

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.328:551.324

doi: 10.15356/IS.2015.01.07

Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин

© 2015 г. В.Р. Алексеев

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск;
Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск
Snow@irk.ru

Ground ice and hydrothermal ground motions on aufeis plots of river valleys

V.R. Alekseev

Melnikov Institute of Permafrost, Yakutsk, and Sochava Institute of Geography, Irkutsk, Siberian Branch of RAS

Статья принята к печати 15 сентября 2014 г.

*Бугры пучения, криогенное движение грунтов, криогенные явления, наледи, наледные процессы, подземный лёд, термокарст.
Cryogenic phenomena, hydrothermal ground movement, aufeis processes, aufeises (icings), pingo, thermokarst, ground ice.*

Излияние и намораживание подземных вод в долинах рек криолитозоны создаёт специфические условия тепло- и массообмена, в результате чего формируется система наледных ледогрунтовых комплексов. Ежегодное формирование и разрушение наледного и подземного льда сопровождается особо опасными геодинамическими явлениями, среди которых ведущее место занимает гидротермическое движение грунтов – пучение, термокарст и термоэрозия. В наледных долинах происходит быстрое, часто неожиданное переформирование каналов стока, резкое поднятие и опускание земной поверхности, разуплотнение и «перетряхивание» сезонно-протаивающих и сезонно-промерзающих горных пород. Показано, что наледные участки речных долин – самые «горячие» точки области распространения вечной мерзлоты. Сформулированы задачи дальнейших исследований.

A specific system of aufeis ice-ground complexes is regularly formed in river valleys of the cryolithic zone as a result of the ground water outpouring and freezing. Early formation and destruction of aufeis and ground ices is followed by hydrothermal motions of grounds which are the ice heaving, thermokarst, and thermal erosion. The aufeis plots of river valleys are shown to be the most “hot” points of the permafrost zone.

Введение

Участки формирования крупных наледей-тарынов резко выделяются на фоне окружающей местности. Зимой, даже в самые жгучие морозы здесь «парит» излившаяся из земных недр вода или на многие километры расстилается ледяная гладь, а летом удивляет ослепительно белый ледяной покров среди зелени лугов и лесов. Наледи и наледные ландшафты всегда привлекали внимание учёных, путешественников и иных любителей природы своим «необычным» видом, загадками и парадоксами. Но лишь в последние 50–60 лет была приоткрыта завеса их происхождения, объяснены некогда таинственные явления, например, взрывы бугров пучения, миграция и распад ледяных полей, питание и многолетняя изменчивость наледообразующих источников и др.

В процессе многолетних исследований установлено, что наледи подземных вод – своеобразные индикаторы теплового состояния крио-

литозоны, мощный регулятор поверхностного и подземного стока, могучий фактор преобразования микроклимата, состава и строения рыхлых отложений, конфигурации речной сети и криогенных ландшафтов [1–4, 7, 22, 23, 28, 30, 36, 40]. Однако многие аспекты наледоведения не изучены. К ним относятся процессы теплового взаимодействия ледяных массивов и подстилающих горных пород, особенности формирования подземных льдов, закономерности развития ряда опасных геодинамических процессов – пучения грунтов, термоэрозии, термокарста, суффозии и др. Настоящая работа частично восполняет этот пробел.

В основу статьи положены материалы многолетних наблюдений на специальных наледных полигонах, организованных в конце XX в. в Северном Забайкалье и в горах Восточного Саяна [3]. При анализе полученных материалов и подготовке статьи использованы также данные полевых наблюдений автора в Южной Якутии, Амурской

области, Забайкалье и Прибайкалье, а также опубликованные сведения по другим районам криолитозоны [6, 10–12, 14, 21, 24, 33–35, 39, 40].

Особенности подземного льдообразования на наледных участках речных долин

Наледи и наледные процессы значительно влияют на интенсивность сезонного промерзания и протаивания горных пород, на их температурный режим и фазовые переходы воды в толще грунтов. В одних случаях они активизируют подземное льдообразование, в результате чего увеличиваются запасы подповерхностных льдов, а в других способствуют уменьшению их массы и глубины залегания. В некоторых местах происходит захоронение ледяных массивов, которые по своему генезису относятся к наледям или снежникам, а по условиям залегания и положению относительно дневной поверхности — к подземным льдам. Формирование наледей создаёт специфические условия подземного льдообразования, отличные от условий смежных участков речных долин [3, 6, 18, 19, 39]. Зимой кривая вертикального распределения температур здесь существенно деформируется из-за выделения тепла наледным слоем воды, при этом образуется своеобразный термоклин (рис. 1). Деформация температурной кривой, постепенно уменьшаясь в размерах, смещается вниз по разрезу и обычно затухает на границе мёрзлых и талых пород. Величина отклонения температуры от «нормального» положения определяется теплозапасом наледнеобразующих вод. Число случаев появления термоклина соответствует количеству изливания воды, которое маркируется общим числом элементарных слоёв наледного льда в рассматриваемой точке разреза.

Спустя некоторое время после появления воды на льду в результате «погружения» тепловой волны и теплотока мёрзлый грунт частично оттаивает снизу. Фазовый переход воды создаёт у подошвы мёрзлого слоя вакуум, который вызывает подсос грунтовой влаги из нижележащих горизонтов и сбоку. После промерзания слоя воды на льду кривая распределения температуры выравнивается и термоклин исчезает. В это время формируется горизонтальный шпир подземного льда и происходит дальнейшее промерзание подстилающей увлажнённой массы горных пород. Такие

циклы гетерогенного льдообразования многократно повторяются (см. рис. 1). В итоге, с одной стороны, увеличивается мощность льда на поверхности земли, а с другой — нарастает толщина мёрзлых грунтов с ярко выраженной слоистой криогенной текстурой.

Многочисленные наблюдения на полигоне «Чарские Пески» показали, что образующиеся таким образом пачки ледяных шпиров почти всегда ориентированы параллельно поверхности наледнеобразования и сложены чистым прозрачным льдом призматической или зернистой структуры [3, 27]. В песках и супесях толщина шпиров обычно изменяется от 2 до 50 мм; слои выдержаны по простирацию и ограничены ровной поверхностью вмещающих грунтовых масс (рис. 2, а). Расстояние между соседними ледяными включениями колеблется от нескольких миллиметров до 8–10 см. Толщина заключённых между ними слоёв грунта зависит от продолжительности периода повторного наледнеобразования: чем больше времени проходит после изливания воды и полной кристаллизации наледного слоя, тем продолжительнее промерзание подстилающих горных пород и соответственно больше расстояние между ледяными шпиром. В не выдержанных по составу грунтах эта закономерность нарушается. В этом случае возможны частые пережимы и выклинивание включений льда, обусловленные неравномерным промерзанием грунтовой толщи из-за неоднородности её теплофизических характеристик и увлажнения. Однако ритмы льдовыделения вниз по разрезу сохраняются и в общем соответствуют количеству циклов изливания наледных вод. Приведённое описание представляет собой приближённую схему сложного теплофизического процесса, детали которого неизвестны. Для полного раскрытия механизма вакуум-фильтрационного льдообразования необходима постановка специальных опытно-экспериментальных работ и режимных наблюдений на наледных полигонах.

В крупнообломочных и хорошо промытых валунно-галечниковых отложениях слоистые криогенные текстуры отсутствуют. Если перед началом наледнеобразования горные породы обводнены и не испытывают стеснения в процессе дальнейшего промерзания, то в них образуется базальная криогенная структура, т.е. лёд заполняет всё «свободное» пространство между частя-

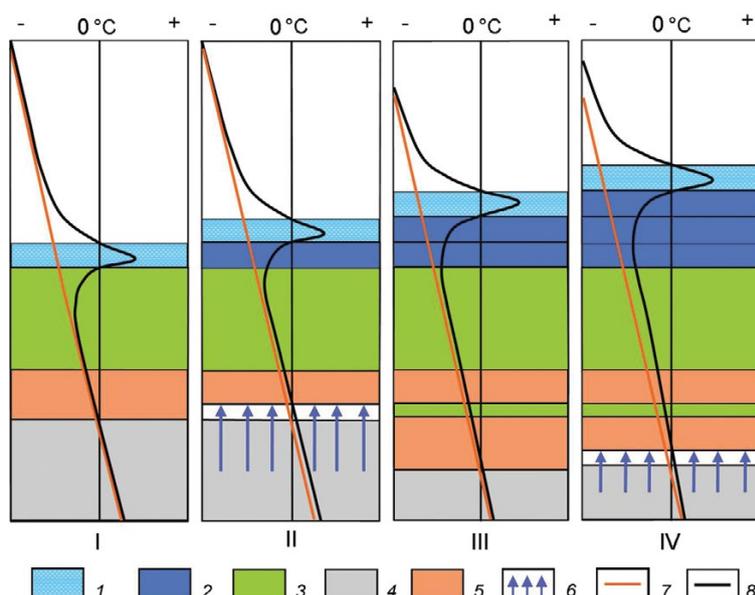


Рис. 1. Схемы сопряженного формирования наледи и подземного льда.

Стадии льдообразования: I – промораживание наледного ложа; формирование первого наледообразующего слоя воды; II – образование вакуума в толще горных пород в результате частичного таяния подземного льда и подсос воды снизу; формирование второго наледообразующего слоя воды; III – выравнивание кривой распределения температуры, приrost толщины слоя подземного льда; формирование третьего наледообразующего слоя воды; IV – подтаивание подземного льда снизу, образование вакуума у его нижней поверхности, новый подсос воды, формирование очередного наледообразующего слоя; 1 – вода; 2 – наледный лёд; 3 – мёрзлый грунт; 4 – талый грунт; 5 – подземный лёд; 6 – направление криогенной фильтрации подземных вод; 7 – кривая распределения температуры между периодами наледообразования; 8 – кривая распределения температуры в период образования и кристаллизации слоя воды на льду

Fig. 1. Schemes of combined formation of aufeis and ground ice.

Stages of the ice formation: I – freezing-through of the aufeis bed; formation of the first aufeis-forming layer of water; II – formation of vacuum in the layer of rocks as a result of partial thawing of ground ice, and infiltration of water from below; formation of the second aufeis-forming layer of water; III – smoothing of the temperature profile and increasing of thickness of the ground ice layer; formation of the third aufeis-forming layer of water; IV – partial melting of the ground ice from below, formation of vacuum at its lower surface, new infiltration of water, and formation of a next aufeis-forming layer; 1 – water; 2 – aufeis ice; 3 – frozen ground; 4 – thawed ground; 5 – ground ice; 6 – direction of cryogenic filtration of groundwater; 7 – the temperature profile between periods of the aufeis formations; 8 – the temperature profile at a period of formation and crystallization of water layer on the ice

ми грунта, при этом происходят их подвижка в разных направлениях и отток воды под криогенным давлением в соседние участки. Напряжения, возникающие в процессе кристаллизации воды, в данном случае не вызывают существенную деформацию поверхности земли, поскольку компенсируются давлением наледного льда и оттоком воды в стороны. Этот механизм подземного льдообразования характерен для открытых криогенных систем. Разрезы такого рода мы неоднократно вскрывали в долинах рек с наличием полыней, уровень воды в которых зависит от «силы мороза». Установлено: чем ниже температура воздуха, тем выше уровень воды в открытой части русла или в проруби, что свидетельствует об отжимании подземной воды в процессе промерзания вмещающих пород.

