

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.345

Н.А. Шполянская¹**О МЕХАНИЗМАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ
(КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕГРЕГАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА)²**

Обсуждается происхождение крупных залежей подземных пластовых льдов, широко развитых на равнинах севера России. Подземные льды содержат большую палеогеографическую информацию, поэтому важно установить их генезис. Пластовые льды изучают с 1960-х гг., но до сих пор их генезис остается дискуссионной проблемой. Существует несколько концепций их генезиса, часто взаимоисключающих, — от утверждения о захоронении остатков древнего покровного оледенения до формирования непосредственно в субмаринных условиях. Согласно одной из ранних концепций пластовые льды формируются при эпигенетическом промерзании грунтов в результате миграции грунтовых вод из глубоких слоев вверх, к фронту промерзания. Это так называемый сегрегационный механизм, поддерживаемый молекулярными связями воды в грунтах, и один из ведущих механизмов формирования слоистых мерзлых толщ с текстурирующими льдами. Статья посвящена критическому анализу этого механизма с точки зрения его возможности сформировать мощные ледяные пласты.

Рассмотрен большой экспериментальный материал, накопившийся к настоящему времени, из анализа которого вытекает, что миграция воды к фронту промерзания под действием молекулярных связей невозможна на большое расстояние, следовательно, невозможен длительный непрерывный подток воды, необходимый для роста крупного ледяного тела. Миграционный поток возможен только на небольшое расстояние, он многократно прерывается во время промерзания грунта, что обуславливает возникновение зон иссушения. С помощью этого механизма возможно формирование отдельных ледяных прослоев (шлиров), пронизывающих мерзлые грунты, но не формирование пластовых льдов.

Ключевые слова: пластовые льды, генезис подземных льдов, сегрегационное льдообразование, миграция воды, эпигенетическое промерзание.

Введение. На равнинах Западной Сибири, северо-востока европейской территории России и Чукотки широко распространены подземные пластовые льды — крупные тела неопределенной формы размером несколько десятков метров по горизонтали и вертикали (рис. 1). Установление их генезиса необходимо, потому что пластовые льды, как и все подземные льды, содержат большую палеогеографическую информацию. В их строении и свойствах сохраняются первоначальные черты времени их формирования, данные их изучения можно использовать для реконструкции природных условий прошлого. Однако, несмотря на то что их интенсивное изучение началось в 1960-е гг., происхождение подобных образований до настоящего времени остается остро дискуссионным вопросом. Практически не наблюдается развития мнений относительно генезиса льдов — все существующие концепции (дополняемые вариантами механизма льдообразования) до настоящего времени поддерживаются их авторами.

Две основные концепции содержат два взаимоисключающих мнения. Одни авторы [12, 17, 19, 28]

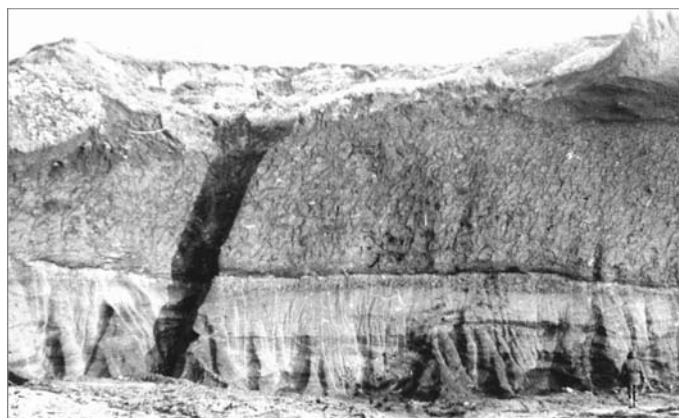


Рис. 1. Пластовая ледяная залежь Тадибеяха, Западный Гыдан (нижняя часть разреза), 70° с.ш.

считают пластовые льды захороненными в грунтах остатками покровных ледников, т.е. свидетелями существования в прошлом покровного оледенения. Другие полагают, что это изначально внутригрунтовые образования, исключая присутствие в прошлом наземных ледников.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: nella@shpolyanskaya.msk.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке Программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-335.2014.5).

