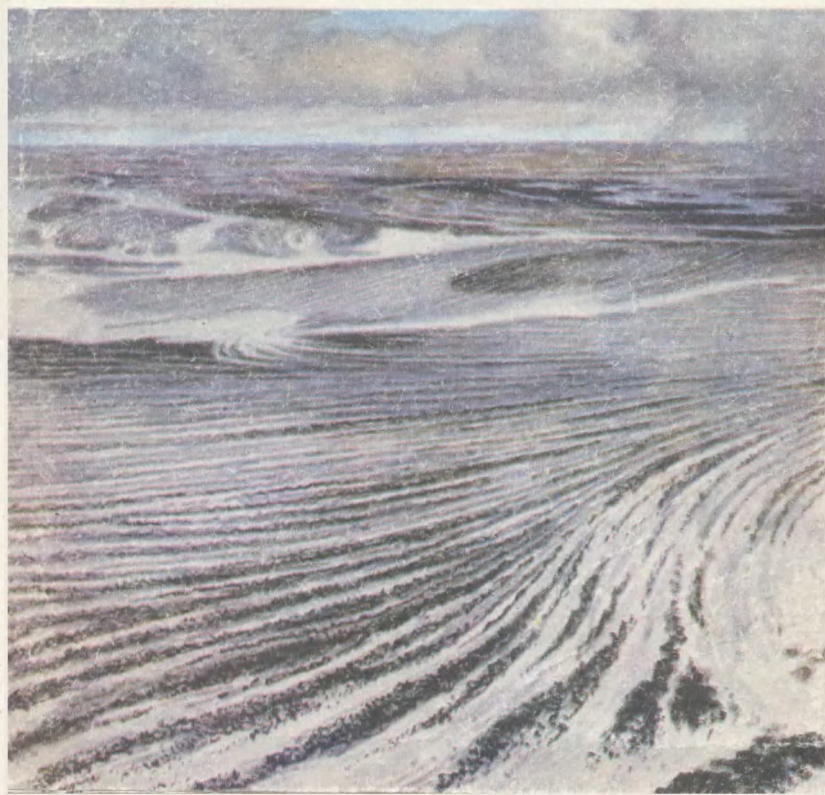


**МР  
И**  
знаний

---

Н. Н. РОМАНОВСКИЙ

# Холод Земли



МИР ЗНАНИЙ

---

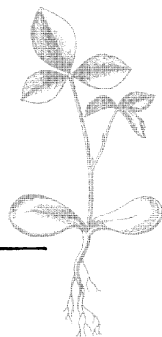
Н. Н. РОМАНОВСКИЙ

# Холод Земли

*Пособие для учащихся*

---

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1980



Scan AAW

ББК 26.3  
Р 69

Рецензенты:

Заслуженный деятель науки РСФСР,  
доктор географических наук,  
профессор МГУ / Г. К. Тушинский. |  
Заведующий отделом института  
географии АН СССР, доктор  
географических наук А. А. Величко.

Р 60601—567 289—80 4306030000  
103(03)—80

ББК 26.3  
552

© Издательство «Просвещение», 1980 г.

*Светлой памяти моего учителя,  
профессора  
Бориса Николаевича Достовалова,  
яркого ученого-мерзлововеда и пре-  
красного воспитателя молодежи,  
посвящается эта книга.*

## ВВЕДЕНИЕ

**М**ихаил Васильевич Ломоносов наряду с большим количеством блестящих научных идей, которым не перестают удивляться, которым следуют и которые развивают благодарные потомки, высказал идею о холодной оболочке Земли, названной позже криосферой. Термин «криосфера» был предложен в 1923 г. А. Б. Добровольским. Он писал, что «лед образует... на земном шаре постоянную оболочку — криосферу. Эта оболочка находится в тесных связях, своеобразных и определенных, с литосферой, гидросферой и атмосферой. У нее есть свой верхний и свой нижний пределы, причем последний очень высоко поднимается вверх в жаркой зоне, постепенно опускаясь по направлению к холодным зонам, где он частично проникает в глубь Земли».

Так вот, о холодной зоне Земли, о той ее части, где температуры литосферы постоянно в течение многих лет или кратковременно в течение зимы имеют отрицательные значения, а вода находится в твердом состоянии, в виде подземного льда, и будет рассказано в этой книге. Холодная часть литосферы — криолитозона, или мерзлая зона земной коры, — изучается наукой мерзловедением (геокриологией).

Мерзлая зона земной коры, или, как часто говорят и пишут, область вечной (многолетней) мерзлоты, обладает рядом особых свойств, в первую очередь наличием в горных породах особого удивительного минерала — льда, который плавится и образуется вновь при температурах, близких к 0 °С. Переходы температуры через 0 °С очень



часто происходят в верхних горизонтах горных пород, вызывая их замерзание и оттаивание, что, в свою очередь, резко изменяет их свойства и вызывает к жизни особые геологические процессы и явления, называемые мерзлотными или криогенными. Эти процессы очень активны. Они преобразуют лицо Земли, приводят к образованию особых, мерзлотных форм рельефа; они влияют на состав и состояние горных пород, накапливающихся и существующих в условиях мерзлой зоны земной коры; они определяют важнейшие черты ландшафтов в зонах тайги, лесотундры, тундры и полярной пустыни; они влияют на особенности произрастания растительности и в то же время сами зависят от нее; они самым активным образом воздействуют на различные сооружения, возводимые человеком в области вечной мерзлоты: дороги и аэродромы, промышленные и гражданские здания, гидроэлектростанции и горнодобывающие предприятия.

Мерзлотоведение как наука возникла совсем недавно. В самостоятельную отрасль знаний она оформилась в 30-х годах на стыке геологии, географии, физики Земли и строительного дела. Основателем мерзлотоведения стал профессор Михаил Иванович Сумгин. Это поистине советская наука, и ее колыбель — наша страна. В последние три десятилетия мерзлотоведение активно развивается не только у нас, но и в США и Канаде. Мерзлотоведением начинают заниматься и ученые других стран: Польши, Монголии, Японии, Аргентины, Швеции, Норвегии, Финляндии. Советская школа мерзлотоведов неизменно занимает с начала возникновения и до наших дней лидирующее положение в этой отрасли знаний. Это показали результаты трех международных конференций по мерзлотоведению, которые состоялись в 1963 г. в США, в 1973 г. в СССР, в Якутске, и, наконец, в 1978 г. в Канаде, в городе Эдмонтоне. Научный престиж советской мерзлотной школы был основан на глубоком и всестороннем развитии теории этой науки и огромных достижениях в практике хозяйственного освоения области вечной мерзлоты, охватывающей север европейской части СССР, большую часть Сибири и Дальнего Востока, горы Памир, Тянь-Шань, Алтай и Кавказ с их исключительными природными богатствами.

Решения XXIV и XXV съездов Коммунистической партии Советского Союза, направленные на освоение этих богатств, вовлечение их в сферу производства, поставили пе-

ред советскими мерзлотооведами ряд важнейших практических проблем, имеющих большое народнохозяйственное значение. Напомним, что разработка нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири, сооружение линий газо- и нефтепроводов, изыскание и строительство Байкало-Амурской магистрали, создание Южно-Якутского территориально-производственного комплекса, призванного освоить богатейшие запасы коксующихся углей и железных руд этого района, строительство Колымской ГЭС и развертывание многих и многих других крупнейших строек происходит в условиях вечной мерзлоты. А эта вечная мерзлота коварна и... очень динамична. Правильное обращение с ней требует глубоких научных знаний, знания теории и практики мерзлотооведения. Но знание не бывает без людей, без знатоков своего дела. Для воспитания «знатоков» необходима подготовка кадров специалистов-мерзлотооведов, способных решать практические и теоретические проблемы, связанные с «холодом нашей Земли».

Подготовка кадров специалистов-мерзлотооведов в нашей стране уже началась. Созданы специализированные кафедры в Московском и Якутском государственных университетах, планируется организация таких кафедр в высших учебных заведениях Иркутска, Читы и других городов Сибири. Специальные курсы по мерзлотооведению введены в качестве обязательных во многих учебных заведениях страны, готовящих инженеров-геологов, гидрогеологов, строителей, горняков и географов. Ведь значительная часть этих специалистов будет работать в северных и восточных областях нашей страны и иметь дело с мерзлотой и мерзлотными явлениями. Но и те из них, кто станет трудиться в западных и даже в южных областях нашей Родины, столкнутся с сезонным промерзанием горных пород — природным явлением, которое ставит перед практикой острые и специфические мерзлотные вопросы. Те же, кто захочет заглянуть в недавнее геологическое прошлое нашей планеты и выберет своей специальностью четвертичную геологию или палеогеографию, вынуждены будут иметь дело с ископаемыми следами вечной мерзлоты, которые встречаются почти на всей территории СССР.

Настоящая книга ставит своей целью рассказать молодым читателям, вступающим в самостоятельную жизнь, о том, что такое вечная мерзлота и мерзлотные явления, о некоторых проблемах, стоящих перед мерзлотооведением,

о приемах освоения области вечной мерзлоты и о тех учебных заведениях, где можно получить эту специальность.

Книга не претендует на охват всех проблем мерзотоведения или систематическое изложение всех основ этой науки. Глубокие и полные знания мерзотоведения сможет получить каждый, кто заинтересуется этой отраслью науки и решит посвятить ей свои силы, свой ум и энергию. И я уверен, что, каждый, выбравший мерзотоведение, не разочаруется в своем выборе, ибо новая развивающаяся отрасль знаний таит в себе главное, что необходимо получить пытливым и энергичным: во-первых, возможность познания неизвестного, еще не изученного никем до тебя; во-вторых, актуальность, жгучую необходимость в приложении новых открытий на практике; в-третьих, романтику дальних дорог и неизученных уголков нашей страны. Их осталось не так уж много, и большая их часть находится в районах, где развита вечная мерзлота.

# Глава I

## ЧТО ЕСТЬ МЕРЗЛОТА

**Н**аверное, в СССР о вечной мерзлоте слышали все. На страницах газет и журналов пишут о трудностях, которые преодолевают строители городов и горняки, добывающие золото в Сибири; на экранах телевизоров мы видим тюменских нефтяников и создателей БАМа, бурящих скважины в вечной мерзлоте и возводящих на ней земляное полотно будущей железной дороги. И, пожалуй, на вопрос, что такое вечная мерзлота, большинство дало бы примерно одинаковый ответ: «Это никогда не оттаивающие мерзлые грунты». Так ли это? И так, и не так.

**Что такое мерзлые и морозные породы.** Под мерзлыми породами большинство исследователей в СССР в настоящее время понимают горные породы, которые содержат в своем составе подземный лед и имеют отрицательную температуру. Количество подземного льда в мерзлой породе может быть различным и изменяться от 1—2 до 100 %. Чистый лед — это тоже горная порода. Распределение льда в породе также бывает самым разным. Например, в мерзлых песках он заполняет поры, превращая сыпучую породу в монолитный твердый песчаник, спаянный ледяным цементом; в глинистых отложениях лед часто образует причудливую систему ледяных прожилок, линзочек, слоев, ледяных шпиров (рис. 1), а в трещиноватых скальных породах, таких, как граниты, известняки, сланцы, лед заполняет трещины. Подземный лед в горных породах создает новые черты их строения — криогенную текстуру мерзлых пород. Во всех случаях наличие льда в породе меняет ее свойства: водопроницаемость, механическую прочность, теплопроводность и др. Подземный лед цементирует поро-



**Рис. 1.** Мерзлые морские глины, разбитые сеткой ледяных прослоев. Для масштаба ручка ножа 10 см. (Фото Г. И. Дубикова.)

ды, делает их более прочными. Особенно сильно увеличивает механическую прочность у рыхлых, как говорят геологи, дисперсных отложений, таких, как галечники, пески, суглинки, глины, а также у торфа. По существу, из малопрочных грунтов, легко деформируемых при небольших нагрузках, они превращаются в монолитные образования, обладающие свойствами скальных пород.

Мерзлые породы, в которых присутствует подземный лед, всегда имеют отрицательную температуру. Но если порода охлаждена ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , т. е. имеет отрицательную температуру, то в ней далеко не всегда содержится подземный лед. Охлажденные горные породы без льда очень широко встречаются в природе в двух основных вариантах: во-первых, когда скальные массивные и безводные породы имеют температуру ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , во-вторых, когда пористые или трещиноватые породы насыщены солеными водами или рассолами, замерзающими только при очень низких отрицательных температурах. В первом варианте мы имеем дело с сухими, так называемыми морозными породами; во-втором — с охлажденными породами, насыщенными отрицательно-температурными водами. Они названы

старейшим советским мерзлотоведом и гидрогеологом Нестором Ивановичем Толстихиным криопэгами («криос» — холод, лед, «пэги» — холодные воды, источники). Для строителей очень важно, что при наличии отрицательной температуры, но отсутствии льда в породе ее свойства при переходе через 0 °C не изменяются сколько-нибудь существенно.

**Какими бывают подземные льды и как они образуются.** Подземные льды, т. е. льды, входящие в состав верхних слоев литосферы, имеют различное происхождение и образуют разнообразные по величине и форме скопления в горных породах. Их можно разделить на две разные по происхождению группы.

К первой группе относятся погребенные поверхностные льды, которые образовались на поверхности земли, озер, рек или морей, а потом уже были погребены накопившимися на них осадками. К числу таких льдов относятся, во-первых, льды ледников и многолетних снежников, образовавшихся в результате накопления и перекристаллизации снега, во-вторых, льды, возникшие при замерзании речных, озерных и морских вод, а также в результате излившихся на поверхность и замерзших подземных вод, так называемых льдов наледей.

Погребенные льды в целом имеют относительно небольшое распространение. Чаще всего они встречаются в горных районах, где в узких долинах многолетние снежники или наледи погребаются у подножия крутых склонов осыпями и обвалами, а также в районах оледенений, когда ледниковый лед перекрывается моренами, состоящими из обломочного, рыхлого материала. В зоне таяния (абляции) ледников такой рыхлый материал вытаивает из ледникового льда и концентрируется на его поверхности. Образуется так называемая абляционная морена, которая перекрывает, захороняет неподвижный, мертвый ледниковый лед. Такой лед в условиях вечной мерзлоты может сохраняться долгое время (рис. 2).

Вторую группу подземных льдов составляют льды, образовавшиеся непосредственно в горных породах. П. А. Шумский подразделяет их на конституционные льды, т. е. образовавшиеся за счет воды, содержавшейся в горных породах при их промерзании, и пещерно-жилые. Пещерно-жилые льды возникают при заливании поверхностных вод в полости и трещины, которые существуют в

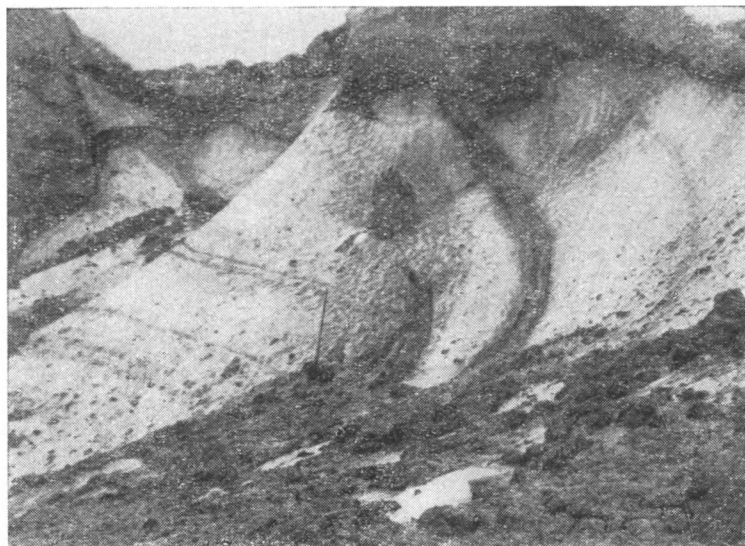


Рис. 2. Погребенный пласт ледникового льда со следами его деформаций на севере Западно-Сибирской равнины. (Фото В. И. Соломатина.)

массивах мерзлых пород. К полостям, в которых может накапливаться пещерно-жильный лед, относятся, например, карстовые пещеры в известняках, а также так называемые термокарстовые полости, возникающие при вытаивании других видов подземных льдов. Трещины и жилы, в которых образуется такой лед, могут иметь тектоническое происхождение, а также возникнуть при уплотнении или усыхании пород. Очень часто трещины образуются при сильном охлаждении зимой мерзлых массивов пород с поверхности. Такие трещины называются морозобойными. В плане они обычно образуют полигональную сеть. Появляются эти трещины зимой, периодически или ежегодно. Весной в них заливается талая снеговая или поверхностная вода, образуя ледяные жилки. В результате многолетнего растрескивания в мерзлых массивах растут льды, которые называются повторно-жильными или полигонально-жильными.

Но, пожалуй, самое большое распространение имеют конституционные подземные льды. В их число входят сле-

дующие основные категории льдов: лед-цемент, сегрегационные и инъекционные льды.

*Лед-цемент* — это мелкие кристаллы льда, заполняющие поры и небольшие трещинки в породе. Лед-цемент образуется в результате замерзания воды в тех пустотах (порах и мелких трещинках), которые существовали до ее промерзания.

*Сегрегационные* (или миграционные) льды образуются во влажных глинистых и пылеватых породах (глинах, супесях, суглинках, алевролитах), когда при их промерзании вода движется, мигрирует в сторону фронта промерзания, образуя в результате этого слои и линзы льда — ледяные шпилы, заключенные в мерзлой глинистой породе, сцементированной льдом-цементом (см. рис. 1).

Расскажу кратко о причинах миграции влаги и образовании ледяных шпиров сегрегационного льда — процесса очень сложных и изученных еще далеко не полно. Вода во влажных дисперсных породах находится под силовым воздействием минеральных частиц. Под влиянием молекулярных сил вокруг частиц породы образуется слой так называемой связанной воды, структура которой изменена по сравнению со структурой гравитационной воды. При этом наибольшее силовое воздействие и изменение структуры испытывают слои воды, непосредственно контактирующие с поверхностью минералов. Известно, что свободная, слабо минерализованная вода переходит в лед при  $0^{\circ}\text{C}$ . Связанная вода замерзает при более низких температурах, тем более низких, чем ближе слои воды находятся к поверхности частиц. Количество связанной воды в немерзлых дисперсных осадках зависит в первую очередь от величины поверхности минеральных частиц. А величина поверхности в единице объема породы увеличивается по мере возрастания их дисперсности, т. е. в ряду: песок, супесь, суглинок, глина. Поэтому глины обладают наибольшим количеством связанной воды. При их замерзании переход воды в лед осуществляется не при нуле градусов, а в диапазоне температур от 0 до  $-5$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах остается только очень незначительное количество незамерзшей связанной воды, находящейся непосредственно на поверхности частиц.

При промерзании пород в естественных условиях образуется граница раздела талого и мерзлого грунта, называемая *границей раздела фаз*. В мерзлой глинистой поро-



де кристаллы льда растут за счет связанной воды, в результате чего уменьшается толщина пленок этой воды на поверхности частиц. Поскольку толщина пленок связанной воды в талой зоне остается прежней, то на границе раздела фаз нарушается равновесие и связанная вода начинает мигрировать из талой зоны в мерзлую, образуя в ней ледяные прослойки, параллельные фронту промерзания. Миграция воды из талой зоны в мерзлую приводит к иссушению талых пород у фронта промерзания и образованию в них трещин усыхания. Эти трещины могут служить местами образования шлиров льда, перпендикулярных фронту промерзания. Таким образом, первым условием миграции влаги при промерзании является нарушение влажностного равновесия, возникновение градиента влажности на границе талого и мерзлого грунта.

При замерзании воды выделяется тепло. Для того чтобы кристаллизация льда из воды могла продолжаться, это тепло должно удаляться, уходить от фронта промерзания в более холодную часть мерзлой породы. Это второе условие миграции влаги — наличие градиента температур и потока тепла, уходящего от фронта промерзания. В естественной обстановке отвод тепла осуществляется чаще всего к поверхности земли, а далее это тепло уходит в атмосферу. В таких условиях в мерзлой части промерзающего массива пород существует градиент температур. При этом чем больше градиент температур, тем сильнее отвод тепла от фронта промерзания, или, говоря другими словами, больше тепловой поток в мерзлой зоне.

Рост прослоя сегрегационного льда происходит в том случае, когда поток влаги, кристаллизующейся и выделяющей тепло, равен теплотоку, отводящему тепло в мерзлую зону. При соблюдении такого условия рост прослоя сегрегационного льда может происходить неограниченно долго, а следовательно, толщина его может быть очень большой. Рост ледяного штира прекращается в двух случаях. Во-первых, когда не происходит отвод тепла, выделяющегося при замерзании воды, во-вторых, когда поток влаги становится меньше теплотока от фронта промерзания. В последнем случае граница промерзания начинает смещаться в сторону талой зоны и в мерзлое состояние переходит порода, имеющая небольшое содержание льда. Такое продвижение фронта промерзания продолжается до тех пор, пока на его границе не восстановится равен-

ство влажностного и теплового потоков. В этом случае вновь начинается образование шлира сегрегационного льда.

Огромное разнообразие природных условий, в которых проходит промерзание глинистых пород, является причиной того, что шлиры сегрегационного льда в породах имеют самые различные формы и размеры. Они бывают выдержанными, с плавными очертаниями, короткими и ломаными; толщина их изменяется от долей миллиметра до нескольких метров, когда прослой льда становятся пластовыми залежами.

Чаще всего основная система шлиров сегрегационного льда как бы повторяет положение фронта промерзания. Это позволяет в обнажениях мерзлых горных пород восстанавливать изменение конфигурации мерзлой толщи в геологическом прошлом.

И еще одно важное замечание. При образовании сегрегационного льда в процессе промерзания в глинистых породах происходит увеличение их объема по сравнению с талым состоянием. Этот процесс называется морозным пучением пород. Различают два случая пучения при сегрегационном льдообразовании.

В первом случае ледяные шлиры образуются только за счет перераспределения влаги, содержащейся внутри промерзающих пород, без ее поступления извне. При этом влажность минеральной части мерзлой породы уменьшается, а само пучение не бывает значительным. Такое промерзание называется промерзанием по способу «закрытой системы». Во втором случае в промерзающий массив возможно поступление влаги извне, например из водоносных горизонтов. Это промерзание по способу «открытой системы». При этом мерзлые породы приобретают льдистость, существенно превышающую их влажность до промерзания. В них образуется очень большое количество сегрегационного льда, прослой которого могут достигать мощности от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Пучение в условиях промерзания открытых систем бывает очень значительным.

*Инъекционные льды* — это третий вид конституционных льдов в мерзлых породах. Они образуются в результате внедрения подземных вод, находящихся под большим напором, или в саму мерзлую толщу, или, чаще всего, по контакту мерзлых и талых пород. Внедряющаяся напор-

ная вода сама создает полости, заполняет их и замерзает под большим давлением, деформируя породы, лежащие в кровле, образуя в них трещины и разрывы.

Инъекционные льды могут формироваться на глубине, в массивах мерзлых пород (рис. 3) и не проявляться в рельефе поверхности земли. В других случаях они образуются вблизи поверхности, что приводит к возникновению бугров пучения и гидроакколитов, о которых пойдет рассказ во второй и третьей главах книги.

**О вечной мерзлоте и криолитозоне.** Вернемся к тому, что такое вечная мерзлота. Вечной или многолетней мерзлотой называются породы, находящиеся в мерзлом состоянии не менее двух-трех лет. На южной окраине области распространения вечной мерзлоты время существования мерзлых пород составляет от нескольких до десятков лет, а на арктическом побережье Якутии и на вершинах горных сооружений Памира и Тянь-Шаня достигает сотен тысяч, а возможно, и миллионов лет.

Многолетнемерзлые толщи пород (условимся называть их для краткости просто мерзлыми) образуются при длительном промерзании пород, насыщенных пресными и слабосоленатыми водами. В этом случае их нижняя граница — подошва мерзлой толщи — совпадает с нулевой геоизотермой, т. е. поверхностью, где температура пород равна  $0^{\circ}\text{C}$ . Поэтому положение подошвы мерзлой толщи можно определить различными способами: визуально — по керну из скважин, которые проходят специальным способом «в сухую», без промывки водой; по положению нулевой геоизотермы, получаемой в результате измерения температур в скважинах при помощи вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и электрокаротажа в скважинах по резкому изменению электрического сопротивления пород на границе перехода из мерзлого в талое состояние.

В тех случаях, когда многолетнему охлаждению и промерзанию подвергаются породы, насыщенные солеными водами и рассолами, или породы монолитные, нетрещиноватые, не содержащие свободной воды, положение подошвы многолетнемерзлых пород и нулевой геоизотермы не совпадают между собой. Ниже мерзлотной толщи, содержащей подземный лед, появляется вертикальный ярус пород, насыщенных криопэгами или ярус морозных пород. В этом случае советские ученые выделяют особую зону

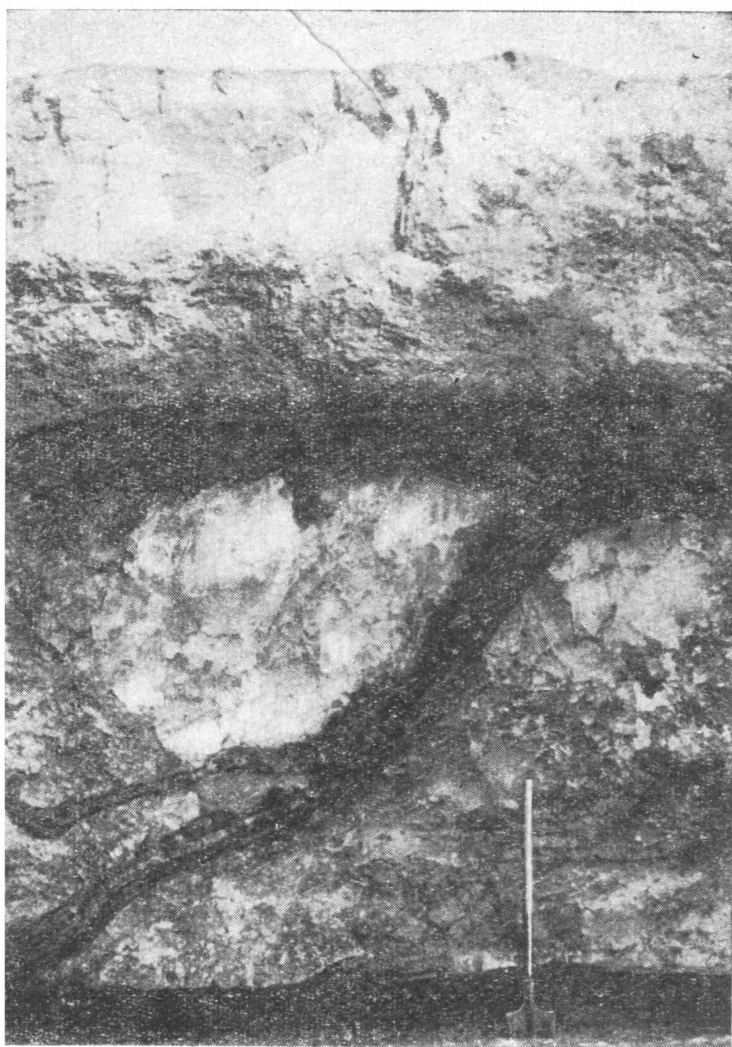


Рис. 3. Залежь инъекционного льда в промерзших отложениях озера Кара-Куль на Памире. (Фото Н. Е. Ермолина.)

охлаждения в земной коре — криолитозону, нижняя поверхность которой определяется положением нулевой геоизотермы. Криолитозона может состоять из ярусов мерзлых, морозных и насыщенных криопэгами пород, находящихся в различных сочетаниях и имеющих разную мощность.

Американские и канадские исследователи криолитозону отождествляют с понятием «вечная мерзлота» (permafrost) — постоянный холод, мороз, а грунты с отрицательной температурой считают вечномерзлыми (permafrost ground).

Мерзлые толщи обычно залегают на очень небольшой глубине, непосредственно ниже слоя, который ежегодно оттаивает летом. Этот слой называется слоем сезонного оттаивания отложений. Мощность сезонноталого слоя изменяется от 2—3 м до 20—30 см, а его подошва является одновременно верхней поверхностью мерзлой толщи. В ряде случаев над верхней поверхностью мерзлой толщи существует слой постоянно талых пород, которые только сезонно промерзают зимой на некоторую глубину. Если подошва слоя зимнего промерзания не достигает верхней поверхности мерзлой толщи, не сливается с ней, то такая мерзлота называется несливающейся. Если мощность талой кровли над мерзлой толщей превышает на значительных по площади пространствах первые десятки метров, то такую мерзлую толщу можно назвать реликтовой, сохраняющейся как остаток (реликт) былой, более холодной эпохи (рис. 4).

Реликтовые мерзлые толщи широко распространены, например, на Западно-Сибирской равнине. Они вскрыты глубокими скважинами значительно южнее современной границы мерзлых толщ, развитых с поверхности к северу от нее. В широкой полосе, достигающей нескольких сот километров, реликтовые мерзлые толщи отделены от современных талыми породами, мощность которых составляет от 20—30 до 100—150 м. Таким образом, здесь существуют двухслойные мерзлые толщи: верхняя современная и нижняя реликтовая, разделенные горизонтом талых пород. В последние годы такие же двухслойные реликтовые мерзлые толщи стали известны и на севере европейской части СССР.

Где и как распространена мерзлота. Выступая перед слушателями, не приобщенными к проблемам мерзлото-

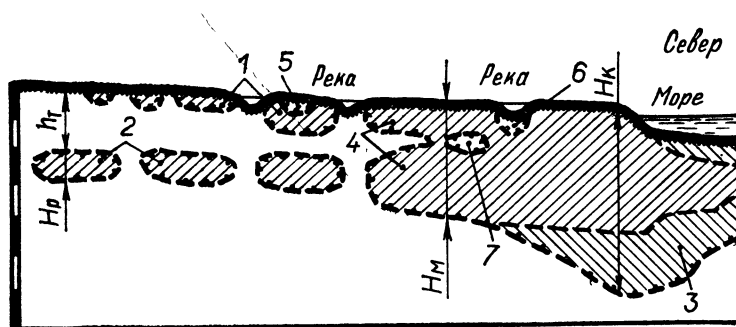


Рис. 4. Схематический меридиональный геокриологический разрез, показывающий изменение распространения мерзлых толщ, криолитозоны и таликов: 1 — современные многолетнемерзлые породы; 2 — реликтовые многолетнемерзлые породы; 3 — охлажденные ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , насыщенные криопэггами породы; 4 — двухслойная мерзлая толща; 5 — несдвигающаяся мерзлота; 6 — несквозной талик под рекой; 7 — внутримерзлотный талик;  $H_m$  — мощность мерзлой толщи;  $H_k$  — мощность криолитозоны;  $H_p$  — мощность реликтовой мерзлой толщи;  $h_k$  — мощность талой кровли над реликтовой мерзлотой.

ведения, всегда хочется начать с риторического вопроса: «А знаете ли вы, какая часть Советского Союза занята вечной мерзлотой?» Этот нехитрый ораторский прием помогает завоевать внимание аудитории и добиться ее почтительного отношения к науке о мерзлых породах — мерзлотоведению. Ведь на половине нашей Родины распространены многолетние мерзлые толщи горных пород, а на двух третях другой половины имеет место глубокое сезонное промерзание, вызывающее к жизни различные мерзлотные процессы и явления. А последствия этих процессов и явлений необходимо учитывать при строительстве дорог и аэродромов, закладке фундаментов зданий и коммуникаций. Сезонная мерзлота — это тоже объект изучения мерзлотоведов.

Вечной мерзлотой, помимо СССР, заняты север Канады и США, высокогорные районы Центральной Азии и Южной Америки. Мерзлота развита даже в жаркой Африке, на вершине горы Килиманджаро. На ледяном континенте Антарктиды и в Гренландии в вечно мерзлом состоянии находятся не только свободные ото льда участки земли, но и породы под краевыми частями ледниковых покровов.

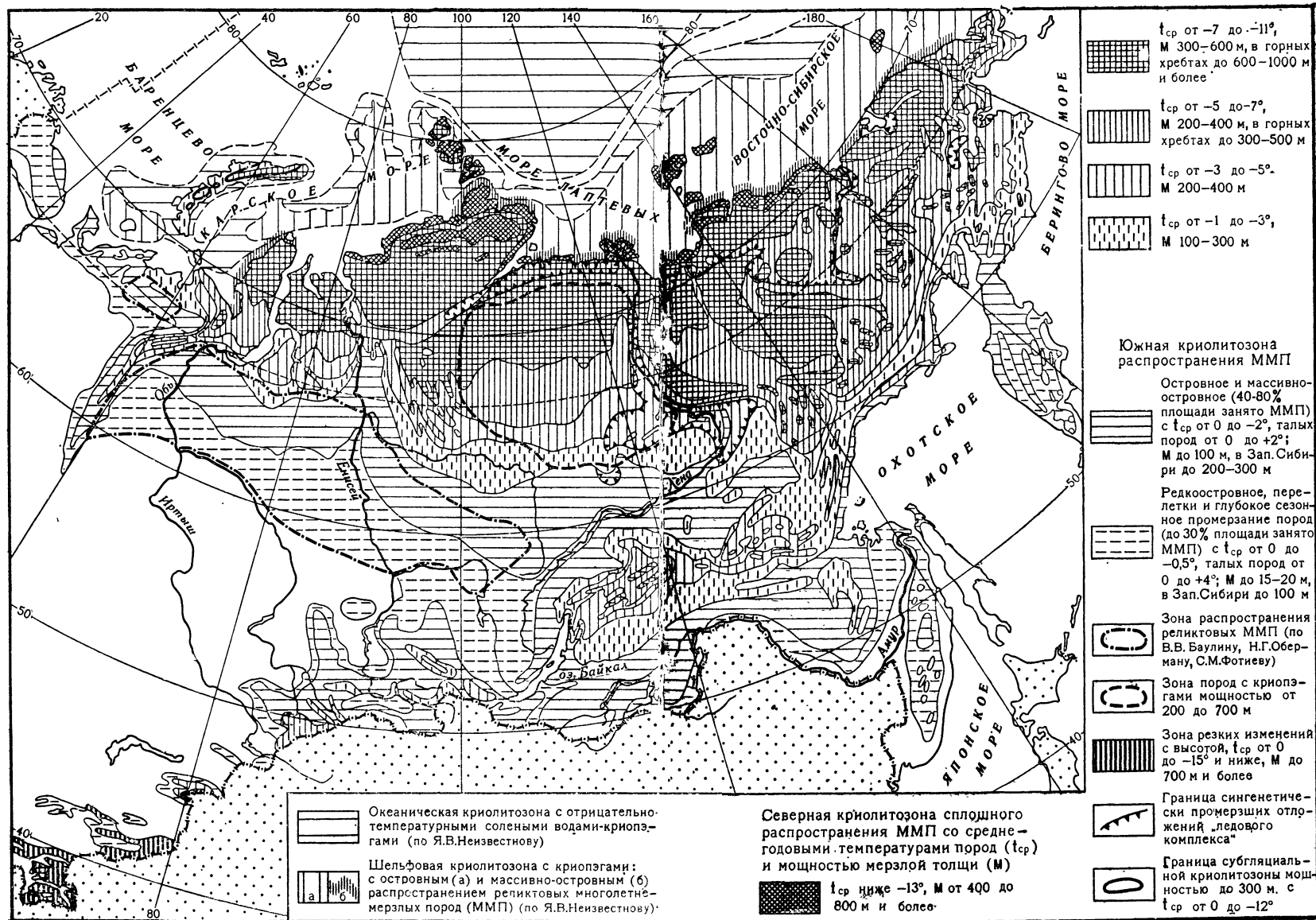


Рис. 5. Карта криолитозоны СССР (составлена

К. А. Кондратьевой, под редакцией В. А. Кудрявцева).

Всего на территории земного шара примерно 25 % суши постоянно находится в мерзлом состоянии. А в эпохи великих оледенений и похолоданий климата площадь, занятая вечной мерзлотой, увеличивалась чуть ли не вдвое. При этом мерзлота оставила глубокие следы в горных породах и рельефе, следы, напоминающие о царстве холода и льда в совсем недалеком геологическом прошлом на территории стран Центральной и Западной Европы, в центральных районах европейской части СССР, на севере США и на юге Канады, т. е. в тех районах, где сейчас господствует умеренный и даже теплый климат. Добавим к сказанному, что на обширных пространствах шельфа Северного Ледовитого океана также распространены реликтовые мерзлые толщи, образовавшиеся при недавнем (в геологическом понимании) затоплении арктических низменностей морем. Распространение мерзлоты на арктическом шельфе изучено еще недостаточно, хотя в последнее десятилетие исследованию этого вопроса уделяется все большее внимание как в СССР, так и в США и Канаде. Кроме того, на большей части акватории Ледовитого океана придонные слои воды имеют отрицательную температуру, в силу чего породы дна на некоторую глубину тоже охлаждены ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и входят в океаническую криолитозону.