На наледных участках речных долин часто формируются замкнутые водоносные системы, промерзание которых сопровождается инъекционным льдообразованием с раздвиганием и поднятием грунтовой массы. Механизм внедрения воды по контактам водоупорных слоев рассмотрен в работах Ш.Ш. Гасанова [6], И.В. Климовского [10], С.А. Санникова [27] и др. Экспериментально он раскрыт и подтверждён опытами Г.М. Фельдмана и В.Е. Борозинца, поставленными в Институте мерзлотоведения СО РАН [31, 32], а также в монографии Я.Б. Горелика и В.С. Колунина, подготовленной в Институте криосферы Земли СО РАН [8]. Наши полевые наблюдения показали, что инъекционный механизм накопления крупных масс подземного льда ярче всего проявляется в условиях наледообразо-

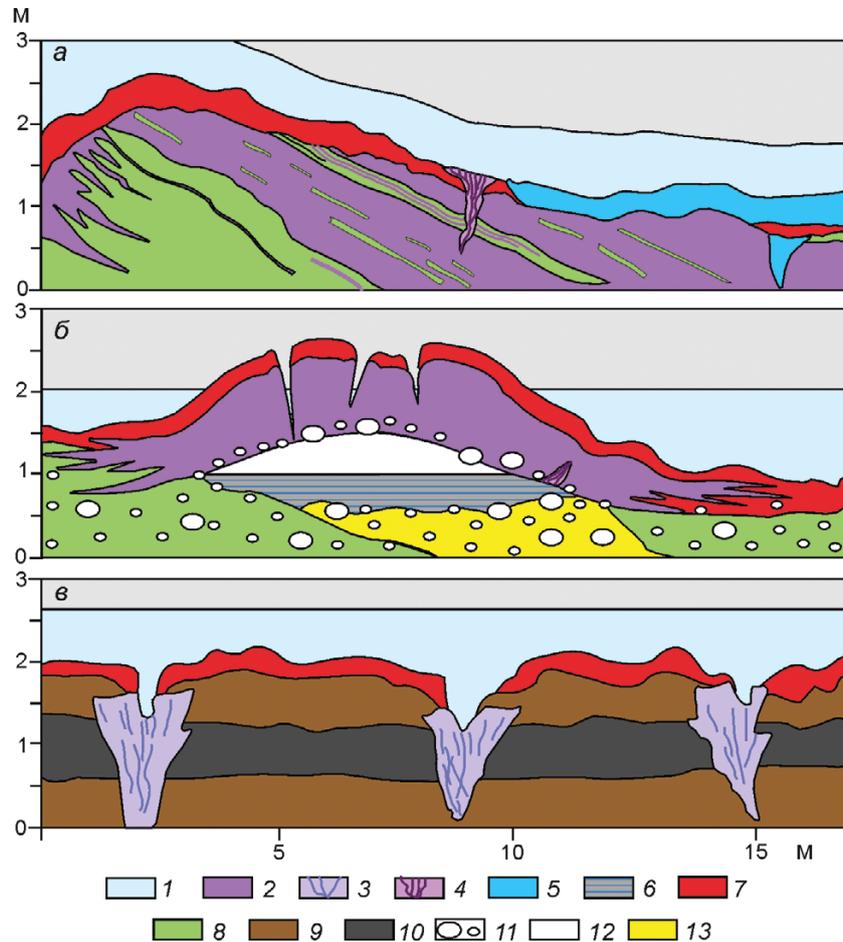


Рис. 2. Ледогрунтовые комплексы на наледном полигоне Чарские Пески, Северное Забайкалье:

a – долина ручья Холодный; *б* – долина ручья Болотный; *в* – правый берег р. Средний Сакукан. Лёд: 1 – наледный, 2 – инъекционный, 3 – повторно-жильный, 4 – трещинно-жильный, 5 – снежный; 6 – вода; грунты: 7 – песок сезонно-протаивающий, 8 – песок многолетнемёрзлый, 9 – супесь многолетнемёрзлая, 10 – торф мёрзлый, 11 – валуны и галька; 12 – воздушная полость в теле бугра пучения; 13 – водовыводящий канал (талый грунт)

Fig. 2. Ice-ground complexes in the Charskie Peski aufeis test area, Northern Transbaikalia:

a – valley of the Kholodny Creek; *б* – valley of the Bolotny Creek; *в* – right bank of the Sredny Sakukan River. Ice: 1 – aufeis, 2 – injected, 3 – wedge ice, 4 – fissure-vein ice, 5 – snow ice; 6 – water; grounds: 7 – seasonally thawing sand, 8 – perennially frozen sand, 9 – perennially frozen sandy loam, 10 – frozen peat, 11 – boulders and pebbles; 12 – air cavity within the frost mound body; 13 – take away water canal (thawed grounds)

вания при особом тепловом режиме и повышенном увлажнении подстилающих горных пород.

Пласты инъекционного льда формируются в период, когда грунт на смежных участках долины промерзает на некоторую глубину. В это время под наледью в связи с выделением большого количества скрытой теплоты кристаллизации сохраняется надмерзлотный талик. Промерзание его кровли в перерывах между наледообразованием, а также криогенное отжимание воды с боков вызывают большое давление, которое резко падает при прорыве подземной воды на поверхность или её внедрении в виде обособленной линзы между талым

и мёрзлым грунтом. В последнем случае кровля талика приподнимается на величину, компенсирующую гидростатическое давление. Дальнейшее промерзание водяной инъекции может быть частичным или полным. Если линза воды промёрзла не полностью, то резкий спад нарастающего давления после очередного излияния по субвертикальным трещинам и зонам разлома обуславливает бурное выделение пузырьков растворённого воздуха и «всплеск» последующего активного прорастания ледяных кристаллов. Этот процесс сопровождается вертикальными деформациями земной поверхности, которые часто остаются не-

заметными под покровом наледного льда. В случае полной кристаллизации водяной инъекции снизу к ней примерзает мелкодисперсный грунт с характерной слоистой криогенной текстурой, сформировавшейся по описанной ранее схеме, а также галька, валуны или крупнообломочный материал (см. рис. 2, б). При последующих инъекциях эта мёрзлая горная порода приподнимается вместе с ледяной кровлей и в дальнейшем заземляется в толще подземного льда.

Иногда инъекции воды происходят между наледью и её ложем, при этом обрываются вмёрзшие в лёд растения. Как правило, нарастание инъекционного льда синхронно следует за циклами излияния и последующей кристаллизации наледобразующих вод, о чём свидетельствуют многочисленные апофизы в периферийных частях ледяных сводов (см. рис. 2, б). Параллельно с этим залечиваются трещины — в них образуются жильные и повторно-жильные льды особой модификации: они питаются или сверху за счёт наледных вод, или снизу — в результате криогенного напора грунтовых вод.

Наличие в массе инъекционного льда выдержанных по толщине и простираению прослоёв и линз горных пород, на первый взгляд, кажется загадкой. Ксенолиты мёрзлого грунта взвешены во льду, имеют чёткие контакты с вмещающим ледяным массивом (рис. 3, а), а иногда образуют своеобразные ярусы и цепочки. Часто во льду встречаются обособленные скопления гальки и крупных валунов (см. рис. 3, б). При документации таких разрезов исследователи обычно считают, что инородные включения сформировались в результате привноса материала на поверхность наледи и его захоронения в результате послойного намораживания воды. При этом не учитываются отсутствие слоистости во льду и возможность инъекционного происхождения структуры.

Своеобразна роль наледных явлений в морозобойном растрескивании грунтов и развитии жильных и повторно-жильных льдов (см. рис. 2, в). Известно, что криогенное растрескивание мёрзлых горных пород происходит при высоких температурных и влажностных градиентах: чем ниже температура поверхности грунтов и выше их влажность (льдиность), тем более мелкие полигоны образуются в результате возникающих напряжений. Лёд в криогенных трещинах обычно формируется в период снеготаяния или

во время весенних паводков. Наледные процессы существенно корректируют схему развития трещинно-жильных льдов. Во-первых, зимой в результате выхода наледобразующих вод морозобойное растрескивание горных пород в поймах рек и на террасах вообще может не проявляться или существенно трансформироваться. В случае, когда наледный процесс начинается осенью и продолжается без перерывов до весны, подземное льдообразование идёт по вакуум-фильтрационной схеме, т.е. без формирования полигонов. Если же наледные явления начинаются со второй половины зимы, то температурные напряжения в грунтах приводят к растрескиванию мёрзлой земли, но полигоны выражены очень слабо. Во-вторых, на наледных участках речных долин повторно-жильные льды формируются не за счёт талых снеговых, а за счёт изливающихся подземных вод, причём время образования ледяных клиньев сдвигается на 2–3 месяца к середине холодного периода года. В-третьих, из-за наличия массы наледного льда, перекрывающего полигоны, трансформируется их развитие в тёплый период года, в частности, уменьшается глубина сезонного протаивания, изменяются интенсивность и характер термоэрозии и термокарста, а также затушёвывается пучение горных пород.

Особую роль наледные явления играют в процессе фронтального роста повторно-жильных льдов. Здесь возможны два случая льдообразования. Если наледные воды заполняют полость над ледяной жилой при неполном промерзании сезонно-талого слоя, то кристаллизация наледобразующих вод сопровождается расклиниванием вмещающей породы и формированием серии сопряжённых ледяных шпиров, утончающихся по мере удаления от морозобойной трещины. Образующийся при этом массив льда служит естественным продолжением ледяной жилы. Обычно для него характерна ярко выраженная субгоризонтальная слоистость, осложнённая последующим морозобойным растрескиванием, т.е. в полости образуется растрескавшийся наледный лёд. Если же пространство над залежью льда заполняется после смыкания промерзающего сезонно-талого грунта с многолетнемёрзлой толщей, то вода замерзает в замкнутом объёме. В этом случае наблюдаются радиальная ориентировка ледяных кристаллов и концентрическое распределение выделившихся пузырьков газа. В центральной

части такого ледяного массива отмечается повышенное содержание минеральных веществ, обусловленное последовательным вымораживанием растворённых солей. Как и в первом варианте, образующийся ледяной нарост в дальнейшем часто расчленяется морозобойными трещинами и приобретает сложную текстуру. При соответствующем режиме осадконакопления на долю этих процессов, видимо, приходится основная часть прироста ледяных жил. Участки с повторно-жильными льдами подобного происхождения наиболее часто встречаются на периферии плоских наледных полей, сложенных мелкодисперсными отложениями, а также на речных террасах, вышедших из-под уровня пойменного режима. Примером местности такого типа служит долина р. Средний Саукан в Верхнечарской котловине. Вскрытые здесь повторно-жильные льды (см. рис. 2, в) относятся к классу полигенетических. Нижняя их часть сформировалась эпигенетически до начала наледообразования, а верхняя — сингенетически в процессе многолетнего развития наледных явлений. Развитие «чистых» сингенетических ледяных жил наиболее вероятно в нижних частях наледных полей, где аккумуляция твёрдого материала обычно преобладает над его сносом.

Типы наледных ледогрунтовых комплексов

Как видим, на наледных участках криолитозоны формируется сложная двухъярусная система парагенетически связанных мёрзлых грунтов и поверхностных льдов. Верхняя её часть сложена наледным льдом, промёрзшим мокрым снегом и снежным покровом, а нижняя — льдонасыщенными горными породами. Строение криогенной системы зависит от двух ведущих процессов — послойного намораживания воды на поверхности земли и кристаллизации подземных вод в условиях периодического изменения плотности теплового потока. По соотношению составных частей наземного и подземного ярусов мы выделили серию генетически однородных структур — наледных ледогрунтовых комплексов (ЛГК), которые существенно отличаются от сходных образований, расположенных за пределами наледных полей. Их строение, сопряжённое развитие и расположение определяют специфику инженерно-геологических и ландшафтно-географических условий освоения местности.

