

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(65-75)

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОСВОЕНИЯ НАЛЕДНЫХ УЧАСТКОВ  
РЕЧНЫХ ДОЛИН

В.Р. Алексеев

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; Snow@irk.ru*

На севере Евразии, в Канаде, на Аляске наледи подземных вод (тарыны) образуют гигантские ледяные поля площадью в десятки квадратных километров. В Сибири ежегодно формируется около 60 000 крупных ледяных массивов, суммарная площадь которых составляет 45 тыс. км<sup>2</sup> (0.66 % криолитозоны) – в 35 раз больше площади всех ледников азиатской части России. На наледных участках речных долин развивается комплекс особо опасных явлений (зимнее затопление территории, формирование пластов наледного и подземного льда, пучение грунтов, термокарст, термоэрозия и др.), которые препятствуют инженерному освоению местности. Наледная опасность создает большие проблемы при строительстве зданий и сооружений, прокладке трубопроводов, эксплуатации автотранспорта, разработке россыпных месторождений полезных ископаемых и пр. На основе анализа условий и закономерностей развития наледных процессов с учетом опыта противоналедной защиты сформулированы три радикальных принципа инженерного освоения местности. Для дальнейшего изучения наледных явлений и решения ряда практических задач предлагается создать специальный опытно-экспериментальный полигон.

*Наледи, борьба с наледями, вечная мерзлота, подземные льды, криогенные явления, криолитозона*

AUFEIS AREAS IN RIVER VALLEYS: ENGINEERING DEVELOPMENT PROBLEMS

V.R. Alekseev

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia; Snow@irk.ru*

Groundwater-fed icins (aufeis or *taryns*) in northern Eurasia, Canada and Alaska form giant fields covering tens of square kilometers. Every year Siberia develops about 60,000 large ice masses with a total area of 45,000 km<sup>2</sup> (0.66 % of the permafrost zone), or 35 times as large as the area of all glaciers in the Asian part of Russia. Especially hazardous phenomena of winter flooding, formation of aufeis and ground ice, frost heaving, thermokarst, thermal erosion, etc. in river valleys pose engineering problems to development of the terrain. The aufeis hazard creates serious difficulties in construction, laying pipelines, production from placer mineral deposits, etc. Three basic principles of terrain development have been formulated proceeding from the conditions and patterns of aufeis formation, with reference to available experience in aufeis hazard mitigation. It is proposed to set up special test sites for further field and experimental studies of aufeis.

*Aufeis, icing, aufeis mitigation, permafrost, ground ice, periglacial phenomena, permafrost zone*

ВВЕДЕНИЕ

Редкий человек, побывавший в краю вечной мерзлоты – в Якутии, Магаданской области, на Чукотке или в Забайкалье, – не удивляется ледяным массивам на дне долин рек в теплое время года. Да и местные жители, привыкшие к сюрпризам северной природы, не сдерживают волнения при виде многометровых глыб чистого голубого льда среди цветущей летней тайги. Наледи... Это простое русское слово таит в себе много тайн и загадок. Оно зовет и вдохновляет, страшит и увлекает – каждого по-своему, в зависимости от возрас-

та, профессии или образа жизни. Для многих людей наледь – опаснейшая стихия воды и льда, которую трудно предсказать, а еще труднее остановить или уничтожить. Более всего опасаются наледей водители транспортных средств, дорожники, строители, рыбаки и охотники. Горе тому, кто легкомысленно оставит на ночь машину на гладком речном льду или без разведки направит колонну по заснеженному руслу: можно не только увязнуть в снежно-ледяной каше, вмерзнуть в лед, но и провалиться под ледяной покров, затонуть

(рис. 1). Известны многочисленные случаи взрыва ледяных и грунтово-наледных бугров пучения, когда в потоках изверженной воды неслись многотонные глыбы льда и мерзлого грунта. Они буквально срезали стоящие на пути деревья и небольшие деревянные мосты. Не выдерживают мощного криогенного напора и разного рода инженерные сооружения, попавшие в зону наледообразования: дома, трубопроводы, опоры линий связи и электропередачи и др. Именно поэтому наледные участки речных долин считаются самы-

ми “горячими”, т. е. наиболее опасными местами криолитозоны.

Несмотря на широкую известность, многие стороны наледных явлений изучены еще очень слабо. Причина проста: лишь полвека назад определилось само понятие “наледь”. А без четкого представления объекта исследования, как известно, невозможно ни создать стройную теорию, ни решить конкретные практические задачи. По современным представлениям, наледи – это ледяные массивы, покровы и корки льда, возникающие



**Рис. 1. Наледи – одно из самых опасных криогенных явлений на северных дорогах.**

Ни один водитель не рискнет отправиться в путь по автозимнику в одиночку, только в колонне (а), слишком велик риск вмерзнуть в ледяную толщу (б, в) или провалиться под лед (г). Даже в теплое время года преодолеть наледный участок долины – большая проблема (д). Снимки с сайта Яндекс.Фотки; и др.

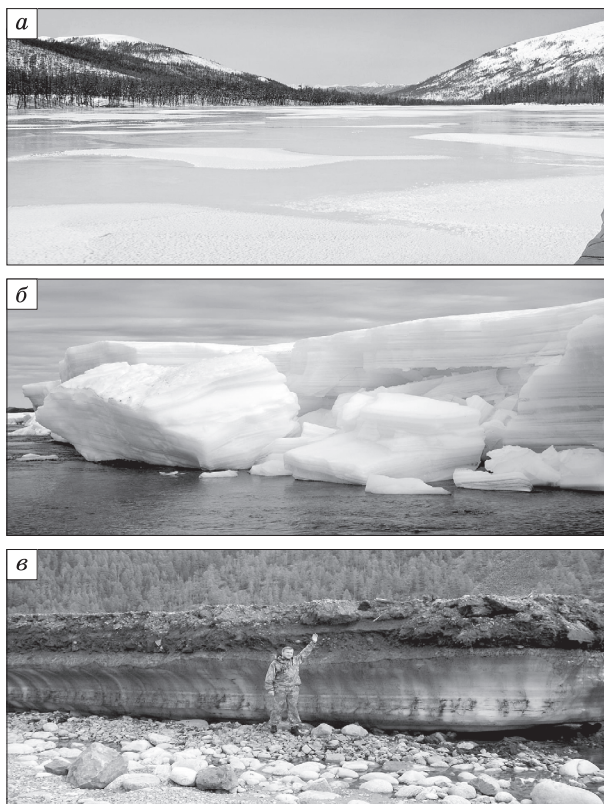
при послойном намораживании воды на поверхности твердых тел [Гляциологический словарь, 1984; Алексеев, 2007]. В области распространения вечной мерзлоты наиболее крупные наледи образуются в результате намораживания подземных (родниковых) вод. Именно они создают в криолитозоне самые неблагоприятные ситуации и проблемы.

### НЕИЗВЕСТНОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ СИБИРИ

Согласно последним данным [Королева, 2011], площадь криолитозоны России составляет 10.7 млн км<sup>2</sup> – 65 % территории государства, при этом область сплошной вечной мерзлоты занимает более 5.2 млн км<sup>2</sup> (49 %), область прерывистых многолетнемерзлых пород – 2.4 млн км<sup>2</sup> (22 %) и область массивно-островной и островной мерзлоты – 3.1 млн км<sup>2</sup> (29 %). Территория, на которой встречаются крупные наледи подземных вод (тарыны), превышает 7.6 млн км<sup>2</sup> (71 % криолитозоны). Относительная наледность этой территории (включая наледи речных вод) составляет 0.66 %, около 56 тыс. км<sup>2</sup>. Общая площадь, ежегодно занимаемая наледями подземных вод, составляет примерно 45 тыс. км<sup>2</sup> (на 3.5 тыс. км<sup>2</sup> больше площади Швейцарии). Количество же ледяных массивов со средней площадью около 1 км<sup>2</sup> приближается к 60 000 [Алексеев, 2015].

Много это или мало? Для сравнения укажем площадь ( $F_i$ ) и количество ( $N_i$ ) ледников на материковой части России:  $F_i = 2551$  км<sup>2</sup>,  $N_i = 1727$  [Долгушин, Осипова, 1989]. Как видим, суммарная площадь наледного (конжеляционного) оледенения нашей страны превышает оледенение классическое (сублимационное, осадочно-метаморфическое) в 18 раз. Количество же крупных наледей подземных вод больше количества горно-долинных ледников Азиатской России в 35 раз.

Долгое время крупномасштабное оледенение речных долин с питанием из недр земли вызывало недоумение. Откуда столько воды? Ведь мерзлые горные породы водонепроницаемы, значит, создают своеобразный экран, барьер, препятствующий как наполнению подземных емкостей, так и их разгрузке (опорожнению). Вопрос разрешился во второй половине XX в. [Седов, Швецов, 1940; Швецов, 1951, 1981; Шенелев, 1987; Ну, Pollard, 1997]. Мерзлая зона земной коры оказалась не монолитной, а пронизанной сложнейшей системой водопоглощающих и водовыводящих каналов – таликов, при этом во многих регионах под вечной мерзлотой сформировались целые моря – криоартезианские бассейны напорных подземных вод [Толстихин, 1974]. Наледи, вечная мерзлота, водоносные талики и горизонты вместе с сезоннопротаивающим (деятельным) слоем горных пород образуют различные типы криогидрогеологических структур, внешним проявлением которых



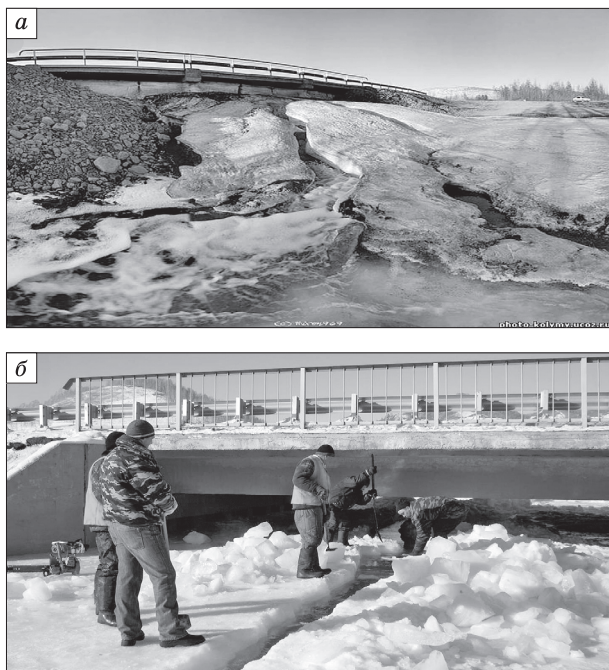
**Рис. 2. Наледи-тарыны – специфическая форма оледенения области сплошного и прерывистого распространения вечной мерзлоты.**

*a* – гигантская наледь подземных вод в Баргузинской котловине, Прибайкалье (фото Polyach. Яндекс.Фотки...0\_3f4c0\_58bbdd94\_orig); *b* – массив тающего наледного льда в речной долине на Колыме (фото Mochalova. Yama River...45035806); *v* – пласт подземного инъекционного льда на наледной поляне в долине р. Алгама, Южная Якутия (фото irina-karman. Яндекс.Фотки...00\_437ed\_13f9569b\_orig. – [https://img-fotki.yandex.ru/get/4201/irina-karman.4/0\\_437ed\\_13f9569b\\_S](https://img-fotki.yandex.ru/get/4201/irina-karman.4/0_437ed_13f9569b_S)).

являются характерные ледогрунтовые комплексы (рис. 2). Закономерности формирования и свойства подобных образований во многом неизвестны. Они-то и создают тот загадочный и тревожный колорит промороженным землям, который старательно не замечают некоторые экспресс-проектировщики. Об этом важно помнить и говорить именно сейчас, когда планируется и уже началось беспримерное освоение природных богатств восточных районов страны, особенно севера Сибири и Дальнего Востока.