На территории суши многолетнемерзлые горные породы имеют разное распространение по площади. Наглядное представление об этом может дать карта криолитозоны Советского Союза (рис. 5). На карте видно, что вблизи южной границы распространения мерзлоты многолетнемерзлые толщи образуют отдельные, разрозненные небольшие острова. К северу площадь этих островов увеличивается. Постепенно они переходят в сплошные массивы, где талые породы встречаются только под озерами, в долинах крупных рек, да еще по разрывам в земной коре — тектоническим нарушениям, по которым циркулируют потоки подземных вод. Это территория распространения сплошных мерзлых толщ, где площади таликов не превышают 5 %, а иногда составляют только доли процента. Если для жителей Европы вечная мерзлота кажется удивительным, непривычным явлением — природным феноменом, то для тех, кто работает на севере Сибирской платформы, в горах Верхоянья или на Таймыре, феноменальным явлением становятся островки талых пород — талики, сохраняющие



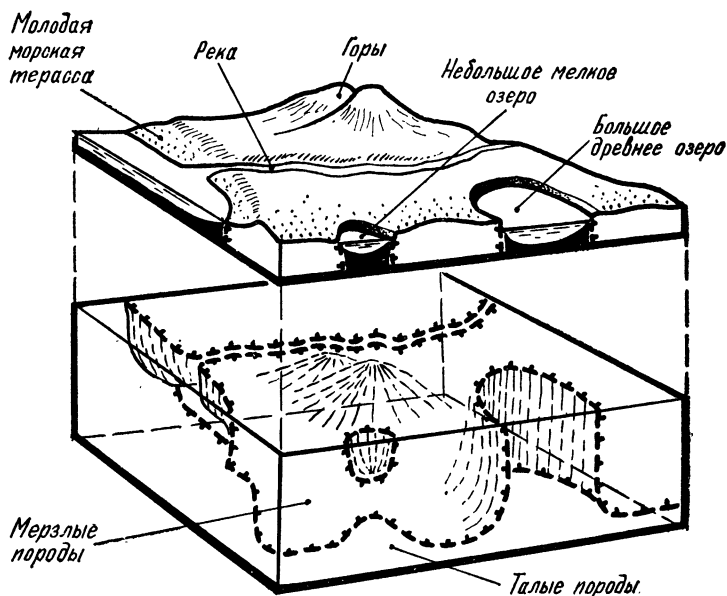


Рис. 6. Блок-диаграмма, показывающая условия залегания и изменение мощностей мерзлых толщ и таликов в зависимости от рельефа и водоемов (по А. Лахенбруху с изменениями).

еся главным образом под воздействием поверхностных или подземных вод в этом суровом царстве промерзшей земли.

В южной части области многолетнемерзлых пород талики чаще всего пронизывают мерзлые толщи на всю мощность, насквозь; они так и называются сквозными. В северной половине этой области все чаще талики становятся несквозными. Под озерами, особенно небольшими и мелкими, существуют несквозные талики, ограниченные с боков и снизу мерзлыми толщами водонепроницаемых пород. Такие талики имеют форму чаши, и мерзлотоведы обычно говорят о них как о *чашах протаивания*. Под реками несквозные талики имеют форму желобов, иногда непрерывных, а иногда разобщенных между собой. Там, где глубокие плесы, не промерзающие насквозь, сменяются перекатами, на которых русловые отложения протаивают только сезонно, несквозные талики представляют собой серию ванн, разобщающихся зимой. Под несквозными под-

озерными и подрусовыми таликами нижняя поверхность мерзлой толщи обычно залегает на меньшей глубине, как бы зеркально, в несколько сглаженном виде повторяя конфигурацию верхней поверхности мерзлой толщи (рис. 6).

**Что мы знаем о мощностях мерзлоты и криолитозоны.** Мощности мерзлых толщ и криолитозоны изменяются в больших пределах: от 3—4 м до 1,5 км. В настоящее время наибольшая мощность криолитозоны зафиксирована в Северо-Западной Якутии. Здесь, на южном склоне Анабарского кристаллического щита, нулевая температура по замерам в скважине была установлена на глубине 1450 м.

В Северном Забайкалье, в наиболее высокой части хребта Удакан, мощность криолитозоны в скальных слаботрепциноватых породах составляет 1200—1300 м. Несомненно, такие мощности не являются предельными ни для Сибирской платформы, ни для горных районов. В высокогорных районах Тянь-Шаня и Памира можно ожидать, что криолитозона имеет мощность до 2,5—3 км.

Законы изменения мощностей мерзлых толщ и криолитозоны носят сложный характер. Мощности криолитозоны зависят от многих причин: от условий и периода промерзания, от геологического строения и гидрогеологических условий территории, от высотной поясности и широкой зональности.

На одной и той же широте мощности криолитозоны и ее строение сильно зависят от геологических и гидрогеологических условий. Так, в сильно обводненных (в талом состоянии) отложениях мощность мерзлоты будет меньше, а льдистость мерзлых пород больше, чем в породах, относительно меньше обводненных или безводных. Чем больше при промерзании пород затраты (расход) тепла на образование льда, тем меньше будет мощность мерзлой толщи при условии, что время и температурные условия промерзания одинаковы. Поэтому мощность криолитозоны, часть которой представлена породами, насыщенными незамерзшими криопегами, бывает обычно больше мощности многолетнемерзлых пород со льдом, формировавшихся в аналогичных температурных условиях.

Большое влияние на формирование мощности мерзлых толщ оказывает влияние потока тепла из недр Земли. В геологических структурах с повышенным теплотоком из недр мощности мерзлых толщ меньше, чем в структурах, сходных по составу и условиям промерзания пород,

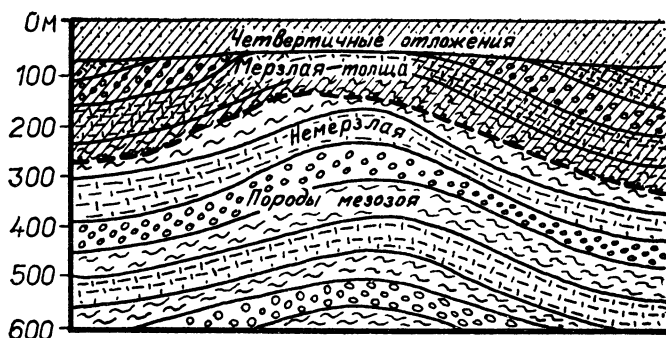


Рис. 7. Уменьшение мощности мерзлой толщи в сводовой части антиклинальной складки.

где поток тепла относительно меньше. Повышенные теплотокеты характерны, например, для тектонических впадин байкальского типа, приуроченных к байкальской рифтовой зоне. По сравнению с ними в тектонических впадинах забайкальского типа теплотокеты меньше, а мощности мерзлых толщ при сходных условиях на поверхности относительно больше. Величина теплотокетов из недр Земли влияет и на значение геотермических градиентов, и на геотемпературное поле в мерзлых толщах и подстилающих талых горных породах.

Величина тепловых потоков даже в пределах одних и тех же крупных геологических структур неодинакова и изменяется в зависимости от условий залегания пород, особенностей и интенсивности движения подземных вод и др. Поэтому мощности мерзлых толщ за счет локальных изменений величин потока внутреннего тепла вследствие его перераспределения по площади могут претерпевать заметные изменения.

В качестве примера расскажу об одной особенности залегания мерзлых толщ в синклинальных и антиклинальных структурах, характерных для осадочного чехла платформ и тектонических межгорных впадин (рис. 7). Советскими геофизиками, занимавшимися исследованием нефтяных и газовых структур вне районов вечной мерзлоты, было достаточно давно установлено, что в осевых частях антиклинальных структур, к которым бывают приурочены скопления нефти и газа, тепловые потоки больше, чем

на их крыльях. В синклинальных структурах картина обратная.

Эту закономерность применительно к условиям формирования мерзлых толщ применил в 1950 г. В. А. Кудрявцев. В результате он пришел к важному выводу, что в ядрах антиклиналей мощность мерзлоты должна быть меньше, а синклиналей больше по сравнению с участками горизонтального залегания пластов. Следует сказать, что открытие этой закономерности (применительно к проблеме поисков нефти и газа) имело не только научное, но и важное практическое значение. Изучение тектонических структур в труднодоступных, удаленных районах Западно-Сибирской низменности, заболоченных и занятых озерами, является делом очень сложным, требующим огромных усилий геологов и геофизиков. Наличие антиклинальных структур, потенциально являющихся коллекторами нефти и газа, устанавливают путем проведения гравиметрической и других видов съемки с самолетов. Но определить точное положение таких структур на местности можно только при наземных геофизических исследованиях, результаты которых контролируются, или, как говорят геологи, заверяются, скважинами. Бурение глубоких скважин — дело дорогое и технически сложное. А в северных районах Западной Сибири это усугубляется полным бездорожьем. Трудно и дорого завозить мощные буровые станки, колонны буровых труб, снабжать буровые бригады горючим, снаряжением, оборудованием и питанием. А ведь только при помощи скважин можно установить, есть ли в структуре газ или нефть. При этом скважины должны быть пройдены в сводовой части структуры, где наиболее вероятно скопление этих полезных ископаемых. Правильно расположить скважину — это значит быстро и минимальными затратами решить основную геологическую задачу: найти полезное ископаемое. Вот здесь-то и помогла установленная мерзлотооведами закономерность различия мощностей мерзлых толщ в разных частях структур.

Нужно сказать, что на Западно-Сибирской низменности в мерзлом состоянии находятся песчаные и глинистые отложения, обладающие в мерзлом состоянии значительной льдистостью и высокими значениями электрических сопротивлений. Те же отложения, насыщенные пресными и солоноватыми водами, в талом состоянии имеют низкие значения электрических сопротивлений. В силу

этого геофизики относительно легко определяют мощности мерзлой толщи при помощи вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). По минимальным значениям мощностей мерзлых толщ геологи устанавливают положение тектонического свода, а затем уже проектируют и бурят глубокие разведочные скважины. Рациональное размещение скважин существенно повысило эффективность разведки, сократило объемы бурения и сроки проведения работ и дало большую экономию средств.

**О температурном режиме мерзлых толщ.** Важнейшей характеристикой многолетнемерзлых пород является их температурный режим. В верхних горизонтах пород температура их меняется в течение года. Весной и летом верхние слои породы постепенно нагреваются. Когда температура становится  $0^{\circ}\text{C}$ , начинается сезонное протаивание отложений, которое в южных районах достигает максимума в октябре, а в северных — в августе. Теплая волна распространяется по глубине вниз, постепенно затухая. В конце лета — начале осени начинается сначала охлаждение, а затем и промерзание оттаявших пород сверху. Полное промерзание оттаявшего летом слоя в Арктике происходит очень быстро, за месяц — полтора, а в Забайкалье оно оканчивается только в марте — апреле. Затем начинается охлаждение подстилающего слоя мерзлой породы.

Все колебания температуры пород, происходящие в течение года, так называемые сезонные колебания, постепенно затухают и на некоторой глубине температура пород остается относительно неизменной в течение года. В мерзлотоведении такой глубиной считается поверхность, где колебания температур не превышают  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Она называется глубиной нулевых годовых амплитуд температур или подошвой слоя годовых колебаний. Температура на этой глубине считается среднегодовой температурой пород —  $t_{\text{ср}}$  (рис. 8). Подошва слоя годовых колебаний находится на разной глубине. При  $t_{\text{ср}}$  пород, равной  $0^{\circ}\text{C}$ , она совпадает с глубиной сезонного оттаивания; чем ниже среднегодовые температуры пород, тем на большую глубину проникают годовые колебания температур, считая от подошвы сезонноталого слоя (рис. 9).

Среднегодовые температуры горных пород в области многолетней мерзлоты изменяются обычно в пределах от 0 до  $-15^{\circ}\text{C}$ , что достаточно отчетливо видно на карте криодитозоны СССР (см. рис. 5). В экстремальных клима-

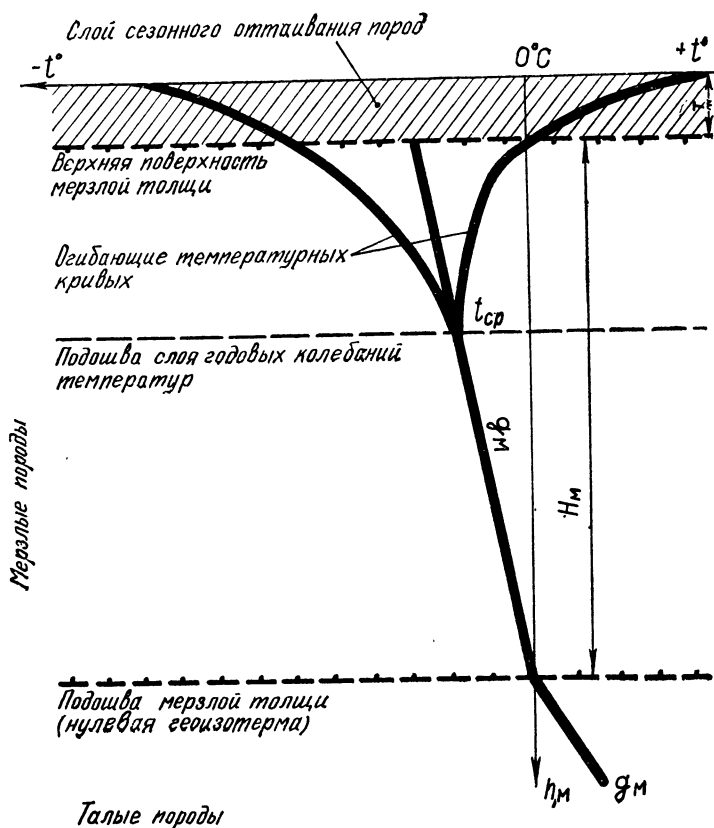


Рис. 8. Температурный разрез мерзлой толщи:  $H_m$  — мощность мерзлой толщи;  $t_{ср}$  — среднегодовая температура пород на подошве их сезонных колебаний;  $g_m$  — геотермический градиент в мерзлой толще;

тических условиях в высокогорных районах Памира, Гималаев, Тянь-Шаня или в Антарктиде среднегодовые температуры пород могут иметь существенно более низкие значения. Наблюдается общая тенденция понижения температур, во-первых, с юга на север (широтная мерзлотно-температурная зональность) и, во-вторых, в горных районах с повышением абсолютной высоты местности (высотная мерзлотно-температурная поясность).

Широтная мерзлотная зональность и вертикальная по-ясность в изменении среднегодовых температур пород про-является в природе достаточно сложно и может быть уста-новлена только при анализе температурного режима пород на больших территориях. В пределах небольшого района, буквально на соседних участках, температуры пород раз-личаются на несколько градусов. Связано это с тем, что температурный режим пород формируется под влиянием многих факторов природной среды. К ним относятся расти-тельные покровы, состав и влажность пород, такие особен-ности климата, как его континентальность, общее количе-ство выпадающих осадков, температуры жидких осадков, мощности и плотности снега и его распределение по пло-щади и т. д. В естественной обстановке эти факторы силь-но варьируют, находятся в самых разнообразных сочета-ниях. Поэтому в пределах одного района иногда наблю-дается очень широкий диапазон изменения температур пород. Например, в Южной Якутии, на территории Чуль-манского угленосного бассейна, где сейчас создается Юж-но-Якутский территориально-производственный комплекс, среднегодовые температуры мерзлых пород изменяются от 0 до  $-4$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ , а талых — от 0 до  $+2$ ,  $+3^{\circ}\text{C}$ . В силу это-го мерзлотная зональность проявляется как тенденция изменения температур пород на широких площадях при движении с юга на север.

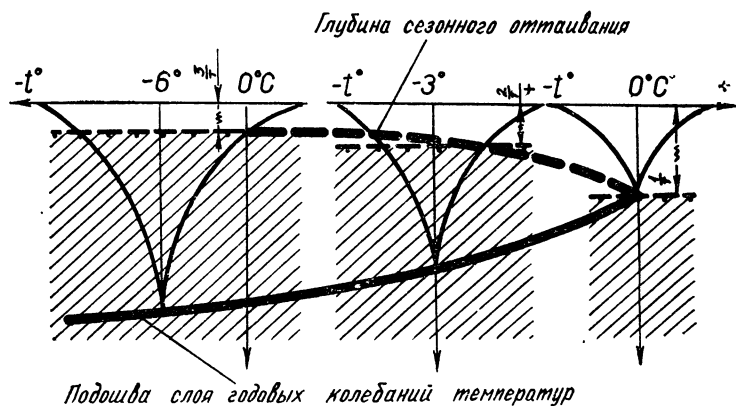


Рис. 9. Изменение глубины сезонного оттаивания пород и зале-гание подошвы слоя годовых колебаний температур при пони-жении  $t_{\text{ср}}$  пород.

Среднегодовые температуры пород являются важным, но не единственным показателем температурного режима пород. Ниже подошвы слоя годовых колебаний температуры мерзлых пород обычно повышаются, достигая у подошвы мерзлоты (или криолитозоны)  $0^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, в мерзлой толще существует градиент температур (геотермический градиент), изменяющийся в разных районах от  $1^{\circ}$  на 20 м до  $1^{\circ}$  на 100 м (см. рис. 8). В достаточно мощных неоднородных по составу толщах градиент температур может меняться по разрезу при изменении теплопроводности пород.

**О динамике температурного режима мерзлых толщ.** Геотермический градиент является осью температурных колебаний с разными периодами: годовых, многолетних, вековых и т. д. Такие колебания температур, имеющие ритмический характер и обусловленные главным образом причинами космического характера, происходят в атмосфере и давно уже изучаются климатологами. Советскими и зарубежными учеными установлены колебания с периодами в 3—6, 11—13, 22—26, 80, около 300 лет, 1850 лет и т. д. Амплитуды этих колебаний неодинаковы в разных районах, но в целом не выходят за пределы нескольких градусов.

Советским мерзлотоведом В. А. Кудрявцевым было установлено, что такие колебания появляются и в верхних горизонтах земной коры, в том числе в многолетнемерзлых породах. Они сложно накладываются друг на друга, обуславливая динамику температурного режима и мощности мерзлых толщ. В зависимости от мощности мерзлоты, периода температурных колебаний и их амплитуд вызванные ими изменения температур пород могут затухать в пределах мерзлой толщи, влияя только на  $t_{\text{ср}}$  пород и на распределение температур ниже подошвы годовых колебаний, или достигать подошвы многолетнемерзлых пород. В последнем случае такие колебания температур обуславливают движение нижней границы мерзлой толщи вниз или вверх, т. е. многолетнее промерзание или протаивание пород снизу. Следует подчеркнуть, что температурное состояние мерзлых толщ меняется во времени непрерывно. Эти изменения легко прослеживаются в слое годовых колебаний температур путем их измерения в скважинах в течение года. Динамику среднегодовой температуры пород во времени и изменение температурного поля ниже



подошвы годовых колебаний можно установить при помощи многолетних наблюдений в одних и тех же скважинах, рассчитать при помощи формул или смоделировать на различных аналоговых устройствах, зная изменения природных факторов (температуры воздуха, мощности и плотности снега и т. д.).

Температуры пород на глубинах более 30—40 м от поверхности и положение подошвы мерзлой толщи изменяется во времени чрезвычайно медленно. Изменение температур за год на значительных глубинах составляет сотые, тысячные и десятитысячные доли градусов, а сами скважины, в которых ведутся измерения, вносят нарушения, превосходящие эти значения. Кроме того, измерительная аппаратура, установленная стационарно в глубоких наблюдательных скважинах, чтобы не вносить нарушений при ее спусках и подъемах, и эксплуатируемая в суровых климатических условиях, обычно меняет свои параметры во времени — стареет. В течение нескольких лет датчики температур приходят в состояние, когда замеры температуры пород с указанной выше точностью становятся невозможными. Поэтому прямые натурные многолетние наблюдения в скважинах не позволяют пока получать прямых сведений о динамике мерзлых толщ. Наблюдениями фиксируется некоторая условно стационарная (квазистационарная) картина температурного поля, являющаяся результатом динамических процессов, которые привели к ее формированию.

Устанавливаются также физические эффекты, являющиеся следствием динамики температурного поля, такие, как аномально повышенное или аномально пониженное давление подземных вод, неравенство теплоток, входящих к нижней границе мерзлой толщи из недр Земли и уходящих от нее к поверхности. Они косвенно или прямо свидетельствуют о наличии неравновесных состояний и позволяют оценить направления происходящих мерзлотных процессов.

Анализ температурного поля мерзлых толщ горных пород, в том числе среднегодовых температур, распределение температуры ниже слоя годовых колебаний, соотношения теплоток у подошвы мерзлой толщи позволяют установить динамику температур и мощностей мерзлых толщ. Повышение средней температуры мерзлых толщ фиксируется в температурных кривых так называе-

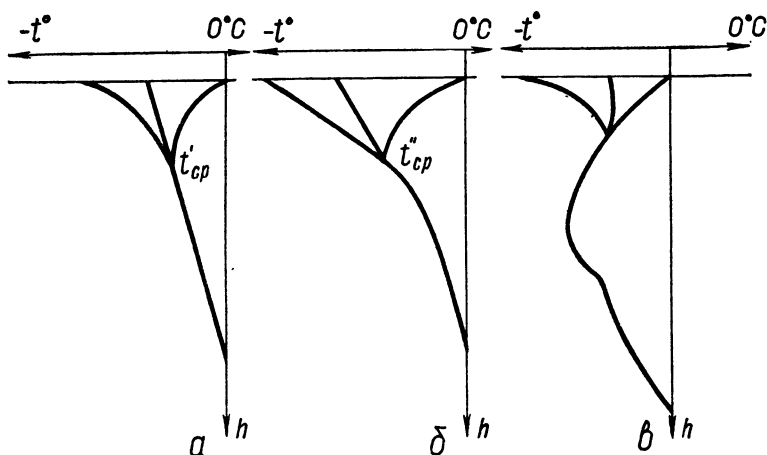


Рис. 10. Температурные разрезы мерзлой толщи: *а* — нормальный, *б* — аградационный, *в* — деградационный.

мого деградационного типа, наличие которых было впервые установлено в конце 20-х годов основоположником мерзлотоведения М. И. Сумгиным в районе станции Скворово Забайкальской железной дороги. Понижение температуры на глубине нулевых годовых колебаний обуславливает появление кривых аградационного типа (рис. 10).

М. И. Сумгин, в течение многих лет собиравший факты о повышении температур мерзлых пород, об отступании южной границы мерзлоты к северу, о разобщении верхней поверхности мерзлых толщ и слоя сезонного промерзания (т. е. о возникновении «несливающейся» мерзлоты), о развитии термокарста вследствие протаивания залежей подземных льдов, выдвинул в начале 30-х годов теорию о современной деградации мерзлоты. По его представлениям, мерзлота оттаивает, уменьшается ее площадь, повышается температура по сравнению с ледниковым временем, когда она имела наибольшее развитие.

Теория деградации М. И. Сумгина была принята далеко не всеми учеными. Против нее выступили известные мерзлотоведы С. Г. Пархоменко, П. И. Колосков, П. Н. Каптерев и Д. В. Редозубов. Они приводили факты новообра-

зования мерзлых толщ во многих районах СССР и кривые температур аградационного типа.

П. Н. Каптеревым были обработаны результаты режимных наблюдений за температурами в скважине, пробуренной в районе станции Сквородино Забайкальской железной дороги, о которой упоминалось выше. Температурные кривые, полученные в этой скважине М. И. Сумгиным, послужили ему основанием утверждать, что температура пород на подошве слоя годовых колебаний здесь выше, чем в нижележащей толще. А это могло, по его мнению, быть только в случае потепления климата. Но какого потепления по сравнению с каким временем? П. Н. Каптерев объяснил повышение  $t_{\text{ср}}$  пород и наличие минимума температур ниже слоя годовых колебаний температур воздуха коротким потеплением климата с периодом 35—40 лет, а не общим длиннопериодным потеплением со времени ледниковой эпохи. Он утверждал, что кратковременное повышение температуры должно смениться аградацией. Дальнейшие наблюдения подтвердили правильность его предвидения: среднегодовая температура у подошвы слоя годовых колебаний начала неуклонно понижаться и, наконец, температурная кривая приобрела сначала нормальный, а затем аградационный характер.

В результате упомянутые выше мерзлотоведы выдвинули в противовес М. И. Сумгину положение об аградационном развитии мерзлоты в настоящее время на территории СССР.

Научным следствием развившейся дискуссии между сторонниками деградационного и приверженцами аградационного направления развития мерзлых толщ было создание В. А. Кудрявцевым современной теории динамики мерзлых толщ, о которой будет сказано специально в четвертой главе.

**Сезонное оттаивание и сезонное промерзание пород.** Рассказывая о многолетнемерзлых толщах и их температурном режиме, мы уже упоминали о том, что мерзлые породы летом оттаивают на некоторую глубину, т. е. над ними формируется сезонноталый слой (СТС). Немерзлые породы к югу от границы мерзлоты и талики в области ее распространения промерзают зимой. В результате этого образуется сезонномерзлый слой (СМС) — сезонная мерзлота. Слой сезонного промерзания и сезонного оттаивания пород многие мерзлотоведы называют *деятель-*

ным слоем, подчеркивая тем, что именно в этом слое происходят наиболее интенсивные процессы замерзания и оттаивания грунтовой влаги, приводящие к образованию и таянию подземного льда, к пучению и осадкам, к процессам физического выветривания пород; здесь наблюдаются максимальные по величине изменения температур и т. д. Однако между сезонноталым и сезонномерзлым слоями существует одно важное различие. Сезонноталый слой образуется над мерзлой толщей за счет тепла, поступающего с поверхности земли летом, а сезонномерзлый слой возникает над талыми породами с нулевыми или положительными температурами при расходе тепла зимой. Сезонноталый слой развит над мерзлой водоупорной толщей, а сезонномерзлый — над талой, обычно водопроницаемой. Это приводит к определенному различию в их влажностном режиме и в процессах, которые протекают в этих слоях.

Слои сезонного промерзания и сезонного протаивания пород, по образному выражению В. А. Кудрявцева, являются «кухней мерзлоты». Они в значительной мере обуславливают температурный режим подстилающих пород. Так, выпадающие жидкие атмосферные осадки, просачиваясь в слой сезонного оттаивания, отдают породам этого слоя наибольшее количество тепла. Поэтому очень важно знать, каков состав пород, слагающих этот слой.

В сезонноталом и сезонномерзлом слоях происходит процесс так называемой температурной сдвижки, открытый В. А. Кудрявцевым. Суть этого важного геофизического явления заключается в том, что среднегодовая температура на поверхности земли не равна температуре на подошве этих слоев, а чаще всего бывает выше. Связано это с тем, что глинистые влажные породы, слагающие эти слои, имеют большую теплопроводность в мерзлом состоянии ( $\lambda_m$ ), чем в талом ( $\lambda_t$ ). Поэтому зимой через замерзший грунт тепло уходит в атмосферу легче, чем поступает в массив пород летом через протаявший слой, обладающий более высоким термическим сопротивлением. В результате при одинаковом в течение ряда лет температурном режиме поверхности земли средняя за год температура поверхности оказывается более высокой, чем у подошвы слоев сезонного промерзания или сезонного оттаивания. Следствием этого является интересный природный эффект: при положительной температуре поверх-

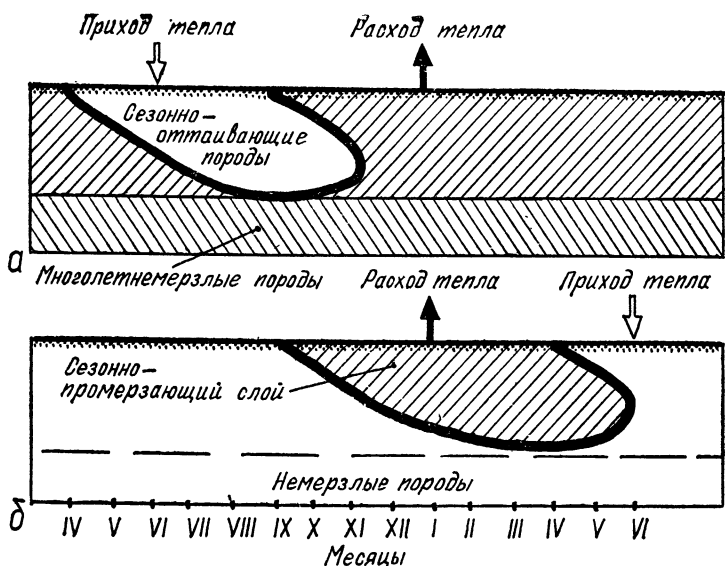


Рис. 11. Ход сезонного оттаивания (а) и сезонного промерзания пород (б) во времени.

ности в некоторых грунтах (торфе, глинах, суглинках), для которых  $\lambda_t < \lambda_m$ , возможно формирование мерзлоты.

Добавим к сказанному, что в сезонноталом и сезонно-мерзлом слоях происходят основные экзогенные мерзлотные процессы. Воздействуя на эти слои, можно изменить ход мерзлых процессов и температурный режим пород. Многие методы и приемы тепловой и водно-тепловой мелиорации мерзлых толщ, призванные изменить режимы оттаивания или промерзания пород, их механические свойства или состояние, воздействуют на состав, влажность или другие характеристики слоев сезонного оттаивания и промерзания.

При мерзлотных исследованиях в глаза бросается несколько важных особенностей слоев сезонного оттаивания и промерзания. Так, глубины сезонного оттаивания непрерывно меняются летом. То же происходит со слоем сезонного промерзания зимой. Поэтому глубина протаявшего или промерзшего слоя, зафиксированная сегодня, через несколько дней будет уже совершенно другой. При этом темпы протаявания или промерзания в разные эта-

пы сезона неодинаковы (рис. 11). Поэтому полученные в теплое время глубины сезонного оттаивания или промерзания приводят к их максимальному значению и оперируют уже этими наибольшими величинами.

Глубины сезонного оттаивания и промерзания (максимальные за год) сами изменяются в широких пределах в зависимости от состава, влажности и температурного режима пород. Наибольшие глубины сезонного оттаивания составляют 4—6 м, сезонного промерзания — 6—8, иногда до 10 м, а минимальные — до нуля. В последнем случае отсутствует сезонное промерзание или оттаивание. Наиболее часто мощности слоев сезонного промерзания и оттаивания изменяются от 2—4 м на юге до 0,3—0,2 м на севере.

Самые маленькие глубины оттаивания свойственны торфам. Далее по возрастанию следуют глины, суглинки, пески, галечники и валуны. Таким образом, чем более грубый состав имеют отложения, тем на большую глубину они оттаивают. Влияние влажности пород весьма значительно и однонаправленно: чем больше влажность, тем меньше глубины сезонного оттаивания (или промерзания) отложений.

Температурный режим пород оказывает сильное, существенное воздействие на глубины сезонного оттаивания и промерзания. Воздействие это, как показали сначала известный мерзлотовед П. И. Колосков, а затем В. А. Кудрявцев, целесообразно оценивать по двум параметрам: по среднегодовой температуре пород и по амплитуде колебаний температур на поверхности земли, сильно зависящей от континентальности климата. Даже неискушенному человеку очевидно, что чем ниже среднегодовая температура пород, тем меньше (при других одинаковых условиях) будет мощность их сезонного оттаивания летом, а в талой области с повышением  $t_{\text{ср}}$  будет уменьшаться глубина сезонного промерзания пород.

Влияние континентальности климата, которую обычно оценивают через величину амплитуды колебаний температур на поверхности земли, не столь привычно, хотя и достаточно понятно. Представьте себе два района с существенно разным климатом и близкими между собой температурами пород. Первый из них — север Кольского полуострова с пасмурным, коротким, холодным летом и длинной, многоснежной и относительно мягкой зимой.

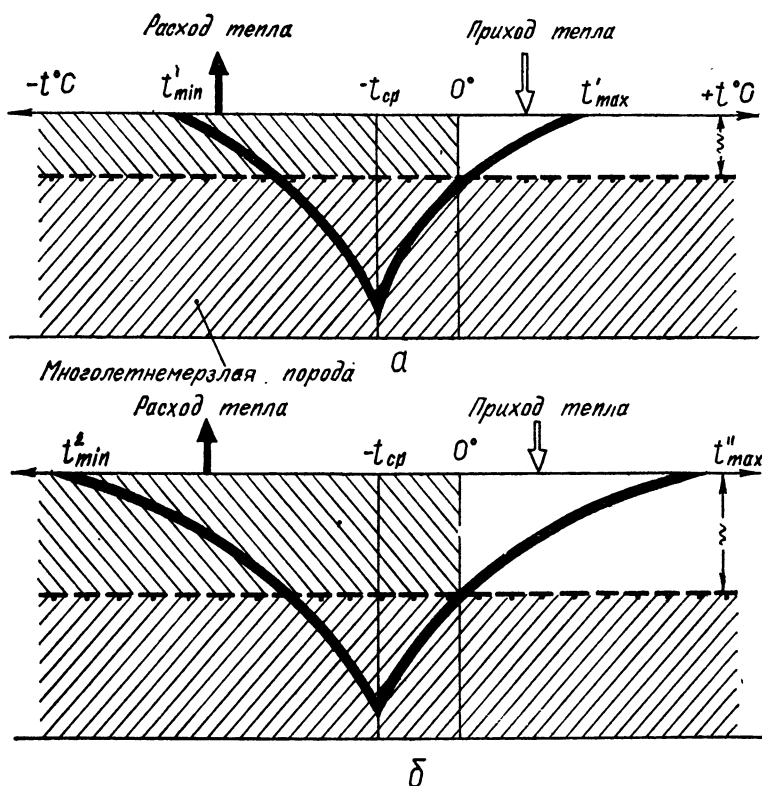


Рис. 12. Различия в глубинах сезонного оттаивания отложений в условиях морского (а) и континентального (б) климатов.

Климат здесь суровый, морской. Второй район — Центральное Забайкалье, для которого характерны очень суровая, малоснежная зима и жаркое, довольно сухое лето. Климат тоже суровый, но резко континентальный. В том и другом районах температуры пород близки к  $0^{\circ}\text{C}$ .

На Кольском полуострове летом в породы поступает мало тепла, но немного его и расходуется зимой благодаря наличию мощного слоя снега, предохраняющего породы от выхолаживания. В результате породы протаивают сезонно на небольшую глубину: торфяники — до 50—70 см, суглинки — до 0,8 м (рис. 12).

В Забайкалье благодаря жаркому лету поступление тепла в породы весьма велико и они оттаивают на боль-

шую глубину. Зимой при наличии маломощного снега происходит их сильное выхолаживание и промерзание. Поэтому влажные торфяники протаивают здесь до 1,2—1,5 м, а более сухие пески и суглинки — до 2—3 м и даже более.

Среднегодовые температуры пород одинаковые в двух этих районах, а амплитуды колебаний температур, или, как обычно говорят, континентальность типов сезонного оттаивания и промерзания пород, различные. Поэтому резко различаются и глубины оттаивания.

Еще большие различия глубин в районах с морским и континентальным климатом характерны для слоев сезонного промерзания отложений. Связано это с резким различием влажности пород на талых массивах, особенно сложенных песками. В условиях морского климата влажность весьма большая, в сухих континентальных районах — незначительная.

Таким образом, глубины сезонного оттаивания пород при одинаковом их составе и влажности уменьшаются при понижении их среднегодовых температур с юга на север и увеличиваются при повышении континентальности от районов, испытывающих сильное воздействие морей, к центральным частям континентов.

Изучая количественное влияние таких факторов, как мощность и плотность снежного покрова, различных видов растительных покровов, теплофизические свойства отложений и влияние их влажностного режима на температурный режим пород, исследователи получают действенное оружие в управлении глубинами сезонного оттаивания и промерзания пород и такими криогенными процессами, как пучение, солифлюкция, морозобойное растрескивание и др. Появляется возможность путем проведения простых инженерных мероприятий: снегозадержания или удаления снега, дренажа или обводнения пород, замены грунтов и других способов — регулировать глубины оттаивания или промерзания и противодействовать развитию нежелательных процессов и явлений.

Поясним сказанное примерами.

В районах, где породы промерзают сезонно, линии коммуникаций закладывают ниже подошвы сезонномерзлого слоя, с тем чтобы предохранить водоводы от замерзания и не удорожать их строительство созданием теплоизоляции. В континентальных условиях, где глубины се-



зонного промерзания превышают 2—3 м, прокладка канав такой большой глубины становится дорогостоящим и технически сложным мероприятием. Снизить стоимость работ можно, уменьшив глубину канав, а для этого нужно сделать меньше глубину сезонного промерзания. И сделать это довольно просто, учитывая закономерности, о которых шла речь выше. Уменьшение глубин сезонного промерзания можно достигнуть здесь простым обводнением пород этого слоя или снегозадержанием. Несложные мероприятия по заболачиванию поверхности помогают уменьшить глубины заложения водоводов, тем самым резко сократить объемы земляных работ и стоимость прокладки коммуникаций. Но, проделав такого рода мелиоративные мероприятия, следует строго регламентировать правила эксплуатации участков с неглубокой закладкой водоводов, не допуская утаптывания снега, дренажа грунтов и т. д.

Второй пример. Прочность и долговечность дорожных и аэродромных покрытий сильно нарушаются процессами пучения. При пучении к фронту промерзания подтягивается влага, образуются линзы и прослой сегрегационного подземного льда. Последние увеличивают объем мерзлой породы по сравнению с талой. При этом пучение идет неравномерно, в силу чего на поверхности появляются бугры. Жесткие покрытия дорог трескаются, асфальт, бетон и другие материалы крошатся. А весной на месте вытаявших линз льда появляется разжиженный грунт. Он выплескивается при динамических нагрузках, создаваемых идущим транспортом. На месте вытаявшего бугорка пучения образуется западина — выбоина — на дорожном покрытии.

Для борьбы с пучением необходимо уменьшить влажность пород и ослабить миграцию влаги при их промерзании. С этой целью практикуется замена глинистых грунтов, обладающих плохой водоотдачей, крупным песком или галечниками, легко дренируемыми, в которых не образуется линз льда, приводящих к пучению породы.