Поскольку верхний ярус не отличается многообразием строения и состоит из сравнительно однородных слоёв наледного, реже речного льда и снега, в схеме типизации его можно представить как один структурный элемент системы. Тогда стратиграфические особенности разреза определяются основными типами подземного льдообразования — сегрегационным, базально-цементным, вакуум-фильтрационным, напорно-инъекционным и трещинно-жильным. Вместе с наземной аккумуляцией льда эти процессы формируют структуру и криогенное строение семи основных ледогрунтовых комплексов (рис. 4). Два из них (I и II) образуются в условиях открытой системы, когда подземные воды кристаллизуются без криогенного напора и существенной деформации вмещающих пород; остальные возникают в результате промерзания закрытых водоносных структур, в которых при переходе воды в лёд развивается высокое давление, которое приводит к перемещению минеральных частиц грунта, подъёму кровли и крупным деформациям земной поверхности. Рассмотрим характерные особенности ледогрунтовых комплексов по данным наших наблюдений на наледных полигонах.

ЛГК-I — массивно-сегрегационный. Верхний ярус мощностью 1–1,5 м — двухслойный, состоит из наледного и речного кристаллического льда с примесью смёрзшейся шуги. Нижний ярус толщиной 0,2–0,8 м образуется в середине или во второй половине зимы, сложен илистыми, песчано-гравелистыми или галечными отложениями, пронизан мелкими, равномерно распределёнными линзами или гнёздами льда. Криогенная текстура грунта — преимущественно массивно-линзовидная. Контакт с подстилающими не мёрзлыми породами ровный. Весной уровень воды находится существенно ниже подошвы мёрзлого слоя. Встречается на пойме и под руслом промерзающих водных потоков на участках над- и межмерзлотных таликов, осушающихся в зимний период. Видимых подвижек грунта и перекрывающих ледяных слоёв не обнаружено.

ЛГК-II — цементно-базальный. Верхний ярус толщиной 1–2 м — двух- или трёхслойный, состоит из снежного или речного кристаллического льда, перекрытого наледью речных или подземных вод. Нижний ярус мощностью до 1 м сложен хорошо промытыми валунами и галькой, промежутки между которыми полностью

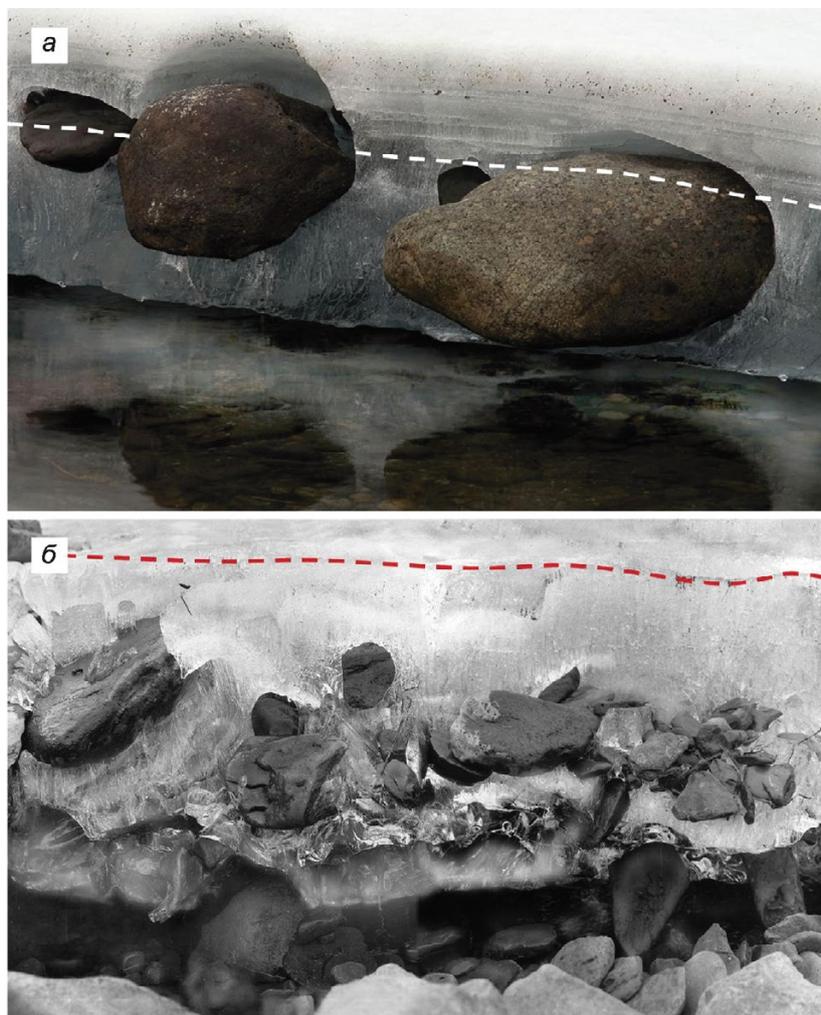


Рис. 3. Валуны и окатанные обломки горных пород в толще вакуум-фильтрационного льда: *a* – на наледной поляне в долине р. Сунтар, Якутия (фото С. Карпухина); *б* – на наледной поляне в долине р. Аунакит, Патомское нагорье; пунктиром показана нижняя граница наледного льда

Fig. 3. Boulders and rounded fragments of rocks within the layer of vacuum-filtration ice: *a* – on the aufeis glade in the Suntar River valley, Yakutia (the photograph by S. Karpukhin); *b* – on the aufeis glade in the Aunakit River valley, Patom Plateau; dotted line shows the lower boundary of the aufeis ice

заполнены льдом. Базальная криогенная текстура отложений формируется во второй половине зимы после промерзания поверхностного водного потока в условиях высокой обводнённости руслового аллювия. Такие условия характерны для участков рек с «ныряющим» стоком. В сухих русловых отложениях льдообразование происходит в середине или в конце зимы в результате затекания наледных вод. В обоих случаях кристаллизация воды в полостях сопровождается цементацией горной породы с небольшим смещением её частей относительно друг друга, что не приводит к подъёму кровли с намёрзшим снежно-ледяным покровом.

ЛГК-III – слоисто-сегрегационный. Верхний ярус мощностью до 2,5 м – одно- или двухслойный, состоит из наледного или из наледного и снежного льда. Нижний ярус представлен льдистым сезонно-протаивающим слоем мелкодисперсных горных пород (песок, суглинок, супесь или глина), подстилается вечной мерзлотой. Встречается на периферийных участках задернованных наледных полей, находящихся во 2-й и 4-й стадиях развития. Выявлены три варианта промерзания замкнутой водоносной системы: 1) промерзание слоя происходит до начала процесса наледообразования (в ноябре–декабре) и продолжается под образующимся наледным покровом до полного смыкания с мно-

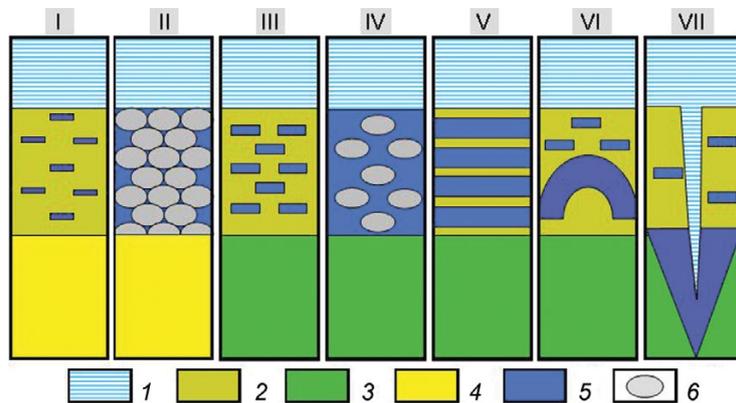


Рис. 4. Типы наледных льдогрунтовых комплексов:

I – массивно-сегрегационный; II – цементно-базальный; III – слоисто-сегрегационный; IV – базально-сегрегационный; V – вакуум-фильтрационный; VI – напорно-инъекционный; VII – трещино-жильный. 1 – наледь с прослоями снежного льда и снега; 2 – сезонно-протаивающий слой горных пород; 3 – многолетнемёрзлые горные породы; 4 – талые и немёрзлые грунты; 5 – подземный лёд; 6 – валуны и галька

Fig. 4. Types of aufeis ice-ground complexes:

I – massive-segregation; II – cement-basal; III – layered-segregation; IV – basal-segregation; V – vacuum-filtration; VI – pressure-injection; VII – fissure-vein. 1 – aufeis with alternating layers of snow ice and snow; 2 – seasonally thawing layer of rocks; 3 – perennially frozen rocks; 4 – thawed and unfrozen grounds; 5 – ground ice; 6 – boulders and pebble

голетнемёрзлым основанием; 2) грунт переходит в мёрзлое состояние в процессе послойного намораживания воды на дневной поверхности в перерывах между излияниями; 3) увлажнённый надмерзлотный слой промерзает после затухания наледных процессов и стабилизации отрицательных температур по всему разрезу. Слои сегрегационного льда толщиной 3–5 см, параллельные фронту промерзания, формируются: в нижней части горизонта; по всей промерзающей толще; под наледью в приконтактном слое. Криогенная сегрегация грунта сопровождается поднятием земной поверхности вместе с лежащим на ней наледным льдом на 10–30 см в зависимости от толщины сезонно-протаивающего слоя и его предзимнего увлажнения.

ЛГК-IV – базально-сегрегационный. Верхний ярус – однослойный, представлен наледным льдом толщиной до 3 м, нижний мощностью 0,5–1 м состоит из валунов и крупной гальки, взвешенной в прозрачном массивном льду. Ниже располагаются не мёрзлые водоносные отложения на многолетнемёрзлом основании или на коренных (скальных) породах. Грунтовые воды в процессе промерзания приобретают напор, часто фонтанируют или внедряются по контакту земной поверхности с наледью, образуя линзы и пласты чистого голубоватого льда. Переход воды в лёд сопровождается повсеместными подвижками валунов и гальки относительно друг друга,

смещением промёрзшей кровли вместе с пластами наледного льда на высоту 0,5–1,5 м. Местами в толще отложений встречаются выдержанные по горизонтали пласты и линзы инъекционного льда толщиной 0,5–0,8 м с призматической вертикально ориентированной структурой. Комплекс формируется в течение всего холодного периода года. Часто его можно встретить в руслах небольших рек и ручьёв, осушающихся к началу зимы. На зрелых наледных полях в третьей стадии развития он может занимать десятки и сотни тысяч квадратных метров, при этом от года к году объём подземного льда и величина гидротермического движения грунтов существенно меняются (рис. 5). В летний период нижний ярус ледового комплекса часто ошибочно принимают за наледь, «засорённую» принесённым со стороны валунно-галечным материалом.