По поводу механизма внутригрунтового роста пластовых льдов единого мнения тоже нет. Многие авторы приняли сегрегационный механизм льдообразования при эпигенетическом типе промерзания [1, 4, 5, 9], определяемый миграцией поровой грунтовой воды снизу вверх, к фронту промерзания, и замерзанием ее в виде ледяных прослоев. Признают и инфильтрационный механизм льдообразования, тоже при эпигенетическом промерзании, предполагающий внедрение в промерзающий грунт больших масс воды под напором [5] или проникающих в грунт сверху из водоемов, в частности во время морских приливов [6]. Предлагается и совместный инфильтрационно-сегрегационный механизм поступления воды в грунты [9, 30]. Существует и концепция, согласно которой предполагается формирование пластовых льдов непосредственно в субмаринных условиях при сингенетическом типе промерзания донных отложений, ее основоположник А.И. Попов [15], эта концепция развивается в работах [25, 26].

Постановка проблемы. Наши многолетние исследования [27] показали, что пластовые льды неоднородны, среди них есть льды разного генезиса, в том числе и инъекционные, и погребенные первоначально наземные льды — глетчерные, снежные, водные (рис. 2). Большая часть упомянутых механизмов способна сформировать пластовые льды. Однако анализ всех накопившихся к настоящему времени материалов показывает, что трудно объяснить формирование мощного пласта льда сегрегационным механизмом при эпигенетическом промерзании грунтов, т.е. путем миграции поровой влаги с большой глубины к фронту промерзания. Поскольку, как показано на карте (рис. 2), инъекционные и погребенные льды составляют сравнительно небольшую долю пластовых льдов, все

остальные льды должны, казалось бы, формироваться именно путем миграции грунтовой воды при эпигенетическом промерзании, однако это не так. В цели исследования входило рассмотрение того, как происходит миграция грунтовой воды при эпигенетическом промерзании грунтов.

Материалы и методы исследования. Сегрегационный (миграционный) способ формирования ледяных прослоев основан на данных работ [29, 32] и исходит из существования в дисперсных грунтах связанной воды (адсорбированной грунтовыми частицами), миграция которой к фронту промерзания может проходить без перерыва сколь угодно долго. Поэтому при наличии соответствия между скоростью подтягивания воды и скоростью ее замерзания рост слоя льда может быть бесконечным.

Процесс миграции связанной воды к фронту промерзания широко развит в мерзлых и промерзающих грунтах и играет ведущую роль в формировании криогенной текстуры мерзлых пород и текстурообразующих льдов. В связи с этим многие исследователи считают, что в процессе сегрегационного льдообразования при эпигенетическом промерзании грунтов вполне возможно такое сочетание скорости промерзания и скорости подтока влаги, когда толщина ледяного штира может расти неограниченно. Принимается, что при промерзании грунтов от поверхности в глубь толщи (эпигенетически) происходит непрерывная миграция связанной воды с большой глубины на большое расстояние (100—150 м и более), которая за длительное время обеспечивает рост мощных пластовых льдов.

Господствующая со времени Г. Бескова [29] и до настоящего времени адсорбционно-пленочная гипотеза миграции воды к промерзающему слою грунта сводится к следующему. В тонкодисперсных грунтах