Примеры использования изученных мерзлововедами закономерностей в развитии мерзлых толщ, сезонного промерзания и протаивания можно умножить. Они широко используются при решении различных инженерных вопросов в области вечной и сезонной мерзлоты. Правильная теория всегда имеет хорошее практическое приложение.

## *Глава II*

### **РАССКАЗ О МЕРЗЛОТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ЯВЛЕНИЯХ**

**С**езонное и многолетнее промерзание горных пород, а также их протаивание и нагревание, постоянно происходящие в природе, приводят к развитию мерзлотных, или, как их часто теперь называют, криогенных, геологических процессов и явлений. Мерзлотные явления относятся к числу экзогенных геологических явлений, т. е. таких, которые возникли под действием внешних по отношению к Земле факторов: за счет энергии, получаемой от Солнца и отдаваемой в мировое пространство, под действием силы тяжести и др. К числу мерзлотных относятся процессы полигонального морозобойного растрескивания мерзлых грунтов и образования по трещинам вертикальных клиновидных тел — полигональных жильных структур, процессы и явления пучения дисперсных пород при их промерзании, склоновые явления, такие, как солифлюкция, курумообразование и т. д., процессы термокарста, термоэрозии и термоабразии, связанные с протаиванием льдистых пород и скоплений подземных льдов.

Для геологов очень существенно, что мерзлотные процессы и явления оставляют свои следы в дисперсных отложениях, накапливающихся в районах, где распространена вечная мерзлота. Они придают их строению специфические черты, а иногда и полностью определяют их неповторимое своеобразие. Некоторые генетические типы отложений, образующихся одновременно с развитием мерзлотных процессов, приобретают столь своеобразный облик, что начинают резко отличаться от своих южных

собратьев — аналогов, образующихся вне области мерзлых пород. Например, вместо знакомых всем песчаных и глинистых речных наносов — аллювия — в условиях суровой мерзлоты накапливается оторфованный пылеватый осадок с толстыми слоями льда, к тому же пронизанный вертикальными ледяными клиньями.

Криогенные процессы находят свое выражение и в рельефе поверхности Земли. Формы рельефа, созданные мерзлотными процессами и явлениями, носят название мерзлотных форм рельефа и микрорельефа. Мерзлотные формы рельефа придают удивительный облик территориям, занятым многолетней мерзлотой. А когда мерзлые толщи оттаивают, деградируют, они остаются в виде остаточных, реликтовых образований, свидетельствующих о былом суровом климате и распространении вечной мерзлоты.

Мерзлотные процессы и явления весьма существенно могут воздействовать на инженерные сооружения. Чтобы их влияние не нарушало прочности покрытий дорог и аэродромов, не приводило бы к потере устойчивости зданий, разрабатываются меры борьбы с их отрицательным влиянием, сооружаются специальные конструкции, применяются строго регламентированные приемы производства работ. Все это, несомненно, делает более сложным и дорогим строительство в области вечной мерзлоты. При возрастающих масштабах освоения Севера это имеет большое значение и требует разработки специальных приемов строительства и новых типов конструкций. Недостаточный учет вредного влияния мерзлотных процессов и явлений грозит очень большими затратами на восстановление нарушенных сооружений или их полным выходом из строя. А для того чтобы правильно бороться с вредным влиянием мерзлотных явлений, в первую очередь нужно знать их природу, условия и механизмы их развития.

В этой главе мы расскажем только о некоторых криогенных геологических процессах и тех необычных явлениях, которые они вызывают.

**От чего трескается мерзлая земля и что при этом происходит.** Еще русские путешественники и исследователи прошлого века Фигурин, Бунге, Толмачев, Лопатин и другие после возвращения из путешествий по центральным районам Сибири и ее арктическому побережью писа-

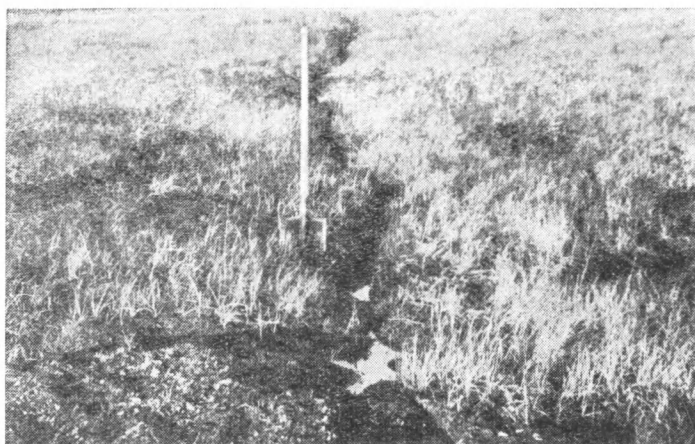


Рис. 13. Морозобойная трещина в тундре. (Фото В. Н. Зайцева.)

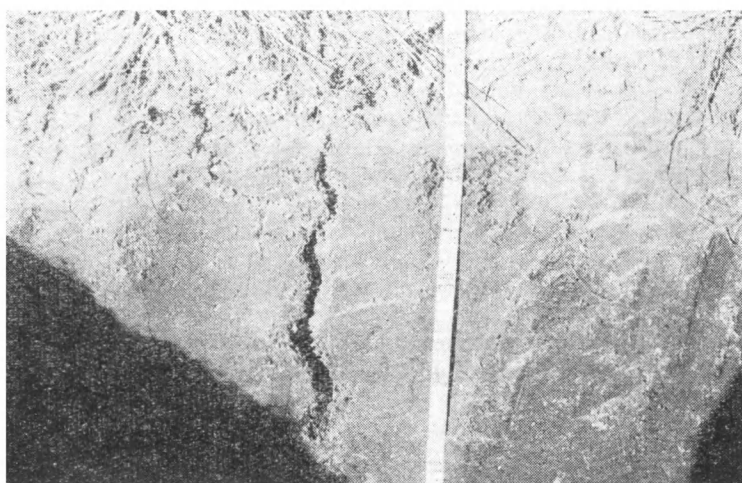


Рис. 14. Морозобойная трещина и ледяная жила в стенке шурфа. (Фото В. Н. Зайцева.)

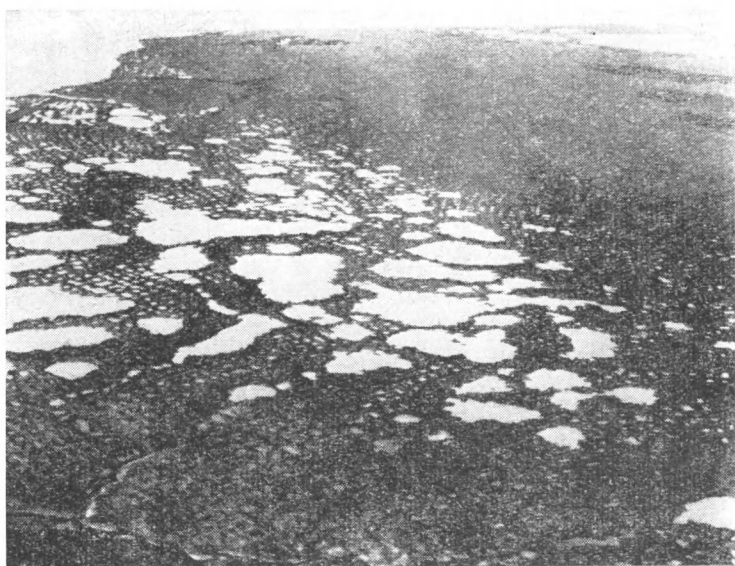


Рис. 15. Полигональная поверхность тундры на полуострове Таймыр. Полигоны имеют выпуклые валики и заболоченную центральную часть. Светлые пятна — мелкие термокарстовые озера. (Фото Л. Д. Сулержицкого.)

ли о том, что зимой под действием сильных морозов земля с грохотом трескается, а на ее поверхности появляется сеть морозобойных трещин (рис. 13). Весной в эти трещины заливается талая снеговая вода и в мерзлой породе образуются вертикальные ледяные клинышки — жилы. Из года в год морозобойное растрескивание мерзлых пород в зимнее время повторяется, трещина вновь и вновь заполняется весной водой, а в результате в мерзлой породе растут ледяные клинья (рис. 14). Разрастаясь в ширину, клинья льда выжимают вверх вмещающую их породу. Вокруг морозобойных трещин на поверхности земли образуются валики. В результате возникают характерные полигональные ландшафты.

Теперь с морозобойным растрескиванием знакомы многие, побывавшие хоть раз на Севере. Многочисленные исследования в области вечной мерзлоты показали, что особенно ярко описанный процесс проявляется в тундровой зоне. Поэтому тундры очень часто имеют полигональ-

ный рисунок поверхности, который хорошо заметен на местности, а особенно отчетливо виден с воздуха.

Когда летишь на самолете вдоль побережья Ледовитого океана, в иллюминатор можно наблюдать бескрайние тундры, почти сплошь покрытые полигонами (рис. 15). Рисунок морозобойных полигонов разнообразен: четырех-, пяти-, шестиугольные, правильной и неправильной формы; одни плоские, другие с выпуклыми валиками по периферии и с мелкими озерками в центре; третьи с приподнятыми центральными частями, ограниченными «канавами», заполненными водой (рис. 16, 17). Полигоны, полигоны, полигоны...

Близкое залегание мерзлых пород и ячеистое строение поверхности полигональных тундр затрудняют сток поверхностных вод и приводят к появлению болотистых ландшафтов с характерным распределением растительности. В тундре на повышенных участках полигонов развиваются растительные ассоциации мхов и злаков, требующие небольшого увлажнения, а в заболоченных понижениях, особенно в полигональных болотцах, растет влаголюбивая пушица и накапливается торф.

Процесс морозобойного растрескивания распространен очень широко в регионах с континентальным климатом, для которых характерна холодная малоснежная зима. Растрескиванию в таких условиях подвергаются не только многолетнемерзлые породы, но и талые глинистые и песчаные отложения, сезоннопромерзшие зимой. Очень широко, например, морозобойное растрескивание пород проявляется в Северном Казахстане, Южном Забайкалье и в Приуралье, т. е. в районах, где зимой бывают жестокие морозы почти при полном отсутствии снега. Морозобойные трещины достигают здесь иногда ширины 5—10 см и проникают вглубь на 1—2 м. Решетка морозобойных трещин часто бывает очень густой, и поперечник образуемых ими полигонов составляет всего 1,5—2 м. Такие трещины разрушают асфальтовые покрытия дорог, могут нарушать кабели линий связи, заложенные в грунт на небольшую глубину, образовывать трещины в фундаментах зданий и причинять многие другие неприятности.

В геологическом прошлом, в наиболее холодные этапы четвертичного периода, когда господствовал суровый континентальный климат, морозобойное растрескивание пород было одним из господствующих процессов Северной



Рис. 16. Полигональная поверхность террасы реки на Севере. Хорошо видно, как полигоны меняют свою конфигурацию от периферии к центру.



Рис. 17. Морозобойные полигоны на пойме реки. Полигональная сеть повторяет конфигурацию меандра.



Рис. 18. Небольшая растущая ледяная жила в аллювиальных отложениях.

Евразии и Северной Америки. Этот процесс активно проявлялся на территории Западной и Центральной Европы, Скандинавского полуострова, охватывал в пределах СССР большую часть Русской равнины, Западно-Сибирской низменности, всю Восточную Сибирь. Следы этого процесса в виде реликтовых полигональных форм повсеместно встречаются в этих районах, где в настоящее время трудно представить, что здесь некогда существовала мерзлота и были жестокие морозы.

Почему и как образуются морозобойные тре-

щины и каким образом развиваются на их основе полигональные структуры, имеющие в вертикальном разрезе форму клиньев или жил?

В начале XX в. американский геолог Леффингуэлл, работавший на Северной Аляске, заложил основы так называемой контракционной гипотезы образования морозобойных трещин и роста на их основе ледяных жил в многолетнемерзлых породах. Ледяные жилы (рис. 18) в мерзлых отложениях рек и озерных осадках, как доказывал он, являются основной, преобладающей формой подземного льда, распространенного на северном побережье Аляски.

После исследований Леффингуэлла, опубликовавшего свои работы в 1915—1919 гг. морозобойному растрескиванию и жилным льдам в течение долгого периода уделялось довольно мало внимания. В 50-е годы интерес к этой проблеме существенно обострился в связи с работами мерзлововеда А. И. Попова.

Работая в составе экспедиции, изучавшей мамонта, найденного в 1948 г. на реке Таймыре, А. И. Попов обра-



тил внимание на то, что морозобойное растрескивание и рост жильных льдов происходят на поверхности речных пойм, где идет аккумуляция (накопление) осадков (рис. 19). Проведя комплекс наблюдений, он показал, что при одновременном накоплении отложений и росте ледяных жил (так называемом сингенезе) последние могут достигать очень значительных размеров по вертикали, во много раз превышающих глубину проникновения морозобойных трещин. В результате накопления осадков поверхность земли поднимается, а вместе с ней смещаются морозобойные трещины, в которых накапливается лед, а в мерзлой породе остаются ледяные жилы. Накопится толща в несколько десятков метров, и жилы будут иметь такую же вертикальную мощность (рис. 20).

Высказанная А. И. Поповым идея, завоевавшая как горячих сторонников, так и неумолимых противников, позволяла по-новому подойти к объяснению происхождения мощных скоплений подземных льдов и глинистых отложений, которые слагают приморские арктические низменности Якутии, Новосибирские острова и занимают обширные пространства в пределах Центральной Якутии.

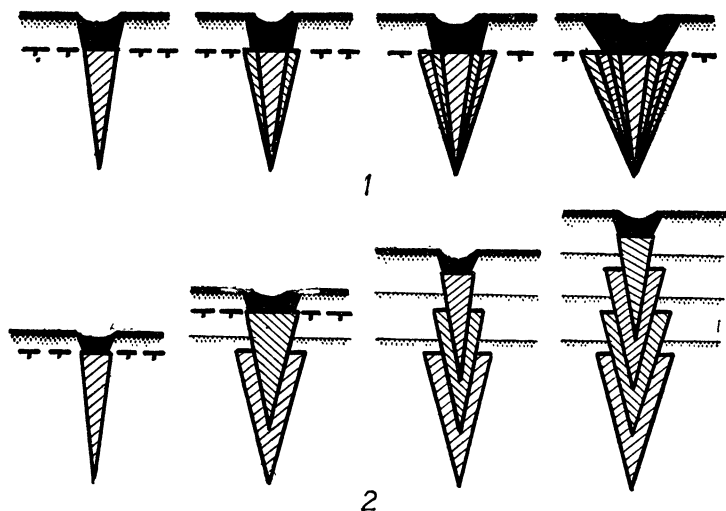


Рис. 19. Схема эпигенетического (1) и сингенетического (2) роста повторно-жильных льдов (по Б. Н. Достовалову).



Рис. 20. Мощная толща с сингенетическими повторно-жильными льдами — «ледовый комплекс» на Яно-Индигирской низменности.

Районы их распространения выделены на карте криолитозоны СССР (см. рис. 5). Об этих льдах мы расскажем более подробно, так как проблема их происхождения волнует умы исследователей более столетия. С их вытаяванием связаны бесчисленные термокарстовые озера, которые создают неповторимый облик арктических равнин. Разрушение таких подземных льдов водами Северного Ледовитого океана привело к образованию обширного шельфа, ширина которого достигает сотен километров. Этими льдами были сложены острова Семеновский и Васильевский, размытые морем и растаявшие под действием солнечного тепла на глазах людей в начале XX в. Возможно, что в связи с исчезновением этих островов, которые видели многие путешественники и мореплаватели, родилась легенда о Земле Санникова, легенда, которая вдохновила замечательного геолога академика В. А. Обручева написать на этот сюжет научно-фантастический роман.

Проблема происхождения ископаемых льдов Сибири и арктических побережий Северной Америки заинтересо-



Рис. 21. Труп молодого мамонта, получившего имя Дима, найденный в мерзлых речных отложениях на Колыме. (Фото А. Ложкина.)

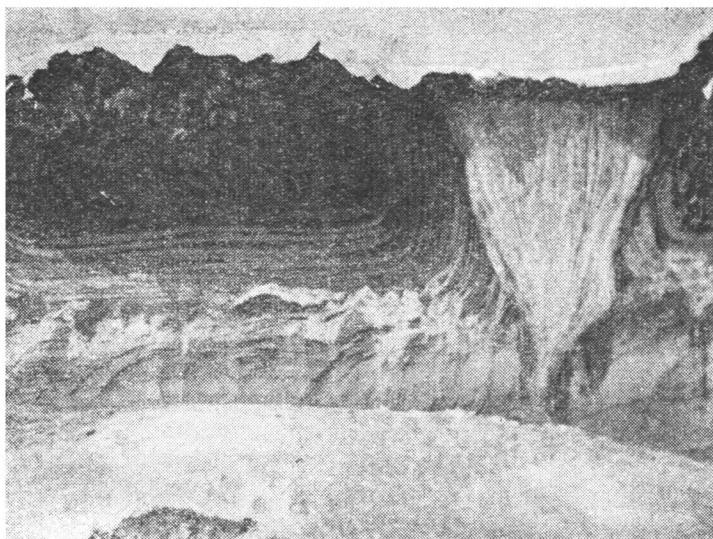
вала исследователей давно. Интерес этот углубляется тем, что из толщи этих льдов вытаивают многочисленные останки мамонтов, шерстистых носорогов, древних лошадей и других животных, составляющих так называемый «мамонтный комплекс». Части этих животных, прекрасно сохранившиеся в вечной мерзлоте, а иногда и целые трупы их находили и находят как местные жители, так и сотрудники научных экспедиций (рис. 21).

Существовали две основные гипотезы происхождения этих льдов. В соответствии с первой из них ископаемые льды представляют собой остатки древних ледников и мощных снежников, перекрытых слоем более молодых глинистых отложений различного генезиса. Включения льдистых пород в толще ископаемых льдов являются наносами, накопившимися в каналах и трещинах, которые прорезали ледниковый покров и по которым проходили потоки талых вод. В эти трещины и промоины попадали древние животные, бродившие по поверхности ледяного покрова, который начал перекрываться молодыми осадками,

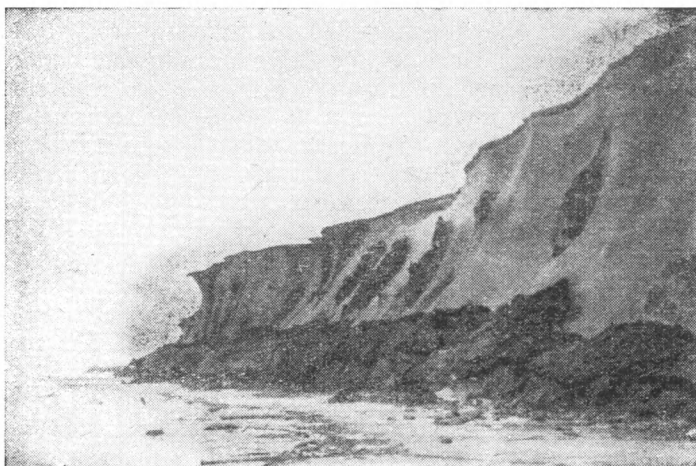
Представление о таком происхождении льдов развивали известные полярные исследователи Э. В. Толь, И. П. Толмачев, геологи К. А. Воллосович, М. М. Ермаков, географ академик А. А. Григорьев и ряд ученых-мерзлотоведов. Ими были высказаны представления о том, что в условиях континентального климата Восточной Сибири с малым количеством осадков оледенения носили зачаточный, эмбриональный характер. В холодные эпохи возникали не мощные ледниковые щиты, растекавшиеся на большие пространства, а маломощные неподвижные фирновые поля, которые постепенно заносились речными наносами.

Другая точка зрения, высказанная еще в начале прошлого века медиком-хирургом Фигуринным, участвовавшим в изучении берегов Восточной Сибири, а затем исследователями Сибири академиком А. Миддендорфом, И. А. Лопатиным, А. Бунге, говорила о накоплении льда в морозобойных трещинах вследствие заиливания в них воды. Эта гипотеза происхождения ископаемых льдов Сибири подверглась критике и была вскоре надолго забыта. Слабым положением гипотезы жильного происхождения льдов было то, что трудно себе представить, чтобы морозобойные трещины проникали до глубины 40—80 м. А именно такой мощности достигают эти льды и до таких глубин в них должна была просачиваться талая вода. Между тем вертикальная полосчатость льдов, а иногда и отчетливая клиновидная их форма в обнажениях, наблюдение за современным морозобойным растрескиванием и накоплением в трещинах льда говорили в пользу ее правомочности. Следует заметить, что ископаемые льды обычно удается наблюдать в обнажениях — обрывах, подмываемых реками, озерами или морем. Обрывы редко имеют строго вертикальные стенки, в которых легко наблюдать истинную форму ледяных и грунтовых тел (рис. 22). В большинстве случаев стенки обнажений неровные и форма выходов льда и грунта бывает самой причудливой (рис. 23). Поэтому клиновидную форму мощные ископаемые льды имеют далеко не во всех обнажениях. А это склоняло многих исследователей к признанию их ледникового происхождения.

Так вот, исследования А. И. Попова показали наличие одновременности в накоплении осадков на поймах рек и в их промерзании, а также в морозобойном растрескива-



**Рис. 22.** Клиновидная жила в озерно-болотных отложениях, в береговом обрыве острова Б. Ляховский. (Фото Т. П. Кузнецовой.)



**Рис. 23.** Выход повторно-жильных льдов «ледового комплекса» в береговом обрыве острова Б. Ляховский. Лед в обнажениях не имеет клиновидной формы.

нии этих осадков и образовании в трещинах полигонально-жильного льда. Благодаря открытию А. И. Попова стало принципиально возможным объяснить формирование очень мощных ледяных жил. Ведь одновременно с накоплением осадков и поднятием поверхности происходит смещение вверх морозобойных трещин и образующихся в них ледяных жилок. Нижние части мощных жил сформировались при существенно более низком положении поверхности земли, а высота элементарных жилок была существенно меньше полных вертикальных размеров ледяных жил.

А. И. Попов первым высказал мысль о том, что мощные толщи ископаемых льдов накапливались на поймах северных рек в условиях сурового континентального климата и низкотемпературной вечной мерзлоты. Он доказал, что «ледовый комплекс» представляет собой своеобразный аллювий — речные наносы, а не остатки ледникового покрова. Из этого положения вытекало много весьма важных следствий. О некоторых из них интересно рассказать. Во-первых, с отложениями рек связаны часто россыпные месторождения полезных ископаемых, и, следовательно, на арктических равнинах, представляющих собой речные (аллювиальные) низменности, такие месторождения могут быть. В то же время существование таких месторождений практически исключено, если низменности имеют ледниковое происхождение. Во-вторых, аллювиальные пойменные отложения, формирующиеся в условиях суровой мерзлоты, обладают чертами, которые совершенно несвойственны аллювию рек умеренных и южных широт: наличие полигональной системы ледяных жил, высокая пылеватость и льдистость минеральных отложений, слабая степень разложения содержащихся в них растительных и животных остатков, а самое главное — огромная общая льдистость всей толщи. Содержание льда по объему достигает в ней 80—95%. Почти сплошной лед... и в то же время это речные отложения.

Значит, существуют мерзлотные, или, как сейчас говорят, криогенные, варианты генетических типов рыхлых отложений, т. е. мерзлые отложения со своими особыми законами формирования, которые еще неизвестны, но которые совершенно необходимо изучать как с позиций литологии осадочных пород (науки о законах формирования их состава и свойств), так и с позиций мерзлотоведе-

ния, геологии четвертичного периода, инженерной геологии и т. д.

Высокая льдистость этих отложений, значительно превышающая их полную влагоемкость, т. е. максимально возможное количество воды, которое может удерживать порода в талом состоянии, свидетельствует о том, что для понимания законов формирования мерзлых отложений необходимо изучать не только закономерности накопления минерального и органического вещества, но и особенности накопления в них льда. Последнее возможно только, если будут изучены закономерности формирования температурного режима отложений и условий их промерзания. Значит, геологи, изучающие мерзлые отложения на Севере, должны учитывать достижения, полученные мерзлотоведами — теплофизиками и ледоведами, изучающими строение и свойства льдов.

Стало очевидным, что лед в мерзлых породах является важным породообразующим компонентом, органически им присущим. Возник и другой вопрос: а как наличие льда влияет на формирование рельефа и его динамику во времени? Представьте себе, что на одну и ту же поверхность поймы принесено одинаковое количество минеральных осадков, но в одном случае ее породы находятся в талом состоянии, а в другом — в многолетнемерзлом. Во втором случае на одну часть осадка может быть включено 4—6 частей льда. Следовательно, темп накопления мерзлой породы будет во много раз больше, чем талой.

Но есть и другая сторона этой закономерности. Ведь близко от поверхности земли под маломощным сезонно-оттаивающим слоем накапливается очень льдистая порода. В этом случае даже небольшое нарушение этого слоя или изменение ландшафтных условий растительности, увлажнения поверхности, снегового покрова, а особенно потепление климата могут привести к протаиванию этих льдистых пород и просадкам поверхности при их оттаивании. Мерзлотоведы говорят, что высокольдистые породы находятся в термодинамическом неустойчивом состоянии и при изменении природной обстановки они служат субстратом для развития процессов термокарста, термоэрозии, термоденудации.

Наконец, открытие А. И. Попова в корне меняло существующие представления о геологической истории развития арктических приморских и Центральнаякутской

низменностей, да и вообще о палеогеографии Восточной Сибири и ряда районов Северной Америки. Видите, какие важные последствия повлекло за собой изменение представлений о происхождении «ледового комплекса» и развитие идеи о сингенетическом накоплении полигонально-жильных льдов и вмещающих их отложений. Конечно, не все эти последствия были осознаны до конца сразу, а единство в мнениях отсутствует и до сих пор.

Однако в 1951 г. Институтом мерзлотоведения АН СССР им. В. А. Обручева была организована крупная экспедиция, которая в течение ряда лет проводила исследования в нижнем течении рек Яны и Индигирки, а также на Новосибирских островах. В результате работы этой экспедиции П. А. Шумским и Б. И. Втюриным были изучены петрографические особенности подземных льдов этого региона, а Б. Н. Достоваловым заложены основы физической теории формирования морозобойных трещин и роста эпигенетических (образовавшихся в породах после их накопления) и сингенетических полигонально-жильных льдов. На основании полевых материалов, полученных в этой экспедиции, Е. М. Катасоновым впервые проанализированы условия одновременной (сингенетической) аккумуляции и промерзания аллювиальных отложений, формирующихся на различных элементах речных долин, т. е. в разной ландшафтной обстановке накопления, или, как говорят геологи, в разных фациальных условиях. В результате этой работы Е. М. Катасоновым были заложены основы нового метода изучения мерзлых четвертичных отложений — метода, названного им мерзлотно-фациальным анализом. Мерзлотно-фациальный анализ отложений предполагает изучение характерных черт мерзлых отложений, обусловленных как особенностями строения слагающего их органического и минерального материала, так и распределением в них линз, прослоев, зерен подземного льда, ледяных жил или следов других криогенных процессов и явлений, таких, как грунтовые жилы, следы пучения грунта и т. д. Геолог-мерзлотовед, использующий при полевых исследованиях четвертичных отложений мерзлотно-фациальный анализ, имеет возможность восстановить условия накопления отложений и их промерзания — перехода в многолетнемерзлое состояние. Это позволяет ему воссоздать геологическую, мерзлотную и физико-географическую обстановку времени их форми-



рования, в частности ответить на вопросы о температурном режиме пород, глубинах их сезонного оттаивания, криогенных процессах и явлениях, которые имели место в геологическом прошлом.

А если геолог, используя радиоактивные, биостратиграфические и другие методы, установит абсолютное время формирования разных типов мерзлых пород, то он может достоверно сказать, как изменялись во времени указанные выше составляющие мерзлотной обстановки. В свою очередь, это открывает возможности для применения методов математического моделирования, для расчета изменения глубины многолетнего промерзания и оттаивания толщи горных пород, динамики их температурного поля и других палеомерзлотных данных. Вот какие возможности таил в себе этот метод.

Метод мерзлотно-фациального анализа был успешно применен позже к анализу других генетических типов пород: к отложениям термокарстовых котловин в Северной и Центральной Якутии — аласов — Н. Н. Романовским и М. И. Ивановым, а к слоновым накоплениям Якутии — Г. Ф. Грависом и др. Таким образом в настоящее время метод мерзлотно-фациального анализа четвертичных отложений, которые находятся или находились ранее в многолетнемерзлом состоянии, является в настоящее время одним из основных для восстановления палеогеографических, особенно палеомерзлотных условий эпох их накопления.

Однако вернемся к вопросам формирования морозобойных трещин.

Б. Н. Достоваловым в 1952 г. была опубликована работа «О физических условиях образования морозобойных трещин и развитии трещинных льдов в рыхлых породах», которая легла в основу многочисленных последующих исследований этих процессов и не утратила своего значения до настоящего времени. Проанализировав температурный режим в слое годовых колебаний температур, он показал, что под его влиянием постоянно происходят процессы расширения и сокращения мерзлых грунтов вследствие их нагревания и охлаждения. Зимой верхние слои породы, благодаря их охлаждению, сжимаются, в то время как нижележащие испытывают расширение вследствие проникновения летней температурной волны. Летом картина носит обратный характер. В силу этого в породах

слоя годовых колебаний температур развиваются напряжения, которые имеют объемно-градиентный характер. В тех случаях, когда эти напряжения превышают предел прочности мерзлой породы на разрыв, в массиве образуются морозобойные трещины. Обычно можно выделить несколько генераций морозобойных трещин, которые пересекаются между собой, образуя полигоны. Первая и вторая генерации трещин образуют самые крупные по размеру полигоны; третья — делит эти полигоны пополам и так далее. Первая генерация трещин обычно образуется одновременно, причем трещины проходят на одинаковом расстоянии друг от друга параллельно естественным вертикальным поверхностям, ограничивающим массивы мерзлых пород: берегам рек, вертикальным границам подозерных таликов и т. д. (рис. 24). Вторая генерация трещин образуется в направлении, перпендикулярном к первой, т. е. нормально к естественным вертикальным поверхностям. В породах, однообразных по составу и криогенному строению, а следовательно, и по своим свойствам, морозобойные полигоны имеют форму прямоугольников, а в породах неоднородных — многоугольников с неодинаковыми по длине сторонами. Расстояние между морозобойными трещинами, как показал Б. Н. Достовалов, определяется физико-механическими свойствами мерзлых пород, в первую очередь такими, как коэффициент их линейного сокращения — расширения при охлаждении и нагревании  $L$  и сопротивление пород на разрыв  $G_p$ , а также величинами градиентов температур в верхних горизонтах пород зимой. Он установил, что расстояние между трещинами тем меньше, чем значительнее величины градиентов температур, при которых они возникают, т. е. чем сильнее охлаждается массив зимой с поверхности, а также чем больше коэффициенты линейного сокращения — расширения и меньше сопротивление пород на разрыв. Поэтому в условиях резкого и глубокого охлаждения массивов пород зимой, которые свойственны районам с резко континентальным климатом, возникают частые системы морозобойных трещин с расстоянием между ними от 1—2 до 10—12 м. В условиях менее континентальных образуются морозобойные полигоны с расстоянием между трещинами до 20—40 м.

В породах с высокими коэффициентами линейного сокращения — расширения, к которым относятся глини-

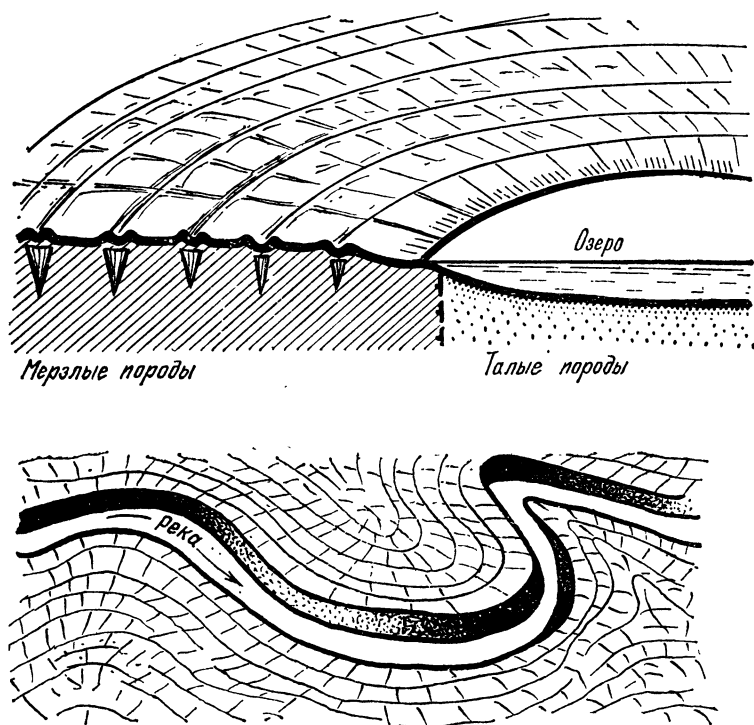


Рис. 24. Заложение сети морозобойных трещин и повторно-жильных льдов под ориентирующим влиянием вертикальных границ подозерных таликов и береговых обрывов рек.

стые льдонасыщенные отложения и льдистые торфяники, размеры полигонов в плане меньше, чем в малольдистых песках или галечниках.

Исследования автора этой книги, проведенные в 60-х — начале 70-х годов, продолжавшие работы Б. Н. Достовалова, А. И. Попова и других мерзлотоведов, позволили установить ряд новых закономерностей, которым подчиняются морозобойное растрескивание и рост полигонально-жильных структур в природной обстановке, свойственной Северной Евразии и Северной Америке.

Изучение морозобойного трещинообразования и полигонально-жильных структур, развивающихся при разном температурном режиме пород, показало, что морозобой-

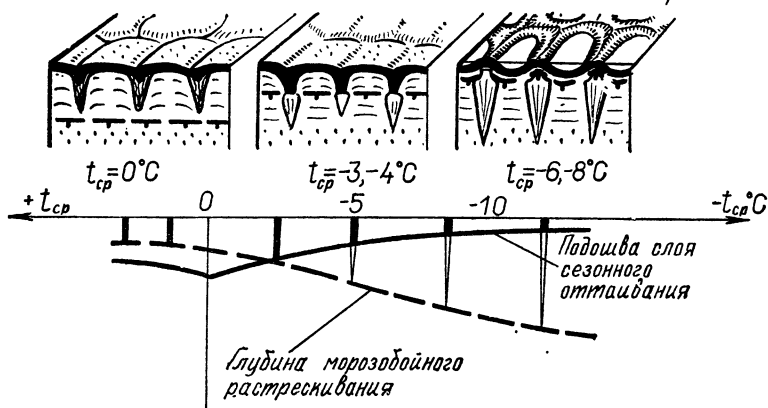


Рис. 25. Мерзлотная зональность грунтовых жил и повторно-жильных льдов в зависимости от среднегодовых температур пород —  $t_{cp}$ .

ные трещины могут проникать на различную глубину от поверхности земли (рис. 25). На южной периферии области вечной мерзлоты и на талых массивах они не выходят за пределы слоев сезонного промерзания отложений, а на мерзлых массивах — слоя сезонного оттаивания. В этом случае ледяные жилы, образующиеся весной в трещинах, летом вытаяивают и постепенно за ряд лет на их месте формируются вертикальные полигональные структуры — земляные жилы. Породы, слагающие эти жилы, более выветрелые, чем вмещающие отложения. Они ожелезнены, обогащены глинистым и органическим веществом, отличаются обычно меньшей плотностью. В силу этого они выделяются по цвету, составу и наличию вертикальной полосчатости.

В районах с более суровыми мерзлотными условиями морозобойные трещины пронизывают сезоннооттаивающий слой и проникают в мерзлую толщу. Поэтому ледяные жилы, образующиеся в трещинах в пределах многолетне-мерзлой толщи, постепенно год за годом формируют ледяные жилы. Ширина и вертикальные размеры последних тем более, чем глубже проникают морозобойные трещины и чем дольше по времени происходит рост ледяной жилы.

Таким образом было установлено, что размеры полигональных решеток морозобойных трещин и глубины их

проникновения сильно зависят от особенностей температурного режима верхних горизонтов мерзлых пород. При положительных и отрицательных, но близких к  $0^{\circ}\text{C}$  среднегодовых температурах пород ( $t_{\text{ср}}$  до  $-2$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ) морозобойные трещины в супесях, суглинках, торфяниках не выходят за пределы слоев сезонного промерзания или сезонного оттаивания. При более низких  $t_{\text{ср}}$  они начинают проникать в многолетнемерзлые породы. В породах разного состава и льдистости это проникновение трещин из сезонноталого слоя в мерзлую толщу происходит в разных диапазонах среднегодовых температур пород. В суглинках, супесях, торфах этот переход наблюдается при  $-2$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ , в песках — при  $-4$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$ , а в гравийно-галечных отложениях при совсем низких температурах, изменяющихся от  $-6$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ . После того как морозобойные трещины пронизывают сезоннопротаивающий летом слой и проникают в верхние слои многолетнемерзлых пород, дальнейшее понижение температуры при движении с юга на север приводит к увеличению глубины проникновения трещин в мерзлую толщу. Это, в свою очередь, приводит к тому, что размеры образующихся в трещинах весной элементарных ледяных жилок увеличиваются, а следовательно, и возрастает темп роста ледяных жил. Поэтому повторно-жильные льды в северных районах, имеющих более суровые мерзлотные условия, растут существенно быстрее, чем в более южных, с «мягкой» мерзлотной обстановкой.