ЛГК-V – вакуум-фильтрационный. Верхний ярус – однослойный, сложен наледным льдом толщиной до 2,5 м, нижний ярус мощностью 0,3–1,8 м представлен дресвой, песком, суглинком, иногда с примесью мелкой гальки. В разрезе горизонта выделяются параллельные друг другу пласты чистого прозрачного льда толщиной 10–50 см, разделённые слоями зашемлённых мелкодисперсных отложений с линзовидной криогенной текстурой. В периферийных частях пласты подземного льда постепенно утончают-

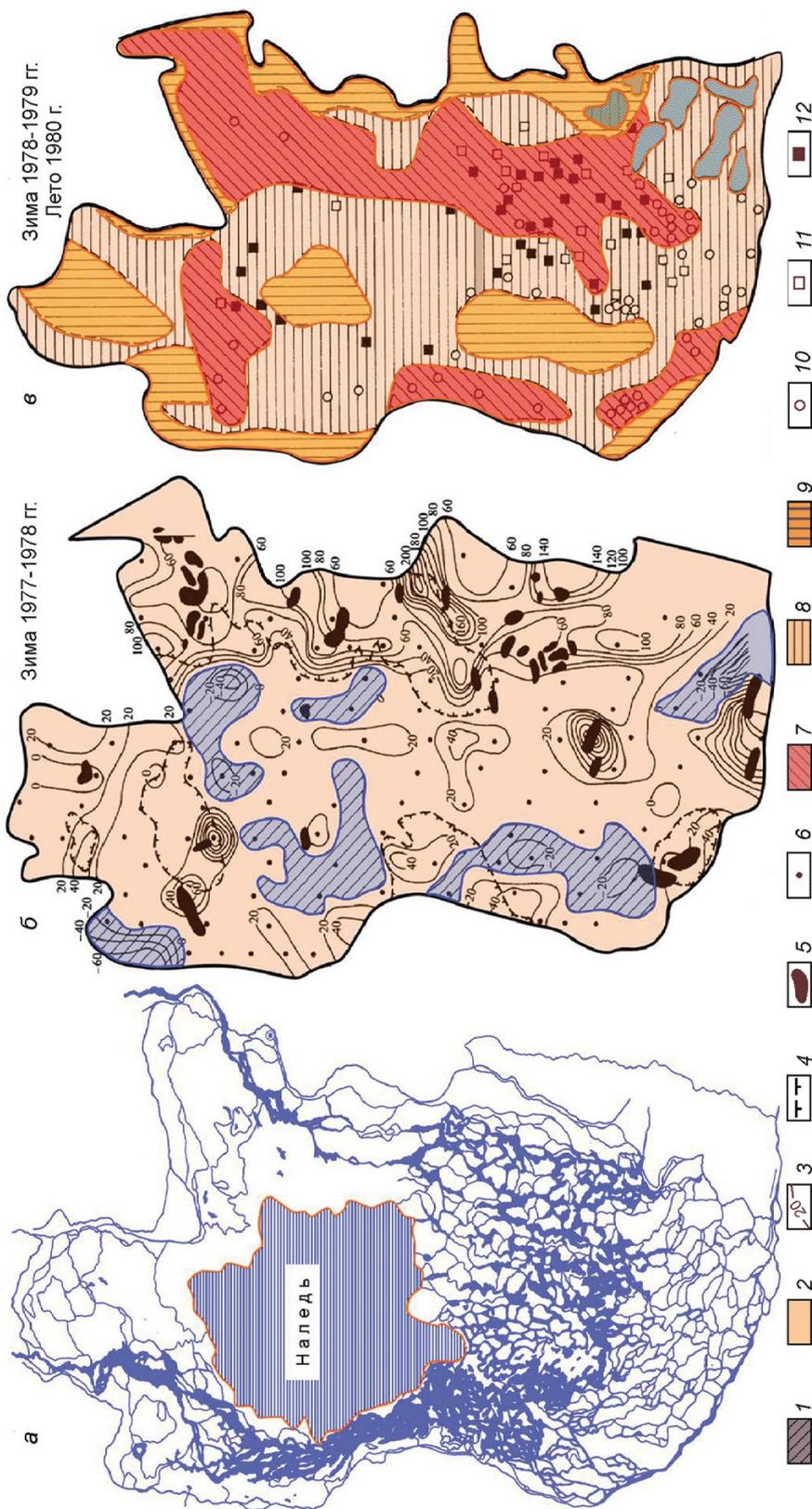


Рис. 5. Русловая сеть на наледной поляне и криогенное движение грунтов в процессе формирования гигантской Муруринской наледи на севере Забайкалья:

а – русловая сеть в период неполного разрушения наледи; *б* – ситуация, по данным наблюдений В.Н. Колотаева [13], зимой 1977/78 г.; *1* – зона понижения поверхности наледного ложа; *2* – зона повышения поверхности горных пород; *3* – изолинии повышения поверхности грунтов, м; *4* – зона развития водно-ледяных ярид; *5* – наледный бугор пучения; *6* – измерительные вежи; *в* – ситуация, по данным наблюдений Б.Н. Дейкина [9], зимой 1978/79 г. и летом 1980 г.; *7* – зона активного водообмена и интенсивного поднятия грунтов при формировании инъекционных льдов средней мощностью 0,73 м; *8* – зона умеренного водообмена и умеренного поднятия поверхности земли при формировании инъекционных льдов средней толщиной 0,45 м; *9* – зона слабого развития инъекционных льдов или их отсутствия; *10–12* – шурфы и разрезы, пройденные в 1979 г. (*10*), в 1980 г. на участках естественного обнажения инъекционных льдов (*11*) и в толще льдосодержащих аллювиальных отложений (*12*)

Fig. 5. Channel network on the aufeis glade and cryogenic movement of grounds during process of the gigantic Mururinskaya aufeis formation in the north of Transbaikalia:
a – channel network at a period of incomplete destruction of aufeis; *б* – situation according to observational data reported by V.N. Kolotaev [13] in winter of 1977/78; *1* – zone of lowering of surface of the aufeis bed; *2* – zone of elevation of the rock surfaces; *3* – contour lines of elevation of the ground surfaces, m; *4* – zone of formation of water-ice ridges; *5* – aufeis frost mound; *6* – measuring poles; *в* – situation according to observational data reported by B.N. Deikina [9] in winter of 1978/79 and summer of 1980; *7* – zone of active water exchange and intense ground elevations during formation of injected ices with average thickness of 0.73 m; *8* – zone of moderate water exchange and moderate elevation of land surface during formation of injected ice with average thickness of 0.45 m; *9* – zone of weak development of injected ice or its absence; *10–12* – pits and profiles made in 1979 (*10*) and 1980 on plots of natural outcrops of injected ice (*11*), and within layer of ice-containing alluvial deposits (*12*)

ся или делятся на ряд отростков, внедряющихся во вмещающую породу в виде разновеликих зубцов. Ниже пачки подземного льда залегает безнапорный водоносный слой. Наличие вечной мерзлоты под ним не установлено. Однако в некоторых обнажениях зафиксированы фрагменты обтаявших ледогрунтовых структур вакуум-фильтрационного генезиса, которые сохранялись не один сезон. Переход инъекционного льда в многолетнемёрзлое состояние мог произойти как в результате переотложения осадков, так и вследствие сохранения наледного льда в течение всего тёплого периода года (при формировании перелетка). Наледный ледогрунтовый комплекс данного типа встречается на обнажённых от растительного покрова ровных зандроподобных равнинах с густой сетью мелководных многорукавных потоков, а также в некоторых суффозионно-эрозионных долинах вблизи постоянно действующих источников подземных вод.

ЛГК-VI – напорно-инъекционный. Верхний ярус состоит из наледного льда мощностью от 0,5 до 1,5 м, нижний ярус толщиной 0,5–1,2 м сложен горными породами разного гранулометрического состава – суглинками, супесями, песком, дресвой, галькой, крупными валунами или торфом. В разрезе обязательно присутствует плоско-выпуклая или двояковыпуклая линза чистого льда, в которую заключены оторванные от основания стволы кустарников, корни деревьев, трава, мох, подстилающие горные породы. Ледяные своды вместе с перекрывающим грунтом разбиты зияющими трещинами, на склонах бугра пучения встречаются радиально наклонённые деревья, а внутри их – воздушные полости и небольшие озёрки. Конфигурация каналов, выводящих напорные подземные воды, благодаря которым формируется линза подземного льда и поднимается ледогрунтовая масса, пока остаётся неизвестной. Судя по тому, что ЛГК-VI приурочен к выраженным в рельефе линейным зонам тектонических разломов, руслам небольших рек и локализованным очагам разгрузки подмерзлотных вод, они представляют собой узкие таликовые щели или «трубки».

Зимой водовыводящие каналы закупориваются ледогрунтовыми «пробками», которые под давлением восходящих струй периодически разрушаются, иногда со взрывом [29], поверхность земли при этом изгибается, приобретая в сечении форму параболы. Напряжения в замкнутых

криогенных системах при их промерзании достигают десятков тысяч атмосфер. В долине р. Эгеги в Восточных Саянах мы зафиксировали случай, когда бугор пучения возник перед скальным порогом из горизонтально залегающих доломитов протерозоя. Весной после разрушения бугра пласты горных пород оказались буквально выломанными из массива и поставлены под углом около 40° относительно своего прежнего положения.

ЛГК-VII – трещинно-жильный. Верхний ярус, состоящий из наледного льда толщиной 0,5–1 м, подстилается толщей мелкодисперсных льдистых отложений с массивно-линзовидной криогенной текстурой и клиновидными включениями жильного и/или повторно-жильного льда. Сезонно-протаивающий слой нижнего яруса толщиной 0,5–0,8 м насыщается мелкими линзами хаотически расположенного сегрегационного льда в середине–конце декабря – до появления наледи. В это же время происходит морозобойное растрескивание грунта, захватывающее многолетнемёрзлые горные породы. Заполнение трещин льдом происходит во второй половине зимы и весной во время снеготаяния. В зависимости от состава и предзимнего увлажнения грунтов поверхность земли приподнимается на 10–40 см. Ледогрунтовый комплекс формируется в условиях малоснежья и низких температур воздуха на периферийной части наледных полей.

Криогенное движение грунтов – особо опасное явление природы

Криогенное движение промерзающих горных пород – широко известный процесс [26]. Ему посвящена обширная научная и нормативно-техническая литература, связанная в основном с решением вопросов устойчивости зданий и сооружений, построенных на пученистых грунтах. Масштабы развития этого явления на наледных полях в полной мере ещё не оценивались. Опубликовано лишь несколько статей, в которых раскрывается динамика земной поверхности под влиянием наледных процессов на основе инструментальных режимных наблюдений [9, 15, 16]. В остальных работах [6, 14, 27, 37, 38] приводятся сведения преимущественно описательного характера. Тем не менее, имеющиеся материалы позволяют установить некоторые закономерности ежегодных морфоструктур-

Амплитуда ежегодного вертикального движения грунтов на наледных участках речных долин по данным наблюдений на полигонах Чарские пески и Эден (в пересчёте на 1 м разреза), см

Стадии развития наледного участка долины*	Типы наледных ледогрунтовых комплексов						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Перигляциальная	5–10	10–20	10–20	–			
Трансгрессивная	10–20	20–30	20–30	40–50	50–100	100–500	20–40
Стабилизационная	10–20	20–30	30–40	30–40	40–70	50–300	10–30
Регрессивная	10–20	20–30	20–30	20–30	30–50	50–100	5–10
Постгляциальная	5–10	10–20	10–20	–			

*Описание стадий развития см. в нашей работе [4].

ных преобразований наледных участков речных долин. В общем виде они отражены в таблице.