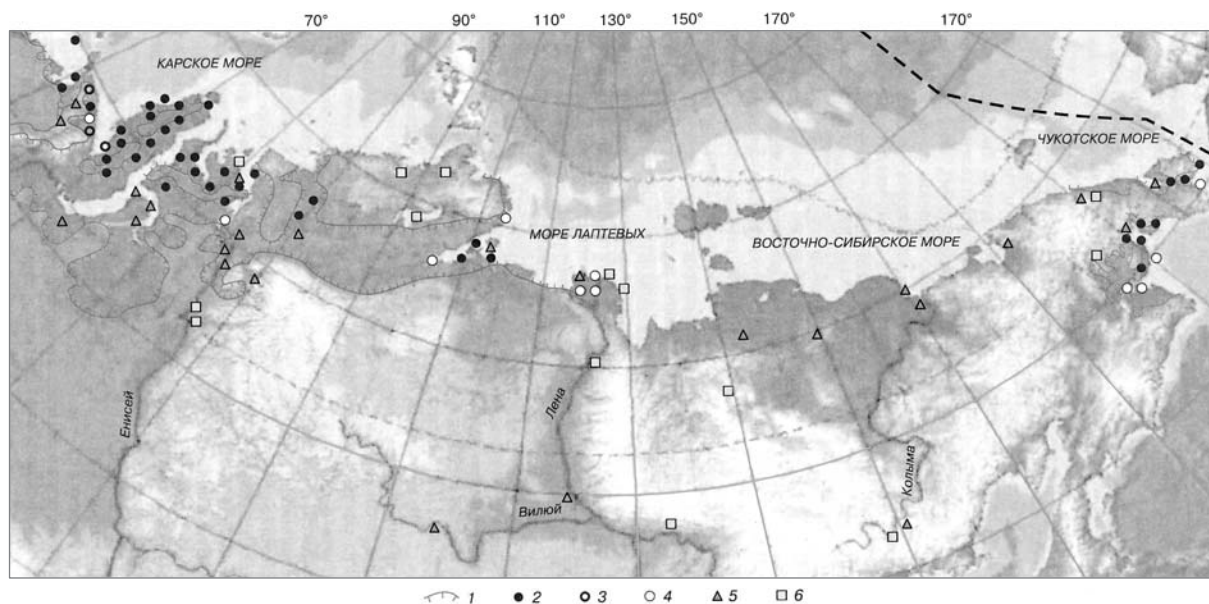


Рис. 2. Карта пластовых льдов криолитозоны России [27]: 1 — границы позднеплейстоценовых морских равнин; 2—6 — генетические типы пластовых льдов: 2 — льды изначально субмаринного генезиса, 3 — льды составные (субмаринные и прибрежно-морские в одном разрезе), 4 — льды прибрежно-морские, 5 — инъекционные льды, 6 — погребенные (первично наземные) льды

присутствуют водные пленки, связанные молекулярными силами с минеральными частицами. Эти силы обуславливают существование водной пленки постоянной толщины вокруг минеральных частиц. При промерзании грунта возникает градиент температуры, на нижней границе промерзающего слоя (фронте промерзания) в зоне фазовых переходов замерзает свободная вода и часть связанной воды. Это создает градиент влажности между границей промерзания и подстилающим талым грунтом. Под влиянием возникшего градиента происходит миграция новых порций воды к фронту промерзания — из нижележащих талых слоев грунта с более толстыми пленками связанной воды к частично обезвоженным слоям перед промерзающим слоем, т.е. пополнение пленок до исходной толщины. По мере продвижения границы промерзания сверху вниз грунтовая влага перемещается снизу вверх из талых слоев грунта. Если принять возможным неограниченный приток воды снизу (при достаточном количестве грунтовой воды), то рост ледяного шпиря в промерзающем грунте, казалось бы, может быть длительным (при соблюдении соответствия между скоростью подачи воды и скоростью отвода тепла) и сформировать мощный ледяной пласт.

Однако, как нам представляется, сегрегационный механизм при эпигенетическом промерзании не может обеспечить непрерывность потока воды к фронту промерзания и образование единого мощного ледяного тела, часто залегающего на большой глубине. Сомнения возникли при исследовании известного опытного подземелья в г. Игарка, где вскрыта высокольдистая толща ленточных глин [14, 24].

Игарское подземелье расположено на широкой 40—50-метровой каргинской (III₃) террасе Енисея. Толща высокольдистых ленточных каргинских глин (возраст $33\,030 \pm 550 \div 39\,000 \pm 400$ лет [13, 21]) вскрыта практически от дневной поверхности до глубины 18 м на протяжении более 50 м по горизонтали. Мощность ленточных глин 20 м, подстилаются они песками [20]. Для толщи характерна слоисто-плетенчатая криогенная текстура с толстыми (от 5—7 до 15—20 и даже до 30 см) шпирями льда. Строение и однотипная криогенная текстура толщи свидетельствуют, что она формировалась в едином озерном бассейне и в последующем промерзала в едином эпигенетическом цикле [14, 24]. Криогенное строение полностью соответствует закономерностям, установленным А.И. Поповым для эпигенетического типа промерзания. Льдистая толща обнаруживает закономерное разреживание и утолщение слоев льда с глубиной, имеет закономерно повышенную льдистость в нижней части слоя активного криолитогенеза (12—14 м), затем при переходе в слой пассивного криолитогенеза льдистость резкое снижается.

Промерзание озерных ленточных глин должно было начаться сразу после их выхода из-под уровня воды в холодную сартанскую эпоху (III₄), сменившую относительно теплую каргинскую эпоху. Льдообразование шло по сегрегационному типу путем миграции

воды к фронту промерзания при достаточно высоких значениях температурного градиента и обильного подтока влаги в условиях открытой системы. Мощные горизонты напорных подземных вод, широко распространенные в районе Игарки [8], обеспечивали неограниченный подток влаги и неограниченное льдовыделение в промерзающих грунтах. О неограниченном подтоке воды в промерзающую толщу ленточных глин Игарки пишет и Т.Н. Жесткова [11].