Была установлена еще одна интересная закономерность. Анализируя размеры полигональных решеток жильных структур в плане для отложений одинакового состава, но распространенных в районах с резкой континентальностью климата, удалось выяснить следующее. Если при постоянных среднегодовых температурах пород на их поверхности увеличивается амплитуда колебаний температур (другими словами, возрастает континентальность типов сезонного оттаивания, о которой мы говорили в первой главе), то в этом случае на ненарушенных расстрескиванием поверхностях морозобойные трещины возникают вновь, а в существующих системах могут измениться размеры полигональной решетки трещин в плане. Появятся новые трещины, более высоких генераций, которые будут делить полигоны пополам (рис. 26).

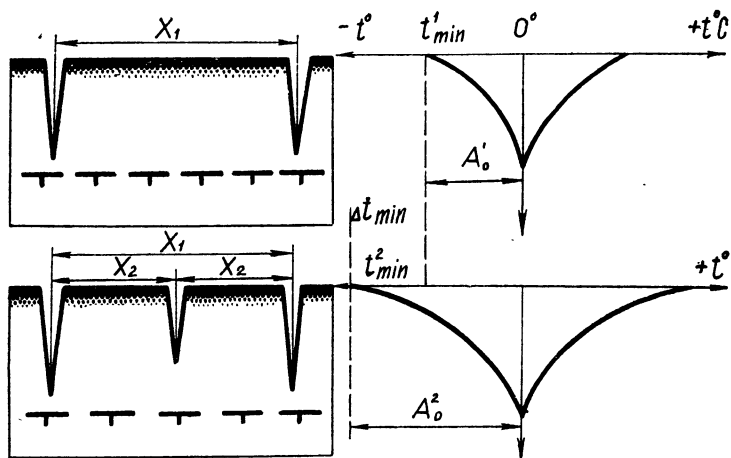


Рис. 26. Схема, поясняющая изменение размеров полигонов морозобойных трещин ( $X$ ) от амплитуды колебания температур на поверхности пород ( $A_0$ ) при постоянной среднегодовой температуре пород  $t_{ср}$ . В правой части рисунка показаны огибающие температурных кривых, в левой — морозобойные трещины и расстояния между ними.

Таким образом, оказывается, что размеры полигональной сетки в плане существенно контролируются величинами амплитуд колебаний температур на поверхности мерзлых массивов. С другой стороны, глубины проникновения морозобойных трещин в большей степени определяются среднегодовыми температурами мерзлых пород. Последняя установленная закономерность является причиной, предопределяющей наличие мерзлотной зональности полигонально-жильных структур, образующихся на основе морозобойных трещин. При этом зональность этих структур, подчиняющаяся мерзлотно-температурной зональности, т. е. понижению к Северу  $t_{ср}$  пород, в природе может быть прослежена только в мерзлых породах одинакового состава и происхождения.

Изучением морозобойного растрескивания и полигонально-жильных структур занимаются не только советские, но и американские и канадские исследователи.

В конце 50-х годов в связи с Международным геофизическим годом начались исследования Антарктического материка. В числе ученых, занимающихся изучением это-

го гигантского ледяного континента нашей планеты, были и мерзлотоведы. Американские исследователи, сначала Трой Л. Певе, а позже Роберт Блек и Теодор Берг, работавшие в районе Земли Королевы Виктории на свободном ото льда участке суши, обнаружили, что морозобойные трещины в этом районе часто заполняются сухим сыпучим песком (рис. 27). Заметим, что условия этой территории, граничащей с краем ледникового щита, отличаются крайней сухостью климата, его исключительной суровостью и очень сильными ветрами. Ветер сдувает снег, несет песок и гравий, которые образуются при разрушении песчаников, выходящих в этом районе на поверхность земли. Зимой, когда возникают морозобойные трещины, песок засыпается в них и образует песчаные жилки. В результате многократного повторения этого процесса в мерзлой толще формируются песчаные жилы. Летом, когда температура верхних горизонтов мерзлых пород повышается и они испытывают расширение, несжимаемые и плохо деформируемые песчаные жилы оказывают сильное давление на вмещающие отложения и выжимают их вверх. В результате на поверхности образуются по два валика,



Рис. 27. Выпуклые полигоны на поверхности валунной морены (Земля Виктории в Антарктиде). На заднем плане — край ледника. На первом плане — желоб над песчаной жилой, имеющей ширину до 4 м. (Фото Р. Ф. Блека.)

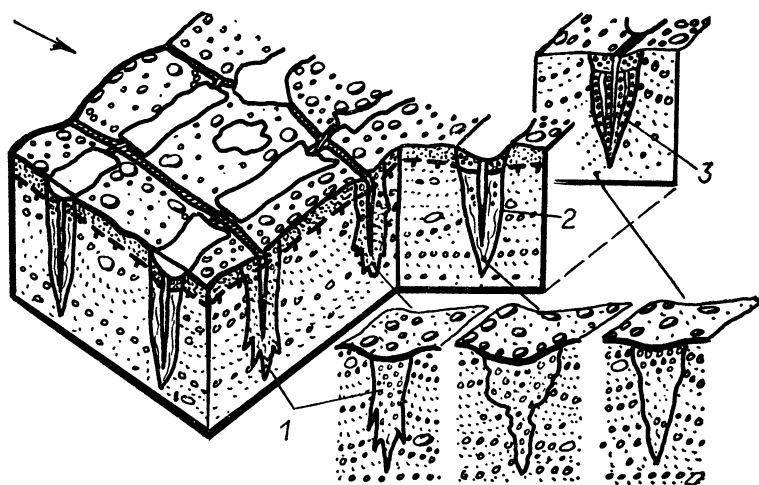


Рис. 28. Блок-диаграмма, показывающая условия образования песчаных (1), песчано-ледяных (2) и ледяных (3) жил в одной полигональной решетке морозобойных трещин. В нижней левой части рисунка показаны те же структуры после их протаивания. Стрелка слева вверху указывает направление господствующих ветров; белым на поверхности изображен снег.

разделенные понижениями — бороздами, находящимися над жилами. Иногда высота этих валиков достигает 1,5—2 м. В глубоких бороздах между ними в одних случаях скапливается сухой песок, в других, находящихся в ветровой тени, часто задерживается снег. Зимой он предохраняет трещины от попадания в них песка, а весной, тая, приводит к образованию ледяных жилок. В результате образуются или ледяные, или при изменяющемся из года в год характере заполнения трещин — песчано-ледяные жилы. Таким образом песчаные, песчано-ледяные и ледяные жилы образуются в одинаковом климате, но при разном режиме увлажнения поверхности. Иногда они находятся в одних и тех же полигональных решетках трещин, образуя так называемые парагенетические ассоциации (рис. 28).

Выполнение морозобойных трещин песком или попеременно песком и льдом может происходить в условиях засушливого климата и в существенно более мягких



мерзлотных условиях, чем в Антарктиде. При положительных или отрицательных среднегодовых температурах пород, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , когда трещины не выходят из сезонномерзлого или сезонноталого слоя, жилы с таким заполнением не проникают в мерзлую толщу, а целиком располагаются в пределах этих слоев. Они образуются на массивах развеваемых золотых песков в Центральной Якутии.

Кроме современных растущих песчаных жил геологам-четвертичникам приходится часто встречаться и с ископаемыми реликтовыми формами. Ископаемые песчаные жилы были известны давно. Их находят на территории Польши и Советского Союза в слоях отложений, формировавшихся в холодные эпохи четвертичного периода. В эти эпохи в районах, прилегающих к краю ледниковых покровов, господствовали суровые климатические и мерзлотные условия, видимо, сходные с антарктическими. Помимо песчаных жил здесь же встречаются полигонально-жильные структуры, образовавшиеся в результате вытаявания существовавших в то время ледяных (или песчано-ледяных) жил. Эти структуры носят название псевдоморфоз по ледяным жилам. Псевдоморфозы по повторно-жильным льдам представляют собой вторичные жильные структуры, образовавшиеся в результате заполнения пустот, возникающих при вытаявании жил льда. Пустоты эти заполнялись вмещающими их отложениями или породами, некогда перекрывавшими ледяные жилы. Иногда псевдоморфозы по таким льдам остаются в толще пород в виде полигональной системы пустот, частично заполненных разрыхленной породой. Такие пустоты были, например, обнаружены и изучены советскими учеными А. Я. Литвиновым и Н. С. Шевелевой в разрезе высокой террасы Енисея под Красноярском (рис. 29). Очевидно, что при застройке территории гражданскими и промышленными зданиями такие системы пустот, залегающие на небольшой глубине, представляют серьезную угрозу для устойчивости сооружений. Их обнаружение в процессе инженерно-геологических изысканий, предшествующих строительству, является важной и сложной задачей. Парадоксально, но мерзлота, даже после ее исчезновения, осложняет условия хозяйственного освоения территории своего бывшего существования.

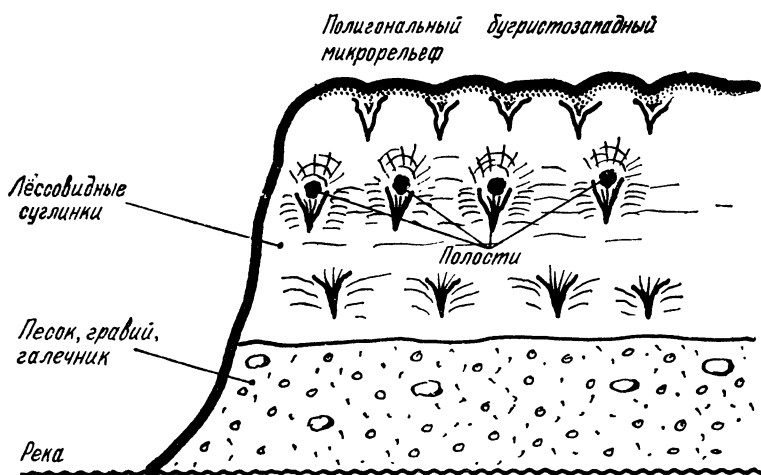


Рис. 29. Схема строения террасы Енисея с тремя горизонтами псевдоморфоз по повторно-жильным льдам. В среднем горизонте сохранились полости на месте вытаявшего льда; верхний горизонт образует на поверхности террасы полигональный бугристо-западинный микрорельеф.

Добавим к сказанному, что псевдоморфозы по жильным льдам имеют очень большое значение при изучении четвертичных отложений и восстановления палеогеографической обстановки прошлого. Во-первых, они указывают на бывшее наличие ледяных жил в отложениях, а следовательно, и на то, что эти отложения находились в многолетнемерзлом состоянии. Можно даже примерно восстановить, какие среднегодовые температуры пород были во время образования этих льдов. Во-вторых, системы псевдоморфоз говорят об изменении мерзлотных условий, которые привели к их оттаиванию. В одних случаях это была полная деградация мерзлых толщ в результате сильного и длительного потепления, в других — только увеличение глубин сезонного оттаивания.

**Растущие камни.** Много лет назад, работая на Новосибирских островах, я встретился с явлением, о котором до тех пор только слышал на лекциях и читал в книгах. На склоне горы Эмис-Тас на острове Большой Ляховский во время маршрута мы с моим коллегой ботаником Владимиром Филиным наткнулись на растущие из земли

валуны гранитов (рис. 30). Камни, достигающие по высоте 1,5 м, выталкивались из мерзлой земли с огромной силой. Некоторые удлиненные камни стояли вертикально, вот-вот готовые упасть. В верхней части поверхность камней была серо-черной от налета лишайников. Ниже отчетливо видны были горизонтальные слои, в разной степени выветрелые и покрытые зарождающимся налетом свежих лишайников. В самом основании поверхность гранитных глыб была свежей, розового цвета, несомненно только что вышедшей из-под земли.

Рядом с вертикально стоящими глыбами, которые бросались в глаза в первую очередь, лежали такие же гранитные валуны, но уже вытолкнутые из земли и упавшие на склон. На их поверхности отчетливо были видны параллельные полосы, в разной степени выветрелые. Несомненно, эти полосы фиксировали циклы выталкивания из грунта. Здесь же видны были и глыбы, только что появившиеся из-под земли. Цвет их был розовый, поверхность светлая, а на некоторых из них еще сохранились остатки мелкозема и скудной полярной растительности.

Рост камней на склонах горы Эмий-Тас был вызван их морозным выпучиванием, или, как часто говорят, вымораживанием. Позже с этим явлением мне пришлось сталкиваться часто. Морозное выпучивание камней рас-



Рис. 30. Выпучивание крупного валуна на склоне возвышенности (север Яно-Индибирской низменности).



Рис. 31. Выпучивание камней и образование каменной россыпи у подножия склона на Становом нагорье недалеко от трассы БАМа.

пространено в горных районах очень широко (рис. 31). Оно сильно влияет на развитие других криогенных явлений и рождает много трудностей при строительстве на Севере.

Как выпучиваются камни? Почему они вылезают наверх из мерзлой земли?

В схеме процесс выпучивания довольно прост. При сезонном промерзании влажных дисперсных отложений объем их за счет перехода воды в лед увеличивается, они приподнимаются вверх, пучатся. Дисперсная порода смерзается с заключенными в нее камнями и глыбами и, приподнимаясь, пучась, тянет их вверх (рис. 32). Кроме того, при промерзании под камнями начинают образовываться линзы сегрегационного льда, которые, в свою очередь, выталкивают их вверх. Рост линз сегрегационного льда связан с тем, что фронт промерзания (охлаждения) под камнями движется в них быстрее, чем во влажной дисперсной породе, заключающей эти камни. В дисперсном грунте много тепла идет на фазовые превращения воды. Камни, приподнятые вверх при осенне-зимнем промерзании, весной и летом в процессе сезонного оттаивания уже не могут занять своего прежнего положения: грунт возле них оседает, полость на месте линзы сегрегационного льда заплывает. Такой процесс, продолжаю-

щийся много лет, в конце концов приводит к вымораживанию камней и концентрации их на поверхности земли. На плоских поверхностях водоразделов вымораживание приводит к образованию глыбовых россыпей, занимающих иногда огромные пространства. Эти россыпи — каменные поля — дают начало каменным потокам — курумам, о которых будет рассказано ниже.

Напомним, что вымораживание камней из супесчаных пылеватых отложений, слагающих слой сезонного оттаивания и верхние слои мерзлой толщи, ведет к их очищению от глыбового материала. Последний, концентрируясь на поверхности, уменьшает глубину оттаивания отложений. Поэтому нижняя часть супесчаных отложений переходит в многолетнемерзлое состояние, приобретая высокую льдистость.

А теперь представьте себе, что неискушенный в мерзлотных явлениях геолог или изыскатель попадает на поле развития таких каменных россыпей. Первое и естественное предположение, возникающее у него: под россыпями камней залегают плотные коренные породы. По составу камней в россыпях, думает геолог, можно судить, как залегают разные по составу и происхождению породы их

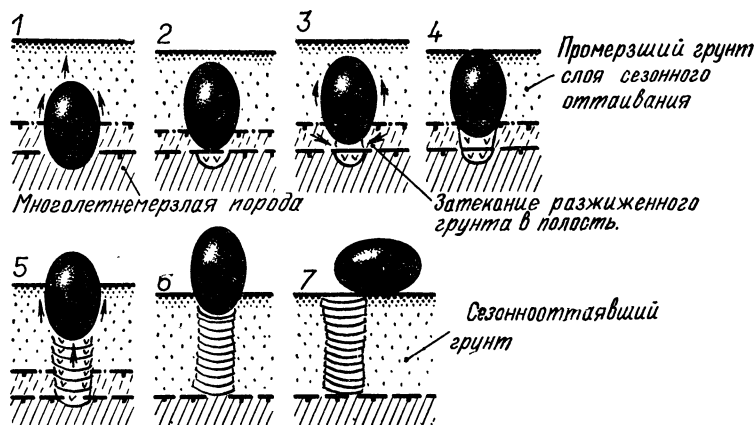


Рис. 32. Схема выпучивания (вымораживания) валуна. Показаны стадии процесса в начале зимнего промерзания сезонноталого слоя (1, 3, 5) и в конце его летнего оттаивания (2, 4, 6). Стрелками изображено приложение сил выпучивания и движение валуна,

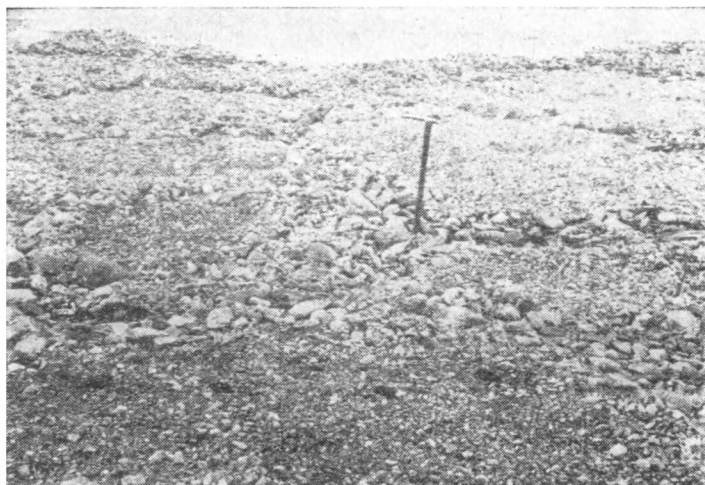


Рис. 33. Сортированные полигоны, образовавшиеся в результате морозобойного растрескивания и дифференциального выпучивания.

скального основания. Но он ошибается: камни при выпучивании могут быть сильно смещены в стороны, особенно при наличии уклона поверхности. Изыскатель и инженер-геолог считают, что скальные породы под россыпью будут надежным основанием сооружений, но ошибаются и они. Ниже нагромождений глыб лежит дисперсный льдистый грунт, дающий осадки при оттаивании и деформации в откосах выемок.

Устойчивость и надежность каменных россыпей кажущаяся. Это иллюзия, созданная морозным выпучиванием.

Морозное выпучивание камней может сочетаться с другими экзогенными процессами: морозобойным растрескиванием и образованием трещин усыхания (диагенетическим растрескиванием), течением рыхлого материала на склонах и прочими явлениями.

Морозобойное и диагенетическое растрескивание приводит к образованию полигональных отдельностей в породах. В результате сезонное промерзание полигональных блоков происходит неравномерно. Быстрее оно идет на периферии блоков, где охлаждение происходит не только



Рис. 34. «Каменные кольца» — сортированные структурные формы на Шпицбергене, образовавшиеся при совместном действии растрескивания и дифференциального выпучивания камней. (Фото Альфреда Яна.)

сверху, но и со стороны вертикальных трещин. В результате выпучивание каменного материала в полигональных блоках разной величины и формы происходит не строго вверх, а вверх и в сторону ближайшей периферии блока. Камни не только двигаются к поверхности земли, но и к периферии полигонов, концентрируясь там и образуя каменные бордюры. В результате образуются «сортировочные полигоны» (рис. 33), «каменные кольца» (рис. 34), «каменные венки» и другие формы, называемые иногда «структурными грунтами».

**Морозное пучение и его последствия.** На севере Западно-Сибирской равнины и в Центральной Якутии, на приморских арктических низменностях Северо-Востока СССР и Северной Америки во множестве встречаются шлемовидные бугры, называемые по-якутски булгунями, а по-эскимоски — пинго (рис. 35). Располагаются булгуни в центре плоских округлых понижений — котловин, образовавшихся на месте озер, обычно термокарстового происхождения. Эти термокарстовые котловины — аласы — возникли при протаивании подземных льдов. Размеры булгуней различны: диаметр по основанию

составляет от 5—10 до 100—200 м, а высота соответственно изменяется от 2—3 до 20—30 м. Верхняя часть этих бугров разбита крупными трещинами. Трещины образуют две системы: концентрическую и радиальную. В нижней части трещин на молодых, растущих булгунях можно видеть подземный лед или сильно льдистый грунт.

Булгуни-пинго являются многолетними буграми пучения. Образуются они при промерзании нескованных таликов под осушающимися термокарстовыми озерами. Промерзание сверху и с боков водонасыщенных пород, слагающих талик, приводит к формированию замкнутой системы, в которой благодаря переходу воды в лед и увеличению объема создается избыточное давление воды (рис. 36). В результате там, где мерзлые породы имеют в кровле промерзающего талика наименьшую мощность, начинается рост бугра пучения. С поверхности он сложен оторфованными озерными суглинками, а его ядро состоит из линз подземного льда и сильно льдистого грунта. Большая часть льда имеет инъекционное происхождение, т. е. он образуется в результате внедрения в ядро бугра напорных вод и их замерзания в виде линз. Другая часть льда накапливается в виде прослоев при медленном под-



Рис. 35. Многолетний бугор пучения — булгуни — высотой 8 — 9 м и диаметром у основания около 50 м. (Фото Ю. А. Мурзина.)



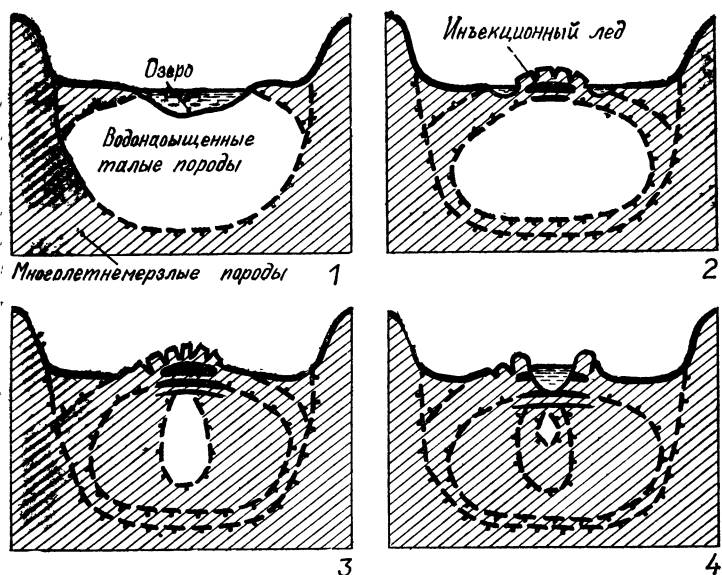


Рис. 36. Схема образования многолетнего бугра пучения в условиях «закрытой системы» при промерзании несквозного подошрного талика (1, 2, 3) и его разрушение (4).

тягивании (миграции) влаги через глинистые грунты к фронту промерзания. В целом булгунихи являются инъекционными буграми пучения. Рост булгунихов заканчивается, когда замкнутый водоносный талик полностью промерзает. Трещины, образующиеся в процессе роста бугра, становятся часто причиной его разрушения: обнажающийся в них подземный лед протаивает под действием тепла. Вершина булгуниха проседает, и он приобретает вид потухшего вулкана с приподнятыми неровными краями и кратерообразной воронкой в центре, иногда заполненной водой.

Несквозные талики под термокарстовыми озерами, с промерзанием которых связано образование булгунихов, распространены главным образом в пределах равнин северной части области вечной мерзлоты. Поэтому и сами булгунихи распространены преимущественно в условиях суровой мощной мерзлоты и редко встречаются вблизи ее южной границы.



Рис. 37. Миграционные бугры пучения, сложенные с поверхности торфом. (Фото Ю. А. Мурзина.)

Существенно большое распространение в области многолетней мерзлоты имеют миграционные бугры пучения. Образуются они в условиях так называемой открытой системы в результате медленного промерзания торфяников и глинистых пород, ниже которых на некоторой глубине залегают водоносные отложения. Подземная вода из подстилающих слоев подтягивается — мигрирует к фронту промерзания, образуя ледяные прослой и линзы, которые существенно увеличивают объем мерзлой породы по сравнению с талой. Поверхность земли приподнимается, выпучивается. Пучение при многолетнем промерзании может идти как локально на небольших участках, так и на обширных пространствах. В первом случае формируются выпуклые (рис. 37) или плосковерхие миграционные бугры пучения с поперечником до нескольких десятков метров и высотой до 2—4 м. Во втором случае, возникают так называемые площади пучения, занимающие пространства до нескольких квадратных километров. Поскольку их высота составляет всего несколько метров,

а поверхность весьма обширна, постольку они обычно плохо выражены в рельефе и для их обнаружения нужно обладать определенными навыками.

Многолетние миграционные бугры пучения распространены наиболее широко на низменных равнинах севера европейской части СССР и в Западной Сибири, где они тяготеют к южной окраине области вечной мерзлоты. Здесь широко представлены развивающиеся, растущие бугры и площади пучения, часто связанные с массивами торфяников. Рост миграционных бугров пучения продолжается до тех пор, пока не начнет промерзать водоносный горизонт, поставляющий влагу для образования подземного льда в их ядрах. Поэтому в условиях суровых мощных толщ распространены миграционные бугры, преимущественно окончившие свой рост в геологическом прошлом, а сейчас находящиеся в стадиях консервации и разрушения. Небольшие бугры развиваются только на участках промерзающих таликов.

Рост многолетних миграционных бугров и площадей пучения происходит неравномерно: в холодные периоды они увеличиваются по высоте, а в теплые как бы оседают. Поэтому при строительстве дорог, линий электропередачи, газо- и нефтепроводов через развивающиеся площади пучения вблизи южной границы мерзлоты сопряжено со значительными сложностями.

Очень большое распространение в районах с глубоким сезонным промерзанием и сезонным протаиванием глинистых грунтов имеют однолетние (сезонные) миграционные бугры пучения. Они появляются зимой в результате образования с сезоннопромерзающим слоем линз миграционного (сегрегационного) льда. Размеры их обычно не велики. В поперечнике они бывают от нескольких десятков сантиметров до 2—3 м, а высота их достигает 30—40 см. Летом они протаивают и на их месте грунты обладают очень высокой влажностью и небольшой несущей способностью.

Сезонные бугры пучения часто возникают на дорогах, строительных площадках, аэродромах, там, где утаптывается или убирается снег. Вследствие этого резко увеличивается глубина зимнего промерзания и сильнее подтягивается влага из водоносного горизонта грунтовых вод и усиливается морозное пучение дисперсных пород. На твердых покрытиях дорог и аэродромов в месте образова-

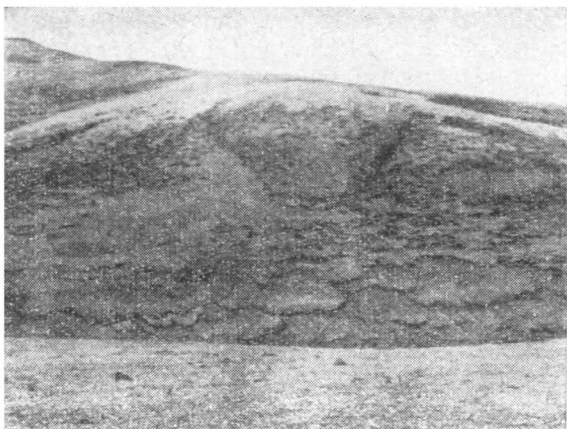


Рис. 38. Солифлюкционные терраски и языки на склоне возвышенности в районе Анадыря на Чукотке. (Фото Л. А. Жигарева).

ния бугров появляются трещины, выпучиваются шпалы и прогибаются железнодорожные рельсы. Совершенно очевидно, что пучение мешает движению транспорта в зимнее время. Скорость движения поездов уменьшается в несколько раз, но неприятности не оканчиваются и летом. На месте протаявших бугров образуются линзы разжиженного грунта, который под влиянием динамических нагрузок, создаваемых идущим транспортом, выталкивается на поверхность. В результате на грунтовых дорогах образуются воронки, в асфальтовых покрытиях шоссе возникают выбоины, а под железнодорожными шпалами — полости, что требует срочного ремонта дорог.

**Подвижные склоны.** Большая часть суши представляет собой наклонные поверхности. Это склоны гор и возвышенностей, борта долин рек, оврагов и небольших ручьев, расчленяющих земную поверхность. На этих наклонных поверхностях происходят экзогенные процессы, называемые склоновыми. Под действием силы тяжести возникают обвалы и осыпи, дождевые воды смывают мелкие частицы с оголенных поверхностей склонов и у их подножия накапливаются шлейфы делювиальных отложений; большие массивы породы отчленяются и соскальзывают вниз, образуя оползни.

В условиях вечной мерзлоты склоновые процессы приобретают особые, специфические черты и в целом становятся очень активными. Но как же может вечная мерзлота ускорять геологические процессы на склонах, ведь массивы пород, даже рыхлых, малопрочных в талом состоянии, накрепко сцементированы льдом? И не так ли давно ученые люди Европы считали область вечной мерзлоты областью вечного покоя?

Считали. А сейчас вряд ли найдется специалист, будь то геолог, географ или строитель, который станет утверждать нечто подобное. Все так неустойчиво, неечно в этой области «вечного покоя» и холода. Но особенно это относится к склонам. Ведь породы на них оттаивают каждое лето на глубину от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров и в процессе оттаивания резко уменьшают свою прочность.

Рыхлые породы — супеси, суглинки, пылеватые пески, содержащие в своем составе подземный лед, приобретают при сезонном оттаивании большую влажность и часто становятся водонасыщенными, текучими. Летние дожди, просачиваясь в них на небольшую глубину (ведь ниже талого слоя лежит водонепроницаемая мерзлая толща), еще больше увеличивают их влажность и делают подвижными. И земля на склонах начинает течь. В одних случаях она течет медленно, в других — быстро, почти катастрофически. Медленно происходит течение дисперсного грунта подо мхом и слоем дернины. Незаметно, почти не нарушая растительных покровов ползет порода по склонам возвышенностей и гор. Правда, в одних местах

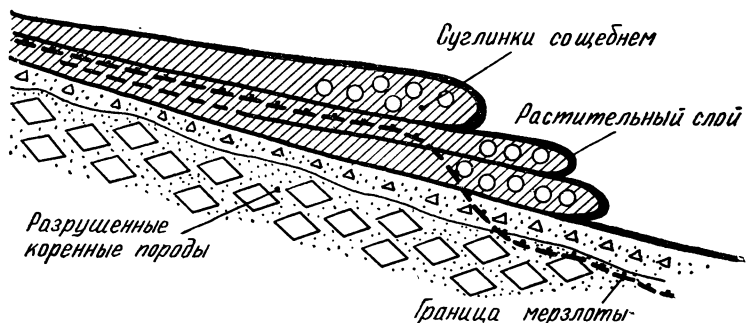


Рис. 39. Стрoение солифлюкционного языка в разрезе (по Л. А. Жигареву).

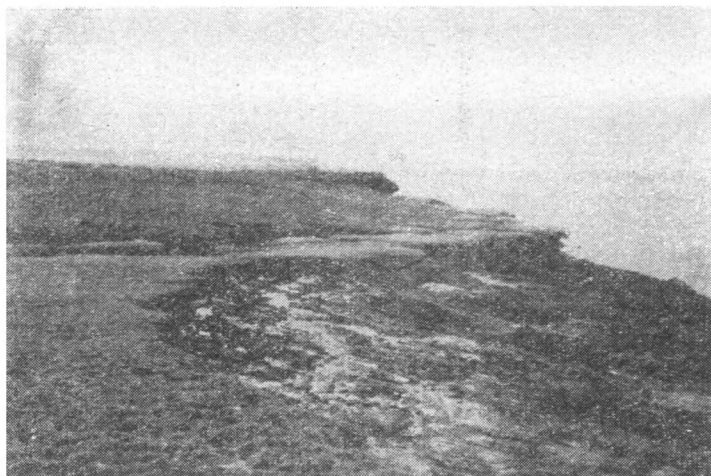


Рис. 40. Быстрая солифлюкция — спływ протаявших льдистых отложений, возникший в результате нарушения устойчивости склона при его подмывании морем (остров Б. Ляховский).

грунт, как бы уплывающий из-под растительного слоя, тянет его за собой, иногда разрывая так, что вдоль склона образуются системы трещин и разрывов дернины, в которых проглядывает разжиженная масса.

В других местах, ниже по склону, плывущий грунт как бы натывается на препятствие. Он приподнимает дернину и, заворачивая ее, сползает вниз, образуя натеки, валы, терраски, языки. Это солифлюкция — пластично-вязкое течение грунта, создающее на склонах крутизной от 20—25 до 5—6° солифлюкционные формы микрорельефа (рис. 38 и 39).

Солифлюкция может быть не только медленной, но и быстрой. В этих случаях грунт приобретает текучую консистенцию. Растительные покровы разрываются на куски, как бы плавающие на разжиженной, подвижной массе. Грязевые потоки засасывают сапоги исследователей, неосторожно ступивших в поток в надежде пересечь его по островкам дернины. Правда, это не опасно. Ведь всего на глубине 50—80 см лежит вечномёрзлый льдистый грунт. Обычно с его летним оттаиванием и связано возникновение быстрой солифлюкции. Причинами про-

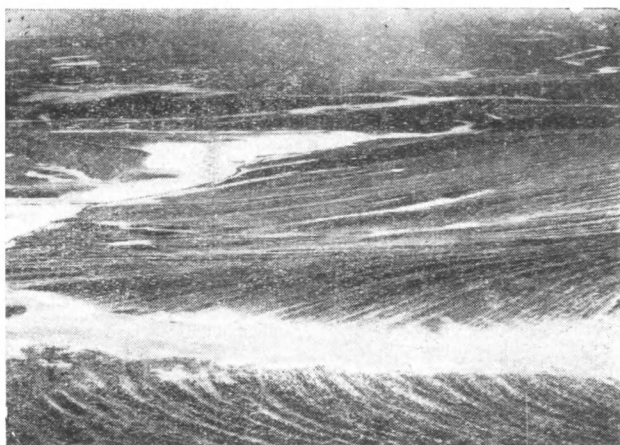
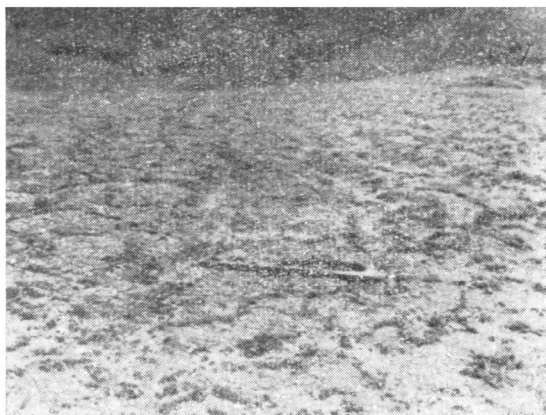


Рис. 41. Солифлюкционные склоны в условиях суровой мерзлоты. Полосы подвижного грунта веерами расходятся к подножиям возвышенностей. Снимок сделан в июле после снегопада; снег концентрируется в понижениях, подчеркивая полосчатый рисунок склонов. (Фото Л. Д. Сулержицкого.)

таивания верхних льдистых слоев многолетнемерзлых пород на склонах может быть подрезание берегов морем (рис. 40), реками и озерами, обильное выпадание теплых летних дождей или антропогенные причины, например неосторожное создание дорожной выемки или канавы. Обычно быстрая солифлюкция проявляется на небольших участках, локально. Она развивается неожиданно, процесс протекает интенсивно, но... через несколько лет затухает, оставляя на месте своей вспышки следы грязевого потока с небольшими натеками грунта.

На севере мерзлой зоны и высоко в горах облик солифлюкции меняется. Течение грунта идет как бы полосами, веерами, расходящимися к подножиям склонов (рис. 41). Подвижный грунт на этих полосах почти лишен растительности, иногда видны ступеньки, образованные наползающими друг на друга микропотоками. Часто полосы состоят из расположенных цепочками глинистых пятен, называемых пятнами-медальонами, окаймленных растительными бордюрами (рис. 42). Между полосами — растительный покров, более сомкнутый, состоящий из различных видов мхов и невысокой травы.



**Рис. 42. «Структурная» солифлюкция: цепочки  
каменистых пятен — медальонов — вытянуты  
вниз по склону.**

Концентрация солифлюкции по полосам придает удивительное своеобразие тундровым ландшафтам невысоких гор и возвышенностей в условиях суровой мерзлоты и неглубокого сезонного оттаивания. Полосчатость солифлюкционных склонов часто подчеркивается, усугубляется термоэрозией, когда ручейки после дождей или при таянии снега текут по пониженным полосам, размывая влажные пылеватые грунты сезонноталого слоя и протаивая залегающие под ним подземные льды. В результате образуются делли — полосчатые склоны, созданные при совместном действии полосчатой солифлюкции и избирательной термоэрозии.

Поверхность делли хорошо видна на первом плане рисунка 41. Иногда делли в тундре и зоне северной тайги при наблюдениях с воздуха и на аэрофотоснимках выглядят как вспаханные поля средней полосы России. Только полосы этой тундровой «пашни» с удивительным постоянством следуют направлению наибольших уклонов поверхности. Хочешь провести горизонтали на карте или аэрофотоснимке, строй их перпендикулярно к направлению солифлюкционных полос. И никогда не ошибешься. Природа помогает топографам.

На склонах гор, сложенных крепкими скальными и полускальными породами, где в составе склоновых отло-



жений много щебня и дресвы, процесс движения материала сочетается с вымораживанием камней. Обломки крепких пород концентрируются по периферии подвижных полос, как бы замещая собой их растительные бордюры. На склонах чередуются полосы, сложенные глинистым и щебнистым материалом, медленнодвигающимся к их подножиям.

Солифлюкция — мощный агент разрушения возвышенностей, бортов долин рек и ручьев. Но процесс, разрушающий горные породы, одновременно является и процессом созидательным. Дисперсный материал, переносимый на склонах солифлюкцией, откладывается у их подножий, создавая здесь аккумулятивные формы рельефа.