Из таблицы видно, что мобильность подстилающих наледь горных пород зависит от типа ледогрунтовых комплексов и стадий развития наледного участка долины. Наледное ложе поднимается в результате формирования линз и пластов подземного льда, а опускается при таянии ледяных включений и тепловой осадке минеральных масс. На крайних стадиях эволюционного развития наледных участков деформация земной поверхности не превышает величину криогенных движений, фиксируемую за пределами зоны наледообразования. Более того, она становится даже меньше, поскольку низкая пойма и русловые отложения блокируются от промерзания покровом наледно-речного льда. Пучение и осадка грунтов здесь внешне не проявляются, во-первых, потому, что глубина сезонного промерзания под замерзающими водотоками редко превышает 0,2–0,5 м, а во-вторых, следы зимнего перемещения подледного аллювия уничтожаются ледоходом и весенними эрозионными процессами. На остальных же этапах преобразования наледной долины почти повсеместно встречаются как положительные, так и отрицательные формы мерзлотного рельефа, причём амплитуда колебания земной поверхности достигает максимальных значений в наиболее активную, трансгрессивную стадию, что обусловлено ярко выраженными процессами вакуум-фильтрационного и напорно-инъекционного льдообразования.

Масштабы и интенсивность движения грунтов на хорошо развитых наледных полянах отражают рис. 6 и 7. Наблюдения проводились в верховьях Большого Эдена на границе лесного пояса с гольцовым редколесьем (абс. высота 1800–1820 м). Наледный участок представля-

ет собой плоскую, слабонаклонную поверхность общей площадью около 0,2 км², сложенную песчано-гравелистыми отложениями с включением крупных (до 2,5 м в диаметре) валунов и обломков горных пород, скатившихся с крутых обрамляющих склонов (всего около 250 штук). Зимой поляна покрывается льдом толщиной 1,5–2 м, который полностью стаивает лишь в середине августа. Пласты инъекционного льда залегают на глубине 0,3–0,5 м от дневной поверхности или непосредственно под толщей наледного льда. Мощность их, выдержанная по простиранию, составляет 0,5–1,2 м, площадь распространения практически совпадает с границами наледной поляны. На месте залегания ледяных пластов перекрывающий их грунт вместе с наледью ежегодно перемещается на высоту до 1 м, иногда более. Весной эти дислокации маркируются на поверхности растрескавшимися ледяными или ледогрунтовыми буграми. Примечательно, что одна часть валунов (примерно 40%), лежащих на гравелистом основании и разбросанных по дну долины, вмораживается в слоистый наледный массив, а другая, расположенная ниже наледного ложа, обволакивается приконтактным или подземным инъекционным льдом шестоватой структуры. Все валуны, независимо от их положения в разрезе и массы, в течение года смещаются в различных направлениях (по высоте и горизонтали) на десятки сантиметров (см. рис. 7). Причины этих движений – криогенный напор подземных вод и осадка в процессе термокарста и термоэрозии. Роль возможного гидродинамического давления поверхностных вод здесь исключается, так как водный поток распластан по наледному ложу и имеет небольшой расход.

Характерная особенность динамики рыхлых отложений в наледных долинах – разно-

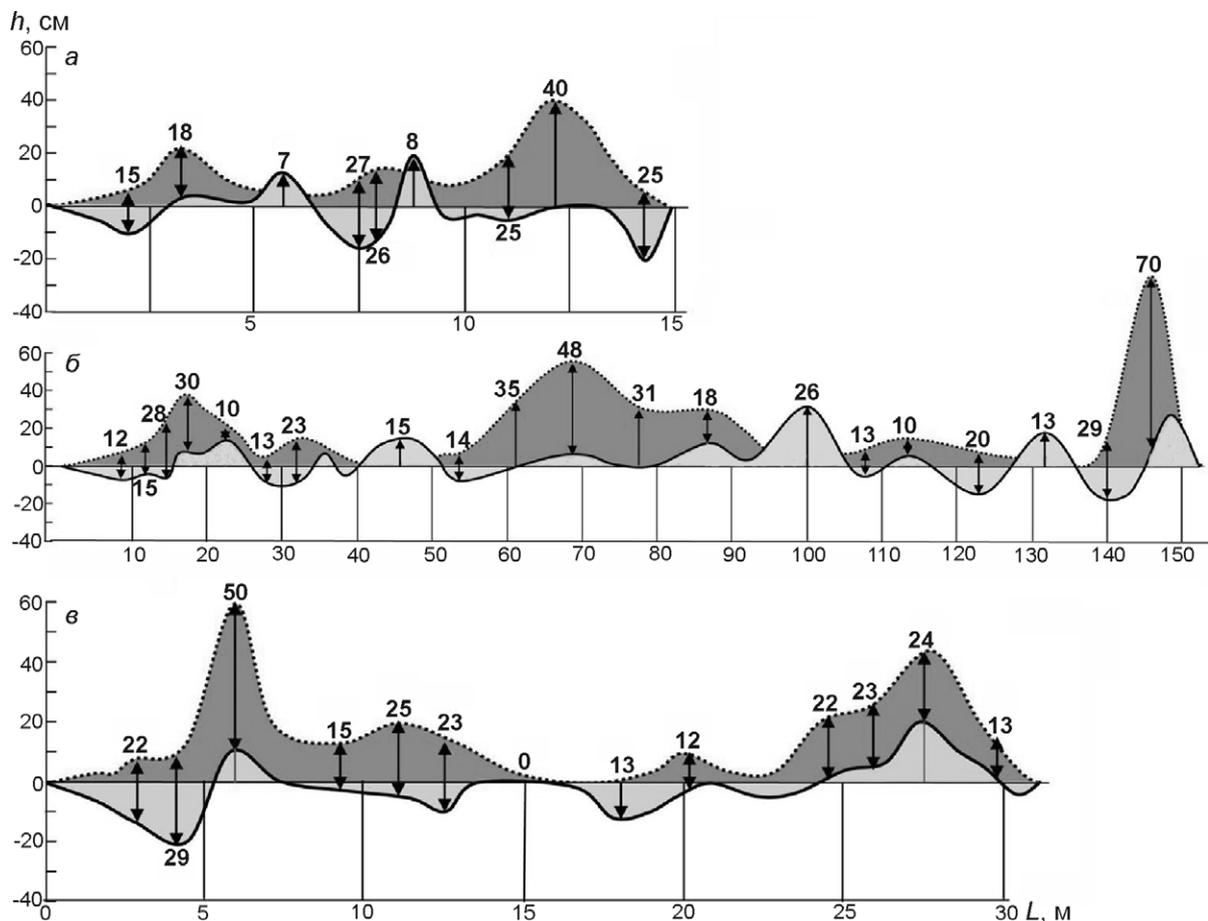


Рис. 6. Изменение высоты земной поверхности наледной поляны в долине р. Большой Эден (Восточные Саяны) по данным серийных нивелировок.

Положение профиля: *а* – верхняя, *б* – средняя, *в* – нижняя часть наледной поляны. Превышение h относительно базисных точек наблюдения (сентябрь 1986 г.) по ширине наледного участка долины L : верхняя кривая – ложе наледи в мае 1987 г., нижняя кривая – поверхность земли в сентябре 1987 г. (после стаивания ледяного массива). Стрелками показано направление движения грунтов, цифрами – абсолютное значение величины смещения (см) поверхности наледной поляны с мая по сентябрь 1987 г. Тёмно-серый цвет идентифицирует процессы пучения грунтов с формированием пластовых и линзовидных льдов вакуум-фильтрационного и напорного происхождения зимой 1986/87 г., серый цвет ниже нулевой линии – процессы термокарста и эрозии, выше нулевой линии – процессы переотложения и аккумуляции осадков в условиях вытаивания инъекционных льдов летом 1987 г.

Fig. 6. Variation of the land surface altitude on the aufeis glade in the Bolshoi Eden River valley (Eastern Sayan) (from data of serial leveling).

Position of the profile: *a* – upper, *b* – middle, *v* – lower part of the aufeis glade. Exceeding of h relative to reference points of observation (September of 1986) along width of the aufeis plot of the valley L : upper curve – the aufeis bed in May of 1987, lower curve – land surface in September of 1987 (after thawing of the ice cluster). The arrows indicate directions of ground movements, numbers correspond to absolute values of the displacement (cm) of the aufeis glade surface from May to September of 1987. Dark grey color identifies ground heaving processes producing ice layers and ice lenses of vacuum-filtration and pressure origins in winter of 1986/87, grey color below the zero line indicates thermokarst and thermoerosion processes, and above the zero line it is the sediment redeposition and accumulation processes under conditions of thawing of the injected ice in summer period of 1987

направленность криогенных движений в холодное время года, т.е. на одних участках грунт вместе со льдом поднимается, а на других опускается. Впервые это явление обнаружили гидрологи В.Н. Колотаев [13] и В.Н. Дейкин [9] на Муруинском наледном полигоне (Верхнечар-

ская котловина) в зимний период 1977/78 г. (см. рис. 5). Механизм развития процесса до конца не ясен. Можно лишь предположить, что зимой опускание части земной поверхности в зоне наледообразования обеспечивается перераспределением запасов и напора подземных вод в

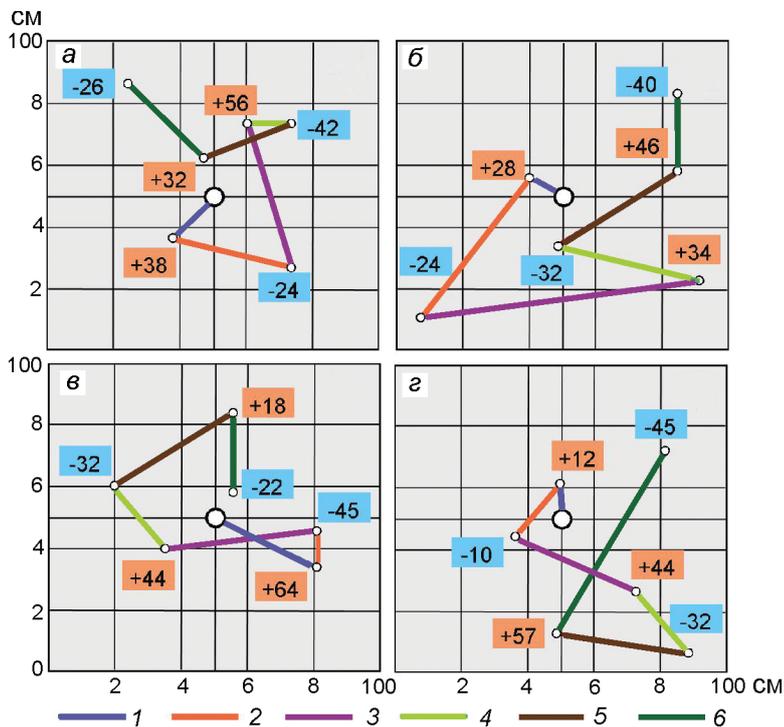


Рис. 7. Гидротермическое движение крупных валунов на наледной поляне в верховьях р. Большой Эден в Восточных Саянах по данным серийных нивелировок 1986–1989 гг.