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НАЛЕДЯМИ

Впервые в широком масштабе проблема борьбы с наледными явлениями возникла при строительстве восточной части Транссибирской желез-



**Рис. 3. На автомобильных дорогах опасные наледы образуются практически на всей территории криолитозоны.**

*а* – наледь под мостовым переходом на Колыме (фото Владимира Чеховских); *б* – наледь в Шебалинском районе на Алтае (Яндекс.Фотки...0\_6e400\_95c33476\_orig).

подорожной магистрали в начале прошлого столетия. На забайкальском и амурском участках трассы наледи встречались почти в каждой долине, на каждом водотоке. Это были маломощные и небольшие по площади (до 2–3 га) ледяные образования, приносившие много неприятностей строителям и эксплуатационникам. Они “заливали” мосты и насыпи, врываются в дома и подсобные помещения, выдергивали опоры зданий и сооружений, заполняли выемки и тоннели, выводили из строя дренажные системы и пр. Потребовалось почти три десятилетия, пока на основе проб и ошибок, в том числе на гужевых и автомобильных дорогах, не был создан комплекс способов противоналедной защиты, посредством которого проблема была снята, хотя не полностью и не везде. Наледная опасность в те годы устранялась в основном в местах намораживания речных и грунтовых вод. Применялись мерзлотные пояса, земляные валы, деревянные заборы, резервные выемки, утепление и спрямление русел рек, ручьев и т. д. В процессе работ использовались преимущественно шанцевые инструменты – лом, лопата, тачка и кайло. Лишь после Великой Отечественной войны начали применять бульдозеры, скреперы, экскаваторы, подъемные краны и прочее, но сущность методов не изменилась.

Могучая техника вселила уверенность в том, что с наледями, да и с другими опасными мерзлотными процессами, можно легко справиться в любой точке криолитозоны. Во время инженерно-строительных изысканий на БАМе и на трубопроводной трассе Восточная Сибирь–Тихий океан (ВСТО) автору не раз приходилось слышать примерно такие заявления: “Сейчас с мерзлотой и наледями нет проблем. Провалится насыпь – засыпим, выпучит – подрежем, деформируется мост – починим или снесем, построим новый. Режимные наблюдения вообще не нужны...” Эти люди легкомысленно считают, что главное – в кратчайший срок уложить трубу, рельсы, а разбираться с негативными явлениями будем потом. Конечно, “шапками закидать” можно что угодно, но где взять столько шапок? Пренебрежительное отношение к наледной опасности граничит с государственным преступлением, потому что такой подход может привести к грандиозным экологическим катастрофам. Убедительный показатель – опыт действующих автомобильных дорог (рис. 3), где проблема противоналедной защиты до сих пор остается актуальной. Природа не прощает панибратства, а глупость в решении стратегических вопросов освоения территории строго и безжалостно наказывает, в чем мы много раз убеждались на протяжении последних десятилетий.

Сибирь – основной источник природных ресурсов России: нефти, газа, золота, алмазов, полиметаллов, каменного угля и др. Большая часть этих богатств сосредоточена в зоне сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых горных пород, т. е. там, где функционируют наиболее сложные криогидрогеологические структуры и где гигантские наледи-тарыны встречаются почти в каждой речной долине (рис. 4).

Длина родниковых наледей во многих регионах измеряется десятками километров [Швецов, Седов, 1941; Толстихин, 1974; Шепелев, 1987; French, 1976], при этом ледяные массивы, нанизываясь на главное русло реки, периодически смещаются вдоль него, образуя так называемые наледные поляны. Границы таких наледей простираются от борта до борта долины, средняя мощность льда колеблется в пределах 1.5–3.5 м при максимальном значении 5–8 м, иногда и более. В северных районах криолитозоны и в горах массивы наледного льда часто сохраняются в течение всего теплого периода года, а наиболее крупные из них остаются на следующую зиму, т. е. являются многолетними. В горах относительная наледность колеблется в пределах 0.2–1.5 %, в некоторых небольших бассейнах рек может достигать 10–12 %.

Вступать в схватку с такими “монстрами” методами 30-х гг. прошлого столетия наивно. Не могут ни мощные экскаваторы, ни бульдозеры. Но осваивать наледнеопасные участки криолитозоны