В северной части области вечной мерзлоты, особенно в низкогорных районах Северо-Востока СССР, где склоны возвышенностей и гор имеют среднюю крутизну, этот процесс, действуя в течение многих десятков тысяч лет, приводит к накоплению мощных масс солифлюкционных отложений. Эти отложения перекрывают террасы рек, как бы погребая их под собой. На месте речных террас в долинах рек образуются своеобразной выпуклой формы склоны — террасо-увалы. В недрах таких террасо-увалов бывают погребены россыпи золота и других минералов, накопившиеся в речном аллювии.

Солифлюкционное течение пород на склонах не способствует разделению дисперсных пород по величине слагающих их частиц или составляющих их минералов по массе. Солифлюкционный поток равным образом несет частицы легкого кварца или тяжелого золота. Поэтому если в горах разрушаются породы, содержащие коренное золото, то продукты их разрушения будут перенесены солифлюкцией в долины рек без потери золотых частиц по пути их движения. Здесь солифлюкционные осадки перемываются водами ручьев и рек, которые выносят легкие минералы и оставляют на месте тяжелые, концентрируют их в речном галечнике и песках. Таким образом в условиях вечной мерзлоты солифлюкция поставляет материал, содержащий тяжелые минералы, а реки отмывают его, концентрируя в россыпях.

Коротко еще об одной любопытной особенности в проявлении солифлюкции. Уже давно геологами и географами было замечено, что на юге Восточной Сибири солифлюкция проявляется наиболее интенсивно на склонах

возвышенностей, обращенных на север, а на севере этого региона, в горах Верхоянья, в бассейнах рек Индигирки и Колымы, напротив, этот процесс более активен на склонах, имеющих южную экспозицию. Действительно, в Забайкалье и Прибайкалье, в районах достаточно южных, с континентальным и засушливым климатом, на обогреваемых и сухих южных склонах возвышенностей влажность пород в сезонноталом слое не велика и при сезонном оттаивании, достигающем глубины 3—4 м, они не приобретают текучей консистенции. На северных, обычно холодных и сильно увлажненных склонах, плохо обогреваемых солнцем, отложения имеют высокую влажность, а глубина их сезонного оттаивания, достигая 1,5—2 м, бывает оптимальной для развития солифлюкции.

В северных районах при общей высокой влажности пород сезонноталого слоя на склонах возвышенностей оптимальные глубины сезонного оттаивания бывают на склонах, экспонированных на юг, т. е. более теплых. На склонах северной экспозиции глубина сезонного оттаивания слишком мала, чтобы породы могли активно течь. Тем более что при неглубоком сезонном оттаивании, составляющем всего 30—40 см, большая часть этого слоя сложена мхами и слаборазложившимся торфом, закрепляющим склоны и препятствующим течению грунта.

Таким образом возникает явление, называемое геоморфологами экспозиционной асимметрией долин. В долинах, проходящих широтно, один борт сухой, с четко выраженными речными террасами, без следов течения пород на склонах, а другой борт, напротив, несет следы активной солифлюкции. Террасы этого борта долины сильно перекрыты солифлюкционным материалом и часто превращены в террасо-увалы.

При этом экспозиционная асимметрия долин на юге и севере Сибири прямо противоположна.

В горах и плоскогорьях, где близко к поверхности залегают скальные породы, распространен еще один вид склоновых явлений, наиболее свойственных для области вечной мерзлоты. Это курумы — каменные потоки (рис. 43), каменные реки и обширные каменные поля, покрывающие целые склоны. Курумы обычно построены сложно. В образовании, движении и аккумуляции курумного материала участвует целый ряд процессов, интенсивность и роль которых на разных стадиях развития



Рис. 43. Каменный поток — курум — на склоне горы (Становое нагорье, вблизи трассы БАМа).

курумов и в разных частях одного и того же курума неодинакова. К числу этих процессов относится вымораживание (выпучивание) камней, приводящее к концентрации их на поверхности, криогенная и термогенная десерпция, соскальзывание и сползание обломочного материала по льдистому горизонту, слагающему основание курума и медленное течение этого льдистого материала под весом курума, и др.

Важнейшее значение в движении курума имеет процесс, называемый термогенной десерпцией — сползанием. Коротко расскажем о механизме его действия. Глыбы камня, слагающие курум, постоянно нагреваются и охлаждаются. При нагреве размер глыб возрастает, они как бы поднимаются вверх перпендикулярно к поверхности склона. При охлаждении размер глыб уменьшается и приподнятые глыбы садятся, но теперь уже перпендикулярно вниз, подчиняясь действию силы тяжести. И так много, много раз. В результате камни медленно смещаются, ползут вниз по склону, причем более крупные из них как бы выталкиваются к поверхности курума, а мелкие остаются внизу. Приповерхностные слои курума, которые нагреваются и охлаждаются сильнее, чем залегаю-

щие вблизи подошвы слоя сезонного оттаивания, смещаются вниз по склону быстрее. Действие криогенной десерпции подобно термогенной. Разница заключается только в том, что при криогенной десерпции температуры переходят через  $0^{\circ}\text{C}$  и содержащаяся в теле курума вода замерзает и оттаивает, а лед усиливает эффект выталкивания камней вверх. Понятно, что чем больше крутизна склона, тем быстрее движется курумный материал под действием десерпции.

В основании склонов курумный материал аккумулируется. Движение его замедляется или прекращается вовсе.

В периоды выпадания ливневых дождей, когда тело курума насыщается водой, не успевающей стекать вниз, когда происходит быстрое оттаивание мерзлого основания и вес его сильно увеличивается, могут происходить быстрые подвижки всей каменной массы вниз, носящие катастрофический характер.

В сейсмически активных горных районах причиной катастрофически быстрых движений курумного материала могут быть и землетрясения. Заметим, что склоны покрытые курумами, малоблагоприятны для строительства дорог. Дорожные насыпи, представляющие собой дополнительную нагрузку, особенно выемки, подразделяющие курумы и нарушающие их равновесие, могут служить причиной смещения каменных масс и разрушения дороги.

**Термокарст и его последствия.** Пожалуй, каждый исследователь, каждый житель Севера сталкивался с явлением термокарста в самых разнообразных его проявлениях. На низменных равнинах в области вечной мерзлоты термокарст приводит к образованию бесчисленных озер, как совсем маленьких, напоминающих лужи, так и огромных, занимающих площади в десятки квадратных километров. Эти озера растут, смещаются, осушаются, и на их месте остаются термокарстовые котловины. Какова же сущность процесса, не совсем правильно названного «термическим карстом»?

Термокарст — это процесс вытаивания подземных льдов или оттаивания сильно льдистых отложений, сопровождающийся просадками земной поверхности и образованием пониженных, или, как обычно говорят ученые, отрицательных форм рельефа (рис. 44). Значит, для того чтобы начал развиваться процесс термокарста, не-



Рис. 44. Термокарстовая западина с озерком на террасе озера Чатыроем на Пампире, на высоте 3430 м. (Фото Н. Е. Ермолина.)

обходимо, чтобы в земле неглубоко от поверхности находились залежи подземных льдов или высокольдистых рыхлых пород, способных давать осадку при их оттаивании. Протаивать подземные льды могут как в результате увеличения глубины сезонного оттаивания, если они залегают близко к поверхности, так и в силу глубокого многолетнего оттаивания мерзлых толщ. В этом случае льды лежат обычно на глубине нескольких метров и бывают перекрыты слабольдистыми отложениями. При этом кровля над сильнольдистыми рыхлыми породами или над подземными льдами проседает, образуя термокарстовые западины.

Возможность появления термокарста, приводящего к просадкам поверхности, всегда очень беспокоит строителей. И не напрасно. Термокарст может разрушить дороги, жилые дома и промышленные сооружения. В естественных условиях термокарст в разных его проявлениях определяет ландшафты обширных территорий. Например, термокарстово-озерные ландшафты свойственны северу Западно-Сибирской низменности, приморским арктическим низменностям Якутии и Центрально-Якутской

низменности. Однако формы термокарста в этих районах различны.

Проблеме термокарста были посвящены многолетние исследования С. П. Качурина — одного из первых советских мерзлотоведов, сподвижника М. И. Сумгина. В его монографии «Термокарст на территории СССР», изданной в 1961 г., он обобщил все сведения об особенностях проявления этого процесса в разных районах криолитозоны и проанализировал причины его возникновения.

Причины увеличения глубин сезонного оттаивания и возникновения термокарста различны. Чаще всего это потепление климата, проявляющееся на обширных пространствах и порождающее возникновение многочисленных термокарстовых форм. Толчком к появлению термокарста могут быть лесные пожары, при которых не только уничтожаются сами леса, но и выгорает наземный растительный покров из трав и мхов и поверхность земли становится черной. В результате уменьшается ее отражательная способность. Летом она сильнее нагревается и грунт на месте пожаров протаивает глубже, чем в ненарушенных условиях.

Процесс термокарста очень сложен. Он имеет много сторон: теплофизическую, геологическую, геоморфологическую. Эти стороны связаны между собой. Как и для любого сложного природного процесса, при рассмотрении термокарста важно выделить главные причины, приводящие к его возникновению и развитию, и те необходимые условия, при наличии которых может развиваться этот процесс. Это позволяет найти его общие черты и выделить характерные особенности возникновения, во-первых, при протаивании подземных льдов разного происхождения, во-вторых, при развитии термокарста в различной природной обстановке. Попробуем в общих чертах проанализировать особенности проявления термокарста в разных природных условиях.

Для развития процесса термокарста очень существенно, что на плоских поверхностях равнин появляются понижения, заполненные водой. Вода в мелких озерах сильно прогревается летом за счет прямой солнечной радиации, как бы аккумулируя и сохраняя солнечное тепло. Глубина сезонного оттаивания под ними увеличивается, и протаиванием захватываются все новые горизонты льдистых пород или подземного льда. В результате про-



Рис. 45. Термокарстовое озеро в Якутии; около берега деревья оседают в озеро и гибнут. (Фото Л. Д. Сулержичского.)

исходят новые просадки, нарушаются растительные покровы (рис. 45), глубина озерков увеличивается, а их отепляющее воздействие на мерзлые грунты растет. Таким образом мелкие термокарстовые водоемы сами как бы стимулируют дальнейшее развитие термокарстового процесса.

Анализируя теплофизические условия развития термокарста, В. А. Кудрявцев показал, что при вытаивании мономинеральных залежей льда с образованием бесконечных озер процесс носит как бы характер цепной реакции (рис. 46). Зародившееся термокарстовое озеро само приводит к прогрессивному протаиванию подземного льда до полного его исчезновения. Под озерами, температура донных отложений которых положительная, образуется талик. Форма талика зависит от размеров и глубины озера и мощности мерзлоты. Если поперечник озера меньше мощности мерзлоты, то формируется несквозной подозерный талик, а если его диаметр вдвое превышает мощность мерзлой зоны, то в конечном итоге, когда процесс много-

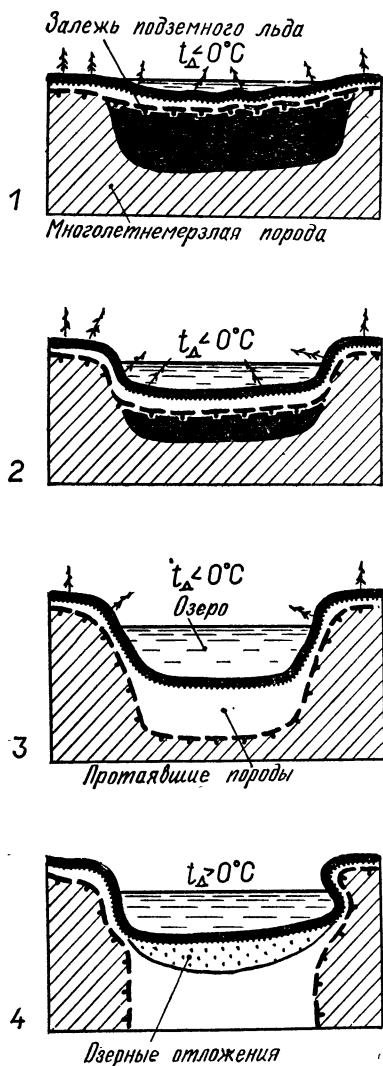


Рис. 46. Схема прогрессивного развития термокарста при протаивании залежи подземного льда (1, 2) с образованием подозерного талика (3, 4).

летнего оттаивания достигает своей окончательной фазы, под озером образуется сквозной талик.

Протаивание мерзлых толщ под термокарстовыми озерами — процесс длительный. Поэтому под теми из них, которые образовались относительно недавно, таликовые чащи еще не достигли своей предельной, стационарной формы, а продолжают развиваться и сейчас. Геологи-мерзлотоведы используют это обстоятельство для определения времени их возникновения. Изучив в поле мощности таликов под озерами и мощности окружающих их мерзлых толщ, температуры донных отложений и мерзлых пород, а также их теплофизические свойства, можно математически рассчитать время, необходимое для образования сквозных таликов. Так мы можем узнать, когда возникло термокарстовое озеро.

Многочисленные термокарстовые озера распространены на северных низменностях, сложенных льдистыми осадочными породами и подземными льдами. Глубина многих из них составляет от 3—4 до 10—20 м, и донные отложения находятся в талом состоянии. Другие



термокарстовые озера имеют глубину всего 1—1,5 м, и подстилаются многолетнемерзлыми породами, часто обладающими очень высокой льдистостью. При этом дальнейшего оттаивания и просадок этих пород не наблюдается. Кроме того, накапливающиеся в мелких озерах осадки сами промерзают, а на мелководье в них иногда даже начинают образовываться повторно-жильные льды.

Что происходит? Почему возникшее термокарстовое озеро не протаяло под собой высокольдистый грунт? Ведь некоторые исследователи утверждали, что возникшее термокарстовое озеро всегда «прожигает» под собой мерзлую толщу, приводит к уничтожению льдистых пород.

Да, иногда «прожигает»! Но всегда ли бывает так? Всеобщий ли это закон? Или есть условия, когда термокарст бессилен разрушить льдистые породы? Попробуем найти этому объяснение.

Дело в том, что при протаивании под озерами льдистых отложений происходят два процесса. Один из них — это просадка при оттаивании, которая ведет к увеличению

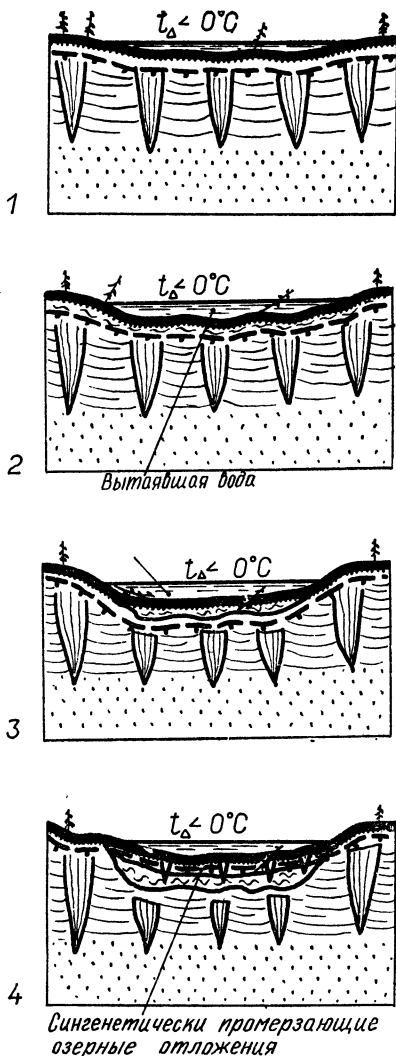


Рис. 47. Схема развития затухающего термокарста при протаивании льдистых отложений с повторно-жильными льдами (1, 2, 3) и накоплением в термокарстовом водоеме сингенетически промерзающих отложений (4).

глубины озера и росту его обогревающего влияния на грунты, о чем было сказано выше. Другой — это высвобождение минеральной и органической составляющих из протаивающей породы и концентрация их над льдистой, еще не протаявшей толщей. В результате образуется слой нельдистых отложений, предохраняющих льдистый грунт от теплового воздействия озера (рис. 47). Вот тут-то и кроется отгадка тайны термокарстовых озер с мерзлым дном. В том случае, когда в процессе развития термокарста глубина озера и его обогревающее влияние на грунты увеличивается медленно, а слой нельдистых вытаявших отложений растет быстро, то термокарстовые просадки прекращаются. Происходит это, когда протаивают относительно малольдистые отложения. При этом глубина озера достигает предельной величины, а температура донных отложений остается отрицательной. Сезонно оттаивают только малольдистые отложения. Они-то и предохраняют высокольдистые породы от дальнейшего протаивания.

Термокарст в этом случае затухает. Но он может вновь интенсифицироваться, если глубина воды в озере увеличится под влиянием каких-то внешних причин, например при создании подпора. Новой волне термокарста может способствовать и потепление климата, когда возрастает обогревающее действие на грунты мелких озер. Если в тех же природных условиях протаивают высокольдистые породы, то рост глубины термокарстовых озер и их обогревающего влияния превышает концентрацию в сезоннопротаивающем слое минеральной и органической составляющей оттаивающих пород. Через некоторое время глубина термокарстового озера увеличивается настолько, что температура донных отложений становится положительной. Под озером начинает образовываться и расти подозерный талик, а термокарстовые просадки продолжают до полного протаивания льдистых пород.

Глубокие термокарстовые озера сохраняются и даже продолжают развиваться при похолоданиях климата, следующих за теплыми климатическими периодами, когда шло массовое образование термокарста. Именно такие озера, возникшие в климатический оптимум, который был несколько тысяч лет назад, в обилии встречаются на приморских низменностях Якутии и арктических островах, в очень суровой климатической обстановке, продол-

жая свою разрушительную работу. Воды термокарстовых озер воздействуют на берега, сложенные льдистыми породами, оттаивают и размывают их. Этот процесс протаивания и размыва льдистых пород водами озер и северных морей называется термоабразией. Он приводит к увеличению площади термокарстовых озер, изменению их формы. Размывая льдистые берега, термокарстовые озера на равнинах Севера смещаются, мигрируют. На Чукотке и американском Севере встречены обширные территории с ориентированными термокарстовыми озерами, имеющими эллипсоидную форму. Длинная ось этих озер вытянута по направлению господствующих летом ветров. Преобладание ветров одного направления приводит к тому, что озерные воды летом более интенсивно размывают подветренные берега, приобретая вытянутую форму и смещаясь в одном направлении.

Миграция термокарстовых озер, их дренирование речной сетью или высыхание приводят к образованию на их месте термокарстовых котловин с плоским дном. В Западной Сибири, где термокарст развивается главным образом на льдистых морских, ледниково-морских и ледниковых отложениях, содержащих пластовые залежи подземных льдов, термокарстовые котловины называются хасыреями. В Якутии такие котловины, образовавшиеся при вытаивании пород «ледового комплекса» с сингенетическими повторно-жильными льдами, носят название аласов. В условиях избыточного влажного климата приморских равнин Севера все термокарстовые озера и котловины имеют сток поверхностных вод. Из них вытекают ручьи и небольшие реки. А вот в условиях засушливой Центральной Якутии часто встречаются котловины с высыхающими или высохшими термокарстовыми озерами (рис. 48). Вода в этих озерах имеет высокое содержание солей, обладает неприятным горьковатым вкусом и непригодна для питья. Высыхание термокарстовых озер ведет к ослаблению термокарстового процесса, промерзанию подозерных таликов и часто к формированию в их днище булгунахов.

Процессы термокарста, которые возникают при возможности стока воды, образующейся при таянии подземных льдов, идут по-иному, чем при образовании термокарстовых озер. Самое существенное, что они являются затухающими, довольно быстро прекращающими свое

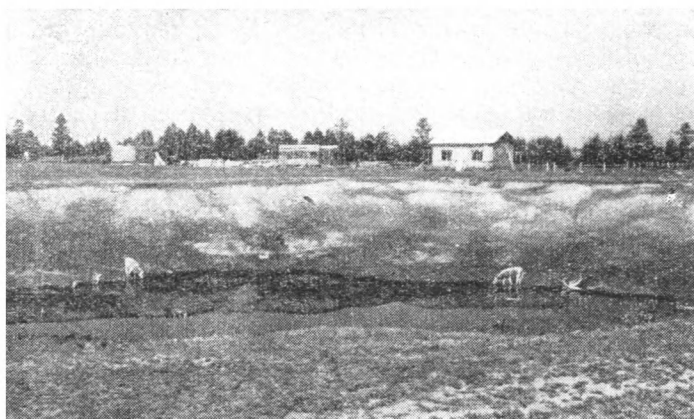


Рис. 48. Замкнутый алас с высыхающим термокарстовым озером в Центральной Якутии.

поступательное развитие. При отсутствии термокарстового водоема отсутствует и его тепляющее влияние и постоянное протаивание льдистых пород прекращается, а в их кровле скапливается слабольшедистый грунт. Это обстоятельство используется в хозяйственной практике. Чтобы предотвратить возникновение термокарста или прекратить его прогрессивное развитие, термокарстовые водоемы осушают, спускают в речную сеть, а местность дренируют. Эта мера борьбы с термокарстом выработана путем анализа законов развития этого процесса в естественных условиях.

В Центральной Якутии днища осушенных термокарстовых котловин — аласов — обычно представляют собой прекрасные луга, издавна используемые местным населением для выпаса скота. На северных низменностях днища аласов разбиты системой морозобойных полигонов и на их поверхности развиваются травянисто-моховые сообщества, малопригодные для использования в качестве корма для скота. Однако сразу после осушения озера в течение ряда лет (а возможно, и десятков лет) на его днище развивается комплекс трав, который можно использовать как для заготовки сена и сочных кормов, так и для летнего выпаса. Эта особенность развития ландшафтов была подмечена магаданским мерзлотоведом

С. В. Томирдиаро, который предложил и внедрил в практику спуск, осушение термокарстовых озер для создания сенокосных угодий на Чукотке. Для случая возможного заболачивания днища искусственного аласа при промерзании подозерного талика, развития морозобойного растрескивания и появления травяно-моховых ассоциаций растений он предложил еще один мелиоративный прием: создать искусственное озеро в аласной котловине, перекрыв временной земляной дамбой канал, по которому прежде проводился спуск озера в речную сеть. Затем по прошествии нескольких лет, когда льдистые породы в днище начнут оттаивать, а моховые покровы отомрут и всплывут, вновь спустить озеро и опять использовать его днище как сенокосные угодья.

Следует сказать, что термокарст часто сопровождается процессом термоэрозии — размыва мерзлых льдистых пород водами ручейков и речек. Движущаяся вода оттаивает мерзлый грунт, размывает и сносит талые слои. В результате ручейки легко врезаются в глубь мерзлой породы, быстро образуя крутостенные овраги, рывины и промоины. Мерзлый грунт на их стенках оттаивает, оплывает и уносится потоками. Часто в условиях суровой

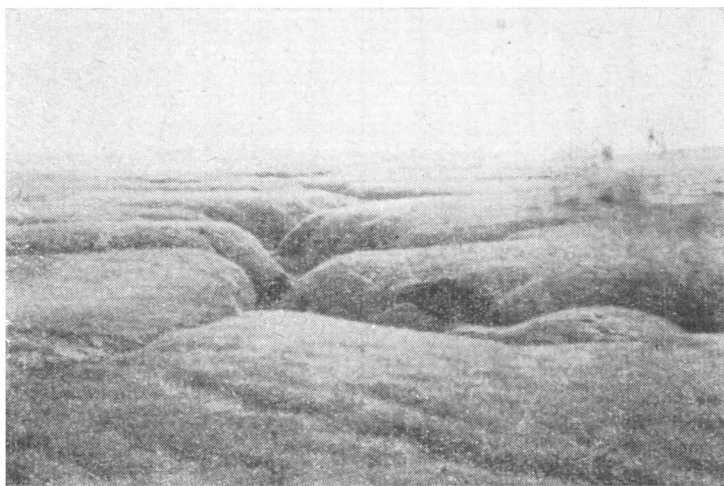


Рис. 49. Термоэрозионный овраг, образовавшийся при размыве системы повторно-жильных льдов

мерзлоты ручейки наследуют контуры полигональной сети повторно-жильных льдов (рис. 49). В этом случае водотоки имеют узкое русло, круто, часто под прямыми углами изменяют свое направление. Над местами, где пересекаются жилы, оно расширяется, образуя глубокие, округлой формы бочаги.

Термоэрозия резко усиливается при снятии растительного покрова в районах хозяйственного освоения. В результате начинает образовываться сеть оврагов. Часто термокарстовые рытвины возникают по придорожным канавам, грозя устойчивости дорожного полотна (рис. 50).

**Термоабразия и загадка Арктического шельфа.** Выше мы упомянули о том, что озера и моря, воздействуя на берега, сложенные многолетнемерзлыми льдистыми отложениями, разрушают их. Процесс разрушения морями и озерами мерзлых берегов называется термоабразией. Он складывается из оттаивания льдистых пород и подземного льда под действием воды, а в надводной части берега — под влиянием теплых масс воздуха, прямой солнечной инсоляции и дождей, из размыва оттаявших слоев породы



Рис. 50. Термоэрозия грозит устойчивости дороги.

*Линия отрыва блока*

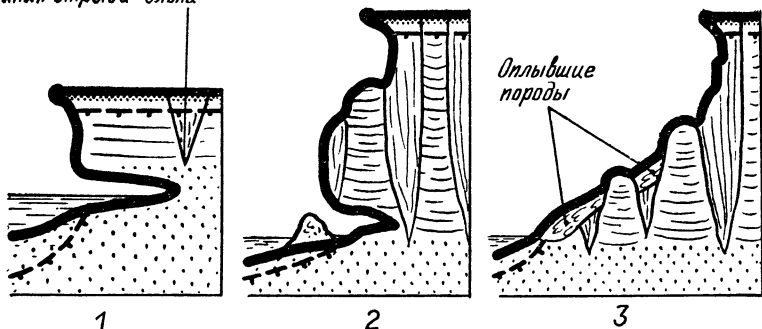
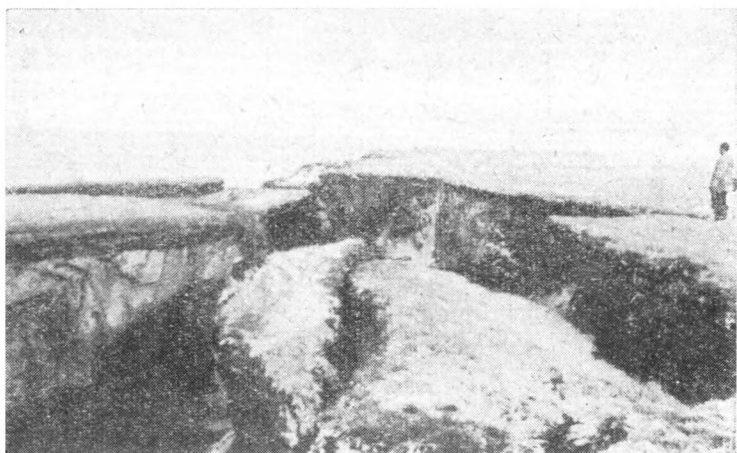


Рис. 51. Термоабразионные берега с нишами (1, 2) и без ниш (3), когда в основании берега скапливаются вытаявающие и оплывающие породы.

вследствие волнового воздействия водоемов и из выноса осадков течениями. Вследствие волнового воздействия моря в основании берегов часто образуются внушительные термоабразионные ниши, глубина которых достигает 10—15 м (рис. 51, 1). Массивы мерзлой породы, подрезанные нишами, нависают в отвесных береговых уступах, грозя обрушиться вниз. В берегах, где подмываются породы с повторно-жильными льдами, плоскости отрыва блоков породы обычно проходят по льду (рис. 52). Огромные блоки отрываются и обрушиваются вниз (рис. 53), где они постепенно оттаивают и размываются морем.

Берега, сложенные породами «ледового комплекса» и состоящие на 70—90% из подземного льда, активно разрушаются под действием солнечного тепла, воздуха и дождей. Моря, озера, а также реки чаще всего выполняют в этом случае роль «чистильщиков». Они размывают и уносят вытаявшие минеральные и органические остатки протаявшей породы, сползающие вниз и накапливающиеся в основании обрыва или в нижней части склона. Тем самым термоабразия как бы сохраняет крутизну берегового обрыва (рис. 51, 2). Если термоабразия ослабевает или прекращается, то постепенно берег выполаживается, льдистые породы и подземные льды покрываются слоем вытаявшей породы, которая предохраняет их от дальнейшего оттаивания (рис. 51, 3).

Абразия берегов северных морей, сложенных льдистыми породами, происходит иногда очень быстро и до-



**Рис. 52.** Отрыв блоков на подмываемом морском берегу Оягоского Яра происходит по ледяным жилам.

стигает 10—12 м, а в некоторых случаях и 20—30 м в год. Этот процесс, как упоминалось выше, привел к полному разрушению островов Семеновского и Васильевского. По берегам пролива Дмитрия Лаптева, соединяющего море Лаптевых с Восточно-Сибирским морем, благодаря термоабразии образовались величественные береговые обрывы: с севера — берег острова Большого Ляховского, а с юга — так называемый Оягосский Яр, представляющий собой северное побережье Яно-Индигирской приморской низменности.

Термоабразия сыграла значительную роль в формировании шельфа у берегов восточной части Советской Арктики и Северной Америки. Совсем недавно этому процессу приписывалась решающая роль в разрушении арктических равнин, сложенных высокольдистыми отложениями. Разрушение этих равнин началось в начале голоцена, т. е. около 10 тыс. лет назад. Активно продолжается он и сейчас. Однако в последние годы советский ученый Э. Ф. Арз, в течение многих лет изучавший механизм и мерзлотно-геологические условия проявления термоабразии, доказал, что за счет этого процесса море могло продвинуться к югу только на несколько десятков километров. В то же время известно, что ширина шельфа





Рис. 53. Блок мерзлой породы, обрушившийся на морской пляж (берег острова Б. Ляховский).

морей восточного сектора Советской Арктики достигает несколько сотен километров. Это хорошо видно на карте (см. рис. 5) по размерам полосы шельфовой криолитозоны. Это несоответствие ширины шельфа, возможного времени его формирования и скорости термоабразии привело Э. Ф. Арэ к выводу, что главным в образовании Арктического шельфа была морская трансгрессия. В период последней трансгрессии произошло повышение уровня моря более чем на 100 м, что сопровождалось погружением под уровень воды обширных территорий низменностей.

С проблемой голоценовой морской трансгрессии Полярного бассейна находятся в связи любопытные явления, обнаруженные американскими учеными в мелководной прибрежной зоне моря Бофорта. При анализе аэрофотоснимков мелководья они обратили внимание на округлые пониженные формы рельефа, напоминающие по размерам и конфигурации аласы, в центре которых отчетливо просматривались бугры, подобные булгунам-пинго. Очевидно, если море абрадировало бы свои берега, то сохраниться эти формы не могли. Американские исследователи предложили оригинальное объяснение происхождению обнаруженного явления. Они считают, что,

когда морем была затоплена низменная равнина, сложенная мерзлыми льдистыми толщами, с многочисленными термокарстовыми озерами и несквозными таликами под ними, начались два процесса. Один из них — это таяние и растворение соленой водой, имеющей температуру около  $-1,7$ ,  $-1,8^{\circ}\text{C}$  подземных льдов, а другой — промерзание подозерных таликов под влиянием низкотемпературных вод. Эти талики, заключающие в себе пресные воды с температурами замерзания около  $0^{\circ}\text{C}$ , сложены с поверхности глинистыми, слабо проницаемыми породами, не позволяющими плотным, соленым водам просачиваться вниз. Вот и начали эти талики промерзать сверху под действием морской воды с отрицательной температурой, образуя замкнутые водонапорные системы, которые, в свою очередь, вызвали к жизни рост подводных булгуняхов.

Гипотеза эта весьма правдоподобна, хотя, несомненно, требует соответствующей проверки.

Термоабразия оказывает существенное влияние на устойчивость сооружений в береговой зоне. Особенно часто под ее воздействием разрушаются маяки, установленные на высоких обрывах, сложенных «ледовым комплексом» и подмываемых морем. Эти маяки приходится систематически переносить в глубь берега, когда обрыв перемещается к ним на близкое расстояние.

### Глава III

## ПРОБЛЕМЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И НАЛЕДЕЙ

**И**з иллюминатора самолета смотрю на бескрайнюю равнину севера Западной Сибири: реки, расщепленные на бесконечные протоки или извивающиеся в бесконечных петлях, и озера, озера, озера, маленькие, большие, огромные, окруженные болотистой тундрой. Вся земля залита водой.

Короткая посадка в Норильске. Незаходящее холодное полярное солнце с севера. Снова взлет, и вот уже справа остается Среднесибирское плоскогорье, розово-черные горы Бырранга, покрытые каменными россыпями, ледяная суровость которых подчеркнута белыми полосами натающих снежников. А слева, за окном, Северо-Сибирская низменность и снова болота, озера, реки. Только они поменьше, чем в Западной Сибири. Пересекаем долины Хатанги, Оленька и грандиозной Лены. И сразу под нами появляются гребни Верхоянских гор, разрезанные пенистыми прозрачными реками, в долинах которых лежат цепочки блестящих на солнце наледей. Их овальные тела разделены черными дорожками речных потоков. И чем дальше на восток, тем больше наледей видим мы в долинах горных рек и на плоских днищах межгорных тектонических впадин. А по всем логам, оврагам, долинкам и долинам бежит вода.

Так бывает летом. В это время трудно представить себе, что, когда зимой ледяной панцирь скует озера и промерзнут бесчисленные болота, вода в реках и ручьях иссякнет, обнажатся серые валунники в их руслах и только местами из-под земли, разрывая замерзающий грунт, будут бить незамерзающие ключи и подземная вода, растекаясь по поверхности, будет замерзать, обра-

зуя ледяные щиты наледей, сливающиеся с заснеженными берегами долин.

В условиях суровой мерзлоты в долинах ручьев, малых и даже средних рек сток поверхностных вод зимой отсутствует полностью. В таких могучих реках, как Колыма, Индигирка, Яна, Оленёк, Хатанга, количество воды, протекающей в зимнее время, снижается в сотни раз по сравнению с летом.

Там, где летом было изобилие воды, зимой остро встает проблема ее получения. И тут вся надежда на подземную воду. А найти и получить ее в районах вечной мерзлоты — задача совсем не легкая.

**Что происходит с подземными водами при образовании вечной мерзлоты.** Это сложная проблема, которой занимается отрасль знаний, находящаяся на стыке мерзловедения и гидрогеологии, и которую можно назвать гидрогеологией мерзлой зоны земной коры. Ее основы были заложены в 30-х годах в СССР замечательным ученым Н. И. Толстихиным. В 1941 г. им была написана книга «Подземные воды мерзлой зоны литосферы», которая обобщила знания, полученные по этому вопросу исследователями Сибири А. В. Львовым, С. А. Подъяковым, Н. М. Козьминым, В. Г. Петровым и другими, и была первой в мире монографией, посвященной этой интересной и важной научной и народнохозяйственной проблеме. С тех пор советские гидрогеологи и мерзловеды внесли много нового в познание подземных вод в районах, где верхние горизонты горных пород, содержавших некогда подземную воду, скованы вечной мерзлотой, и где связь поверхностных и подземных вод осуществляется только по локальным участкам, где породы сохранились в талом, непромерзшем состоянии, т. е. по водоносным таликам. Попробую в наиболее общих чертах рассказать о том, как изменяются гидрогеологические условия при многолетнем промерзании верхних слоев земли.

Многолетнее промерзание всех горных пород, содержащих воду, приводит, во-первых, к частичному или полному переходу ее в подземный лед, а во-вторых, к резкому изменению свойств самих пород. Водопроницаемые, водоносные породы становятся мерзлыми и водонепроницаемыми или, как обычно сейчас говорят, криогенными водоупорами. Многолетнее промерзание пород начинается от поверхности земли, где породы обычно

наиболее сильно обводнены. Высокая водоносность пород в одних районах является следствием залегания с поверхности слабо уплотненных рыхлых отложений (песков, галечников и др.), а в других районах обусловлена большой трещиноватостью коренных осадочных, метаморфических и изверженных пород. В скальных породах вблизи поверхности земли существует так называемая зона экзогенной трещиноватости, образование которой обусловлено действиями поверхностных, внешних сил: выветриванием, разуплотнением выведенных на поверхность глубинных пород, находившихся некогда под большим давлением, выщелачиванием некоторых легко растворимых компонентов пород водами и т. д. Эта зона имеет мощность от 30—40 до 150—200 м и содержит грунтовые трещинные воды.

Грунтовые воды в трещиноватых коренных породах и рыхлых отложениях пополняются за счет атмосферных осадков и поверхностных вод, с которыми они гидравлически тесно связаны. Грунтовые воды имеют свободную верхнюю поверхность и не обладают напорами. Эти воды очень часто используются для водоснабжения в поселках, деревнях, небольших городах. Для питьевого водоснабжения они должны проходить очистку, так как легко загрязняются в районах хозяйственной деятельности. При образовании вечной мерзлоты в первую очередь промерзают породы, содержащие грунтовые воды. Под небольшими мерзлыми толщами, мощность которых меньше мощности рыхлых отложений, или зоны экзогенной трещиноватости коренных пород, подземные воды сохраняются, но приобретают так называемый криогенный напор. Иногда эти воды даже фонтанируют (самоизливаются) из скважин, особенно тех, которые пробурены в долинах рек. Питание их атмосферными осадками и поверхностными водами происходит в условиях вечной мерзлоты только локально, по таликам. В районах, где мерзлые толщи имеют островное и массивно-островное распространение, талики, по которым пополняются подземные воды, приурочены как к плоским водораздельным пространствам, сложенным хорошо водопроницаемыми породами, так и к долинам рек (рис. 54). В более суровой природной обстановке талики остаются только под долинами рек, а иногда непосредственно под их руслами и глубокими старичными озерами.