Смещение марки по горизонтали (цветные линии) и по вертикали (цифры у опорных точек, см): 1 – зима 1986/87 г.; 2 – лето 1987 г.; 3 – зима 1987/88 г.; 4 – лето 1988 г.; 5 – зима 1988/89 г.; 6 – лето 1989 г. Ориентировочная масса валунов: а – 0,5 т, б – 0,8 т, в – 1,2 т, г – 1,5 т

Fig. 7. Hydrothermal movement of large boulders on the aufeis glade close to upper Bolshoi Eden River in the Eastern Sayan (from data of the serial leveling in 1986–1989).

Displacement of the mark along horizontal (color lines) and vertical (numbers at reference points, cm): 1 – winter of 1986/87; 2 – summer of 1987; 3 – winter of 1987/88; 4 – summer of 1988; 5 – winter of 1988/89; 6 – summer of 1989. Approximate weight of boulders: а – 0.5 t, б – 0.8 t, в – 1.2 t, г – 1.5 t

криодинамической системе в результате её неравномерного промерзания.

Особое внимание на наледных участках долин привлекает локальное пучение грунтов, приводящее к формированию округлых или вытянутых бугров-гидролакколитов высотой 3–4 м, иногда до 7 м, и диаметром до 150 м. Чаще всего отношение высоты холмов к их ширине составляет 1:10. Бугры могут быть одно- или многолетними, они приурочены к очагам сосредоточенной разгрузки напорных подземных вод (вокруг родников) или внешне бессистемно разбросаны по периферии зрелых наледных полей (рис. 8). Причины и механизм их формирования изучены недостаточно. Вероятно, возникновение и рост курганов происходят в результате криогенного или гидравлического напора водоносных систем при их промерзании, однако детали этого процесса неизвестны.

В разрезе бугров выделяется грунтовая кровля толщиной 0,5–0,8 м, ниже которой залегает ледяной свод мощностью до 1,5 м. Под ним обычно располагается слой воды, отделённый от свода воздушным пузырьём. Полностью промёрзшее водяное ядро бугра пучения чаще всего представляет собой плоско-выпуклую линзу. Подземный лёд прозрачный, скрытослоистый, имеет гипидиоморфно-зернистую структуру, содержит вы-

тянутые цилиндрические пузырьки воздуха, ориентированные нормально к фронту промерзания.

В процессе роста бугры периодически растрескиваются и из их недр вырываются потоки воды и воздуха. Объём водяных линз может измеряться десятками кубических метров. Однажды у границы массива Чарские Пески возник гидролакколит высотой с двухэтажный дом (!). Геологи Удоканской геологической экспедиции Ф.И. Аникеев и В.Н. Самойленко пробили в его основании небольшую штольню, через которую спустили линзу непромёрзшей грунтовой воды и проникли внутрь. Под ледяным сводом оказалась полость высотой 7 м и диаметром 28 м [17]. После излияния грунтово-ледяная кровля обычно оседает, трещины смыкаются или кольматируются замёрзшей водой. Циклы нарастания и спада напряжений в течение зимы многократно повторяются до тех пор, пока водоносная система не промёрзнет полностью или не прекратится теплоотдача в сторону дневной поверхности.

Бугры начинают формироваться в ноябре–декабре и сохраняются до весны, до таяния снега. Разрушение бугров пучения чаще всего приводит к образованию округлых кратероподобных углублений, обрамлённых хаотически сложенными валами грунта с включениями фрагментов почвы, стволов деревьев, кустарников и обрыв-

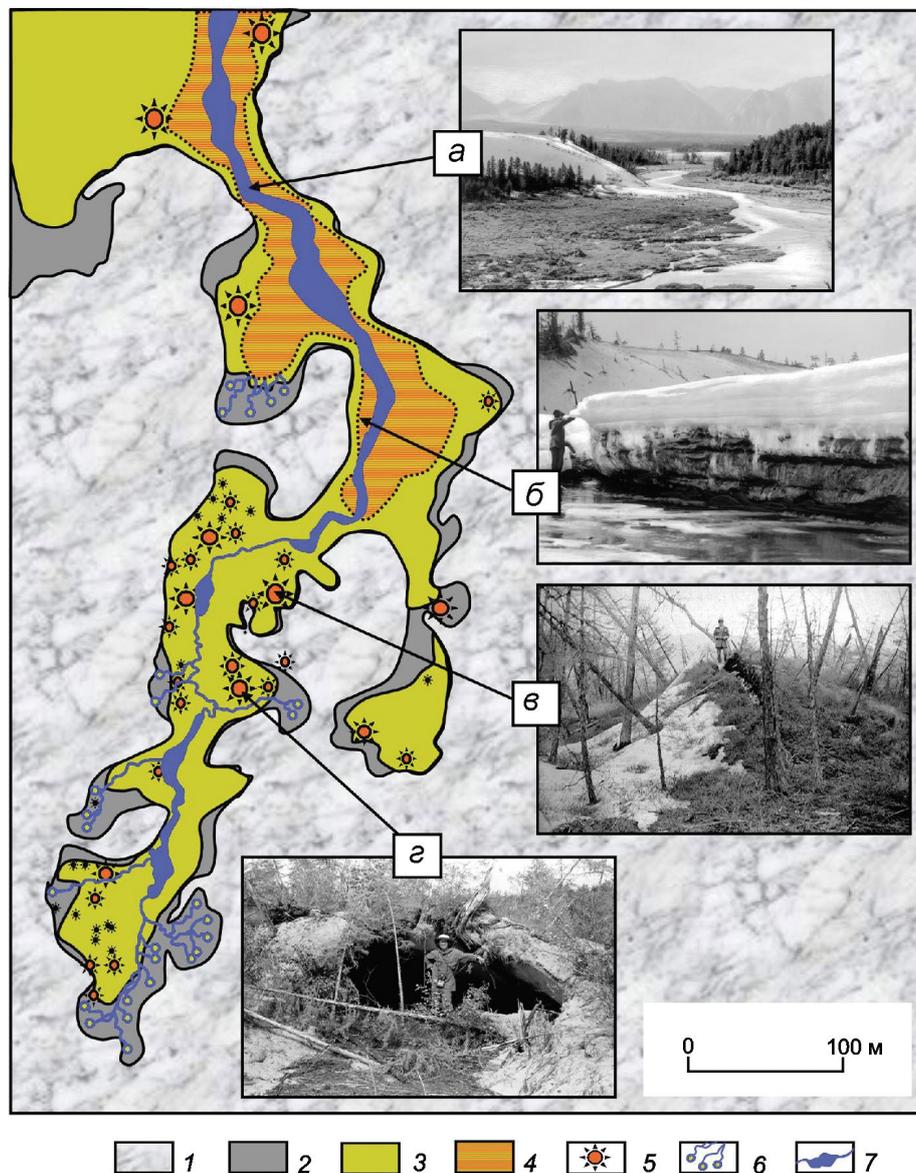


Рис. 8. Гидротермическое движение грунтов в наледной долине ручья Холодного. Урочище Чарские Пески на севере Забайкалья:

Фотографии: *а* – общий вид устьевой части наледной долины после стаивания наледи, сентябрь 1978 г.; *б* – вакуум-инfiltrационный грунтовый комплекс в начале июля 1978 г.; *в* – бугор пучения с ледяным ядром – напорно-иъекционный ледо-грунтовый комплекс, июнь 1977 г.; *г* – воздушная полость в разрушающемся гидролакколите, июль 1978 г. 1 – массив развезаемых песчаных отложений; 2 – безналедный участок долины с величиной ежегодного поднятия земной поверхности до 10 см; 3 – участок долины, ежегодно покрываемый наледным льдом толщиной 1–2,5 м с амплитудой гидротермических движений 0,1–0,3 м; 4 – участок долины с пластами вакуум-инfiltrационного льда с амплитудой криогенного движения грунтов 0,8–1,2 м; 5 – бугры пучения высотой 0,5–3,5 м с линзами напорно-иъекционного льда; 6 – постоянно действующие источники подмерзлотных подземных вод; 7 – русло ручья с вытаявшим подземным льдом на участках расширения

Fig. 8. Hydrothermal movement of grounds on the aufeis valley of the Kholodny creek, Charskie Peski Urochishche in the north of Transbaikalia:

Photographs: *a* – general view of estuarine part of the aufeis valley after thawing of aufeis, September of 1978; *б* – vacuum-infiltration ground complex in early June of 1978; *в* – frost mound with the ice core – pressure-injection ice-ground complex, June of 1977; *г* – air cavity in the destroying hydrocolith, July of 1978. 1 – cluster of dispersed sandy deposits; 2 – aufeis-free plot of the valley with annual elevation of its surface up to 10 cm; 3 – part of the valley yearly covered by the aufeis ice 1.0–2.5 m thick and the amplitude of hydrothermal movements from 0.1 to 0.3 m; 4 – part of the valley with layers of vacuum-infiltration ice, the amplitude of cryogenic movement of grounds here ranges within 0.8–1.2 m; 5 – frost mounds 0.5–3.5 high with lenses of pressure-injection ice; 6 – permanent sources of subpermafrost groundwater; 7 – channel of a creek with thawed ground ice on plots of extension

ков дернины. Такие кратеры иногда превращаются в небольшие озёра и становятся постоянными очагами разгрузки подземных вод. В.С. Преображенский [20] вблизи массива Чарские Пески описал ледяной грот, возникший на месте полуразрушенного гидролакколита диаметром около 35 м и высотой более 3,5 м, на дне которого располагалось озеро глубиной более 1,3 м. Из него по трещине вытекал небольшой ручеёк.

Пластовые подземные льды начинают разрушаться уже в процессе термоэрозионного расчленения наледи, и со временем на месте их залегания возникают термокарстовые провалы (рис. 9, а), борозды, канавы. Если на участках просадки грунтов имеется растительный покров, то он полностью уничтожается и восстанавливается лишь через многие годы в постгляциальную стадию развития долины. Неравномерное вытаявание подземных льдов часто приводит к образованию одноуровневых ледогрунтовых террас высотой 0,5–0,8 м (см. рис. 9, б), разделённых руслами мигрирующих мелководных потоков, или серии плосковершинных останцов, подстилаемых пластами инъекционного льда (см. рис. 9, в). Летом на наледных полянах можно встретить «грибы», ножка которых представляет собой обтаявший ледяной пласт, а шляпка — кусок дернины с живыми растениями или крупный обломок горных пород (см. рис. 9, г). Иногда возникают озоподобные конусы и гряды, внутренняя часть которых сложена наледным или подземным инъекционным льдом.

При вытаявании повторно-жильных льдов на наледных полянах сначала образуются глубокие канавы, заполненные водой, над которыми возвышаются блоки вмещающих жилы грунтов. В плане такие участки выглядят как полигональная сеть, в узлах которой располагаются небольшие озёрки. В случае осушения канав начинается быстрая деградация многолетнемёрзлых грунтов, и наледное ложе превращается в систему невысоких останцовых бугров-байджерахов, которые быстро исчезают в результате термоэрозионной деятельности потоков талых наледных вод.

Термокарст при вытаявании текстурообразующих льдов проявляется сравнительно слабо, главным образом по периферии наледных полей, в местах эпизодического появления наледного льда. Деформации поверхности наледного ложа здесь не столь значительны, однако при опреде-

лённых условиях и в этих местах могут развиваться особо опасные явления. Нами описан такой случай в Тункинской котловине на юго-западе Прибайкалья. В мае 1973 г. в долине р. Тибельти талые наледные воды проникли под толщу сезонно-мёрзлых песчаных отложений и сформировали за несколько дней овраг длиной около 250 м, шириной 10–15 м и глубиной до 2 м (см. рис. 9, д). Суффозионно-эрозионный процесс сопровождался характерными трещинами оседания и массовым обрушением мёрзлых блоков с лежащими на них пластами наледного льда.

