);  $a$  — размер промерзающей зоны, м (штриховая линия). Слева — опыт Г.П. Бровки с коллегами (1990), справа — М. Вигнес с коллегами (Vignes et al., 1974).

### Секрет жидкой капли

Конечно, не всякий содержащийся в грунте лед образуется так, как описано выше. Он может быть просто погребен под наносами ила либо образоваться из воды, внедрившейся под напором в уже мерзлые слои. Всегда важно точно установить условия его формирования, поскольку именно они и воссоздают конкретную обстановку прошлого. Существенную помощь оказывают результаты исследований многочисленных включений, содержащихся в природных льдах, — газообразных, твердых или жидких. Пузырьки газа могут многое рассказать о составе атмосферы в прошлые времена, твердые частички характеризуют свойства вмещающих пород, а жидкие капли — происхождение и состав замерзшей воды. Жидкая капелька концентрирует внутри себя большую часть примесей воды и потому остается незамерзшей в



ледяном теле. При наложении на лед градиентного поля температуры все микроскопические образования начинают медленно перемещаться в более теплую сторону льда. В этих условиях с течением времени происходит его самоочистка. Например, так происходит опреснение морского льда, который в момент формирования содержит многочисленные капельки рассола. Исследование закономерностей перемещения включений оказывается важным для оценки возраста самого льда. Для этого в лабораториях создаются специальные криоскопические установки (рис.8), где наблюдаемые в микроскоп процессы выводятся на экран телевизора или компьютера, а запоминающие устройства позволяют воспроизвести все детали явлений.

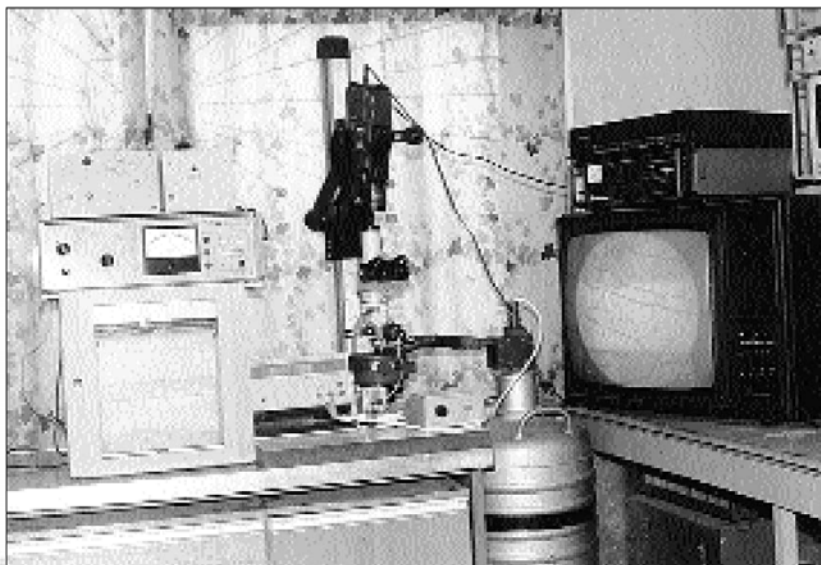


Рис.8. Общий вид установки для исследования микропроцессов в промерзающих образцах.

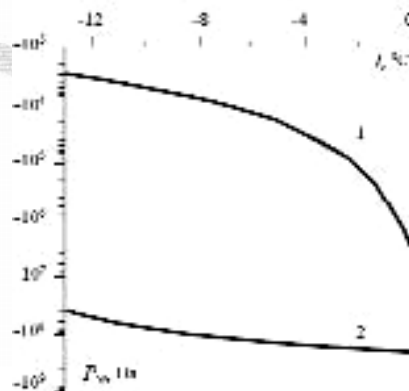


Рис.9. Зависимость давления внутри включения от температуры в данной точке образца. 1 — лед с реальным значением вязкости, 2 — недеформируемый лед.