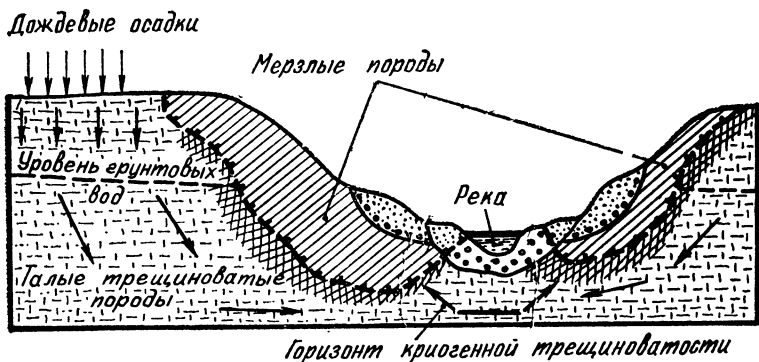


Рис. 54. Схема питания подземных вод через талики на водоразделах трещиноватых массивов. Стрелками показано направление движения подземных вод.

В массивах коренных пород трещиноватость с глубиной уменьшается, постепенно сходя на нет. А водоносные трещины сохраняются только по тектоническим разрывам и в их обрамлении. При многолетнем промерзании в первую очередь становятся криогенными водоупорными и исключаются из водообмена наиболее трещиноватые и обводненные породы, залегающие ближе к поверхности. Гидрологи говорят, что в этом случае уменьшается емкость гидрогеологической структуры. Однако здесь вступает в силу новый природный процесс, которого нет в умеренных и южных широтах: колебания нижней границы мерзлой толщи, а она изменяет свое положение почти непрерывно, только достаточно медленно. Переход подземной воды в лед и обратно постепенно увеличивают размеры трещин и их количество. Многократное промерзание и оттаивание пород приводят к образованию под мерзлой толщей горизонта повышенной трещиноватости, который называют горизонтом криогенной дезинстрекции пород. Породы здесь сильно обводнены и содержат подмерзлотные воды. Эти подмерзлотные подземные воды, вскрываемые скважинами, могут служить хорошим источником водоснабжения, особенно в южных районах, где мощность мерзлоты не превышает 100—150 м. Впервые на наличие горизонта криогенной дезинтеграции и его сильную обводненность обратил внимание инженер А. В. Львов, проводивший изыскания Забайкальской

железной дороги. На подземных водах из этого горизонта было организовано водоснабжение нескольких железнодорожных станций.

В более суровых мерзлотных условиях при полном промерзании зоны экзогенной трещиноватости в массивах изверженных и метаморфических пород (гранитов, базальтов, гнейсов и т. д.) подземные воды сохраняются только по разрывным тектоническим нарушениям в земной коре, часто весьма локально.

Если представить себе картину в общем виде, то становится очевидным, что грунтовые воды рыхлых отложений и коренных пород в области вечной мерзлоты при движении с юга на север, а в горах также от подножий горных сооружений к их вершинам оказываются все в большей степени промороженными. Их становится все меньше и меньше, а в некоторых районах они полностью отсутствуют. Если они и сохраняются, то только на очень небольших участках в таликах под руслами рек и непромерзающими глубокими озерами. Поэтому значение грунтовых вод для водоснабжения уменьшается по мере увеличения суровости мерзлотных условий.

**Влияние вечной мерзлоты на артезианские воды.** А что же происходит в условиях вечной мерзлоты с подземными водами, залегающими глубоко от поверхности, ведь именно эти воды больше всего используются для водоснабжения крупных поселков, городов и промышленных предприятий, именно они обладают очень большими запасами и хорошим качеством? Такие подземные воды в меньшей степени подвержены загрязнению в районах активной хозяйственной деятельности.

Подземные воды глубокого стока, если так можно сказать, промерзают во вторую очередь. Происходит это тогда, когда грунтовые воды в основном уже проморожены, а мощности мерзлых толщ превышают 100—200 м. По мере увеличения сплошности и мощности мерзлых толщ ухудшаются условия питания этих вод. Очаги их питания и разгрузки локализуются по водоносным таликам, которые наиболее часто приурочены к долинам рек и озерам.

Но в природе при глубоком вековом промерзании происходят не только количественные изменения: слабее становится водообмен, ухудшаются условия питания, медленнее происходит сток и т. д. Появляются качествен-

но новые явления, связанные с охлаждением и промерзанием подземных вод глубокого стока в верхних горизонтах земной коры. Не все эти явления выявлены полностью, многие из них не нашли еще вполне обоснованного научного объяснения, да и вряд ли о них можно рассказать в рамках популярной книги. Это предмет специальных исследований. Но о некоторых из них я все-таки упомяну и сделаю это на примерах артезианских бассейнов — крупных гидрогеологических структур, приуроченных к платформам. Геологически они представляют собой в вертикальном разрезе двухъярусные сооружения. Нижний ярус — это кристаллический фундамент, верхний — осадочный чехол, состоящий из переслаивающихся осадочных пород, различающихся по происхождению, возрасту, составу, водопроницаемости. Это карбонатные породы (известняки, доломиты, мергели), глины, аргиллиты, алевролиты, сланцы, галечники, а также галогенные отложения, содержащие легкорастворимые соли и т. д. В осадочный чехол могут быть включены и вулканогенные образования: туфы и лавы, изливавшиеся на поверхность, или интрузивные породы, внедрившиеся в толщи осадочных напластований в виде магмы под большим давлением и застывшие в ней. Породы осадочного чехла смяты в пологие складки. Хорошо водопроницаемые породы в чехле чередуются с плохо проницаемыми. Поэтому наибольшей водопроницаемостью породы обладают по пластам, в направлениях, близких к горизонтальным. В вертикальном направлении, перпендикулярно к пластам, движение вод или затруднено, или невозможно.

Мощность осадочного чехла на платформах различна и изменяется от сотен метров до 10 км и более.

Артезианские бассейны содержат больше всего межпластовых (артезианских) вод, которые пополняются поверхностными водами, в местах, где эти пласты выходят на поверхность земли в пределах наиболее высоко расположенных участков бассейна. Разгрузка артезианских вод происходит на участках выходов пластов на низких абсолютных высотах, под реками или под морем. Артезианские воды обладают напором. Обычно в артезианских бассейнах в верхней части разреза воды имеют малую минерализацию — до 1 г на литр — и относятся к пресным. С глубиной минерализация увеличивается и гидрохимическая вертикальная зона пресных вод сменяется зоной



солончатых вод с минерализацией до 10 г на литр, а последняя, в свою очередь, переходит в зону соленых вод и рассолов. Изменяется с глубиной и состав растворенных в воде солей. Мощность зоны пресных вод в артезианских бассейнах, сложенных породами различного возраста и состава, меняется в широких пределах: от 100—200 до 1000 м и более.

Многолетнее глубокое промерзание пород осадочного чехла артезианских бассейнов охватывает в первую очередь зону пресных вод, а затем зону солончатых вод. Если зоны пресных и солончатых вод оказываются промерзшими полностью, охлаждению и многолетнему промерзанию начинают подвергаться соленые подземные воды. В этом случае, во-первых, становится невозможным получение для водоснабжения пресных артезианских вод, во-вторых, начинается активное преобразование соленых вод по их составу и степени минерализации, получившее название криогенной метаморфизации подземных вод. Дело в том, что при замерзании сильно солончатых и соленых вод образуется слабоминерализованный подземный лед. Часть воды остается в жидком состоянии. Но минерализация ее сильно увеличивается, т. е. образуются рассолы, которые постепенно отжимаются вниз. Некоторые соли выпадают в осадок.

В слоистых геологических системах, состоящих из чередования водоносных хорошо водопроницаемых и слабопроницаемых пород — литологических водоупоров, образуются замкнутые со всех сторон линзы соленых вод и рассолов, имеющих отрицательную температуру. Они как бы включены в толщи мерзлых пород. Зато в мощных водоносных толщах трещиноватых пород охлажденные рассолы концентрируются у подошвы мерзлоты — образуется криолитозона, в которой нижний ярус представлен криопэгами.

Промерзание водоносных пород и переходы воды в лед при продолжающемся понижении их температуры сопровождаются увеличением объема и повышением давления в линзах незамерзших рассолов. В результате в этих линзах возникает аномально высокое криогенное давление подземной воды.

Обратный процесс имеет место в этапы потепления климата. Повышение температуры пород приводит к растворению подземного льда, контактирующего с линзами

рассолов, и к уменьшению давления последних вплоть до появления линз безнапорных вод. Такие линзы соленых вод и рассолов, заключенные в мерзлых толщах и указывающие на деградацию последних, сильно затрудняют бурение глубоких скважин. Дело в том, что такое бурение обычно проводится с промывкой ствола скважин специальной буровой жидкостью. При помощи этой жидкости из скважины выносятся шлам — размельченная порода, образующаяся в результате ее разрушения твердыми буровыми наконечниками. Линзы слабонапорных и безнапорных рассолов поглощают эту буровую жидкость, в результате резко возрастает ее расход и нарушается нормальная очистка стволов скважин от шлама.

В конце 30-х — начале 40-х годов в связи с промышленным развитием Центральной Якутии остро встала проблема водоснабжения города Якутска и многочисленных совхозов и колхозов. По сухости климата эта территория может быть отнесена к полупустыне. Осадков здесь выпадает менее 200 мм в год, и если бы не мерзлота, то не было бы здесь ни лесов, ни лугов, ни пашен. Мерзлота препятствует глубокому просачиванию дождевых вод, повышает влажность пород в слое сезонного оттаивания и тем самым помогает растениям получить необходимую для них влагу. Благодаря этому в Центральной Якутии произрастает тайга и можно выращивать овощи и хлеб, ведь лето в этом районе жаркое, хотя и короткое. Но воды здесь все равно мало, и небольшие реки и ручьи к концу жаркого лета пересыхают. Зимой еще хуже: для получения воды нужно топить снег или озерный лед. Надежда одна — на подземную подмерзлотную воду. Однако подмерзлотные артезианские воды, вскрытые в песчаниках верхней юры и нижнего мела, залегали существенно ниже уровня моря, хотя и имели слабую минерализацию. Этот водоносный горизонт находится непосредственно ниже подошвы сплошных мерзлых толщ, и области его возможного питания и разгрузки полностью проморожены. Ниже того горизонта повсеместно залегает мощная толща водонепроницаемых глинистых пород, которые, в свою очередь, лежат на кембрийских известняках. Воды, вскрытые в этих известняках, имеют нормальный напор и фонтанируют в скважинах. Питание вод в кембрийских известняках происходит на южной окраи-

не Якутского артезианского бассейна, где мерзлые толщи не имеют сплошного распространения.

Наличие аномально низких пластовых давлений в артезианских водоносных слоях было встречено и в других артезианских бассейнах в пределах территорий со сплошным распространением мерзлых толщ. При этом дефицит давления достигал 80 атм, т. е. вода устанавливалась на глубинах более 800 м ниже уровня моря. Причины этого явления до сих пор окончательно не установлены, однако одна гипотеза кажется наиболее убедительной и подтверждающейся фактами. В основе ее лежат геоисторический, термодинамический подходы к этому явлению.

Представьте себе артезианский бассейн, область питания которого находится на юге, а разгрузки подземных вод — на севере (рис. 55). При похолодании многолетнее промерзание пород начинается на севере, постепенно распространяясь на юг, и, наконец, охватывает зоны питания водоносных горизонтов. Питание подземных вод дождевыми осадками и поверхностной водой сначала ослабевает, а потом и совсем прекращается. При этом подземная вода, переходя в лед, увеличивается в объеме и последний начинает действовать как поршень, создавая криогенный напор в водоносных горизонтах. Благодаря криогенному напору на севере артезианского бассейна даже в очень суровых мерзлотных условиях продолжается разгрузка подземных вод в виде крупных концентрированных источников. Заметьте, что питание артезианских вод прекращается, а разгрузка благодаря криогенному напору, обусловленному многолетним промерзанием пород в областях питания, продолжается до тех пор, пока увеличивается мощность мерзлоты. Следствием этого является уменьшение количества воды в артезианском водоносном горизонте. Но достаточно начаться потеплению и оттаиванию мерзлых толщ снизу, там, где в южной части бассейна раньше, до промерзания, была зона питания водоносного горизонта, как избыточное криогенное давление исчезает, а следовательно, прекращают действовать источники на севере в зоне разгрузки. Талики, по которым выходили артезианские воды на поверхность, промерзают, и водоносный горизонт оказывается изолированным от поверхности. Протаивание мерзлых толщ снизу в изолированной системе и переход льда в воду,

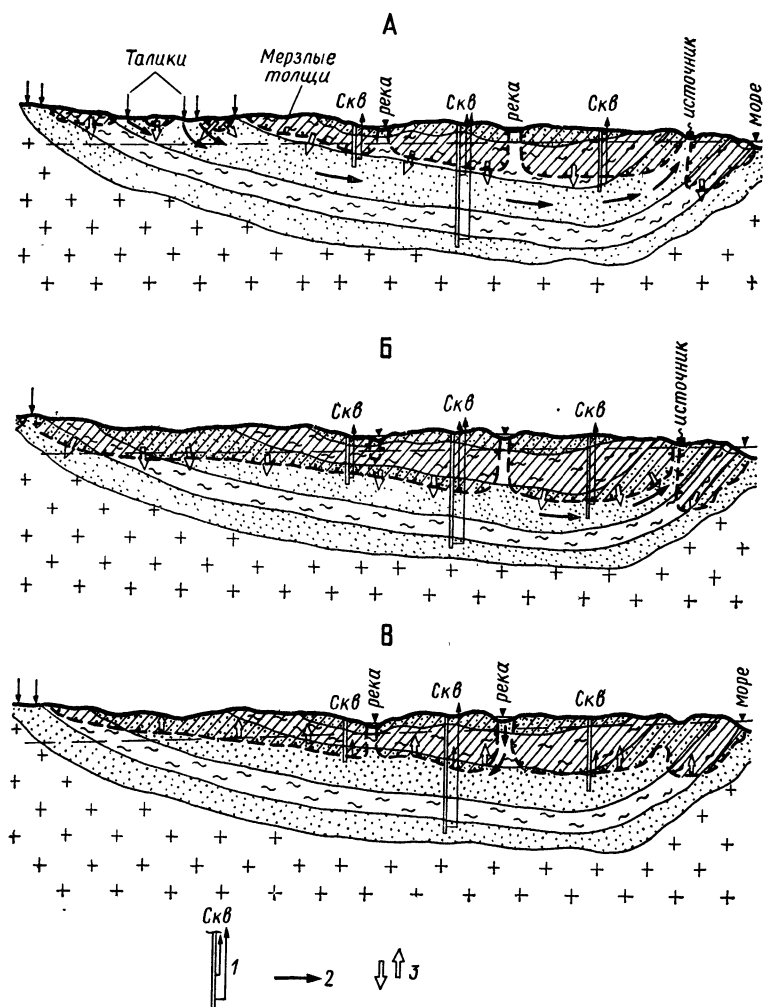


Рис. 55. Схема появления пониженных напоров в артезианских водоносных горизонтах в процессе динамики мерзлых толщ. Положение мерзлых толщ и напоров подземных вод: а — до промерзания области питания водоносных горизонтов; б — при достижении максимума промерзания; в — при деградации мерзлых толщ снизу.

1. Скважины, около которых стрелками показаны уровни вскрытия и установления напорных подземных вод.
2. Направление движения подземных вод.
3. Направление смещения нижней границы мерзлой толщ,

сопровождающийся уменьшением объема, приводит к дефициту насыщения пород водой и новому падению давления и напоров в водоносной системе. Падение давления, в свою очередь, может привести к появлению эффекта всасывания. Дело в том, что никакая природная водоносная система не может быть полностью изолированной. Ограничивающие ее талые водоупорные слои являются только относительными водоупорами. Под большими давлениями они способны фильтровать воду. Поэтому в водоносный артезианский пласт с низким давлением снизу, из подстилающих горизонтов, где сохранилось нормальное давление воды, и сверху, через подозерные и подрусловые талики, сложенные глинистыми породами, начинает просачиваться подземная вода, заполняя свободные объемы в порах и трещинах артезианского горизонта. По прошествии некоторого времени давление в нем восстановится. Но если протаивание мерзлых толщ снизу продолжается, то действуют два противоположных процесса: освобождение объемов в системе при переходе льда в воду и поступление воды за счет всасывания через относительные водоупоры. Эти процессы противоборствуют между собой. Неравномерный темп протаивания снизу за счет различия потоков тепла из недр земли в разных частях геологических структур, о котором мы писали в первой главе, и неодинаковое поступление воды за счет всасывания, связанное с неравномерным распространением таликов и неодинаковой водопроницаемостью относительных водоупоров в пределах одного артезианского бассейна, создает различия в дефицитах напоров. Такая картина и наблюдается в Якутском артезианском бассейне. В одних скважинах, вскрывших подземные воды в породах верхней юры и нижнего мела, вода устанавливается на глубине в несколько десятков метров ниже уровня моря, а в других уровень воды едва превышает абсолютную отметку «минус 300 м».

Достаточно очевидно даже для малосведущего в вопросах гидрогеологии человека, что получать артезианскую подземную воду с глубины несколько сот метров ниже поверхности земли технически значительно труднее, чем из артезианских фонтанирующих скважин. Это не только технически сложно, но и дорого. А следовательно, нужно искать другие источники для водоснабжения, обычно менее удобные по сравнению с артезианскими

водами: строить водозаборы в непромерзающих реках и подавать воду иногда на большие расстояния, создавать искусственные водохранилища и т. д.

**Парадокс с источниками.** Советскими гидрогеологами Н. И. Толстихиным, А. И. Ефимовым и Н. А. Вельминой была подмечена одна интересная особенность, свойственная подземным водам области распространения многолетнемерзлых пород, наиболее характерная для ее горных районов. С юга на север по мере увеличения сплошности, мощности и суровости мерзлых толщ неизменно сокращается количество постоянно существующих в течение всего года источников подземных вод глубокого подмерзлотного стока. Одновременно с этим увеличивается количество воды в этих источниках, т. е. их дебиты. Гидрогеологи говорят, что разгрузка подземных вод становится более концентрированной. Парадоксальное на первый взгляд явление: чем суровее мерзлота, тем мощнее источники подземной воды. Объяснение кроется в единстве и борьбе двух противоположностей: холода мерзлых толщ и тепла воды. Дело в том, что в условиях суровой мерзлоты небольшие, узкие, извилистые и рассредоточенные пути движения подземных вод перемерзают вблизи поверхности земли. При небольшом количестве и слабом движении по этим путям пресные подземные воды не способны противостоять холоду. В силу этого потоки подземной воды устремляются к поверхности по наиболее водопроницаемым, хорошо промытым каналам, концентрируются в них. Скорости движения воды возрастают, расходы источников увеличиваются. Сосредоточенные выходы подземной воды способны противостоять даже самым суровым морозам.

Таким образом, сложная природная система, состоящая из противоборствующих между собой составляющих: мерзлых толщ, имеющих отрицательные температуры, пресных подземных вод с нулевыми или положительными температурами и суровых зимних погодных условий, воздействующих на водоносные талики и источники, — сохраняет свою устойчивость. Природные системы, хотя бы часть которых находится в условиях отрицательных температур, выделены мерзловедом Александром Борисовичем Чижовым в особую группу криосистем. Рассматриваемая нами криосистема — одна из наиболее динамичных и сложных.

Необходимо подчеркнуть, что воздействие зимних холодов на подземные воды наибольшее в местах их выхода на поверхность земли. Именно здесь находится наиболее уязвимое звено природной криосистемы — подземные воды — мерзлые толщи. Промерзнут места выходов подземных вод на поверхность и изменятся условия существования этой криосистемы. Сразу появятся у нее новые свойства, которые найдут свое выражение в новых криогенных процессах и явлениях. Например, в тех случаях, когда водоносные породы около поверхности начинают зимой промерзать, движение вод ослабевает и, наконец, прекращается, а их тепляющее воздействие на породы резко уменьшается. В результате источники исчезают, водоносный талик продолжает промерзать с поверхности, но в то же время напор подземных вод возрастает, причем иногда весьма существенно. Такие напорные подземные воды при сезонном промерзании талика способны приподнимать промерзший слой породы, внедряться в образующуюся полость и образовывать инъекционные бугры — гидролакколиты. Гидролакколиты образуются в местах выхода напорных вод обычно в течение одной зимы, а существуют часто в течение ряда лет. Ядра гидролакколитов состоят из инъекционного льда, возникшего при промерзании напорных подземных вод. Вершина их разбита трещинами, в которых обнажается подземный лед, а деревья, приподнятые вместе с промерзшим грунтом, веерообразно наклонены. Это хорошо видно на фотографии (рис. 56), сделанной мерзлотоведом В. Р. Алексеевым.

Н. И. Толстихиным было установлено, что гидролакколиты очень часто встречаются в Забайкалье, поскольку в этом регионе природные условия очень благоприятны для их образования. Здесь, в межгорных впадинах, у подножия невысоких горных хребтов, много выходов подземных вод, а климат отличается высокой континентальностью и суровыми зимами. Холодные малоснежные зимы благоприятствуют глубокому сезонному промерзанию пород около источников подземных вод и росту гидролакколитов.

В южных районах области вечной мерзлоты зимой в местах выхода источников на поверхность формируются незамерзающие полыньи, а ниже источников появляются и растут наледи. В северных районах полыньи встре-



**Рис. 56.** Гидролакколит на месте выхода подземных вод. (Фото В. Р. Алексеева.)



**Рис. 57.** Гигантская наледь на Северо-Востоке СССР. На поверхности наледи видны ручьи, образовавшиеся при ее таянии.



чаются редко, а наледи часто формируются непосредственно у источников. О причинах таких различий будет сказано ниже, после рассказа о наледях.

**Что такое наледи.** Наледи — это ледяные поля, которые растут в самые жесткие морозы, потому что вода вырывается на поверхность и, бессильная противостоять холоду, замерзает (рис. 57). А летом ледяные тела наледей, ослепительно яркие под лучами солнца, лежат среди зеленеющей тайги. Веселые ручейки с ледяным дном и хрустальной, нестерпимо холодной водой текут по наледям, постепенно разрезая их на глыбы. И вдруг оказывается, что на чистом льду наледи лежит творожистая масса желтоватой соли. Это кристаллы кальцита. Он выпадает в осадок при замерзании даже самой пресной природной воды, а потом долго лежит на остатках льда и камнях на месте формирования наледи. К наледям спешит измученный путник: по ним летом легче идти, здесь меньше гнуса и комаров. К наледям подходят лоси и олени, спасаясь от оводов. Здесь можно отдохнуть в изнурительную жару сибирского лета.

**Почему, когда и как образуются наледи.** Расскажу об этом подробнее. Наледи возникают и растут только в морозный период года. Они образуются за счет различных вод: речных, озерных, подземных. Часто они имеют смешанные источники питания. Воды, идущие на формирование наледи, изливаются на поверхность в результате увеличения гидродинамического или гидростатического давления, которое бывает вызвано зимним перемерзанием рек, потоков подземных вод или замерзанием озер. Вода под давлением прорывает ледяной покров или слой промерзшего грунта, она вырывается на поверхность, растекается по ней и замерзает. Иногда нарастание давления воды ведет к образованию бугров на поверхности наледей (рис. 58), а ее прорывы на поверхность сопровождаются взрывами. Куски льда разлетаются в стороны на десятки метров. Над выходящими на поверхность потоками воды стоит облако пара. Постепенно вода остывает, превращается в кашу из ледяных игл и снега и, наконец, в слой льда. Процесс этот повторяется вновь и вновь.

Прорывы воды на поверхности происходят периодически и в разных местах, поэтому наледный лед обладает слоистостью. Толщина каждого слоя зависит от количе-

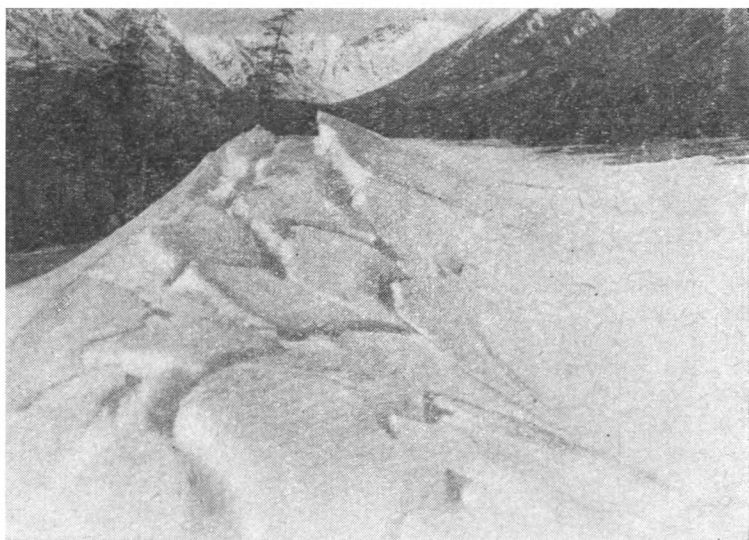


Рис. 58. Наледный бугор в долине реки Кенелибит в Чибгалахском хребте. (Фото Ю. А. Мурзина.)

ства воды, изливающейся на поверхность за один цикл и скорости ее замерзания (рис. 59).

При освоении Сибири первопроходцы сталкивались в первую очередь с речными и озерными наледями, ведь по льду рек и озер пролегали зимой пути их караванов. Речные и озерные наледы обычно имеют небольшие размеры и разрушаются в период таяния речного и озерного льда. И сегодня они представляют определенную опасность для временных зимних дорог, прокладываемых по сибирским рекам и озерам. Однако наибольший интерес для мерзловедов и гидрогеологов представляют наледы подземных вод. Повышенное внимание к ним определяется целым рядом обстоятельств.

Во-первых, наледы — это показатели присутствия подземных вод. В ряде случаев наледы могут свидетельствовать о происхождении и количестве этих вод. Особенно важно знать, сколько воды можно получить в зимний период, когда другие источники водоснабжения (за счет поверхностных вод) отсутствуют. Наледи легко фиксируются на местности, а это совсем немаловажное



Рис. 59. Канал в наледи, по которому зимой текла вода. Видна слоистость наледного льда.

обстоятельство для исследователя, работающего в бескрайних и труднодоступных горах Сибири и Дальнего Востока.

Весной и в начале лета наледи можно обнаружить в маршрутах, при аэровизуальных наблюдениях с самолетов и вертолетов, а также на аэрофотоснимках, сделанных в это время. Это позволяет гидрогеологам установить места выхода (разгрузки) подземных вод на поверхность, правильно и целенаправленно планировать исследования.

Представьте, на сколько можно облегчить труд геолога, если заранее указать ему место, где залегает полезное ископаемое. А источник воды, отмеченный наледью, это тоже полезное ископаемое для гидрогеолога, предмет его поисков. И вот отряды исследователей, которые отделили-фрировали зимой, в камеральный период, наледи на аэрофотоснимках, отметили их на картах, облетели весной территорию будущих работ на вертолете или самолете, отправляются в летние маршруты, точно зная места, которые они должны детально изучить.

Во-вторых, наледи производят большую геологическую работу, создавая своеобразные формы рельефа — наледные поляны.

В-третьих, наледи могут оказывать пагубное воздействие на инженерные сооружения, особенно на полотна шоссе и железных дорог, на небольшие мосты и трубы. Нередко наледи образуются в поселках, причем прорыв подземных вод происходит часто в подполья отапливаемых зданий, под которыми остаются непромерзшие «окна».

Я вспоминаю случай, который произошел на Патомском нагорье, в районе знаменитых Бодайбинских золотосысыпных россыпей. Полевой лагерь нашей экспедиции стоял на конусе выноса небольшого ручья, и мы знали, что под нами течет поток грунтовых вод. Работы затянулись до поздней осени. Начались морозы, земля стала быстро промерзать, в палатках установили печки и топили их почти круглые сутки. Но вот основной отряд кончил работы, и осталась только группа наблюдателей, которые жили в старом зимовье, а мой коллега, гидрогеолог, продолжал ночевать в палатке. Наконец и он не выдержал холода, и в ночь, когда он перешел в зимовье, в его палатку, где под печкой оставался талик, хлынула подземная вода и образовалась наледь.

Изучение наледей и разработка мер борьбы с их нежелательным воздействием являются важнейшей частью инженерно-геологических изысканий при дорожном и гражданском строительстве. В дни, когда пишется эта книга, с проблемой наледей сталкиваются изыскатели и строители Байкало-Амурской магистрали, которая проходит по районам интенсивного развития наледных процессов.

Каковы же условия, благоприятные для образования наледей подземных вод?

В первую очередь это большое количество вод, залегающих близко от поверхности земли или выходящих на нее. Такие условия свойственны для горно-складчатых областей, особенно тех, где породы обладают высокой трещиноватостью, а тектонические разломы в земной коре остаются мобильными, по ним происходят новейшие тектонические движения.

Вторым условием являются морозные зимы с малым количеством снега. При сильных морозах вся вода, выхо-

дящая на поверхность, успевает замерзнуть. Маломощный снежный покров способствует быстрому промерзанию пород слоя сезонного оттаивания и глубокому сезонному промерзанию водоносных таликов. В результате на пути подземных вод создаются мерзлые барьеры — баражи, которые сужают живое сечение потоков, вызывают появление криогенных напоров и излияние вод на поверхность. Таким образом, для активного наледообразования наиболее благоприятным является резко континентальный климат с суровыми малоснежными зимами. Поэтому наледей почти нет в Хибирах. Несмотря на большую водообильность этого района, образованию наледей не благоприятствуют довольно мягкая зима и мощный снеговой покров. Наледеи появляются на Полярном Урале, в западной части Средне-Сибирского плоскогорья. На востоке нашей страны по мере возрастания в этом направлении континентальности климата, число наледей увеличивается, растут их размеры. Но наибольшее количество наледей характерно для Забайкалья и Верхояно-Колымской горной области, где господствует резко континентальный климат.

А вечная мерзлота? Ее в принципе может и не быть. Но все же ее влияние огромно.

Попробую рассказать об этом, пригласив читателя мысленно двинуться с юга, из района Забайкалья, к северу через Алданский щит в царство гигантских наледей — в Верхояно-Колымскую горную область.

В Забайкалье, в районах островного и массивно-островного распространения мерзлых толщ, обычно образуются небольшие наледеи. Ведь здесь разгрузка подземных вод носит рассредоточенный характер. Размеры наледей и даже места их появления могут изменяться из года в год в зависимости от суровости зимы. Препятствием для подземных потоков служит сезонномерзлый слой. А сезонное промерзание глубже в холодные малоснежные зимы, чем в снежные и относительно теплые. Поэтому в холодные зимы возникает больше наледей и в них сконцентрировано больше льда.

На севере Забайкалья, на Становом нагорье и Алданском щите, по мере увеличения суровости и сплошности мерзлоты, сосредоточения подземных вод в узких таликах, приуроченных к днищам рек и к молодым тектоническим разломам в земной коре, по мере возрастания

дебитов источников размеры наледей становятся больше. Однако под большинством наледей зимой существуют водоносные талики. По ним часть воды протекает, не попадая в наледи. В этих районах места образования наледей постоянны, они практически не зависят от суровости зимы, но вместе с тем площади и объемы наледного льда подвержены ежегодным колебаниям. И наконец, в наиболее суровых мерзлотных условиях гор Верхоянья, где талики под руслами рек и ручьев разобщаются зимой на систему отдельных замкнутых ванн и сток подземных вод под ними прекращается, в наледях подземных вод каждую зиму фиксируется постоянный объем льда. Подвержены ежегодным изменениям только площади и форма наледных тел.

Таким образом оказывается, что чем суровее мерзлотные условия, тем более жестко фиксированы места образования наледей и стабильнее становятся их параметры: площади, объемы льда и даже форма.

Легко можно представить, что если наледь образуется в одном месте много веков подряд, то она сильно воздействует на ландшафт и рельеф того участка: становится угнетенной или отмирает совсем растительность; ручейки, образующиеся при таянии наледей, размывают и уносят пыль, глину, мелкий песок, оставляя на месте голые валуны и гальку, покрытые налетом солей. Так образуются лишенные растительности наледные поляны, образно названные сибирскими золотоискателями «каменушниками» (рис. 60).

**О воздействии наледей на инженерные сооружения и борьба с ними.** Наледи вблизи южной границы вечной мерзлоты образуются на участках неглубокого залегания подземных вод при различных видах хозяйственной деятельности. Например, для возникновения наледей достаточно небольших, локальных изменений природной обстановки, какая возникает, например, при строительстве дорог. На дорогах зимой убирается или утаптывается снег, в результате чего под ним резко увеличивается глубина сезонного промерзания грунтов. Дорога становится преградой для потоков грунтовых вод на склонах, потому зимой выше по склону от дороги начинают образовываться наледи. Наледь сначала заполняет придорожную канаву, потом становится все более мощной и наконец заливают дорогу. Машины скользят по льду, бук-



Рис. 60. Поверхность наледной поляны, покрытая галечником. На заднем плане — остатки наледного бугра.

суют. В местах, где вода еще не замерзла до конца, их колеса проламывают слои льда, пробивают глубокую колею, покрываются ледяной коркой, а иногда попросту вмерзают в наледь. И все это в жестокие морозы, вдали от жилья.

Способность дорог вызвать к жизни наледи была замечена уже давно мерзлотооведами, гидрогеологами и инженерами-строителями дорог в Восточной Сибири. Особенно большое внимание было обращено на наледи в начале 30-х годов при строительстве Амуро-Якутской магистрали, связывающей Центральную Якутию с Забайкальской железной дорогой. В эти годы впервые был предложен способ борьбы с наледями грунтовых вод при помощи создания «мерзлотных поясов». Это была первая активная мера борьбы с мерзлотными явлениями. Поэтому расскажем об этом подробнее. «Мерзлотные пояса» имеют форму полос, вытянутых перпендикулярно к направлению потока грунтовых вод. Их располагают выше по склону от инженерных сооружений, которые они призваны защищать (рис. 61). Путем создания таких «поясов» резко увеличивают глубину сезонного промерзания пород. Достигается это различными способами: снятием растительности, удалением снега, строительством навесов, под которые не попадает снег и т. д. Таким образом при помощи «мерзлотных поясов» искусственно вызывают образование наледи на расстоянии, безопасном для сооружения. Около дороги наледь уже не может образо-

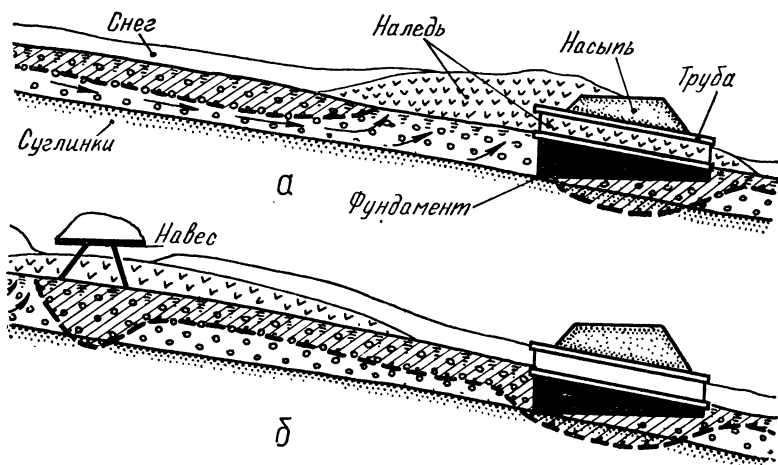


Рис. 61. Схема действия «противоналедного мерзлотного пояса». Стрелками показано движение грунтовых вод.

ываться, вода перехвачена «мерзлотным поясом» и израсходована.

Наледей часто возникают в местах строительства водопропускных труб на небольших водотоках. Фундамент таких труб служит баражом грунтового потока вод в днищах ручьев, логов, рек. Наледь забивает трубу, заполняет русло, иногда выплескивается и на дорожную насыпь. Весной наледь препятствует пропуску талых вод по трубе и они идут по верху, через дорогу, размывают ее и делают непроезжей. Самым простым способом борьбы в этом случае является максимально полное сохранение естественных условий. Нужно строить не трубы, а мосты. Более высокая строительная стоимость мостов с лихвой окупается снижением эксплуатационных затрат.

Широко применяют в южных районах инженерные мероприятия, целью которых является концентрация потоков, сбор грунтовых вод в дренажные канавы или лотки. Строят их таким образом, чтобы отвести воду в места, где наледь уже не будут угрожать инженерным сооружениям: ниже по уклону от дорог, в стороне от жилых поселков и т. д.

В более северных районах, где размеры наледей больше и места их образования строго фиксированы, сущест-



вуют два способа, с помощью которых можно избавиться от их вредного воздействия: вынести сооружение из зоны их влияния, что является пассивным приемом, или, сконцентрировав и утеплив поток наледообразующих вод, вывести его из зоны воздействия на сооружения.

В настоящее время советские ученые большое внимание уделяют разработке теории прогноза возникновения наледей при создании инженерных сооружений и разработке наиболее надежных и дешевых способов борьбы с их вредным воздействием. О некоторых из них было кратко рассказано выше.