Если воспользоваться данными эксперимента, приведенного в работе [7], где исследована миграция воды при разных литологических условиях (три опытные модели), то Игарский разрез имеет наиболее благоприятное строение грунтов для активного льдовыделения. Описываемый разрез представляет собой двухслойную систему из слабопроницаемого верхнего и хорошо фильтрующего нижнего слоев, что обеспечивает максимальный приток воды снизу.

Но, несмотря на максимально благоприятные для льдовыделения условия, единое тело залежного пластового льда здесь не сформировалось. Сформировалась высокольдистая слоистая и линзовидно-слоистая грунтовая толща с толстыми (от 5—7 до 25—30 см) ледяными шпирями (рис. 3).



Рис. 3. Разрез мерзлой толщи ленточных глин (разные участки толщи), игарское подземелье. Видны крупные ледяные шпиря (черное), разделенные широкими грунтовыми прослоями (светлые). Фото Е.Г. Карпова (вверху) и Л.А. Степаненко (внизу)

Даже в миграционном бугре пучения на торфяниках (высотой обычно не более 2—2,5 м), где ледяное ядро формируется тоже при эпигенетическом промерзании путем миграции воды к фронту промерзания (отсюда и его название), не образуется сплошное ледяное тело, а формируются ледяные слои (шлиры) в грунтовой толще (рис. 4). Все эти примеры показывают, что сегрегационный (миграционный) механизм вряд ли способен сформировать мощный залежный пластовый лед.

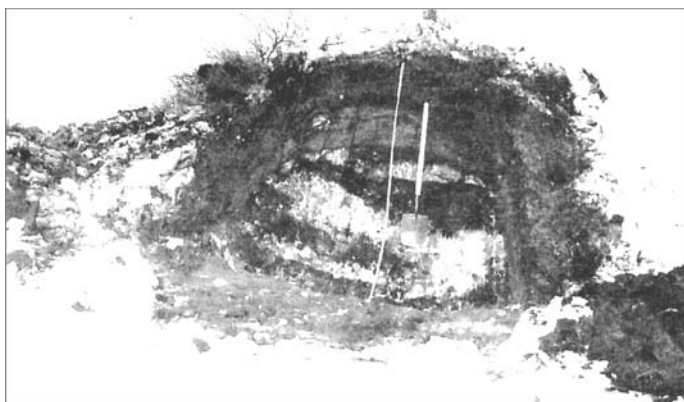


Рис. 4. Миграционный бугор пучения с льдистым ядром, представленным текстурообразующим льдом, Западная Сибирь

В доказательство этого утверждения ниже приводятся материалы экспериментальных исследований миграции воды к фронту промерзания и их анализ с точки зрения возможности формирования крупных пластов льда.

Результаты исследований и их обсуждение. Главная причина, препятствующая формированию мощного ледяного тела, — невозможность длительной и непрерывной миграции связанной воды на большие расстояния. Многочисленные экспериментальные работы указывают на это, а многие исследователи сомневаются в возможности сегрегационного механизма.

Г.М. Фельдман [22] считает, что преувеличены возможности кристаллизационно-пленочного механизма движения влаги, которому приписывается огромный радиус действия — подтягивание влаги к фронту промерзания на расстояние 100—150 м. На основании анализа экспериментов (собственных и опубликованных данных) он сделал заключение, что миграция влаги к растущему ледяному шлиру возможна только при определенных условиях: прорастание кристаллов в поры грунта и непосредственный их контакт со связанной водой, наличие непрерывной пленки связанной воды на поверхности минерального скелета, переохлаждение в зоне растущих кристаллов. Кроме того, наличие единого неразрывного объема связанной воды зависит от дисперсности грунта и его влажности. Этот объем больше в суглинках, меньше в супесях и отсутствует в песках. Если говорить о тонкодисперсном грунте, то следует отметить, что непрерывность объема связанной воды нарушается в маловлажных и

разжиженных грунтах, здесь миграция влаги не происходит.