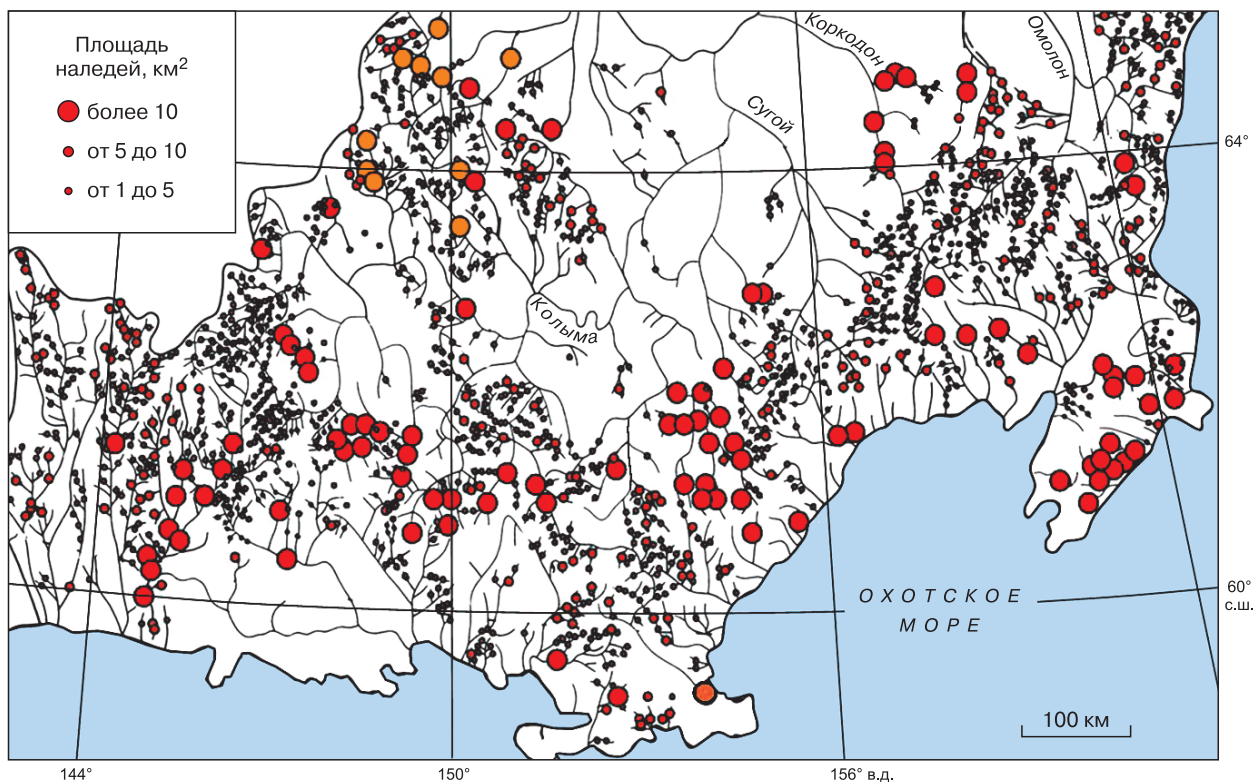


Рис. 4. Карта-схема распространения гигантских наледей-тарынов на территории Колымского нагорья.

все же придется. Можно, конечно, изменить направление трассы железной дороги или нефтепровода (пойти в обход), но во что это обойдется? Можно пересечь наледоопасный участок долины шириной 2, 3, 5 км, не обращая внимания на предупреждения ученых. Нужен ли такой “смелый прорыв”, заведомо обреченный на колоссальные материальные издержки? И кто решится взять на себя ответственность за будущие неприятности? Суровый климат и необычный водообмен в криолитозоне должны учитываться при формировании стратегических позиций освоения местности. Для этого как минимум необходимо знать: с чем особо опасным встретятся изыскатели, проектировщики, строители, да и будущие жители тоже.

#### В ЧЕМ ПРОБЛЕМЫ?

Опыт инженерного освоения мест формирования крупных наледей-тарынов связан в основном с функционированием автозимников и использованием наледного льда и наледных полей в качестве взлетно-посадочных полос (ВПП) и площадок для вертолетов и легкомоторных самолетов. Крупных сооружений в зоне наледообразования не встретишь – никому не хочется, чтобы его детище (дом, труба, опора ЛЭП или дорога) в лютые морозы было затоплено водой и надолго за-

ковано в лед. Именно поэтому проблем освоения наледных ландшафтов как бы не существует. Они не обозначены и не раскрыты ни в одном справочнике, нормативно-техническом документе или учебном пособии. Но это лишь подчеркивает важность обсуждаемой темы, так как грядущее хозяйственное использование гигантских наледных полей неизбежно.

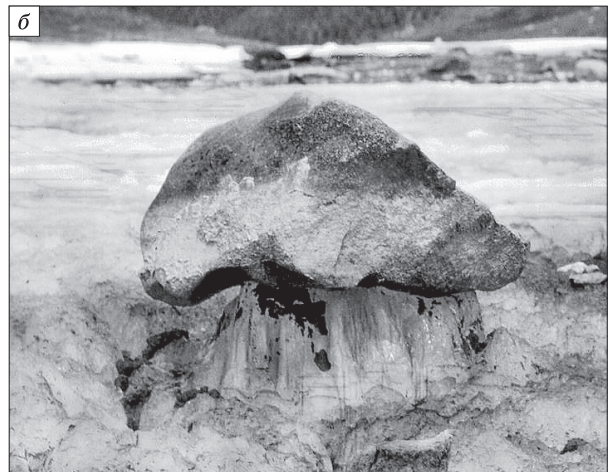
Проблемы инженерного освоения местности, периодически занятой наледным льдом, можно объединить в три основные группы: 1) связанные с обеспечением устойчивости и долговечности зданий, сооружений и коммуникаций в условиях активного наледообразования; 2) возникающие при производстве строительных и других видов работ в периоды формирования наледей, во время их разрушения и после стаивания; 3) появляющиеся после возведения инженерных сооружений в случае нарушения установленных правил и норм экологической безопасности и режима эксплуатации возведенных конструкций. Все три группы проблем определяются специфическим гидротермическим режимом, строением и свойствами наледных ледогрунтовых комплексов, резко отличных от смежных участков территории. Сложности в решении инженерных задач создаются следующими характерными чертами развития наледных природных комплексов.

1. Зимой многие долины рек криолитозоны периодически затопляются излившимися из недр подземными водами. Замерзание наледной воды приводит к накоплению слоистой толщи льда, которая заполняет значительную часть удобной для освоения территории, облекая и перекрывая наземные предметы. Вышедшие на поверхность земли подземные воды часто фильтруются сквозь снежный покров и распространяются далеко за пределы видимого наледного льда. Образующаяся при этом снежная каша представляет большую угрозу для людей, домашних животных и всех видов наземного транспорта.

2. Послойное намораживание воды и таяние льда сопровождаются изменением микроклимата: зимой в наледной долине в среднем на 1.5–2.0 °С теплее, чем за пределами зоны наледообразования, а летом, наоборот, холоднее на ту же величину.

В наледной долине отмечены высокая отраженная солнечная радиация, повышенная влажность воздуха, часты туманы и заморозки, на 1–1.5 месяца сокращен вегетационный период растений, существенно трансформирован гидрограф стока.

3. При сильных морозах соприкосновение растекающейся наледной воды с наземными предметами создает эффект теплового удара, а ее замерзание в трещинах горных пород, в бетоне и других материалах приводит к их шелушению, расклиниванию, более быстрому физическому выветриванию и распаду (рис. 5, а). Зона наледообразования – это своеобразная каменоломня, где скальные береговые обнажения разрушаются и отступают в 5–10 раз быстрее, чем в обычных условиях, а интенсивность диспергирования (измельчения) крупнообломочных грунтов и строительных материалов увеличивается на один-два порядка.