Прогнозировать возникновение и развитие наледей можно, только выполнив несколько исходных требований. Во-первых, необходимо тщательно изучить законы формирования наледей в естественных условиях в разной мерзлотной, гидрогеологической и климатической обстановке. А для этого нужна постановка детальных исследований, в том числе круглогодичных режимных наблюдений, в разных по условиям районах. Задача это сложная и далеко не решенная. Во-вторых, нужно создать физические и математические модели формирования наледей, учитывающие гидродинамическую и теплофизическую сторону этих явлений. Модели должны быть проверены на опытных участках. И, в-третьих, изыскателями в поле должны быть получены исходные данные, необходимые для прогнозирования наледей на потенциально опасных местах. Работа эта только начата. Первые результаты уже достигнуты благодаря работам сибирских ученых. Но это самое начало, и в этом направлении есть большое поле деятельности для мерзлотоведов и гидрогеологов, владеющих физическими и математическими методами.

**Каковы же размеры наледей.** В своем рассказе мы говорили о больших и маленьких наледях. Но что кроется под этим? Какова мера малого и большого применительно к наледям? Так вот, мелкие наледи имеют площади от нескольких десятков до  $10\,000\text{ м}^2$ , а объемы льда в них не превышают 10—20 тыс.  $\text{м}^3$ . Крупные и очень крупные наледи занимают площади от  $100\,000\text{ м}^2$  до  $10\text{ км}^2$ , а объемы льда в них достигают 20 млн.  $\text{м}^3$ . Известны и гигантские наледи, площади которых превышают  $10\text{ км}^2$ , а объемы льда составляют несколько десятков миллионов кубических метров. Самой большой в мире наледью



Рис. 62. Гигантская Ойсордоохская наледь в Селенняхской впадине. Мощность льда составляла в июне 1973 г. 8 м. В канале под наледью проходит поток талых и выходящих на поверхность подземных вод.

является Момский Улахан-Тарын (по-якутски «тарын» значит «наледь»). Эта уникальная по размерам наледь расположена на реке Моме, левом притоке Индигирки, в пределах Верхояно-Колымской горной области. Площадь этой наледи, по подсчетам А. И. Калабина, достигает  $150 \text{ км}^2$ , а объем наледного льда —  $400 \text{ млн. м}^3$ .

Максимальная мощность льда больших и гигантских наледей достигает 8—10 м (рис. 62), а в среднем равна 2—3 м. На территории Северо-Востока СССР обнаружено около 10 тыс. наледей, общая площадь которых, по оценке гидролога Б. Л. Соколова, составляет  $14 \text{ тыс. км}^2$ , а суммарный объем воды, аккумулированный в них, достигает  $30 \text{ км}^3$ . Это значительно превышает площади и объемы ледников этой горной территории. Б. Л. Соколов пишет, что запасы воды в наледях Северо-Востока СССР, Забайкалья, Центральной и Южной Якутии, Хабаровского и Приморского краев, Западной Сибири составляют не менее  $50 \text{ км}^3$ , что почти равно объему годового стока такой крупной реки, как Индигирка. Исследования

последних лет показали, что наледы распространены значительно шире, чем считалось до сих пор. Большое количество их выявлено на Урале, Тянь-Шане, Алтае, в Саянах, Приморье, Амурской области и т. д.

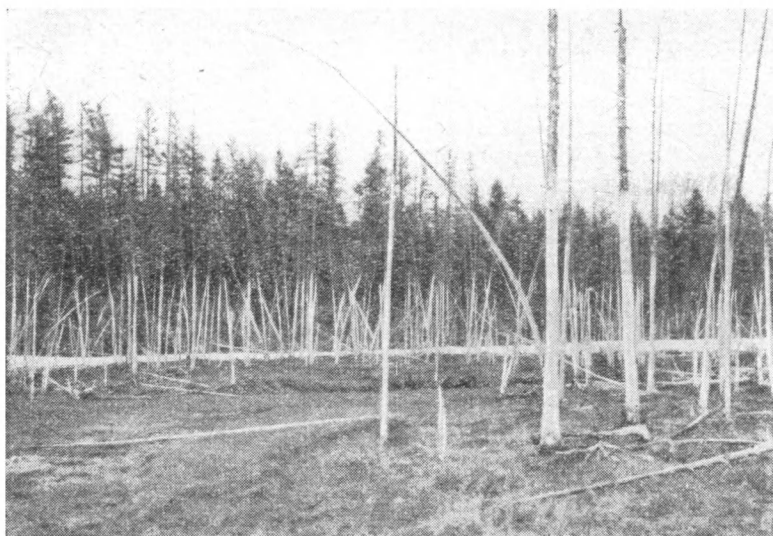
И короткое лирическое отступление. Альпинистов и ученых-гляциологов влечет необыкновенная красота гор и ледников. Об этом много написано, и я не буду повторяться. Но поверьте мне, что величие огромных наледей в долинах горных рек Восточной Сибири, богатство их красок в солнечные дни и полярные белые ночи, мрачная суровость в ненастье ждет своих Рерихов.

**Что полезного могут дать наледы.** А теперь вернемся к научной стороне нашей темы. В условиях суровой мерзлоты, где все подземные воды, выходящие зимой на поверхность земли, фиксируются в виде наледей, оказалось возможным по объему наледного льда оценивать естественные ресурсы подземных вод. По этому способу гидрогеологом О. Н. Толстихиным были оценены ресурсы подземных вод Северо-Востока СССР — огромной территории, до сих пор еще труднодоступной, суровой, но очень богатой полезными ископаемыми и перспективной для развития горной промышленности. При освоении этой территории встает острая необходимость в источниках подземной воды для водоснабжения поселков и горнорудных предприятий. Но сколько этой воды имеется в недрах земли, скованных с поверхности панцирем вечной мерзлоты? Как быстро и с наименьшими затратами узнать это?

Вот здесь гидрогеологам и пришли на помощь наледы. На специальных экспериментальных полигонах было проведено изучение динамики их роста, была установлена функциональная зависимость между их площадями и объемами наледного льда. Потом по аэрофотоснимкам определялись площади наледей для всей исследуемой области и пересчитывались на объемы льда и воды. Метод простой и удобный, но его реализация на практике оказалась далеко не простой.

Расскажем о возникавших сложностях и об открытиях, которые за ними следовали.

Площади наледей следует определять во время достижения максимума, т. е. ранней весной. В более поздние сроки, когда начинается таяние, размеры наледей быстро начинают уменьшаться. Но аэрофотосъемку обычно про-



**Рис. 63.** Стволы деревьев, отбеленные наледным льдом, мощность которого достигала 5 м.

ведут летом, когда стаивает снег и подтаивают наледы. Как же быть?

Исследователями Северо-Востока давно было замечено, что наледы вырабатывают наледные поляны. Это почти плоские, покрытые валунами, песком и галькой поверхности, обычно лишённые растительного покрова, местами занятые погибшим лесом со стволами, отбеленными на высоту, равную мощности наледного льда (рис. 63). Наледные поляны хорошо дешифрируются на аэрофотоснимках по серому тону и характерному рисунку, созданному руслами ручьев, рождающихся при таянии наледей. И вот ученые решили оконтуривать на снимке наледные поляны и узнавать по ним максимальные площади наледей.

По отметкам, оставленным наледями на деревьях, они судили о былой мощности наледного льда, даже когда наледь полностью стаивала. Казалось, что проблема решена. Но детальные мерзлотно-гидрогеологические исследования в одном из наледных районов Северо-Востока — Селенняхском хребте и Уяндинской впадине —

показали, что площади наледных полей часто существенно превышают размеры наледей, иногда в несколько раз. В некоторых случаях огромные наледные поляны оказались покинутыми наледями. Так возникла проблема многолетней миграции паледей.

**Почему мигрируют наледы.** О миграции наледей было известно и раньше, но масштабы этого процесса казались ученым незначительными. А здесь вырисовывалась грандиозная картина гидрогеологических изменений в условиях суровой и мощной вечной мерзлоты за короткое геологическое время.

Закономерно встал вопрос о причинах этого явления. Сразу оговоримся, что полного своего разрешения проблема миграции наледей еще далеко не нашла. Но некоторые ее стороны были изучены и привели исследователей к интересным и новым результатам.

Еще в 40-х годах известные исследователи мерзлоты и подземных вод Северо-Востока СССР П. Ф. Швецов и А. И. Калабин открыли, что многие источники и образованные ими наледы как бы нанизаны на линии разломов в земной коре — тектонические разрывные нарушения, где породы раздроблены, сильнотрециноваты и хорошо водопроницаемы. Поэтому с разломами связаны талики, по которым происходит как питание, так и разгрузка подземных вод в условиях суровой мерзлоты. В 1962—63 гг. О. Н. Толстихин установил, что талики и наледы приурочены не просто к древним разломам, а к разломам активным, по которым и в настоящее время происходят тектонические движения.

Исследования мерзлотоведов-геологов Московского университета в 1968—1969 гг. показали прямую связь новейших движений и миграции наледей. Движения по разломам, видимо, меняют трещиноватость пород, в результате чего и смещаются приуроченные к ним водоносные талики. Выглядит это примерно так. Потоки напорных подземных вод устремляются к тем частям разлома, где трещиноватость пород увеличивается, а участки талика, где движение вод ослабло или прекратилось, начинают промерзать сверху и с боков под влиянием низкотемпературных, суровых мерзлых толщ. Смещается водоносный талик, а за ним смещается наледь подземных вод, двигаясь параллельно тектонической зоне. Покинутая часть наледей поляны, теперь уже реликтовая, еще

долго будет сохранять следы, оставленные наледью. Кстати, реликтовые наледные поляны, ровные, сложенные с поверхности галечниками, являются прекрасными строительными площадками для поселков, аэродромов и промышленных предприятий. Они резко контрастируют с наиболее типичными для этих районов участками, сложенными высокольдистыми пылеватыми грунтами, которые легко подвергаются термокарсту и термоэрозии при освоении их человеком.

Для изучения масштабов и скорости миграции наледей было проведено изучение Селенняхской тектонической впадины и предгорий хребта Тас-Хаяхта. Этот район был выбран потому, что еще ранее наледи здесь были исследованы и детально закартированы. В прошлом веке наледи этого района поразили Гергарда Майделя, совершавшего путешествия по совсем еще неизвестным тогда бескрайним пространствам Северо-Востока Сибири. Г. Майдель писал, что едва он и его спутники вышли к неширокому ущелью реки Кыры, как их взорам представилось бесконечное ледяное поле: «Я не могу привести полных размеров этого поля, потому что проводники не знали, на сколько оно распространяется в обе стороны, объять же его глазом не было возможности, но нам приходилось идти через него на протяжении 20 верст». Судя по карте-схеме, составленной Г. Майделем на основании собственных наблюдений и опроса проводников, площадь наледи достигала колоссальной величины (около 100 км<sup>2</sup>). П. Ф. Швецов и В. П. Седов установили, что наледи Кыра-Нехатанского узла в 1939 г. имели существенно меньшие размеры, чем указывал Г. Майдель, и что они, несомненно, питаются источниками подземных вод глубокого подмерзлотного стока.

В 1973 г. нам предстояло определить, какие же изменения в наледи произошли за 30 с небольшим лет. Проведая съемки тех же наледных районов, что П. Ф. Швецов и В. П. Седов, мы убедились, что изменения превзошли самые смелые ожидания. Прекратил функционировать крупный источник, и распалась одна из самых больших наледей. Зато появился другой источник, и обособилась связанная с ним наледь.

Прорыв вод через мощную толщу мерзлоты, достигающую здесь 200—300 м, произошел в месте пересечения двух разломов. Появление и исчезновение источни-

ков, видимо, связано здесь не просто с новейшими движениями, но и с сейсмическими толчками, сила которых достигает иногда 7—8 баллов.

Сравнение аэрофотоснимков разных лет и исследования погибших и вновь выросших деревьев, находящихся на периферии наледных полей, позволило нам установить, что сами наледы как бы пульсируют. Они то становятся компактными, округлой формы; при этом резко возрастает мощность льда, достигая 7—8 м. В эти годы наледный лед не стает за лето полностью и наледы переходят в категорию многолетних. В другие годы наледы резко увеличиваются по длине и площадь их возрастает, а мощность льда уменьшается. В эти годы наледный лед стает целиком и наледы становятся однолетними.

Не вдаваясь в детали объяснения причин пульсационных ритмов в развитии наледей, подчеркнем, что они связаны с периодическим изменением отепляющего влияния наледей разной мощности на размеры и форму таликов, распределяющих воду по площади наледообразования, и обратного влияния этих таликов на мощность льда и форму наледей. Процесс этот носит автоколебательный характер, что, видимо, свойственно многим криогенным процессам.

Обследование показало, что значительная часть Селенняхской тектонической впадины носит следы образования наледями в геологическом прошлом и не исключено, что размеры наледей во времена Г. Майделя были существенно большими, чем сейчас.

Добавим к сказанному, что ниже концов горных ледников Верхоянья, Памира и Тянь-Шаня тянутся цепочки наледей. Они мигрируют, разрушая формы рельефа, оставленные ледниками. Отступают ледники, и за ними уходят наледы, оставляя следы в виде древних наледных полей.

Последние годы многие мерзлотоведы и гидрогеологи занимаются вопросом о причинно-следственных связях этих двух природных явлений.

Несколько лет назад я обратил внимание, что в Польше перед конечными моренами, оставленными последним ледниковым покровом Европы, существуют формы рельефа, удивительно похожие на наледные поляны, к тому же сложенные отложениями, подобными наледному аллювию,

Следы действия наледей в районах, покрытых в недавнем геологическом прошлом ледниками,— неожиданное, но закономерное явление. Ледники таяли, давали поверхностные и подземные воды, которые в суровых условиях, господствующих перед фронтальными уступами ледниковых щитов, образовывали наледи. Но этот вопрос только начал изучаться палеогеографами, геологами, мерзлотооведами.

В последние годы для изучения наледей начали использовать фотоснимки, сделанные из космоса. Первые исследования в этом направлении показали большие возможности космической фотоинформации. Охват огромных площадей, производство космической съемки в разные периоды года, в различных диапазонах спектра, возможность обработки космических снимков при помощи различных автоматических анализаторов, позволяющих отделить тела наледей от снежников, ледников и просто мощного снегового покрова, делают возможным полно изучать распространение наледей по площади, изменение их размеров в течение года, а также их многолетнюю динамику. Исследования в этом направлении имеют большую перспективу.

**Наледи сохраняют источники.** В заключение главы следует сказать еще несколько слов о взаимодействии таликов, источников и наледей с позиции саморегуляции и самосохранения природных криосистем, о которых говорилось в начале этой главы. Обобщение результатов многолетних мерзлотных и гидрогеологических исследований, которые мне пришлось проводить в самых разнообразных по суровости мерзлоты горных районов Восточной Сибири, позволили установить интересную закономерность. Оказалось, чем суровее мерзлотные и климатические условия, чем меньше дебиты источников напорных подземных вод и чем ближе к  $0^{\circ}\text{C}$  их температура, тем на меньшем расстоянии от этих источников располагаются наледи подземных вод. Другими словами, чем суровее условия и чем меньше тепла выносят подземные воды, тем короче расстояние от точки их выхода на поверхность земли до места их замерзания. Это одна сторона установленной закономерности. Другая сторона заключается в том, что наледи изолируют, предохраняют талики и источники подземных вод от воздействия зимних морозов. Образно говоря, необходимость в такой изоляции у разных таликов и источни-



ков, находящихся в различных условиях, существенно неодинакова. Мощные водоносные талики и высокодебитные источники не нуждаются в дополнительном утеплении; они несут много тепла и сами способны противостоять воздействию зимних холодов. По-иному обстоит дело с малодебитными выходами холодных подземных вод. В суровые зимы они или окажутся замороженными, или... должны изолировать себя от жестоких морозов. У природы в континентальных малоснежных районах Восточной Сибири есть одно средство изоляции — наледный лед, при образовании которого к тому же выделяется огромное количество тепла.

И действительно, в очень суровых мерзлотных условиях севера Верхояно-Колымской горной страны были обнаружены водоносные талики, по которым выходили на поверхность напорные подземные воды, образуя источники с очень небольшим дебитом. Наледи, формирующиеся зимой за счет этих вод, располагались прямо над источниками, как бы перекрывая их ледяной шапкой, предохраняющей талики от перемерзания в самые суровые морозы. Малодебитные источники сами создавали себе теплоизоляцию из наледного льда, мощность которого достигала нескольких метров, а прорывающаяся через лед вода, замерзая на поверхности, резко повышала его температуру по сравнению с температурой воздуха. Криосистема мерзлые толщи — подземные воды — суровый климат сохраняет свою устойчивость при помощи наледного льда. А летом ледяные шапки наледей разрушаются под действием солнечного тепла и воды, освобождая путь для свободного выхода подземных вод на поверхность.

## *Глава IV*

### **КАК ВОЗНИКЛА И РАЗВИВАЛАСЬ ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА**

**П**еред геологами, изучающими горные породы, всегда в качестве главного встает вопрос: каким путем и в какое геологическое время эти породы образовались? Вторым является вопрос: какие изменения претерпели эти породы в своей геологической жизни? Перед мерзлотоведами-геологами встают те же вопросы, только применительно к объектам их исследований — толщам мерзлых горных пород: что является причиной образования вечной мерзлоты пород и почв? Когда, в какой геологический период времени или сколько лет назад началось многолетнее промерзание? Как развивались, как эволюционировали мерзлые толщи со времени своего возникновения? В каких причинно-следственных связях находится многолетнее промерзание или многолетнее оттаивание горных пород с похолоданием и потеплением климата, с развитием покровных оледенений поверхности Земли и с разрушением, таянием ледниковых щитов? Вопросов, на которые должен дать ответ геолог-мерзлотовед, много, а решение их представляет немалые трудности.

**Как вечная мерзлота связана с климатом?** С первых этапов развития мерзлотоведения исследователи, работавшие на Севере и Востоке, связывали наличие мерзлых пород с суровыми климатическими условиями этих районов: с отрицательными среднегодовыми температурами воздуха, холодными продолжительными зимами, снежным покровом небольшой мощности, плохо предохраняющим землю от выхолаживания.

Если говорить более строго, то климат атмосферы и климат самых верхних горизонтов литосферы является

следствием одной общей причины: теплообмена на поверхности Земли, происходящего в результате попадания на нее потока солнечной энергии. Правда, климаты атмосферы и литосферы сами влияют на условия теплообмена, т. е. между ними имеются как прямые, так и обратные связи. Исследования этих природных процессов географами, климатологами, гляциологами, мерзлововедами показывают, что существуют причинные связи между климатами атмосферы и литосферы (в том числе и вечной мерзлоты) и оледенением. Связи эти сложны и еще не всегда до конца исследованы.

Климаты на Земле очень существенно зависят от распределения энергии, поступающей от Солнца. Наибольшее количество солнечной энергии на единицу поверхности получают экваториальные районы нашей планеты, а меньше всего — приполярные. Это связано с тем, что поток солнечной энергии на экваторе падает на Землю почти перпендикулярно. Чем ближе к полюсам, тем больше угол падения солнечных лучей, а на полюсах они как бы скользят вдоль земной поверхности. Очевидно, что температура земной поверхности будет на экваторе наибольшей, а на полюсах могла бы быть самой низкой, если бы полюсы представляли собой сушу. Однако легко представить, что чем ближе к полюсу, тем более благоприятны условия для многолетнего промерзания земной коры.

Но изложенное дает слишком упрощенную картину. Вспомним, например, о том, что поверхность Земли как планеты на 70,8% представляет собой океан и только на 29,2 — сушу. Соотношение между морем и континентами в южном и северном полушариях резко различается. А ведь энергия Солнца, попадающая на сушу и на море, совершенно по-разному ведет себя, т. е. неодинаково отражается, трансформируется и производит различную работу. Ученые говорят о резко различных радиационно-тепловых балансах моря и суши, которые влияют на формирование разных климатических условий. Например, солнечная радиация, попадающая на море, не покрытое льдом, в значительно большей степени, чем на суше, тратится на испарение воды и ее нагревание. А испарение воды — это процесс, идущий с очень большим поглощением тепла. Кроме того, теплоемкость воды выше любого вещества на нашей планете. Чтобы нагреть воду, нужно затратить много энергии, но, когда она охлаждается, то

же количество энергии выделяется в атмосферу. В летний период энергия поглощается и температура моря и воздушных масс над ним повышается очень слабо. Но если количество энергии, поступающей от Солнца, уменьшается (что в годовом цикле бывает зимой, а в многолетнем или многовековом — в периоды уменьшения солнечной активности), начинается обратный ход процессов. В первую очередь пары в атмосфере превращаются в воду, что происходит с выделением тепла. Кроме того, водные массы океана медленно отдают накопленное ими тепло. В результате в океанических условиях колебание температур в летнее и зимнее время минимальное. Понятно, что по-инному строится тепловой баланс суши, где затраты тепла на испарение и конденсацию существенно меньше и нет такого мощного теплоносителя, как водные массы океана.

Разные условия теплообмена над сушей и морем, неодинаковые в зимнее и летнее время года и на разных широтах, создают различия в температурах воздушных масс и их плотности. В результате этого происходит их сложное перемещение, возникает циркуляция атмосферы, существенно влияющая на климаты и условия теплообмена в разных частях континентов. Это, в свою очередь, оказывает влияние на температурный режим верхних горизонтов пород. Например, в районах с океаническим климатом в высоких широтах под обогревающим влиянием моря среднегодовые температуры воздуха существенно выше, чем во внутренних частях континентов. Кроме того, здесь выпадает большое количество снега, который оказывает на почву сильное обогревающее влияние, предохраняя ее зимой от выхолаживания. В результате среднегодовые температуры почвы за полярным кругом на Кольском полуострове близки к  $0^{\circ}\text{C}$ . На этой же широте в континентальных районах Сибири температуры воздуха понижаются с запада на восток по мере ослабления океаничности климата. В этом же направлении количество снега зимой уменьшается, его обогревающее воздействие ослабевает и температуры пород достигают  $-5$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$ .

**О динамике климата и вечной мерзлоты.** Климат Земли как планеты постоянно меняется. Жаркие периоды сменяются холодными, сухие — влажными. Но в целом климат Земли в геологическом прошлом был теплее. Жаркие и влажные климаты господствовали в мезозойское время и в начале кайнозоя.

Обобщая результаты изучения ископаемых остатков растительности и животных, анализируя изменение состава осадочных пород, советский ученый В. М. Силин пришел к выводу, что примерно 30 млн. лет назад началось похолодание и увеличение сухости климата планеты в целом. Причиной похолодания многие ученые считают тектонические поднятия суши, увеличение ее высоты и площади. Площадь, занятая морем, соответствующим образом сокращалась, а глубины Мирового океана возрастали. Сокращение поверхности, занятой морями, приводило к тому, что испарение влаги уменьшалось, а следовательно, сокращалось содержание водных паров в атмосфере. Климат Земли становился более сухим и, что очень существенно, холодным. Дело в том, что во влажном климате проявляется очень важный природный эффект, называемый «оранжерейным» или «парниковым». Сущность его заключается в том, что энергия, получаемая Землей от Солнца, поступает главным образом в виде коротковолнового излучения, которое относительно свободно проникает через насыщенную водными парами атмосферу, в том числе и через облака. Коротковолновая радиация достигает поверхности Земли, часть ее отражается, а другая идет на ее нагрев. Количество отраженной радиации очень сильно зависит от качества поверхности, ее альбедо. Если бы поверхность Земли была бы абсолютно черной, то все тепло, попадающее на нее, шло на ее нагрев и альбедо было бы равно нулю. В действительности альбедо разных по характеру поверхностей на Земле меняется в широких пределах. Очень большой поглощательной способностью и малым альбедо обладают водные покровы. Самое большое альбедо имеют чистый свежеснеженный снег, фирн и белый лед. Радиация Солнца, достигшая поверхности Земли и не отразившаяся от нее, идет на ее нагрев. Здесь-то и происходит важнейший для формирования климата атмосферы и литосферы процесс трансформации коротковолновой радиации Солнца в длинноволновую. Нагретая Солнцем поверхность Земли сама начинает излучать энергию, но уже главным образом в виде длинноволнового (теплого) излучения. Длинноволновое излучение, идущее от поверхности Земли, не может свободно проходить через насыщенную парами атмосферу. Тепловое излучение Земли или противоизлучение отражается от облаков вниз. В результате этого температура приземных слоев воздуха повыша-

ется. Возникает эффект, который используется человеком в теплицах и парниках.

В условиях сухого климата, при небольшом содержании паров в атмосфере и малой облачности, длинноволновое излучение от поверхности Земли свободно уходит в космическое пространство. Приземные слои воздуха легко выхолаживаются, а средняя температура поверхности Земли понижается. Различия в величине парникового эффекта, связанного с влажностью атмосферы, о котором мы говорили применительно к Земле в целом, ярко проявляются для разных ее частей. На участках суши, омываемых морями, где господствует влажный океанический климат, и во внутренних частях континентов с сухим континентальным климатом температуры воздуха и поверхности Земли на одних и тех же широтах, существенно различны. Это легко проследить на территории Евразии, мысленно двигаясь по параллели из Западной Европы с ее влажным морским климатом на восток, в центральные районы Восточной Сибири. Среднегодовые температуры воздуха в этом направлении понижаются от  $+10$ ,  $+8$  °C на побережье Атлантического океана до  $-2$ ,  $-3$  °C в Забайкалье. Соответствующим образом и понижается температура почвы от  $+10$ ,  $+12$  до  $-2$  °C. А ведь солнечной энергии на одной широте приходит к поверхности Земли примерно одно и то же количество, но трансформируется она неодинаково, что и приводит к разному температурному режиму, образно говоря, разному климату верхних слоев Земли.

Забегая вперед, можно сказать, что разная удаленность от моря, разная степень континентальности климата и, следовательно, различная степень проявления парникового эффекта является одной из причин своеобразного положения границы современных многолетнемерзлых пород на территории Европы и Сибири, показанного на карте криолитозоны СССР (см. рис. 5).

Однако вернемся к началу нашего рассказа. Похолодание климата планеты в связи с увеличением площади суши и уменьшением увлажнения атмосферы происходило относительно медленно. Это фиксируется по постепенным изменениям растительности, захороненной в осадочных породах. Но примерно миллион лет назад темп похолодания увеличился. Начался последний этап кайнозойской эры, который называют по-разному: *четвертичный период*, *антропогенный период*, или *плейстоцен*. Именно для

четвертичного периода характерным является развитие покровных оледенений в северном полушарии Земли и вечной мерзлоты.

Здесь следует сказать о второй важной особенности в развитии природы, а именно о наличии ритмических изменений — природных ритмов. Причины существования природных ритмов имеют внеземной характер, а связаны они с изменениями активности Солнца и неодинаковым поступлением радиации Солнца на поверхность Земли при периодических нарушениях в ее движении. Эти нарушения связаны в основном с изменением наклона оси к плоскости эклиптики. В результате на Земле происходит чередование теплых и холодных периодов различной продолжительности, что, в свою очередь, наиболее полно проявлялось в смещении географических поясов (зон) и в изменениях их соотношений.

Следует сказать, что причинность многих климатических ритмов еще слабо изучена.

Ритмические изменения по-разному проявляются как в разные этапы развития Земли, так и в разных регионах земного шара. В одних регионах ритмические изменения природы едва заметны, в других грандиозные события холодных частей периодов сменяются на не менее величественные явления в теплые эпохи.

Известный советский палеогеограф академик Константин Константинович Марков показал в своих работах, что переходным рубежом к четвертичному периоду явилось резкое усиление ритмических изменений, которые в Европе и Северной Америке привели к появлению покровных оледенений суши. Ледниковые покровы, занимавшие огромные площади, увеличивали отражательную способность — альбедо — поверхности Земли, тем самым способствуя более глубокому охлаждению атмосферы в холодные этапы плейстоцена. Однажды возникнув, покровные оледенения сами начинали воздействовать на природную среду, создавая очень суровые условия как над самими ледниками, так и на участках суши, свободных ото льда. В приледниковой зоне, которую в научной литературе называют перигляциальной зоной, происходило глубокое многолетнее промерзание пород.

Ритмические изменения природы имеют различную продолжительность. Устанавливаются периодические колебания температур воздуха с периодами 4—6, 11—13, 40,

80, 300 и 1850 лет. Существуют ритмы с периодами в десятки и сотни тысяч лет. Именно с этими ритмами и связаны крупные похолодания и потепления, оледенения и межледниковья. Более короткие ритмы накладываются на ритмы с большими периодами, поэтому ход изменения во времени таких показателей климата, как температура воздуха, осадки и другие, носит сложный характер, внешне кажущийся случайным. Столь же сложно меняется и температурный режим поверхности и верхних слоев Земли, обуславливая понижение или повышение среднегодовых температур горных пород, увеличение и изменение мощности мерзлых толщ, смещение на юг или отступление на север южной границы вечной мерзлоты.

В. А. Кудрявцев, развивая современные представления о динамике мерзлоты, показал, что одновременно мерзлые толщи пород развиваются под влиянием ритмических изменений очень сложно. За счет колебаний одного периода их температуры могут понижаться, а под влиянием колебаний другого периода — повышаться. Смена деградационных и аградационных направлений в их развитии происходит как во времени на одной и той же глубине, так и в вертикальном их разрезе на разных глубинах в один и тот же момент времени. При этом колебания с короткими периодами проникают на меньшую глубину, чем с длинными. С глубиной происходит запаздывание во времени максимумов и минимумов температурных волн. Например, в мерзлой толще мощностью 250—300 м температурные колебания с периодом 1860 лет вблизи нижней поверхности могут вызывать понижение температур и промерзание (движение нижней границы вниз), а у поверхности они уже находятся в фазе повышения температур и обуславливают появление деградационного направления развития «мерзлотного процесса». В то же самое время в этой же части разреза вечной мерзлоты колебания с периодом в 40 лет могут находиться в фазе похолодания — аградации. Но колебания с таким небольшим периодом не могут влиять на положение нижней поверхности мерзлой толщи такой значительной мощности, так как они практически «гаснут» в слое, не превышающем несколько десятков метров. Значит, с колебаниями коротких периодов связано образование и исчезновение только маломощных мерзлых пород, от первых метров до 30—40 м. В условиях мощных мерзлых толщ они влияют только на температурный ре-



жим верхних горизонтов пород. А формирование и развитие мощной мерзлоты обусловлено колебаниями среднего и главным образом длинного периода продолжительностью в сотни, тысячи и десятки тысяч лет.

**О соотношении оледенений и вечной мерзлоты.** Изложение этого сложного вопроса уместно начать с рассказа о тех условиях, которые необходимы для образования ледников и «подземного оледенения» — вечной мерзлоты. Эти два природных феномена, формирующихся в условиях сурового климата, в определенной мере являются антиподами.

Для образования ледников необходимо наличие отрицательных температур воздуха и такого количества атмосферных осадков, выпадающих в виде снега, которое не может растаять в течение теплого периода года. В этом случае начинает накапливаться ледник, который по мере увеличения его мощности растекается и площадь его возрастает. В периферийной зоне ледника таяние льда превалирует над количеством выпадающего снега и поступлением льда из области его аккумуляции. Это зона абляции ледника, его разрушения.

Значит, факторами, которые способствуют увеличению ледников, являются возрастание количества твердых атмосферных осадков — снега — и ослабление таяния ледникового льда, которому обычно способствует понижение температур воздуха. Чем суровее условия, тем меньше тает лед.

Но если климатические условия суровые, среднегодовые температуры низкие, снега выпадает мало и он полностью стает летом, то в этом случае ледников не возникает, но зато происходит многолетнее промерзание пород — начинается подземное оледенение верхних горизонтов земной коры вследствие замерзания в них подземной воды.

Различия в условиях, необходимых для образования ледников и вечной мерзлоты, обуславливают их разную степень развития в различных регионах северного полушария, особенно Евразии. Ледниковые покровы образовались в холодные эпохи четвертичного времени в регионах, имеющих главным образом морской климат. К таким регионам относятся Европа и Северная Америка. По направлению к центру Евразийского материка по мере удаления от акватории Атлантического океана климат становится все

более сухим и континентальным. Поэтому ледниковые покровы с запада на восток становились все меньше и меньше, а огромные территории Центральной и Восточной Сибири никогда не подвергались оледенению. Только в горах Северного Прибайкалья и Верхоянья образовывались ледники, покрывавшие шапками вершины, языками двигавшиеся по долинам и даже спускавшиеся иногда к подножиям горных сооружений. Но о времени их наибольшего развития идет постоянный научный спор. Одни ученые считают, что максимумы оледенения в этих континентальных районах совпадали с наибольшим развитием ледниковых покровов на западе Европы и в Северной Америке. Другие исследователи обращают внимание на то, что сейчас отсутствию или малому распространению ледников в этих суровых районах препятствует только малое количество выпадающего здесь снега. Увеличилось бы количество снега, говорят они, начали бы расти ледники. А снега может выпадать в этих районах больше в теплые и влажные этапы, когда увеличивается испарение с поверхности моря и усиливается атмосферная циркуляция. Поэтому наибольшее распространение ледников в Восточной Сибири, считают они, могло не совпадать с максимумами оледенения в районах с океаническим климатом, где для поступательного развития ледников необходимо главным образом понижение температур воздуха, наибольшее похолодание.

Регионы с континентальными условиями климата являются территориями наибольшего развития толщ многолетнемерзлых пород, и, как показывают результаты изучения их геологической истории, мерзлые толщи здесь наиболее стабильны во времени. В северных районах они существуют непрерывно сотни тысяч лет, а южная граница их распространения меняла свое положение во времени существенно меньше, чем в регионах с океаническим климатом, подвергавшимся покровным оледенениям.

Для мерзлотоведов и гляциологов важным является вопрос о наличии многолетнемерзлых пород под ледниками.

Возможность образования и существования под ледниками мерзлых толщ или субгляциальной криолитозоны определяется такими условиями, как температура поверхности ледника, мощность ледникового льда и величина градиентов температур, т. е. повышение температуры с

глубиной в ледяной толще. Известно, что существуют ледники, у которых в подошве температура льда равна  $0^{\circ}\text{C}$ . Их можно назвать теплыми, и под ними мерзлые породы отсутствуют. Но есть и холодные ледники, у которых в подошве температура имеет отрицательные значения и породы их ложа находятся в многолетнемерзлом состоянии. К числу холодных относятся небольшие горные ледники на Северо-Востоке СССР, существующие в наиболее высокогорных районах. В основании ледников Памира и Тянь-Шаня, островов Новой Земли и Северной Земли существуют как мерзлые породы, так и талые, что отражено на карте криолитозоны СССР (см. рис. 5).

Под ледниковыми щитами Антарктиды и Гренландии картина распространения мерзлых толщ, видимо, весьма сложная и еще весьма слабо изученная. Американские и канадские исследователи сообщают, что в Гренландии в 150 км к востоку от города Туле температура под толщей льда 1300 м равна  $-13^{\circ}\text{C}$ . Под ледником в северной части Канадского Арктического архипелага при мощности льда около 120 м температура достигала  $-16^{\circ}\text{C}$ , а под толщей льда мощностью 645 м была близка к  $0^{\circ}\text{C}$ . Однако в целом мощность мерзлых толщ — криолитозоны — под ледниками меньше, чем на соседствующих, на занятых льдом участках, а под мощными, с толщиной льда, измеряемой километрами, ледниковыми щитами существуют главным образом талые породы. И все-таки такое утверждение недостаточно подтверждено фактическими данными, и не исключено, что в определенных условиях даже под мощными ледяными щитами бывает глубокое промерзание пород.

**Когда образовалась вечная мерзлота и как это установить.** Вопрос о времени, когда на территории СССР начали формироваться мерзлые толщи, находится в начальных стадиях изучения.

Естественно предположить, что многолетнее промерзание пород началось в районах с наиболее суровым климатом, тяготеющих к акватории Северного Ледовитого океана. Происходило это скорее всего в горных районах. Однако, горные районы подвергаются непрерывному разрушению — денудации. Все, что может прямо или косвенно свидетельствовать о времени и условиях многолетнего промерзания пород, выносится из горных сооружений и откладывается в межгорных впадинах, на равни-

нах, окаймляющих горы с севера, и в морском бассейне Ледовитого океана. Видимо, там и следует искать этих немых, но очень часто красноречиво говорящих о геологическом прошлом свидетелей былых мерзлотных условий.

Но что же может рассказать нам о палеомерзлотной обстановке? Прямые свидетели — это только следы мерзлотных процессов и явлений, запечатленные в породах, накопившихся в соответствующие этапы геологического времени. К числу таких свидетелей относятся криогенное строение пород, распределение в них подземного льда, ледяные и грунтовые жилы, возникшие в результате морозобойного растрескивания пород, геологические структуры, образовавшиеся в результате морозного пучения осадков при их промерзании и др. Все они образуются только в определенной мерзлотной обстановке, а, следовательно, их следы в породах могут рассказать геологу-мерзлотоведу о былых мерзлотных условиях.

Косвенными свидетелями палеомерзлотных условий являются растительные и животные остатки, заключенные в осадочных породах. Их изучение позволяет восстановить былой растительный и животный мир, а по нему судить и о климате прошлого. Если климат был суровым, существовала тундровая или лесотундровая растительность, значит, были условия и для формирования мерзлых толщ. Палеоботанические, палеофаунистические и палеомерзлотные данные дополняют и контролируют друг друга, и их анализ позволяет делать достоверные палеомерзлотные реконструкции.

Таким образом, свидетельство о времени и условиях образования мерзлоты следует искать на северных равнинах, где в кайнозой происходило преимущественно накопление отложений и из геологической летописи вырвано наименьшее количество страниц.

Расскажем об одном эпизоде, который дал науке важное свидетельство о времени начала формирования вечной мерзлоты.