Из материалов Г.М. Фельдмана вытекают определенные выводы: во-первых, условия для миграции воды возникают только в зоне, близкой к фронту промерзания; во-вторых, непрерывность связанной воды не может сохраняться в толще грунта большой мощности (100—150 м), поскольку литологический состав и влажность разных слоев такой толщи в большинстве случаев неодинаковы; еще одно условие ограничивает миграцию воды в промерзающих грунтах — предельный диапазон скорости промерзания. При слишком малой и слишком большой скорости подток влаги резко снижается, поэтому во время промерзания нередко возникают условия, когда механизм миграции за счет термодинамического потенциала не действует.

В работе [23] экспериментально установлено, что миграция грунтовой влаги к фронту промерзания возможна только тогда, когда расстояние фронта от уровня подземных вод не превышает 3,5 м. При большем расстоянии последние перестают влиять на увлажнение промерзающего слоя. Это означает, что источник воды при формировании пластовых льдов должен быть расположен не глубже 3,5 м от фронта промерзания. Таким образом, миграция воды с большой глубины невозможна.

Э.Д. Ершов [10] экспериментально проследил механизм миграции влаги и показал, что в начале промерзания после образования первого мерзлого слоя в грунте возникает градиент температуры и начинается миграция влаги, тогда на фронте промерзания возникает неразрывный поток влаги из талой зоны в мерзлую. Здесь поры грунта полностью заполнены влагой. Однако по мере увеличения глубины и замедления скорости промерзания (из-за уменьшения значений сезонного температурного градиента и увеличения давления вышележащих слоев грунта) градиент потенциала влаги в подстилающей талой зоне уменьшается до нуля, и миграция влаги, а с ней и льдовыделение на границе прекращаются.

Этот очень важный процесс должен, по-видимому, неоднократно повторяться за время эпигенетического промерзания грунта, так как он связан с образованием перед фронтом промерзания слоя “нулевой завесы” (явление, выявленное М.И. Сумгиным [18]). Это водонасыщенный слой, где происходит интенсивный процесс фазовых превращений воды в лед, поэтому температура в нем некоторое время поддерживается равной температуре замерзания воды, при этом в слое исчезает градиент температуры, а следовательно, и поток влаги. Поскольку некоторые категории связанной воды замерзают не при нулевой, а при отрицательной температуре, то, опираясь на эксперименты, описанные в работе [3], можно говорить, что интервал температуры в слое “нулевой завесы” составляет 0 ... –3 °С. По завершении фазовых процессов температурный градиент в слое перед фрон-

том промерзания восстанавливается, поэтому должен возобновиться влагоперенос.

Влагоперенос происходит прежде всего из запасов воды в близлежащих слоях грунта. Этот влагопоток должен добирать воду из слоя, увеличивая толщину ледяных шпиров в промерзавшей части, но одновременно и полностью иссушать этот слой. В слое иссушения неизбежно образование трещин в грунте и разрыв капилляров с нарушением единой капиллярной системы [24]. Подтверждением такого протекания процесса могут служить наблюдения В.В. Рогова [16], исследовавшего разрез в игарском подземелье и установившего, что рост прослоек сегрегационного льда происходит до тех пор, пока не будут полностью исчерпаны запасы влаги, причем до такой степени, что в нижележащем слое может наблюдаться лишь минимум содержания льда-цемента. Миграция воды в этом слое не может происходить, льдовыделения тоже нет. Следовательно, только после полного замерзания иссушенного слоя и продвижения фронта промерзания ниже зоны иссушения начинается новое движение воды с формированием нового шпиря. Без такого перерыва невозможно возобновление градиента температуры и потока влаги. Именно после этого процесс повторяется вновь, так должна формироваться слоистая мерзлая толща с ледяными шпирями разной толщины.

Еще одно свидетельство нарушения непрерывной миграции воды привел В.Г. Чеве́рев [23]. Он экспериментально установил, что уже в начале промерзания, в зоне, где температура близка к 0°C (от начала промерзания до $-0,6^{\circ}\text{C}$), влагопроводность грунта экспоненциально снижается, поскольку горизонтальные шпиря льда, образующиеся в этом диапазоне температуры, прерывают влагопоток и снижают коэффициент влагопроводности в 10–20 раз. Ограничение питания промерзающего слоя грунта влагой, возникающее вследствие этого процесса, приводит к тому, что при дальнейшем понижении температуры влагоперенос в сторону слоя с более низкой температурой осуществляется только за счет запасов воды в близлежащих более высокотемпературных слоях грунта.