**Рис. 5. Наледные участки речных долин – арена активного криогенного выветривания и гидротермического движения горных пород.**

а – дезинтеграция (распад) аргиллитов на наледной поляне в долине р. Юдомы в результате теплового удара наледной воды и расклинивающего действия льда (фото strannic1959. Яндекс.Фотки...0\_8aa03\_5becccc\_orig. – <https://fotki.yandex.ru/next/users/strannic1959/album/196489/view/567811?page=0>); б – гранитный валун, поднятый на высоту 0.5 м растущими кристаллами инъекционного подземного льда в долине р. Эден, Восточные Саяны (фото автора); в – наледный бугор пучения на Чукотке, образовавшийся при промерзании линзы надмерзлотных подземных вод (фото с сайта chukotka\_682); з – просадка горных пород, вмещающих линзу инъекционного подземного льда в долине р. Нерюнгри, Южная Якутия (фото zhenyalevina. Яндекс.Фотки...0\_70064\_a2c01260\_-1-orig. – <https://fotki.yandex.ru/next/users/zhenyalevina/tag/%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%8E%D0%BD%D0%B3%D1%80%D0%B8/album/135046/view/458852?page=8&search-author=zhenyalevina>).

4. Накопление наледного льда создает дополнительную нагрузку на подстилающие грунты (до  $10 \text{ т/м}^2$ ), что приводит к их уплотнению в одних случаях или к разрыхлению и передислокации вследствие динамического удара, оползней и надвигов – в других. Неравномерное распределение толщины ледяного покрова создает сложнапряженное состояние подстилающих грунтов. Осадка и сползание льда сопровождаются деформациями и разрушением вмороженных в лед предметов (см. рис. 5, б) и подстилающих горных пород.

5. Короткопериодные колебания температуры воздуха с амплитудой более  $10\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$  вызывают циклическое расширение и сжатие крупных массивов наледного льда. При понижении температуры линейные размеры и объем льда уменьшаются, а при повышении температуры происходит противоположный процесс – термическое расширение льда. Коэффициент объемного расширения (сжатия) однородного гомогенного льда  $\beta_t$  считается постоянным  $\beta_t = 0.158 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Коэффициент линейного расширения (сжатия) равен  $\alpha_t = \beta_t/3 = 0.053 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . В результате термодинамического напряжения происходят растрескивание, пучение, надвиг наледей на берега, на опоры мостов и контактные сооружения. Наибольшие деформации наблюдаются весной при температурах от  $0$  до  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6. В процессе промерзания линз и пластов воды в массивах наледного льда, под ним и в толще подстилающих грунтов развивается гигантское давление, способное сминать и сплющивать обсадные металлические трубы, выдергивать и сдвигать сваи, разрушать защитные короба и емкости. Промерзание замкнутых скоплений воды сопровождается деформацией вмещающих горных пород, формированием ледяных и льдогрунтовых бугров пучения (см. рис. 5, в), при взрыве которых выбрасываются многотонные глыбы льда и грунта. Формирование линз воды труднопредсказуемо, так как их местоположение меняется год от года и зависит от случайных факторов.

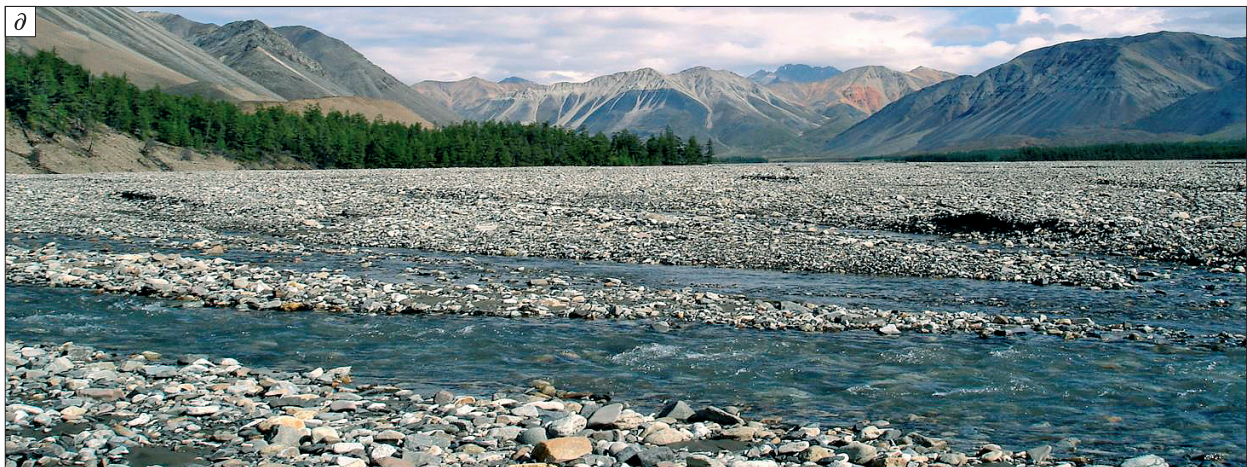
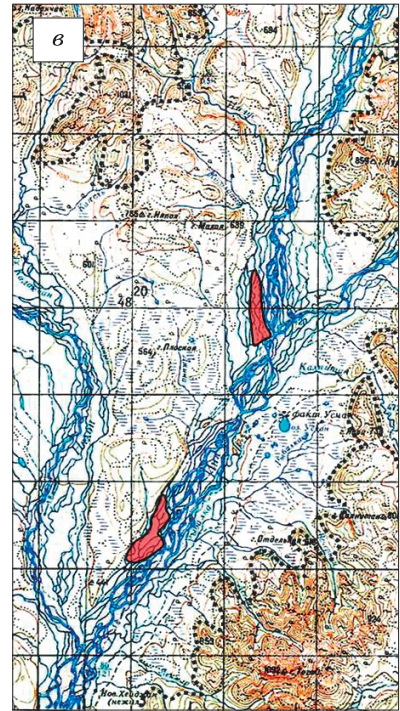
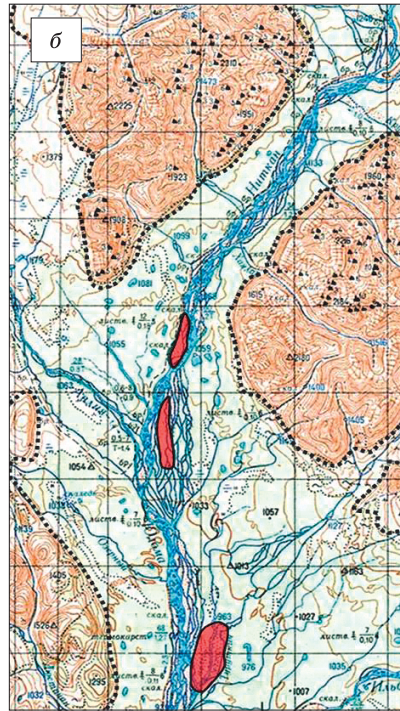
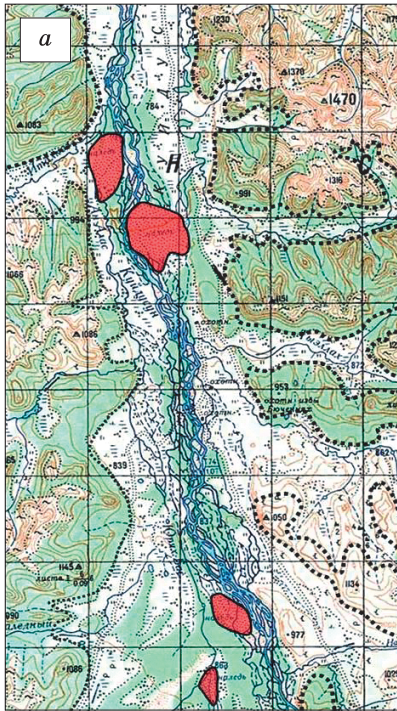
7. На участках формирования наледей-тарынов образуются специфические льдогрунтовые комплексы, создающие крайне опасные ситуации в течение всего года. Верхний ярус комплекса состоит из покровного наледного льда, средний – из слоев сезоннопромерзающего грунта с пластинами и линзами инъекционного льда (см. рис. 2, в; 5, з), а нижний ярус – из многолетнемерзлых или талых водонасыщенных горных пород. Зимой на наледных полянах происходит площадное вертикальное поднятие грунтов и льда в среднем до  $0.5\text{--}1.0 \text{ м}$ , а летом их опускание на ту же величину. Ежегодное гидротермическое движение рыхлых отложений вызывает их разрыхление, перемешивание, резко снижает несущую способность.