Обсуждение

Рассмотренные материалы, а также сведения по другим регионам России и Северной Америки [7, 10, 11, 14, 18, 19, 24, 30, 37–40] показывают, что наледные участки речных долин — самые активные «точки» криолитозоны. Ежегодное формирование и разрушение наземного и подземного льда сопровождается здесь чередой особо опасных геодинамических явлений, среди которых ведущее место занимают зимнее затопление территории, пучение грунтов, термокарст и термоэрозия. Совокупность этих процессов приводит к очень быстрому, часто неожиданному переформированию каналов поверхностного и подземного стока, резкому поднятию и опусканию земной поверхности, разуплотнению и «перетряхиванию» сезонно-протаивающих и сезонно-промерзающих горных пород, что создаёт крайне неблагоприятные условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Данное обстоятельство побуждает нас обратить внимание исследователей и практиков на ряд очень важных вопросов, от решения которых зависит эффективность использования природных богатств Севера и хозяйственное освоение территории в целом.

Прежде всего, отметим характерную особенность накопленных гляциогидрологических и геокриологических информационных ресурсов: несмотря на обилие научной и научно-технической литературы по Северу и Северо-Востоку России, Канаде и Аляске, наледная опасность в рассматриваемом ракурсе практически не рассматривается. При оценке наледных явлений основное внимание исследователей привлекают наледный лёд и вода, разливающаяся по его поверхности. Что происходит под ледяной толщей — неизвест-

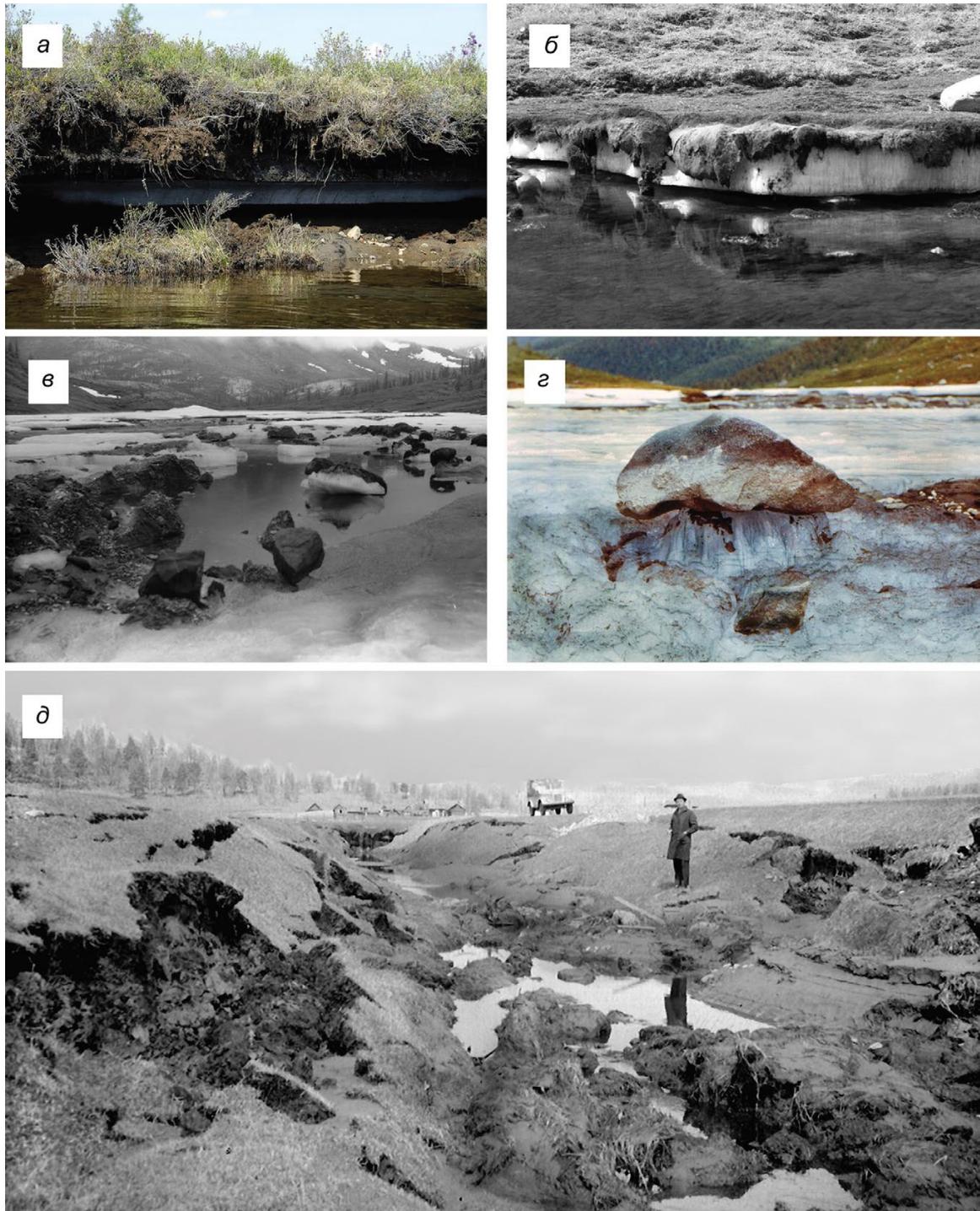


Рис. 9. Формы криогенного движения грунтов на наледных участках речных долин:

a – термокарстовая осадка кровли инъекционного подземного льда; *б* – термоэрозивная терраса наледного ледогрунтового комплекса, куски дернины зажаты между слоями наледного и инъекционного льда; *в* – термоэрозивные останцы на месте разрушающегося массива вакуум-фильтрационного льда; *г* – валун, поднятый на высоту 1,2 м в результате инъекционного льдообразования; *д* – суффозионно-эрозивный провал у автомобильной дороги Иркутск–Монды

Fig. 9. Forms of cryogenic ground movements on the aufeis plots of river valleys:

a – a thermokarst-induced subsidence of a roof of injected ground ice; *b* – a thermoerosion terrace of an aufeis ice-ground complex; pieces of a sod cover are squeezed between layers of aufeis and injected ices; *c* – thermoerosion outliers in place of destroying cluster of vacuum-filtration ice; *d* – boulder lifted to a height of 1.2 m as a result of injection ice formation; *e* – a suffusion-erosion sinkhole near the Irkutsk–Mondy automobile road

но, и это, конечно, сказывается на решении многих практических задач. Показательный пример – история с Керакским наледным участком Забайкальской (Дальневосточной) железной дороги (7352-й километр). Наблюдения за наледями и поведением земляного полотна здесь проводились на протяжении более полувека [25], при этом едва ли не ежегодно принимались решения по обеспечению безопасности пути на основе умозрительных заключений, т.е. без выяснения «внутренних» причин развития опасных процессов, что не приносило ожидаемого эффекта. Лишь после того, как по инициативе известного мерзлотоведа и гидрогеолога П.Н. Лугового полигон детально изучили с помощью колонкового бурения, был найден правильный метод защиты и наледная опасность надёжно ликвидирована.

Отмеченные нами явления достаточно хорошо известны учёным и инженерам, особенно специалистам в области дорожного строительства. Однако их внимание чаще всего ограничивается придорожной полосой. Предпроектные инженерно-строительные изыскания не предусматривают долгосрочных полевых наблюдений, позволяющих выяснить генезис и динамику наледных мерзлотно-геологических образований – считается, что угрозу наледной опасности можно ликвидировать стандартными (типовыми) приёмами защиты. Между тем, закономерности формирования ледогрунтовых комплексов и их развитие зависят от сложного комплекса природных факторов – рельефа и геологического строения, мерзлотно-гидрогеологической обстановки, географической широты, абсолютной высоты местности и многих других.

Для решения практических задач требуется индивидуальный, локализованный подход. Важно также учитывать совокупные и единичные размеры наледей. Наблюдения Б.Н. Дейкина [9] на севере Амурской области показали, что площадь распространения и объём пластовых льдов в границах хорошо выраженных наледных полей в среднем составляют 41,5 и 15% единичных размеров наледей соответственно. Наши ориентировочные расчёты по выявленным индикационным признакам на полигонах Чарские Пески и Эден показали близкие значения – 55 и 20%.

Каковы масштабы распространения иньекционных льдов и бугров пучения на участках формирования гигантских наледей-тарынов,

площадь которых измеряется десятками квадратных километров? Есть ли различия в формировании ледогрунтовых комплексов в северной и южной геокриологических зонах? Как соотносятся степень прерывистости вечной мерзлоты, характеристики климата с интенсивностью гидротермических движений грунтов? Эти и многие другие вопросы пока остаются без ответа.

Начатые 30–35 лет назад работы в данном направлении на БАМе, в Якутии и на Северо-Востоке России вскоре были свёрнуты и не возобновлены до сих пор. Имеющейся информации, полученной в южных районах криолитозоны, в основном для решения задач дорожного строительства, недостаточно для оценки масштабов и особенностей развития наледной опасности. Именно поэтому используемые сейчас экспресс-методы проектирования трасс линейных сооружений в сложных геокриологических условиях, например нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан, не приносят ожидаемого эффекта. Проблема обострится в северной геокриологической зоне, при строительстве линейных сооружений большой протяжённости типа трансконтинентальной железной дороги на Аляску, так как обойти или преодолеть «активные точки» без экологического риска не удастся.

Всё это требует постановки специальных исследований, направленных на каталогизацию наледей, изучение их динамики, условий формирования и развития с учётом процессов взаимодействия ледяных массивов с подстилающими горными породами и внешней средой. Важное практическое значение приобретают также совершенствование и разработка новых методов выявления и оценки наледной опасности с помощью дистанционного зондирования и наземных подспутниковых наблюдений.

Решение инженерных проблем освоения наледных участков речных долин предполагает организацию опытно-экспериментальных полигонов, на которых можно было бы выявлять особенности поведения природно-технических систем (трубопроводов, земляных насыпей, мостов, подземных и наземных коммуникаций и пр.), функционирующих в особо сложных условиях; разрабатывать принципы и методы проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений в наледоопасных зонах, наконец, проверять теоретические модели и тех-

нологические схемы обустройства ежегодно оледеневающих пространств размером в десятки и сотни квадратных километров.

Актуально, на наш взгляд, изучение строения и особенностей формирования наледного аллювия. Этот доступный, хорошо промытый и отсортированный материал может найти широкое применение в строительстве. Ежегодное «перетряхивание» рыхлых отложений, ослабление энергии водных потоков и морфологические особенности русловой сети позволяют рассматривать наледные поляны, древние и современные, как своеобразные ловушки россыпного золота. Наледный аллювий такого типа распространён по всему «золотому поясу» северо-востока Азии — от Саян до Колымского нагорья, а также на Аляске. Не случайно основоположник геологии россыпей Ю.А. Билибин при поисках «золотоносных песков» большое внимание уделял наледным явлениям [5]. Этот аспект требует постановки специальных разведочных работ. Есть надежда, что он привлечёт внимание специалистов и получит соответствующее научно-практическое разрешение.