В этом случае, как и в опытах Э.Д. Ершова, следует ожидать постепенного иссушения и усадки грунтов нижележащих слоев, образования трещин и нарушения капиллярных связей в грунте. Это ухудшает контакты между поровым льдом и незамерзшей водой, затрудняет дальнейшее пополнение запасов воды и еще больше ограничивает зону питания ледяной прослойки.

Важные экспериментальные результаты приведены в работе [3], где исследован влагоперенос в промерзающих засоленных грунтах. Сделан важный вывод о том, что влагопроводность талой зоны промерзающих грунтов снижается с повышением их засоленности. Этот вывод напрямую касается пластовых льдов, поскольку подавляющее количество пластовых льдов залегает в засоленных грунтах морского генезиса. Характер влагопереноса именно в этих грунтах опреде-

ляет механизм образования пластовых льдов. Основное количество влаги должно поступать в формирующийся ледяной пласт из нижележащей талой зоны засоленных грунтов, и, как установлено в упомянутой работе, ее поступление невелико.

В целом многофакторное влияние среды на состояние влаги в грунтах, если учесть непостоянство коэффициента влагопроводности при изменении влажности породы и неоднозначность зависимости его значений от влажности, приводит к многократным сбоям миграционного потока [16]. На процесс миграции влияют и изменения строения грунта в процессе миграции — набухание, пучение.

В.Г. Чеве́рев [23] считает еще одним осложняющим обстоятельством непостоянство температурного градиента в грунтах при промерзании, когда промерзание может смениться оттаиванием. При этом он указывает на особенное свойство воды, действующее при смене градиентов, оно заключается в том, что к фронту промерзания мигрирует связанная вода, а после оттаивания она переходит в свободную воду. Свободная же вода подвержена действию сил гравитации, поэтому она перестает мигрировать к фронту промерзания и стекает вниз по разрезу.

Возможность формирования пластовых льдов путем сегрегационного льдообразования рассматривал В.И. Соломатин — сторонник концепции погребенного генезиса этих льдов. Он совместно с сотрудниками Института криолитологии и гляциологии АН КНР [31] провел серию экспериментов по моделированию процесса влагопереноса из талого грунта в промерзающий слой, а также льдонакопления. Результаты эксперимента весьма показательны. Образцы грунта с равномерной влажностью промораживали сверху вниз. Миграция воды снизу к фронту промерзания и сегрегационное льдовыделение приводили к пучению грунта. Однако прослеживалась сложная динамика пучения с остановками, короткими этапами усадки грунта, а затем с новыми резкими скачками пучения. Такая динамика определялась неравномерным подтоком воды к растущему сегрегационному льду. Наблюдалось неоднократное перераспределение влажности грунта — обезвоживалась талая часть образца, повышалась влажность его мерзлой части. Максимальное льдонакопление отмечали непосредственно у поверхности мерзлого грунта. С глубиной степень изменения влажности убывала. Весь процесс проявился в криогенной текстуре, сформировавшейся в образце. Сверху вниз образовались следующие слои: прослой избыточного сегрегационного льдонакопления (на верхнем торце образца), прослой с массивной криогенной текстурой (т.е. слой иссушения), на нижнем торце образца снова появился шпир сегрегационного льда. Этот эксперимент подтвердил невозможность непрерывного миграционного подтока влаги, а потому невозможность роста ледяного пласта большой мощности.

Очевидно, что все приведенные выше особенности влагопереноса при эпигенетическом промерзании грунтов создают непреодолимые препятствия для длительной непрерывной миграции влаги с большой глубины, т.е. для неограниченного роста ледяного шлира и формирования крупных пластовых залежей.

Г.М. Фельдман [22] предложил вакуумно-фильтрационный механизм миграции воды к фронту промерзания при эпигенетическом примерзании грунтов, который способен, по его мнению, формировать ледяные слои практически неограниченной мощности. Механизм связан с многократными колебаниями границы промерзания в условиях открытой системы (при наличии неограниченного источника воды), что вызывает протаивание нижнего слоя промерзшего грунта и его последующее новое промерзание. Этот механизм успешно проверен в рамках лабораторного эксперимента [2]. Для образца с промерзающим грунтом, подстилаемым слоем воды, задавались соответствующие температурные условия: сверху отрицательная температура, сохранявшаяся постоянной, а снизу положительная температура, близкая к 0 °С. В верхнем промерзающем слое формировался ледяной шлир. Затем снизу повышалась температура, промерзание прекращалось, и большая часть ледяного шлира оттаивала. При следующем понижении нижней температуры до 0 °С снова начиналось промерзание грунта, граница промерзания продвигалась вниз, а вновь образовавшийся ледяной шлир имел большую толщину, чем первоначальный шлир. По мнению авторов работы [2], в зоне протаивания мерзлого грунта образуется вакуум вследствие уменьшения объема льда при его таянии. Затем при новом цикле замерзания под действием вакуума начинается фильтрация (всасывание) воды из нижележащего водоносного горизонта в зону протаивания и последующее ее замерзание. Фронт промерзания продвигается сверху вниз, а вместе с ним повторяется весь процесс и нарастает прослой льда. Авторы [2] считают, что с помощью этого механизма можно вырастить ледяной пласт любой мощности.