8. На месте формирования родниковых наледей происходит трансформация структуры русловой сети: русло реки разбивается на ряд мелководных ветвящихся протоков, которые ежегодно смещаются относительно друг друга, создавая сетчатый рисунок наледной поляны (рис. 6, а–в). Прирост русловой сети, приходящийся на одну наледь, в среднем увеличивается от  $3.5 \text{ км}$  в горах юга Восточной Сибири до  $11.4 \text{ км}$  на плато Путорана и  $23 \text{ км}$  в Верхояно-Колымской горной стране и на Чукотке. Суммарный прирост гидрографической сети в области сплошной и прерывистой мерзлоты ( $F = 7.6 \text{ млн км}^2$ ) оценивается в  $690 \text{ тыс. км}$ . Летом на месте наледей-тарынов часто образуются эфемерные льдогрунтовые острова (см. рис. 6, з), формируются осушенные безрусловые поверхности наледных полей или мелководные озера сложной конфигурации (см. рис. 6, д). Сложная структура и ярко выраженная динамика русловой сети определяют температурный режим, конфигурацию и изменчивость мерзлых горных пород и таликовых зон, создают крайне неблагоприятные условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

9. Размеры наледей меняются год от года, при этом ледяные поля способны распадаться, полностью исчезать или, наоборот, расширяться, охватывая значительную часть прилегающей территории. Многолетняя изменчивость наледей не зависит от их размеров. Установлена короткопериодная циклическая изменчивость объема родниковых наледей продолжительностью от  $3\text{--}5$  до  $10\text{--}11$  лет. Развитие циклов даже для генетически однородных ледяных массивов не совпадает во времени и не зависит от колебания температуры воздуха и количества годовых атмосферных осадков. Данное обстоятельство затрудняет прогноз развития наледных процессов, повышает риск и степень криогенной опасности в наледных речных долинах.

10. Мерзлотно-гидрогеологические особенности наледных речных долин изучены недостаточно. Неизвестно, где и на каких участках под ледяными толщами залегает вечная мерзлота, а где длительное намораживание воды приводит к формированию таликовых зон сложной конфигурации. Предполагаемая зависимость температурного режима и обводненности горных пород от толщины и площади распространения наледей мало обоснована фактическими данными, во многом гипотетична, что не позволяет оценивать состояние криогидрогеологических систем на разных стадиях развития, а также решать конкретные вопросы их взаимодействия с подземными и наземными геотехническими сооружениями.

Приведенная характеристика свидетельствует об исключительно сложных условиях освоения



**Рис. 6. Трансформация русловой сети на участках формирования наледей-тарынов.**

Фрагменты топографических карт Верхояно-Колымской горной страны с границами древних наледных полей (пунктирная линия). Красным цветом показаны массивы наледного льда на дату съемки. Квадрат сетки  $2 \times 2$  км. Долины рек: *a* – Куйдусун, *б* – Юдома, *в* – Иня. Русло наледных рек в теплый период года: *г* – р. Булгут (фото Mekheda Alexander. Panoramio 81393575. – <http://www.panoramio.com/photo/134483594>); *д* – р. Сунтар (фото Юля Устинова. Яндекс.Фотки... 0\_21bd1\_54c451bc\_orig).

наледных участков речных долин. Без преувеличения можно сказать, что здесь затаились ключевые проблемы инженерного мерзлотоведения, решение которых имеет большое значение не только для северной строительной-климатической зоны и гор Южной Сибири, но и для всей области распространения вечной мерзлоты.

### ПРИНЦИПЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОСВОЕНИЯ НАЛЕДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Человек сдвигает горы, создает моря, бороздит просторы Вселенной. Наверное, он может покорить и самую большую Момскую наледь в бассейне Индигирки площадью более  $100 \text{ км}^2$ . Но какой ценой? И нужно ли укрощать стихию, если опасную территорию проще обойти, объехать? Однако все наледоопасные участки Северо-Восточной Азии не обойдешь, их десятки тысяч. Рано или поздно придется осваивать и зоны развития гигантских наледей-тарынов. И тогда жди беды. В этом случае пригодятся разработки ученых и инженеров. Опираясь на современные представления о закономерностях развития родниковых ледяных полей, уже сейчас можно предложить конкретные принципы и пути обеспечения безопасности при грядущем инженерном освоении самых “горячих” участков криолитозоны.

**Принцип I.** Полное устранение наледной опасности посредством ликвидации наледообразующих источников:

а) перемещение зоны разгрузки подземных вод в другое место с помощью подземных каптирующих водоводов, водопонижающих скважин, колодцев, искусственных водовыводящих или поглощающих таликов и пр.;

б) промораживание водоносных горизонтов и подземных каналов стока естественным или искусственным холодом.

**Принцип II.** Снижение наледной опасности путем изменения условий наледообразования (управление процессом растекания и намораживания воды):

а) обеспечение транзита основной части наледообразующих вод в виде регулируемого поверхностного и(или) подземного стока (устройство утепленных каналов, водоводов, траншей, углубление и спрямление русел и др.);

б) ограничение зоны наледообразования устройством валов, заборов, щитов, резервных выемок.

**Принцип III.** Сохранение естественного режима наледообразования:

а) локальное промораживание или протаивание подстилающих горных пород без изменения условий разгрузки подземных вод;

б) оставляем все как есть, ничего не меняя.

Реализация принципов I и II позволяет использовать типовые конструкции инженерных сооружений без их приспособления к изменившимся условиям строительства; принцип III предполагает модернизацию известных или создание

### Рекомендуемые принципы инженерного освоения наледных ландшафтов при различных видах обустройства местности

Мероприятия	Принципы инженерного освоения местности					
	I		II		III	
	а	б	а	б	а	б
Строительство зданий и сооружений городского типа (урбанизация, промстройка)	+	+	+	+		
Укладка трубопроводов			+	+	+	+
Укладка кабелей и других подземных коммуникаций			+	+	+	
Возведение насыпей автомобильных и железных дорог, строительных площадок			+		+	+
Строительство мостов и виадуков			+	+	+	
Устройство автотрасс, ледовых переделов, взлетно-посадочных площадок и полос на льду						+
Строительство аэродромов и ВПП на земляном основании	+	+				
Возведение опор линий связи и электропередачи					+	+
Устройство водозаборов и водоводов			+			+
Строительство плотин, создание водохранилищ					+	+
Устройство складов-холодильников			+	+	+	+
Разработка россыпных месторождений полезных ископаемых	+	+	+	+	+	+
Выемка русловых строительных материалов			+			+
Складирование грузов			+	+		
Устройство хвостохранилищ и отстойников	+	+		+		+
Обеспечение судоходства маломерных судов и лодок			+			

новых конструкций и технологий, адаптированных к сложным условиям освоения наледных ландшафтов. Назначение и использование того или иного принципа потребует тщательного изучения условий наледообразования, сезонной и многолетней динамики наледей и наледообразующих источников, учета прогнозных характеристик наледообразования и процессов изменения мерзлотно-гидрогеологических условий при изменении климата и под влиянием деятельности человека. Очевидно, что разным видам обустройства территории должны соответствовать и разные принципы управления природными процессами (см. таблицу). В любом случае, эффективное использование наледных природных комплексов нуждается в большом количестве информации теоретического, фактологического и методического характера.

Есть основание полагать, что будущее строительство в границах современных наледных ландшафтов принесет новые технические решения на всех стадиях инженерного освоения местности.

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прогноз событий будущего – одна из главных задач науки. Предсказывать грядущее очень важно. Но еще важнее опередить опрометчивые решения сегодня, т. е. сделать так, чтобы общество было готово к возможным катаклизмам, заведомо подготовилось к ним и приняло адекватные меры противодействия. Наледная опасность коварна и жестока. Предупредить, победить стихию можно лишь зная природу ее хитросплетений. А это значит, нужны специальные исследования, наблюдения, эксперименты. Многие ученые и инженеры пытались выяснить глубинную суть наледных явлений, проникнуть в их тайну. Не всем и не всегда это удавалось. Организовано около трех десятков полигонов, на которых проводились режимные наблюдения за наледными процессами продолжительностью от 3 до 30 лет. Забайкалье, Центральная и Южная Якутия, Северный Урал и Чукотка, Алтай и Приморье – сеть стационаров во второй половине XX в. охватывала почти всю криолитозону России. Однако многие вопросы происхождения и динамики родниковых наледей так и остались неосвещенными. Лишь в отдельных точках удалось вскрыть мерзлотно-гидрогеологическую обстановку и проследить ее связь с динамикой наледообразующих источников и намораживанием ледяных массивов [Седов, Швецов, 1940; Толстухин, 1974; Шепелев, 1979, 1987; Yoshikawa et al., 2007]. Причина в том, что исследования проводились несогласованно, без единой программы, по разным методикам, а главное, не сопровождалось изучением подземной, наиболее важной и сокры-

той части наледных систем. Не было бурения, сопряженных мерзлотно-гидрогеологических геофизических, гидроклиматических, гляциологических и многих других необходимых работ. На полигонах обычно измерялась толщина льда, определялись границы ледяных массивов, в лучшем случае фиксировался наледный сток. Этого было явно недостаточно для того, чтобы представить, понять и смоделировать весь цикл явлений, определяющих морфодинамику специфического наземного оледенения.