Одна загадка долгое время лишала сна исследователей, наблюдавших движение жидкой капли во льду. (Такое движение происходит вследствие оттаивания льда с теплой стороны капли и ее замерзания с противоположной, т.е. благодаря известному нам процессу режеляции.) Дело в том, что при движении в сторону повышенных температур капелька еще и увеличивается в размерах. Это понятно, поскольку происходит частичное оттаивание льда так, что концентрация раствора в капле понижается в соответствии с условиями фазового равновесия при той температуре, при которой в данный момент капля находится. Но вследствие разности плотностей воды и льда при фактическом увеличении размеров капли, внутри нее развиваются очень большие растягивающие напряжения, которые с неизбежностью должны приводить к газовыделению внутри капли. Однако ни один микроскоп в мире не зафиксировал это явление! Разгадка заключается в необычных свойствах льда. Этот твердый минерал при длительно действующих нагрузках может течь, как очень вязкая жидкость. Именно текучесть льда и раз-

гружает каплю от высоких растягивающих напряжений. Теория, построенная с учетом данного свойства льда, демонстрирует это обстоятельство в числах.

Два графика на рис.9 показывают, что вследствие текучести льда напряжения в капле уменьшаются по абсолютной величине более чем на три по рядка по сравнению с его недеформируемой идеализацией. Правильно построенная теория позволяет решать целый ряд других важных вопросов. На пример, из теории движения капель следует, что их скорость не должна зависеть от начального радиуса — это действительно наблюдается на опыте. Другой вывод теории, который не подвергался экспериментальной проверке, состоит в том, что аналогичные включения жидкости будут перемещаться и в мерзлом грунте, причем со скоростью в несколько раз выше, чем во льду. Происходит это из-за существенно меньших затрат на фазовый переход на границах в случае мерзлой породы, так как часть жидкости замещается минеральными частицами. Это объясняет и загадочное блуждание криопэггов — больших скоплений рассола внутри мерзлой толщи. (Вспомним, что скорость перемещения включений не зависит от их радиуса.) Это явление отмечено в Якутии и на западном побережье Ямала. Вероятнее всего, их блуждание обязано естественным температурным градиентам, которые всегда присутствуют в природной среде.

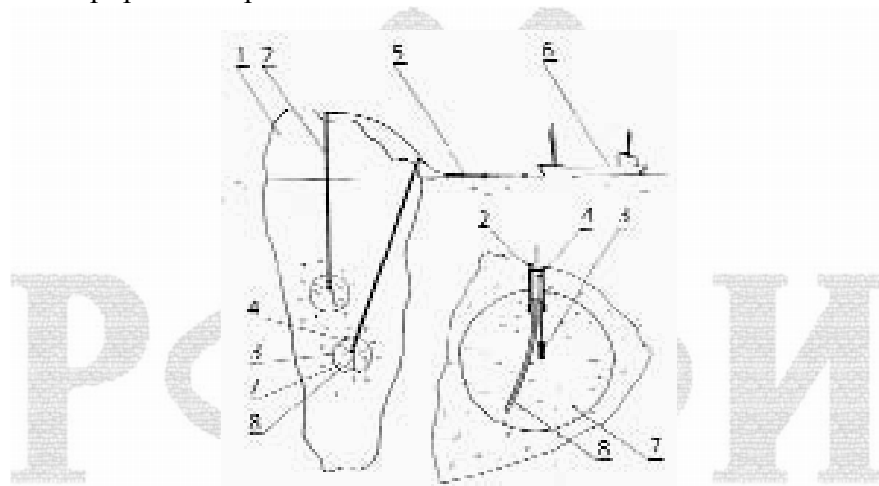


Рис.10. Схема добычи пресной воды из ледяных массивов. 1 — айсберг, 2 — ствол скважины, 3 — нагреватель, 4 — насос, 5 — шланг, 6 — танкер, 7 — полость, 8 — патрубков.

Еще одно неожиданное следствие построенной теории движения капель — получение пресной воды из айсбергов (рис.10). В ледяном гиганте бурят скважину глубиной в несколько сотен метров. Специальным нагревателем на забое проплавляется полость, в которой насосом создается максимально возможное разрежение. Под действием перепада давления в полости и в океане лед начинает течь в сторону полости. При включенном нагревателе он непрерывно тает на ее границах, а образующаяся вода откачивается на судно. Расчеты показывают, что для получения 30 т воды в сутки диаметр полости должен составлять примерно 6 м. При этом скорость течения льда на ее границах очень мала — несколько микрон в секунду.

В кратком очерке невозможно охватить все многообразие явлений, протекающих в мерзлых грунтах и имеющих физическую природу. Мы даже не коснулись таких замечательных фактов, как существование льда внутри по род при положительных температурах, как необычная форма включений во льду, низкая температура плавления малых ледяных тел, и многого другого, что будоражит фантазию исследователя. Но все же сказанного достаточно, чтобы считать мерзлый грунт удивительным образованием природы.