Отметим, что трудно перенести результаты экспериментов этих работ в природные условия. Предлагаемый вакуумно-фильтрационный механизм получен в лабораторных условиях при очень больших значениях температурного градиента, если и существующих в природе, то только в приповерхностных слоях (возможно, при пучении поверхности). Пластовые же льды чаще всего залегают на глубине нескольких

метров, а иногда и нескольких десятков метров. В эксперименте колебания границы промерзания задавали изменением температуры снизу, а температура на поверхности оставалась постоянно низкой. В природе же колебания границы промерзания контролируются изменением температуры на поверхности, поэтому в промерзающей толще сразу же меняется температурный градиент, а соответственно и интенсивность внедрения воды. Г.М. Фельдман [22] пишет, что колебания границы многолетнего промерзания в естественных условиях при эпигенетическом промерзании могут быть обусловлены длиннопериодными колебаниями климата и геотермическим тепловым потоком, а потому они невелики и с глубиной затухают. Все это привело его к выводу, что в естественных условиях колебания границы многолетнего промерзания не могут обеспечить возникновения заметного вакуума и непрерывного поступления огромных масс воды, необходимых для формирования пластовых льдов.

Роль колебательных возвратно-поступательных движений фронта промерзания—оттаивания в формировании аномально толстых ледяных шлиров отмечена и в других работах, например в работе В.Г. Чеверева [23], правда, в ней изложено другое описание процесса: в ходе кристаллизации мигрирующей воды происходит переход связанной воды в практически свободную. Во время промерзания свободная вода образует ледяные прослои вблизи фронта промерзания, а после их оттаивания легко впитывается в промерзающую зону под влиянием градиента потенциала влаги, тем самым утолщая (или объединяя) уже имеющиеся в мерзлой толще шлиры льда. Однако этот механизм не обеспечивает непрерывного подтока воды к фронту промерзания для неограниченного роста ледяного прослоя.

Выводы:

— анализ экспериментального материала о миграции воды к фронту промерзания грунтов показал, что ни один из известных механизмов сегрегационного (миграционного) льдообразования при эпигенетическом промерзании не может обеспечить формирование крупных залежей пластовых льдов;

— образование наиболее широко распространенных пластовых льдов в морских отложениях происходило, скорее всего, другим путем. Описание иного механизма формирования пластовых льдов, способного, по нашему мнению, однотипно проявляться на больших территориях, подробно изложено в работах [25, 26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.Н. Геокриологические условия Западной Сибири. М.: Наука, 1967. 178 с.
2. Борозинец В.Е., Фельдман Г.М. Вакуумно-фильтрационный механизм образования мощных шлиров льда // Проблемы криолитологии. Вып. 9. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С. 165—178.
3. Видяпин И.Ю., Чеверев В.Г. Влагопроводность промерзающих засоленных грунтов // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 4. С. 43—45.
4. Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
5. Гасанов Ш.Ш. Криолитологический анализ. М.: Наука, 1981. 193 с.