Наледи-тарыны отражают термодинамическое состояние верхней части земной коры. Они лишь звено в сложном процессе водообмена криогидрогеологических структур разного порядка с внешней средой. В границах наледных полей происходит ежегодное преобразование строения, структуры и свойств рыхлых отложений, обусловленное миграцией подземных вод, промерзанием водоносных трактов и их последующим протаиванием, образованием линз и пластов инъекционного подземного льда, площадным пучением грунтов, статическим и термодинамическим давлением наледных массивов и т. д. [Алексеев, 2015]. Чтобы в полной мере раскрыть механизм этих сложных процессов, нужны комплексные исследования на специальных наледных полигонах-бассейнах. Программа таких исследований разработана и опубликована [Алексеев, Соколов, 1980; Алексеев, 1989], но, к сожалению, не была в полной мере реализована из-за начавшихся социально-экономических потрясений. Сейчас в связи с предстоящим широким освоением арктических и восточных районов нашей страны она вновь стала актуальной. Более того, всестороннее изучение наледей-тарынов приобрело стратегическое значение. От того, как мы организуем опережающий комплекс полевых наблюдений и экспериментов, зависит экологическая безопасность, надежность и экономическая эффективность многих будущих природно-технических систем Севера: автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов, промышленных и гражданских зданий и др. Разработка новой долгосрочной программы изучения наледей подземных вод – неотложная задача ученых-геокриологов и инженеров.

#### Литература

- Алексеев В.Р.** Принципы организации и научно-информационное обеспечение борьбы с наледями // Материалы гляциол. исслед., 1989, вып. 66, с. 133–138.
- Alekseev, V.R., 1989. Organization principles and theoretical support of aufeis mitigation measures. Materialy Gliatsiol. Issled. 66, 133–138.
- Алексеев В.Р.** Наледведение. Словарь-справочник / В.Р. Алексеев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2007, 418 с.
- Alekseev, V.R., 2007. Icing. Glossary and Handbook. Izd. SO RAN, Novosibirsk, 418 pp. (in Russian)

- Алексеев В.Р.** Криогенез и геодинамика наледных участков речных долин // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, вып. 2, с. 171–224. – URL: <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0177> (дата обращения: 10.01.2017).  
Alekseev, V.R., 2015. Cryogenesis and geodynamics of aufeis sites in river valleys. *Geodinamika i Tektonofizika* 6 (2), 171–224. URL: <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0177> (submittal date: 10.01.2017).
- Алексеев В.Р., Соколов Б.Л.** Программа комплексных наблюдений на наледных полигонах // Материалы гляциол. исслед., 1980, вып. 40, с. 148–152.  
Alekseev, V.R., Sokolov, B.L., 1980. Integrated studies at aufeis sites. *Materialy Gliatsiol. Issled.* 40, 148–152.
- Гляциологический словарь** / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.  
Kotlakov, V.M. (Ed.), 1984. *Glossary of Glaciology*. *Gidrometeoizdat*, Leningrad, 528 pp. (in Russian)
- Долгушин Л.Д.** Ледники / Л.Д. Долгушин, Г.Б. Осипова. М., Мысль, 1989, 447 с.  
Dolgushin, L.D., Osipova, G.B., 1989. *Glaciers*. *Mysl*, Moscow, 447 pp. (in Russian)
- Королева Н.А.** Мерзлотно-экологическое картографирование криолитозоны России: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2011, 24 с.  
Koroleva, N.A., 2011. *Permafrost-Environment Mapping of the Russian Permafrost Zone*. Author's Abstract. Candidate Thesis. Moscow, 24 pp. (in Russian)
- Седов В.П., Швецов П.Ф.** О связи наледей в бассейне р. Яны с подземными водами // Сов. геология, 1940, № 12, с. 86–92.  
Sedov, V.P., Shvetsov, P.F., 1940. Relation of aufeis and groundwaters in the Yana River basin. *Sovetskaya Geologiya*, No. 12, 86–92.
- Толстихин О.Н.** Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР / О.Н. Толстихин. Новосибирск, Наука, 1974, 164 с.  
Tolstikhin, O.N., 1974. *Aufeis and Groundwaters in Northeastern USSR*. *Nauka*, Novosibirsk, 164 pp. (in Russian)
- Швецов П.Ф.** Гигантские наледи и подземные воды хребта Тас-Хаяхта / П.Ф. Швецов, В.П. Седов. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1941, 81 с.  
Shvetsov, P.F., Sedov, V.P., 1941. *Giant Aufeis and Groundwaters in the Tas-Khayakhtakh*. *Izd. AN SSSR*, Moscow, Leningrad, 81 pp. (in Russian)
- Швецов П.Ф.** Подземные воды Верхоянско-Колымской горноскладчатой области и особенности их проявления, связанные с низкотемпературной вечной мерзлотой / П.Ф. Швецов. М., Изд-во АН СССР, 1951, 279 с.  
Shvetsov, P.F., 1951. *Groundwaters in the Verkhoyansk-Kolyma Mountain Province and their Patterns Associated with Low-Temperature Permafrost*. *Izd. AN SSSR*, Moscow, 279 pp. (in Russian)
- Швецов П.Ф.** Живая вода в недрах Севера / П.Ф. Швецов. М., Наука, 1981, 86 с.  
Shvetsov, P.F., 1981. *Living Water in the Depths of the North*. *Nauka*, Moscow, 86 pp. (in Russian)
- Шепелев В.В.** Режим источника и наледи Мугур-Тарын в Центральной Якутии // Исследование наледей. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1979, с. 87–97.  
Shepelev, V.V., 1979. Conditions at the Mugur-Taryn aufeis (Central Yakutia) and at its source, in: *Studies of Aufeis*, Institute of Permafrost, Yakutsk, pp. 87–97. (in Russian)
- Шепелев В.В.** Родниковые воды Якутии / В.В. Шепелев. Якутск, Кн. изд-во, 1987, 128 с.  
Shepelev, V.V., 1987. *Spring Waters of Yakutia*. *Knizhnoye Izd.*, Yakutsk, 128 pp. (in Russian)
- French, H.M.** *The Periglacial Environment* / H.M. French. London; New York, Ljngman, 1976, 309 p.
- Hu, X., Pollard, W.** The hydrologic analysis and modeling of river icing growth, North Fork Pass, Yukon Territory, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, vol. 8, p. 279–294.
- Yoshikawa, K., Hinzman, L.D., Kane, D.L.** Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska // *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 112, G04S43, DOI: 10.1029/2006JG000294.

Поступила в редакцию  
23 января 2017 г.