Анализ современного состояния изученности наледных участков речных долин позволяет сформулировать несколько актуальных задач предстоящих исследований. По нашему мнению, в ближайшее время необходимо:

1) исследовать причинно-следственные связи, закономерности сезонного и многолетнего развития геодинамических и гляциогидрологических явлений в зоне активного наледообразования на основе долговременных наблюдений на специальных наледных полигонах;

2) разработать методику полевой съёмки и картографирования наледной опасности в районах широкого распространения гигантских наледей-тарынов; выявить и оценить индикационные свойства наледей и наледных полян;

3) изучить процессы взаимодействия объектов хозяйственного назначения (трубопроводов, коммуникационных сетей, автомобильных и железных дорог, мостов, плотин, опор линий связи и электропередачи и др.) с основными типами наледей и наледных ледогрунтовых комплексов;

4) определить принципы инженерного освоения наледных участков речных долин в различных природно-климатических и геокриологических зонах; разработать типовые

технологические схемы проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений на участках активного наледообразования;

5) исследовать отложения наледных полян как источников доступных строительных материалов и аккумуляторов некоторых видов полезных ископаемых.

Решение этих задач возможно лишь при объединении усилий специалистов самого разного профиля из заинтересованных учреждений и ведомств на основе комплексной программы под общим названием «Разработка принципов и методов оценки, предупреждения и устранения наледной опасности в криолитозоне России». Подготовку такой программы целесообразно поручить Институту мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН.

Выводы

1. Локализованный выход подземных вод, их намораживание в виде крупных ледяных массивов на поверхности земли создают специфические условия энерго- и массообмена в системе атмосфера—почва—литосфера. Зимой кривая вертикального распределения температур существенно деформируется вследствие выделения тепла наледным слоем воды при его промерзании, при этом образуется своеобразный термоклин. Деформация температурной кривой, постепенно уменьшаясь в размерах, смещается вниз по разрезу и затухает на границе мёрзлых и талых горных пород. Величина и количество отклонений температуры от «нормального» положения зависят от теплозапаса наледообразующих вод и числа излияний в заданной точке пространства.

2. Появление термоклина изменяет условия промерзания подстилающих грунтов и механизм их льдонасыщения, приводит к формированию двухъярусных ледогрунтовых комплексов, резко отличных от криогенных образований смежных участков долины. По генетическим особенностям и соотношению составных частей наземного и подземного ярусов выделяется семь типов наледных ледогрунтовых комплексов — массивно-сегрегационный, цементно-базальный, слоисто-сегрегационный, базально-сегрегационный, вакуум-фильтрационный, напорно-инъекционный и трещинно-жильный. Их строение и свойства определяются процессами наледообразования.

3. Ежегодное формирование и разрушение наледей и подземных льдов сопровождается чередой особо опасных геодинамических явлений, среди которых ведущее место занимают зимнее затопление территории, намораживание воды, пучение грунтов, термокарст и термоэрозия. Совокупность этих процессов приводит к быстрому, часто неожиданному в результате перестроения каналов поверхностного и подземного стока, резкому поднятию и опусканию земной поверхности, разуплотнению и «перетряхиванию» сезонно-протаивающих и сезонно-промерзающих горных пород, что создаёт крайне неблагоприятные условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

4. Наледные участки речных долин — самые активные «точки» криолитозоны. Для их всестороннего изучения необходимо организовать несколько опорных наледных полигонов, расположенных в разных природно-климатических и геокриологических зонах. В программу исследований, кроме естественно-исторических и методических аспектов, следует включить вопросы взаимодействия инженерных сооружений с наледями и наледными ледогрунтовыми комплексами.

Литература

1. Алексеев В.Р. Наледи как фактор долинного морфолитогенеза // Региональная геоморфология Сибири. Иркутск: изд. ИГСиДВ СО РАН, 1973. С. 89–134.
2. Алексеев В.Р. Парагенез наледей и подземных льдов // МГИ. 1989. Вып. 65. С. 81–86.
3. Алексеев В.Р. Ландшафтная индикация наледных явлений. Новосибирск: Наука, 2005. 364 с.
4. Алексеев В.Р. Влияние наледей на развитие русловой сети (наледный руслогенез) // Лёд и Снег. 2013. № 4 (123). С. 95–106.
5. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 463 с.
6. Гасанов Ш.Ш. Инъекционные льды (строение, механизм образования и закономерности распространения) // Материалы VIII Всесоюз. междувед. совещания по геокриологии (мерзлотоведению): Вып. 2. Общая, теоретическая и историческая геокриология. Якутск: изд. ИМЗ СО РАН, 1966. С. 139–153.
7. Горбунов А.П., Ермолин Е.Д. Рельефообразующая роль наледей Тянь-Шаня и Памира // Наледи Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1981. С. 160–166.
8. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2002. 317 с.
9. Дейкин Б.Н. Методика исследования и расчет характеристик инъекционных льдов на наледных участках речных долин // Гляциол. исследования в Сибири. Иркутск: изд. Ин-та географии СО РАН, 1985. С. 146–158.
10. Климовский И.В. Наледи и инъекционные льды долины р. Буордах (хр. Улахан-Чистай) // Геокриол. и гидрогеол. исследования в Якутии. Якутск: изд. ИМЗ СО РАН, 1978. С. 118–125.
11. Колосков К.Н., Корейша М.М. Наледи северного склона Момского хребта // Тр. ПНИИИС: Вып. 36. Геокриол. исследования при инженерных изысканиях. М.: Стройиздат, 1975. С. 124–134.
12. Колосов Д.М. О наледных явлениях как геоморфологическом процессе // Проблемы физич. географии. Т. VI. М.: Изд-во АН СССР, 1938. С. 125–134.
13. Колотаев В.Н. Процесс формирования крупных наледей подземных вод (на примере Муруринской наледи) // Вопросы гидрологии суши: Докл. конф. молодых ученых и специалистов. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 37–45.
14. Корейша М.М. Формирование инъекционного льда в русловых отложениях наледных участков долин рек хр. Сунтар-Хаята // Материалы к науч.-техн. конф. Апрель, 1969. М.: изд. ПНИИИС, 1969. С. 121–123.
15. Кравченко В.В. Гидротермические движения грунтов под наледными массивами // Гляциология Восточной Сибири. Иркутск: изд. Ин-та географии СО РАН, 1983. С. 53–64.
16. Кравченко В.В. Изучение гидротермических движений грунтов под наледями на перемерзающих реках // Геокриол. прогноз при строительном освоении местности. М., 1985. С. 86–88.
17. Кренделев Ф.П. Барханы и ледяные бугры Чарской котловины // Природа. 1983. № 2. С. 58–66.
18. Петров В.Г. Наледи на Амуро-Якутской магистрали. Л.: Изд-во АН СССР и н.-и. автодорожного ин-та НКПС СССР, 1930. 177 с.
19. Подъяконов С.А. Наледи Восточной Сибири и причины их возникновения // Изв. РГО. 1903. Т. 39. С. 305–337.
20. Преображенский В.С. Барханы и гидролакколиты Чарской котловины // Природа. 1961. № 5. С. 93–95.
21. Романовский Н.Н. О геологической деятельности наледей // Мерзлотные исследования: Вып. XIII. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 66–89.
22. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
23. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
24. Романовский Н.Н., Афанасенко В.Е., Корейша М.М. Динамика и геологическая деятельность гигант-

- ских наледей Селенняхской тектонической впадины // Вестн. МГУ. Геология. 1973. № 6. С. 52–74.
25. Румянцев Е.А. Физико-климатические условия и динамика образования Керакской наледи на Забайкальской железной дороге // Тр. ХаБИИЖТа: Вып. 18. Хабаровск: Хабаровское кн. изд-во, 1964. С. 93–120.
 26. Русанов Б.С. Гидротермические движения земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 226 с.
 27. Санников С.А. Изучение инъекционных льдов наледных полей (на примере Забайкалья) // Методика и техника геокриол. исследований. Новосибирск, 1988. С. 134–145.
 28. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 190 с.
 29. Стругов А.С. Взрыв гидролакколита (Читинская область) // Природа. 1955. № 6. С. 117.
 30. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
 31. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
 32. Фельдман Г.М., Борозинец В.Е. Возможный механизм образования крупных ледяных включений в дисперсных грунтах // Региональные геокриол. исследования в Восточной Азии. Якутск: изд. ИМЗ СО РАН, 1983. С. 19–28.
 33. Фотиев С.М. К вопросу о роли наледей в формировании морфологии наледных участков речных долин // Геокриол. условия Западной Сибири, Якутии и Чукотки. М.: Наука, 1964. С. 111–114.
 34. Швецов П.Ф., Седов В.П. Гигантские наледы и подземные воды хребта Тас-Хаяхта. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 81 с.
 35. Шепелев В.В. Родниковые воды Якутии. Якутск: Книж. изд-во, 1987. 128 с.
 36. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Наледи Забайкалья. Чита: изд. ИПРЭК СО РАН, 2006. 213 с.
 37. Carey K.L. Icings Developed from Surface Water and Ground Water. Hanover, New Hampshire: Corps of Engineers. U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering laboratory, 1973. May. 67 p.
 38. French H.M. The Periglacial Environment. Ljngman. London and New York, 1976. 309 p.
 39. Olszewski Antoni. Icings and geomorphological significance exemplified from Oscar II Land and Prins Karls Forland // Acta Universitatis Nicolai Copernici. Geographia XVI. Nauki Matematyczno-Przyrodnicze, 1982. Zeszyt 51. P. 91–122.
 40. Pollard W.H., Franch H.M. Seasonal frost mound occurrence North Fork Pass, Ogilvie Mountains, Northern Yulon, Canada // Fourth Intern. Conf. July 17–22, 1983. Organized by University of Alaska and National Academy of Science. National Academy Press. Washington, 1983. P. 1000–1004.

Summary

Localized groundwater outflow and layered freezing of them in forms of large ice clusters on the surface creates specific conditions for energy and mass exchange in the «atmosphere–soil–lithosphere» system. In winter, the soil temperature profile is essentially deformed due to heat emission by the aufeis layer of water at its freezing that forms a specific thermocline layer. Deformation of the temperature profile, gradually decreasing, moves down the cross-section and disappearing at the interface between frozen and thawed rocks. Magnitude and number of the temperature deviations from a «normal» state depends on the heat storage of the aufeis-forming waters and on the number of outflows at a given point. The thermocline formation changes conditions of freezing for underlying ground layers together with mechanism of ice saturation of them, and that results in formation of two-layer ice-ground complexes (IGC) which differ drastically from cryogenic features in adjacent parts of the valley. Analysis of genetic characteristics and relation of components of the surface and subsurface layers allowed identification of seven types of the aufeis IGC: massive-segregation, cement-basal, layered-segregation, basal-segregation, vacuum-filtration, pressure-injection, and fissure-vein.

Yearly formation and destruction of aufeises and subsurface ices is accompanied by a sequence of particularly hazardous geodynamical phenomena, among which the most important are winter flooding of territories, layered freezing of water, ground heaving, thermokarst, and thermoerosion. Combination of these processes may cause a rapid (often unexpected) reconfiguration of channels of both surface and subsurface runoff, abrupt uplifts and subsidences of the surface, and decompaction and «shaking-up» of seasonally thawing and seasonally freezing rocks, which may create exceptionally unfavorable conditions for construction and operation of engineering structures. Aufeis plots of river valleys are the most «hot» points of the permafrost zone. A comprehensive study of them requires organization of several reference aufeis test areas located in different natural-climatic and geocryological zones. In addition to the natural-historical and methodological aspects, the future research program should include consideration of problems related to interaction between engineering structures and aufeis events and aufeis ice-ground complexes.