6. Голубев В.И. Роль морских гидродинамических процессов в формировании пластовых на арктическом побережье // Мат-лы гляциол. исслед. 2007. Вып. 102. С. 32—40.
7. Гречищев С.Е., Шешин Ю.Б., Гречищева О.В. Моделирование сегрегационного формирования подземных пластовых льдов в различных геологических условиях // Криосфера Земли. 2000. Т. 4, № 4. С. 57—66.
8. Григорьев Н.Ф. Влияние подземных вод и экзогенных факторов на формирование азональных мерзлотных условий в районах Приенисейского севера // Гидрогеологические условия мерзлой зоны. Якутск, 1976.
9. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 245 с.
10. Ершов Э.Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 213 с.
11. Жесткова Т.Н. Формирование криогенного строения грунтов. М.: Наука, 1982. 215 с.
12. Каплянская Ф.А. Пластовые залежи подземных льдов в ледниковых отложениях на западном побережье п-ова Ямал у пос. Харасовой // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, 1982. С. 71—80.
13. Кинд Н.В. Геохронология позднего антропогена по изотопным данным. М.: Наука, 1974. 216 с.
14. Кузнецова Т.П., Рогов В.В., Шполянская Н.А. Верхнеплейстоценовый этап криолитогеоза на восточной окраине севера Западной Сибири // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М.: Наука, 1985. С. 52—67.
15. Попов А.И. О субмаринном типе криодиагенеза // Инж. геология. 1991. № 6. С. 49—55.
16. Рогов В.В. Основы криогенеза. Новосибирск: ГЕО, 2009. 195 с.
17. Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: ГЕО, 2013. 266 с.
18. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1937.
19. Тарноградский В.Д. О происхождении пластовых залежей подземных льдов на Карском побережье полуострова Ямал // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, 1982. С. 80—89.
20. Тумель В.Ф. Игарское опытное подземелье в вечно-мерзлой толще. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945.
21. Файнер Ю.Б., Файнер Т.Г. Некоторые аспекты палеогеографии верхнего плейстоцена северо-запада Средней Сибири // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1982.
22. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
23. Чевеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов. М.: Научный мир, 2004. 235 с.
24. Шполянская Н.А. Особенности льдообразования в четвертичных ленточных глинах района Игарки (на основе структурного и текстурного анализа мерзлой толщи) // Подземный лед. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. С. 141—156.
25. Шполянская Н.А. Криогенное строение дислоцированных толщ с пластовыми льдами как показатель их генезиса (север Западной Сибири) // Криосфера Земли. 1999. Т. 3, № 4. С. 61—70.
26. Шполянская Н.А. Особенности криолитозоны западного сектора Арктики в системе шельф—суша // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 50—57.
27. Шполянская Н.А., Стрелецкая И.Д. Генетические типы пластовых льдов и характер их распространения в Российской Субарктике // Криосфера Земли. 2004. Т. 8, № 4. С. 56—71.
28. Astakhov V.I. Pleistocene glaciations of northern Russia — a modern view // Boreas. 2012. Vol. 10. P. 1—24.
29. Beskow G. Tjaibildingen och Tjallyftningen med aerskild Hanyan till Vagar och jarnvagar // Sver. undersockn. Stockholm. Ser. C. 1935. N 375.
30. Mackay J.R. The origin of massive ice beds in permafrost; Western Arctic Coast, Canada // Can. J. Earth Sci. 1971. Vol. 8, N 4. P. 397—422.
31. Solomatin V.I., Cho Chou Zhou. Water migration and ice segregation in transition zone between melt and frozen ground // Permafrost and Periglacial Processes. 1994. N 3. P. 4.
32. Taber S. Perennially frozen ground in Alaska, its origin and history // Bull. Geol. Soc. Amer. 1943. Vol. 54.

Поступила в редакцию
28.04.2014

N.A. Shpolyanskaya

ABOUT THE MECHANISM OF FORMATION OF MASSIVE ICE BEDS (CRITICAL ANALYSIS OF SEGREGATION MECHANISM)

Genesis of large massive ice beds which are widely present on the northern plains of Russia is discussed. Underground ice is a source of all kinds of palaeogeographic information; therefore understanding of its genesis is of particular importance. Massive ice beds are an object of study since the 1960-s but their genesis is still a debatable point. There are several often controversial concepts, from the buried remnants of the ancient glacial cover to the direct submarine formation. According to an earlier concept massive ice beds are formed in the process of epigenetic ground freezing as a result of upward migration of ground water from the deep layers to the freezing level. The so-called segregation mechanism supported by molecular links of water in the ground is a principal one for formation of layered permafrost with texture-forming ice.

The article presents a critical analysis of the mechanism in terms of its capability to form heavy ice layers. A lot of experimental data are available now and their analysis proves that molecular links could not support large-distance water migration to the freezing surface. Thus, no long-term constant inflow of water which is a prerequisite of a large ice body formation is possible. The migration flow covers just small distances and is several times interrupted during the ground freezing leading to the formation of dehydration zones. Therefore the mechanism is capable of forming individual ice sub-layers (schliers) within the permafrost rather than massive ice beds.

Key words: massive ice beds, genesis of underground ice, segregation ice forming, water migration, epigenetic freezing.