В 1966 г. далеко за полярным кругом, на небольшой речке Большая Чукочья, протекающей по приморской Колымской низменности и впадающей в Восточно-Сибирское море, начал работу небольшой геологический отряд, возглавляемый А. В. Шером. Андрей Шер, геоморфолог по образованию, много лет занимался изучением четвертич-

ных отложений и содержащейся в них фауны ископаемых млекопитающих на Северо-Востоке СССР. Заинтересовавшись тонкой и кропотливой работой по исследованию остатков древних животных, он под руководством известных советских палеонтологов В. И. Громова и Э. А. Вапгенгейм сам стал прекрасным специалистом в этой области.

На далекую тундровую речку Большая Чукочья его привели поиски очень древних форм ископаемых млекопитающих. Его коллеги, московские и магаданские геологи, работающие в этом районе, не раз привозили ему для определений отдельные кости очень древних животных, находки которых ранее не были известны в арктических районах Азиатского материка. Но кости были разрозненные, обычно плохой сохранности, собраны они были на бечевниках и косах реки, т. е., несомненно, были переотложены и находились во вторичном залегании. Точная их привязка к определенным геологическим напластованиям отсутствовала. Восстановить по ним видовую принадлежность животных было трудно, а подчас и просто невозможно, хотя их строение свидетельствовало о большой древности. Но обилие костей, собранных в общем-то случайно, давало основание думать, что рекой Большая Чукочья размываются отложения, очень богатые остатками млекопитающих. Интерес А. Шера к этому району все возрастал по мере поступления все нового и нового ископаемого материала, и становилось очевидным, что аналогичный комплекс древних форм изучен подробно никогда и никем не был.

Обнажение, откуда река Большая Чукочья вымывала кости, было известно достаточно точно, и вертолет высадил исследователей вблизи места их будущих работ. Разбит лагерь, задымился костер, рыболовы любопытствуют, есть ли в реке рыба, но главный интерес исследователей, что сулит им мощный разрез скованных льдом четвертичных отложений, подмываемых излучиной реки. Уже первый беглый осмотр обнажения и бечевника под ним показал, что место выбрано правильно и работы будет очень много. Костей на косах масса, но, для того, чтобы найти их в коренном залегании на месте их захоронения, нужно потратить много усилий для расчистки обнажения мерзлых пород, заплывшего с поверхности слоями разжиженного грунта, промерзшего зимой, а теперь оттаявшего всего на 50—60 см.

Я не буду описывать тяжелый и кропотливый труд по расчистке и препарировке обнажений мерзлых пород, когда слой за слоем аккуратно снимают оттаивающий грунт и открывается мерзлая насыщенная льдом порода, в которую вморожены кости и полуразложившийся торф.

Этот труд по своей кропотливости очень напоминает работу археологов, вскрывающих древние захоронения с бесценными свидетельствами прошлого. Правда, иногда геологи, мерзлотоведы, палеонтологи, работающие на вечной мерзлоте, начинают механизировать свой труд по расчистке геологических разрезов: мерзлые слои размывают гидропомпой. Но достать, получить и даже доставить такую малую механизацию за сотни верст от ближайшего жилья удастся далеко не всегда.

Несколько недель работы отряда дали очень интересные результаты. Было обнаружено, что костные остатки приурочены к толще речных отложений, в которых находилось несколько горизонтов клиновидных тел, в плане образующих полигональную систему. Размер полигонов составлял от 10—16 до 6—8 м, а высота клиньев, сложенных мерзлой породой, до 3—4 м. Именно такие размеры характерны для полигональных решеток повторно-жильных льдов, образующихся при морозобойном растрескивании мерзлых пород на поймах рек. Сразу возникло предположение, что «земляные» клинья могли образоваться при вытаивании ледяных жил, т. е. быть «псевдоморфозами по повторно-жильным льдам». Эти льды, о которых было рассказано в предыдущей главе, всегда образуются только в многолетнемерзлотных породах. И если «земляные» жилы являются псевдоморфозами, то в этом случае они указывают на существование вечной мерзлоты с довольно низкими среднегодовыми температурами, не выше  $-3$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ , во время накопления отложений. О наличии мерзлоты косвенно свидетельствовали и другие признаки: растительные остатки, найденные в тех же отложениях, а также споры и пыльца трав и мхов, характерных для тундры. Значит, здесь была тундра и мерзлота. Вот почему кости млекопитающих, во множестве обнаруженные в мерзлых породах, имели прекрасную сохранность. Более того, внутри трубчатых костей ног животных сохранилось желтоватое порошкообразное вещество, которое первоначально было принято А. В. Шером за результат фосилизации костей, т. е. их обогащения минеральными солями в

период, когда они находились в земле. Однако лабораторные анализы показали, что порошок органического происхождения. Внутри целых, без трещин, костей проникнуть такой порошок не имел возможности. Следовательно, он мог образоваться только из мозгового вещества, находящегося в трубчатых костях. А. В. Шер знал, что такое утверждение вызовет скептическое отношение многих палеонтологов. Дело в том, что мозговое вещество очень быстро разлагается в обычных условиях и сохранение его возможно только при быстром захоронении костей в мерзлоте, которая позже уже никогда не оттаивала.

Детальное изучение костных остатков показало, что они принадлежат к очень древним формам быков, лошадей, овцебыков, широколобого лося и других животных, очень похожих на животных так называемого «тираспольского фаунистического комплекса». Животные этого комплекса жили в нижнем плейстоцене, в самом начале четвертичного периода. Их остатки были изучены наиболее полно на юге европейской части СССР, в районе Тирасполя. Время, когда существовали животные «тираспольского комплекса», составляет примерно 500—600 тыс. лет назад, и климат в то время на этой территории был относительно теплым. Комплекс животных, изученный на реке Большая Чукочья, как доказывал А. В. Шер, являлся северным вариантом «тираспольского комплекса». В нем, по его определениям, резко преобладали виды, способные жить в очень суровых условиях тундры и лесотундры.

Открытие северного варианта «тираспольского фаунистического комплекса», существовавшего в тундре и при наличии мерзлоты, было весьма сенсационным научным событием. Не все ученые были склонны верить выводам, сделанным А. В. Шером. Некоторые из них полагали, что может быть, кости животных, найденные на реке Большая Чукочья, были вымыты из отложений более древних, формировавшихся в теплое время, что они перенесены рекой с юга и переотложены. Если это так, то существование древних млекопитающих в условиях тундры, при наличии суровой мерзлоты, не является доказанным. Да и принадлежность клиновидных тел к псевдоморфозам по жильным льдам тоже ставилось под сомнение.

Нужно было искать новые свидетельства, подтверждающие выводы о былом существовании нижнеплейстоцено-

вых животных в условиях вечной мерзлоты. Поэтому в течение ряда лет А. В. Шер продолжает изучение нижне-четвертичных отложений и фауны Колымской низменности. Он исследует кости мелких грызунов, которые не могут переноситься водой и переоткладываться. Тонкие и хрупкие кости просто истираются и полностью разрушаются при транспортировке их реками.

Промывка оттаивающих пород водой показала наличие массы мелких костей древнего копытного лемминга — современника крупных животных, живших в тираспольское время. Для изучения клиновидных тел был привлечен специалист — мерзловед А. Архангелов, который на большом фактическом материале доказал, что земляные клинья являются псевдоморфозами по ледяным жилам, образовавшимся или при увеличении глубин сезонного протаивания, или при миграции-смещении русла реки, отложившей толщу речных наносов, в которых встречены эти клинья. В то же время криогенное строение пород, вмещающих эти клинья, свидетельствуют, что они никогда полностью не оттаивали. Следовательно, мерзлота на Колымской приморской низменности непрерывно существует не менее чем 600 тыс. лет.

Учитывая, что повторно-жильные льды формируются в достаточно суровых мерзлотных условиях, уже на основании этих данных можно было предположить, что мерзлота начала образовываться на побережье Восточно-Сибирского моря существенно раньше, около 1 млн. лет назад, а возможно, и в более отдаленные времена.

Результаты исследований А. В. Шера на реке Большая Чукочья позволили установить период непрерывного существования мерзлоты на Северо-Востоке СССР. Они были хорошо сопоставимы с данными американских и канадских геологов и мерзловедов Дэвида Хопкинса, Троя Певе и других, которые показывали, что мерзлые толщи на севере Аляски и Канады начали образовываться почти 2 млн. лет назад. Последующие исследования А. В. Шера на Колымской низменности позволили получить новый материал о времени появления мерзлых толщ в этом регионе. Он обнаружил грунтовые клинья, которые определил как псевдоморфозы по повторно-жильным льдам в отложениях, которые на основании определения остатков мелких грызунов и палеомагнитных исследований имеют, несомненно, плиоценовый возраст, а в абсо-



лютном летосчислении они формировались примерно 2 млн. лет назад. Вновь для детального исследования грунтовых клиньев в плиоценовых отложениях был привлечен А. Архангелов. И снова после тщательного изучения он подтверждает мнение, высказанное А. В. Шером: клиновидные тела в породах плиоценового возраста — псевдоморфозы. Но признаков непрерывного существования мерзлоты с этого времени обнаружено уже не было. Поэтому можно предположить, что мерзлые толщи с ледяными жилами в морозобойных трещинах, образовавшиеся 2 млн. лет назад, позже протаивали. Можно сделать еще одно предположение: изучение высокогорной мерзлоты Памира, Тянь-Шаня, Гималаев покажет, что она возникла еще в более древние времена. Исследования продолжаются.

**О некоторых событиях в истории развития мерзлых толщ в Евразии.** Итак, мерзлые толщи в арктических районах возникали 2 млн. лет назад, а начиная со времени, которое определяется в 600 тыс. лет, существовали на севере непрерывно.

В Центральной Якутии, по исследованиям мерзлотоведов Е. М. Катасонова, Н. С. Даниловой и других, вечная мерзлота никогда не оттаивала по крайней мере со среднего плейстоцена, т. е. она существует непрерывно не менее чем 100 тыс. лет. В более южных районах мерзлые толщи возникали и оттаивали и вновь образовывались многократно.

Важным событием в истории развития мерзлых толщ горных пород было верхнеплейстоценовое похолодание, начавшееся примерно 70 тыс. лет назад. В европейской части СССР в этот период началось валдайское оледенение, имевшее две фазы наступления ледников, которые разделялись более теплым временем, когда ледники отступали. В Западной и Восточной Сибири в верхнем плейстоцене были два оледенения, разделенные более теплым периодом. Напомним, что масштабы оледенений уменьшались с запада на восток. Во время второй стадии валдайского оледенения Европы уровень Мирового океана понижался на 100—130 м благодаря концентрации воды в виде ледникового льда. Граница континента на северном побережье Сибири продвинулась за счет осушения шельфа до 800—900 км к северу. На обширных низменностях Северо-Востока СССР, а также в Центральной Якутии происходи-

ло накопление очень льдистых озерно-аллювиальных толщ и с мощными сингенетическими жильными льдами. Температуры горных пород в этих районах понизились до  $-15$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ , в то время как сейчас они изменяются в пределах от  $-7$  до  $-12^{\circ}\text{C}$ . Климат этой эпохи был не только холодный, но и очень континентальный.

Следует заметить, что в Европе валдайское оледенение имело значительно меньшие размеры, чем предшествовавшие ему более древние средне- и нижнечетвертичные оледенения. И в то же время верхнеплейстоценовое похолодание было самым сильным из известных нам. Наиболее холодный этап этого похолодания охватывает время от 30—35 до 10 тыс. лет назад. При этом максимум похолодания в Европе фиксируется 15—17 тыс. лет назад. Главным климатическим рубежом плейстоцена назвал это время советский палеогеограф Андрей Алексеевич Величко. Его исследования показали, что причины этого грандиозного похолодания таились в том, что одновременно с оледенением суши имело место сильное повышение ледовитости моря. Благодаря падению уровня Мирового океана резко ослабло поступление теплых морских вод из Атлантического океана в Северный Ледовитый. Акватория Полярного морского бассейна покрылась мощными натающими, так называемыми паковыми льдами и превратилась, по образному выражению А. А. Величко, в «морскую сушу». Резко увеличилось альbedo и упало испарение с этой территории земного шара. В результате возросла континентальность и суровость климата во всем северном полушарии. Высокая суровость климата привела к резкому увеличению площади, занятой многолетней мерзлотой. В европейской части СССР и Средней Азии южная граница мерзлых толщ достигала примерно  $48^{\circ}$  северной широты и проходила где-то южнее Киева и Волгограда. Вся Западная и Восточная Сибирь была охвачена многолетним промерзанием пород. «Великий криогенной областью» назвал А. А. Величко огромную территорию, скованную «холодом земли». В период великого похолодания, по подсчетам этого исследователя, площадь, занятая мерзлыми толщами, оледенениями суши и моря, составляла 25% всего северного полушария нашей планеты. Высокая суровость и континентальность климата обусловила широкое развитие мерзлотных процессов, особенно морозобойного растрескивания пород.

В период максимальной суровости и континентальности климата площадь, занятая оледенением в Европе, начала сокращаться. Но причиной уменьшения площади ледникового щита было не потепление, как обычно считалось ранее, а уменьшение количества выпадающих твердых осадков. Великая сухость холодного климата породила парадоксальное явление — отступление ледникового щита к северу. На площадях, освобождающихся из-под ледникового покрова, происходило глубокое промерзание пород. Их среднегодовые температуры в Европе понижались до  $-5$ ,  $-7^{\circ}\text{C}$  и ниже. Потоки вод, вырвавшиеся из-под фронта отступающего ледника, замерзали и образовывали перед ним гигантские поля наледного льда, оставившие свои следы в виде древних наледных полей. Холодные стоковые ветра, дувшие со стороны ледника, сносили перед его фронтом снег, несли пыль, песок, катили по земле гравий и гальку. Песок, гравий, галька попадали в морозобойные трещины, которые разбивали скованную мерзлотой землю и образовывали в них песчаные и песчано-ледяные жилы, такие, какие сейчас развиваются на свободных ото льда участках Антарктиды.

Но ничто не длится вечно, и примерно 10 тыс. лет назад начался новый этап плейстоцена — голоцен, который продолжается и сейчас и в котором живет человечество. В начале голоцена примерно за 1000 лет, т. е. за время, в геологическом смысле очень короткое, произошло быстрое разрушение ледникового покрова суши, растаял ледниковый покров моря, произошел подъем уровня Мирового океана и началась деградация мерзлых толщ «великой криогенной области». Разрушение льдового покрова моря резко изменило климат, особенно в Европе, вновь сделало его морским. Потепление и изменение континентальности климата привело к быстрому отступанию южной границы мерзлоты к северу. При этом темп отступления был наибольшим в Европе и уменьшался к востоку.

Наименьшие изменения мерзлотной обстановки произошли в Восточной Сибири, хотя и здесь деградировали мерзлые толщи на юге, «вспыхнул» активный термокарст в Центральной Якутии и на приморских арктических низменностях. Вся северная часть этих низменностей погрузилась под уровень моря и под его воздействием началась деградация мерзлых толщ, превращение их в шельфовую криолитозону.

Наиболее далеко южная граница вечной мерзлоты сместилась к северу в период так называемого голоценового климатического оптимума. Климатический оптимум имел место в период от 8—8,5 до 4,5 тыс. лет назад. В это время далеко к северу продвинулись и границы растительных зон. Граница лесов в Западной Сибири переместилась по широте примерно на  $4^{\circ}$  по сравнению с современным ее положением.

Мощные мерзлые толщи, образовавшиеся на севере европейской части СССР и в Западной Сибири в верхнем плейстоцене и достигавшие мощности 400—500 м, не успели протаять полностью к концу климатического оптимума. Они остались в этих районах в виде реликтовых мерзлых толщ, о которых говорилось в первой главе.

Примерно 4,5 тыс. лет назад началось верхнеголоценовое похолодание и новообразование мерзлых толщ. Южная граница их распространения продвинулась к югу. На севере, где мощность протаявших за голоценовый оптимум пород была невелика, произошло смыкание плейстоценовых реликтовых и новообразовавшихся голоценовых мерзлых толщ. Южнее, где многолетнее промерзание в оптимум достигло 100—300 м, а мощность вновь образовавшейся мерзлоты была меньше, сформировались двухслойные мерзлые толщи. Заметим, что граница современных мерзлых толщ в Западной Сибири проходит севернее, чем реликтовых плейстоценовых, что хорошо видно на карте криолитозоны СССР.

Второй «холодный» этап голоцена не был однообразным по своему климату и динамике мерзлотных условий. Южная граница мерзлых толщ изменяла свое положение в связи со средне- и короткопериодными колебаниями климата, смещаясь как к югу, так и к северу.

В то же время реликтовые мерзлые толщи продолжали и продолжают деградировать снизу за счет воздействия потока тепла из недр нашей планеты.

## Глава V

### О ТОМ, КАК СТРОИТЬ, ДОБЫВАТЬ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ И ОХРАНЯТЬ ПРИРОДУ В ОБЛАСТИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

**Как строить на мерзлоте.** Две основные сложности, два главных зла подстерегают строителей в области вечной мерзлоты. Во-первых, это просадка при оттаивании льдистых грунтов под фундаментами зданий, насыпей железных и шоссейных дорог, под покрытием аэродромов. Во-вторых, это выпучивание фундаментов, опор, мостов, столбов линий электропередачи, а также пучение железнодорожного и шоссейного полотна. Сложности при строительстве, связанные с просадками при оттаивании и с пучением, очень велики, а убытки при возникновении этих явлений буквально неисчислимы. Поэтому строительство на вечной мерзлоте должно проводиться так, чтобы избежать влияния этих двух зол, свести их на нет.

Мерзлые породы, сцементированные льдом, в подавляющем своем большинстве являются хорошим, прочным основанием для домов и промышленных сооружений. Они способны выдерживать большие нагрузки, не подвергаясь деформации, особенно если температуры пород не поднимаются выше  $-5^{\circ}\text{C}$ . Но глинистые породы и чистый подземный лед при температурах, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ , становятся пластичными; их прочность и несущая способность под фундаментами понижаются.

Остановимся на этом вопросе подробнее. Мерзлые дисперсные породы, содержащие в своем составе лед и незамерзшую связанную воду, обладают особым качеством изменять свои физико-механические свойства при изменении температуры. Происходит это потому, что от температуры зависит, во-первых, количество незамерзшей воды в дисперсных, особенно глинистых, породах, о чем было упо-

мянуто в первой главе, и, во-вторых, прочность одного из основных компонентов мерзлой породы — льда. При температуре около  $0^{\circ}\text{C}$  в мерзлых дисперсных группах содержится максимальное количество незамерзшей воды, которая является наиболее слабой составляющей породы, а подземный лед обладает наименьшей прочностью. Мерзлые грунты при таких температурах обладают способностью к вязкому течению и высокой сжимаемостью под действием даже небольших нагрузок. Поэтому их называют пластично-мерзлыми. При понижении температуры уменьшается количество связанной воды, растет прочность льда и увеличивается общая прочность мерзлой породы. Грунты переходят в твердомерзлое состояние. Они становятся практически несжимаемыми при нагрузках до  $5\text{--}10\text{ кг/см}^2$ , т. е. таких, которые допускаются под опорами фундаментов крупных сооружений. При превышении этих нагрузок для твердомерзлых грунтов характерно хрупкое разрушение, а не пластические деформации. Переход от пластично-мерзлого состояния в твердомерзлое происходит для грунтов различного состава при разных температурах: для пылеватых песков при температуре  $-0,3^{\circ}\text{C}$ , для супесей  $-0,6^{\circ}\text{C}$ , для суглинков около  $-1^{\circ}\text{C}$ , а для глин разного состава изменяется в диапазоне от  $-1,5$  до  $-5$  и даже  $-7^{\circ}\text{C}$ . Однако и в твердомерзлом состоянии прочность грунтов не остается неизменной, она продолжает увеличиваться с понижением температур.

Основатель механики мерзлых грунтов Н. А. Цытович показал в своих фундаментальных работах, что различные показатели физико-механических свойств мерзлых пород, которые должны учитываться при расчетах устойчивости инженерных сооружений, меняются при изменении температуры сложно, нелинейно. В силу этого для целей строительства приходится проводить большое количество лабораторных испытаний физико-механических свойств мерзлых грунтов, таких, как сопротивление сжатию, растяжению и сдвигу, прочности смерзания и др. Показатели физико-механических свойств грунтов получают для диапазона температур, который определяется тем, в каком режиме будут «работать» изучаемые грунты под сооружениями. А это, в свою очередь, зависит от типов сооружений, от мерзлотных условий и климата района, где планируется строительство. При этом важно знать не только естественную мерзлотную обстановку, существующую до

строительства, но, главное, рассчитать, прогнозировать те условия, которые возникнут в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Для этого перед строительством проводят мерзлотную инженерно-геологическую съемку территории, отбирают образцы мерзлых грунтов для лабораторных испытаний, а затем дают мерзлотный прогноз, о чем подробнее мы расскажем в следующей главе.

Исследования образцов мерзлых пород проводят в специальных, довольно сложных по конструкции приборах, которые помещают в холодильные камеры-лаборатории. В таких холодильных камерах в течение опыта автоматически поддерживается постоянная отрицательная температура. В последние годы в производстве испытаний образцов мерзлых пород широко внедряются автоматика, дистанционные измерения и обработка результатов при помощи ЭВМ.

Таким образом мерзлотоведы, проектировщики и строители должны учитывать изменение прочности мерзлых пород от их температуры, принимая показатели, характерные для самых худших условий, которые будут иметь место при эксплуатации сооружений, т. е. при наиболее высоких возможных температурах. Но следует подчеркнуть, что снижение прочности мерзлого грунта при повышении его температуры — это «зло не столь большой руки». С ним бороться не так уж сложно. Ведь мерзлый грунт по своей прочности все равно выше талого.

Главные неприятности начинаются, когда под фундаментами сооружений мерзлые породы оттаивают. При этом прочность пород снижается во много раз. Под действием собственного веса и под весом здания протаивающие породы начинают уплотняться. Поры и полости в породе, прежде заполненные льдом, уменьшаются, происходит просадка при оттаивании грунта. Прочность сильно льдо-насыщенных глин, суглинков, песков при их оттаивании настолько сильно может снижаться, что грунты начинают течь под собственным весом или выдавливаться даже под очень небольшой нагрузкой из-под фундаментов сооружений.

Просадка при оттаивании происходит обычно неравномерно. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в породах подземный лед чаще всего распределен неравномерно; во-вторых, протаивание под зданием также идет обычно неодинаково. Неравномерность осадки — это глав-

ная опасность для фундаментов зданий и самих сооружений. Представьте, что одна часть фундамента здания просела больше, другая — меньше, третья осталась в прежнем положении. В результате в стенах появляются и растут трещины и, если не принять срочных мер против протаивания и просадок грунта, в конечном итоге здание развалится. Именно так чаще всего и происходили аварии зданий, построенных без учета вечной мерзлоты.

Как же борются с протаиванием и неравномерными просадками мерзлых грунтов под зданиями? Ответ напрашивается сам: не допускать протаивания.

Но это легко сказать, да не так просто сделать, особенно под отапливаемыми домами, цехами с горячим производством, зданиями теплоэлектростанций и т. д. Способ был найден советскими мерзлотооведами и строителями: сделать между полом здания и мерзлыми породами, на которых оно стоит, теплоизоляцию. Теплоизоляция должна быть такой, чтобы мерзлота не протаивала от тепла, идущего от пола. Она может быть сделана из слабопроводящих синтетических материалов, представлять собой подстилку из малольдистого песка и гравия или быть воздушной. Да, воздушной. Воздух очень плохой проводник тепла. Кроме того, зимой холодный воздух можно легко использовать для охлаждения мерзлого основания сооружений, сообщать ему запас холода. По этому принципу построены на вечной мерзлоте здания с проветриваемыми подпольями. Пол зданий хорошо изолирован, утеплен, чтобы не пропускать холод в здание. По периметру подполья существует система отверстий-продухов. Зимой продухи открывают и холодный наружный воздух свободно поступает в подполье, охлаждая мерзлый грунт. Летом продухи закрывают, не позволяя проникнуть под здание теплом воздуха.

Впервые проветриваемые подполья были обоснованы и рассчитаны Н. А. Цытовичем еще в 1928 г. Это позволило развить метод возведения сооружений по принципу сохранения мерзлого состояния оснований, широко и успешно применяемый в СССР и за рубежом.

Первым большим промышленным зданием, возведенным по методу сохранения мерзлого грунтового основания, была тепловая Якутская центральная электростанция. Здание станции, запроектированное и построенное в 1931—1933 гг., успешно эксплуатируется до сих пор без каких-



либо недопустимых деформаций, при достаточно высокой температуре внутри самого здания.

Большинство зданий с проветриваемыми подпольями строят на свайных фундаментах. По периметру здания в вечную мерзлоту вбивают сваи, а на них устанавливают фундамент. Сваи обычно сделаны из железобетона, реже из металла. Под небольшими жилыми зданиями иногда ставят деревянные сваи, но сейчас их используют редко.

В мерзлый грунт сваю вбить трудно. Поэтому под каждую сваю бурят скважину или пропаривают цилиндр. Для этого в мерзлый грунт вбивают перфорированный наконечник — паровую иглу — и подают в него горячий пар. Грунт вокруг паровой иглы оттаивает, после чего иглу вбивают глубже и глубже. В результате образуется цилиндр талого разжиженного грунта. Паровую иглу вынимают и на ее место вбивают сваю. Под действием окружающего мерзлого массива пропаренный талый грунт в цилиндре замерзает, намертво вмораживая сваю.

Железобетонные сваи обычно делают на специальных заводах железобетонных изделий, а потом доставляют на стройку. Но такие сваи можно сделать и прямо на стройке. Для этого под каждую сваю роют шурфы или бурят скважины широкого диаметра. В них монтируют металлический каркас сваи, а затем заливают его цементом специальных марок, твердеющим при отрицательной температуре.

Количество свай под зданиями определяется специальным инженерным расчетом. Допустимая нагрузка на каждую сваю зависит от ее формы, глубины заложения в мерзлой толще, свойств грунта и наиболее высоких температур в летне-осенний период. Чем ниже температура, тем больше сила смерзания сваи с вмещающим ее грунтом и тем больше прочность последнего. Поэтому в условиях низкотемпературной мерзлоты допустимая удельная нагрузка на сваю больше, чем если температуры грунтов близки к 0 °С.

На сваях, вмороженных в вечную мерзлоту, построено большинство современных зданий в городах Якутске (рис. 64), Норильске, Мирном, Воркуте и других многочисленных городах и поселках. Здания имеют все современные удобства: центральное отопление, горячую воду, канализацию и т. д. Трубы отопления, водопроводные и канализационные трубы смонтированы в специальных ко-



Рис. 64. Центр Якутска. Все здания построены на сваях по принципу сохранения мерзлого состояния грунтового основания. (Фото И. А. Некрасова.)

робах, снабженных теплоизоляцией, идущих по поверхности для удобства их ремонта и контроля. Короба соединяют здания с центральной котельной и распределительным коллектором. Короба с трубами установлены или почти на уровне земли и через них на месте пешеходных дорожек и подъездных путей перекинута мостики, или приподняты на сваях на несколько метров над землей, на высоту, позволяющую транспорту свободно проезжать под ними.

Эксплуатация зданий по принципу сохранения мерзлоты в их основании требует жесткой регламентации. Нельзя допускать утечек воды или нарушения работы проветриваемых подполий, которые могут вызвать протаивание мерзлых грунтов в основании сооружения и просадок, приводящих здания в аварийное состояние.

Под зданиями и сооружениями, выделяющими большое количество тепла, сохранить вечную мерзлоту бывает невозможно. Теплоэлектростанции, цехи с горячим производством или технологическими процессами, использующими большое количество воды, предотвратить утечку которой

практически нельзя, строят по принципу протаивания мерзлых грунтов в основании сооружений и сохранения их в талом состоянии. Здесь существуют два варианта оттаивания мерзлоты: во-первых, предварительное протаивание, до начала возведения сооружения, во-вторых, протаивание в процессе строительства и при эксплуатации.

В первом случае различными способами: при помощи воды, пара, электрических устройств — мерзлые льдистые грунты под фундаментом зданий предварительно оттаивают и уплотняют. Глинистые льдистые породы, переходящие при оттаивании в разжиженное состояние, обычно удаляют и заменяют крупнообломочными несжимаемыми талыми грунтами — песками, галечниками, щебнем. Фундаменты зданий возводят, учитывая свойства талых пород в их основании. Зимой искусственно протаянные и уплотненные породы при помощи теплоизолирующих материалов, снега и т. д. предохраняют от глубокого промерзания, образования в них линз льда и пучения.

Во втором случае здания и сооружения возводят на мерзлых породах, а в процессе их эксплуатации допускают оттаивание грунтов в их основании. Фундаменты и конструкции сооружений должны быть или абсолютно жесткими, или, напротив, приспособленными к неодинаковым осадкам оттаивающих грунтов, под разными частями зданий. Способ строительства с протаиванием мерзлых грунтов в основании сооружений в процессе их эксплуатации очень сложен. Он требует чрезвычайно детальных определений свойств мерзлых и оттаивающих грунтов, особенно их осадок под разными частями зданий и развития их во времени. Чтобы определить ход развития осадок, необходимо решение теплофизической задачи об образовании «чаши» оттаивания под зданием с учетом неравномерности состава и свойств мерзлых и оттаивающих грунтов. Вторая сложность — конструктивная. Трудно и дорого создать надежные конструкции сооружений, которые допускают неравномерную осадку грунтов в их основании, или сделать абсолютно жесткий, недеформируемый фундамент. Поэтому описываемый способ редко применяется на практике.

Вторым злом для строителей является выпучивание свай, столбов опор линий электропередачи и газопроводов при сезонном промерзании влажного грунта. Последний увеличивается в объеме, и поверхность земли приподнима-

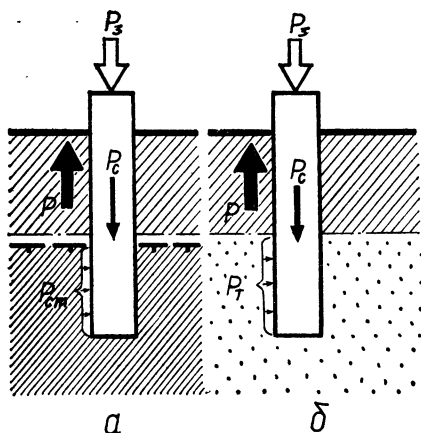


Рис. 65. Схема, сил, действующих при выпучивании столба (а), замороженного в многолетнемерзлый грунт, и (б), заглубленного в талый грунт.

ется, пучится. Осенью сваи и столбы смерзаются с грунтом и он как бы тянет их наверх, выдергивает из земли. Если силы выпучивания достаточны, чтобы выдернуть, приподнять сваю или столб, то под ним остается пустое пространство. Весной протаивающий грунт уменьшается в объеме, проседает, полость заполняется разжиженным грунтом, а столбы и сваи остаются в приподнятом положении. Повторяющийся из года в год процесс выпучивания и

просадок может полностью выдернуть твердый предмет из грунта. Выпучивание невозможно, если силы выпучивания  $P$  равны или меньше веса сваи (столба)  $P_c$  и нагрузки, передаваемой сооружением  $P_3$ , а также сил смерзания с мерзлым грунтом  $P_{cm}$  или сил трения о талый грунт  $P_T$  (рис. 65). Даже из простого анализа приведенной схемы следует, что бороться с выпучиванием можно разными способами. Во-первых, глинистый грунт в сезонноталом или сезонноммерзлом слое можно заменить крупнообломочным. Но это дорого и не всегда возможно. Во-вторых, можно уменьшить или ликвидировать совсем смерзание грунта и сваи в сезонноталом (сезонноммерзлом) слое. Для этого поверхность сваи может быть, например, покрыта жировой смазкой. В-третьих, можно увеличить нагрузку от сооружений, передаваемую на сваю, или увеличить смерзание и сцепление сваи (или столба) с многолетнемерзлым грунтом. Увеличив нагрузку на каждую сваю, можно уменьшить их число над зданием, но здесь вступает в силу вопрос о прочности свай и несущей способности мерзлых грунтов под ними. Потому конструкторы и строители идут чаще другим путем: увеличивают сцепление (смерзание) сваи с многолетнемерзлой породой. Для этого площадь

смерзания увеличивают, применяя различные приемы: сваю делают толще, забивают ее глубже или понижают температуру мерзлой породы. Кроме того, применяют различные конструкции свай, позволяющие удерживать сваю в мерзлой толще за счет прочности самого грунта. Например, делали сваи с ребристой поверхностью. В этом случае, помимо сил смерзания, выдергиванию противостоит работа грунта на срез. Столбы и различные опоры часто снабжа-

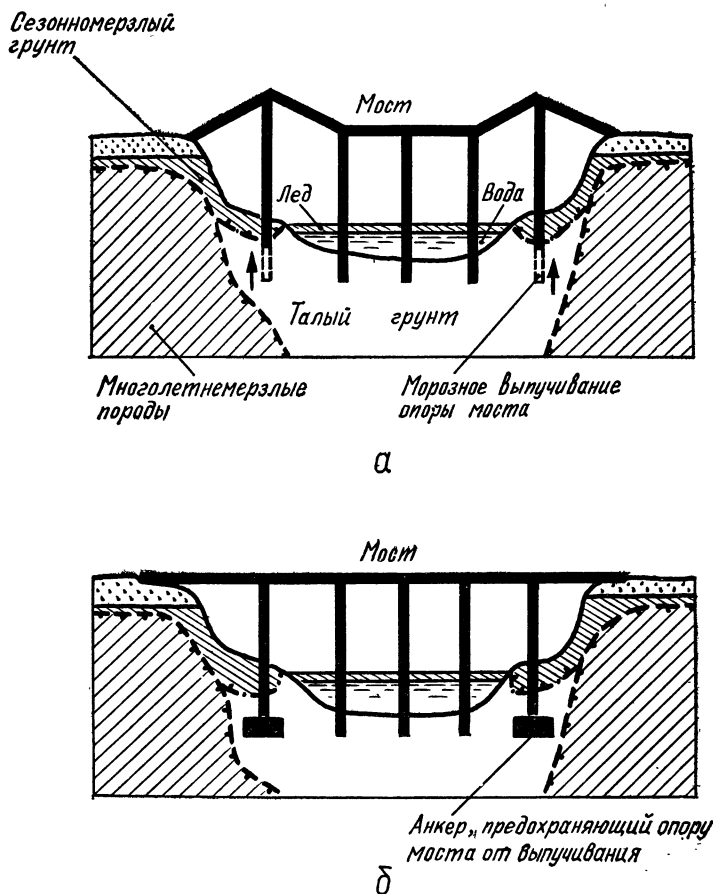


Рис. 66. Деформация моста при морозном выпучивании опор на талой пойме (а) и закрепление опор анкерами (б) для борьбы с их выпучиванием,

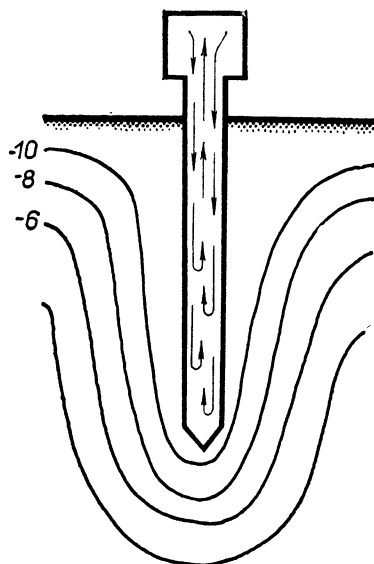


Рис. 67. Схема действия термосвай в зимнее время.

ют специальными устройствами — анкерами, удерживающими их в мерзлой породе и резко увеличивающими сопротивление выпучиванию (рис. 66).

Широкое массовое строительство в условиях вечной мерзлоты побуждает разрабатывать новые принципы, создавать новые конструкции, увеличивающие надежность работы сооружений.

Так, в последнее десятилетие у нас и за рубежом широкое использование получили термосваи различных конструкций. Принцип их работы весьма прост. Термосвая представляет собой металлическую трубу, заполненную

незамерзающей жидкостью. Она погружается в грунт так, что верхняя часть ее, обычно снабженная резервуаром (баком) для жидкости, остается над землей (рис. 67). Зимой незамерзающая жидкость, в качестве которой часто используется керосин, в баке и верхней части термосвай охлаждается и плотность ее увеличивается, это приводит к появлению конвективных потоков: холодная жидкость опускается сверху вниз, а более теплая поднимается снизу вверх. В результате зимой грунт вокруг термосвай охлаждается. Если термосвая погружена в мерзлую толщу, то понижение температуры способствует увеличению сил смерзания. Вокруг термосвай, забитых в талый грунт, образуется цилиндр промерзающего грунта, позволяющий увеличить нагрузку на сваю и бороться с ее выпучиванием вверх. Летом, когда на поверхности земли температуры выше, чем в мерзлом грунте, плотность жидкости в термосае увеличивается сверху вниз, вследствие чего конвективные потоки отсутствуют.

Термосваи используются в основании зданий на глинистых мерзлых грунтах при естественных температурах,

близких к 0 °С. Понижение температур приводит к увеличению несущей способности глинистых пород.

В условиях вечной мерзлоты опоры небольших посейских и железнодорожных мостов, устанавливаемые вблизи русла в талые грунты, очень часто подвержены сильному воздействию сил выпучивания. Эти силы здесь особенно велики благодаря глубокому сезонному промерзанию пород и близкому залеганию водоносного горизонта, увеличивающему пучение в верхней части сезоннопромерзающего слоя. Вес мостов невелик, и передаваемая на сваи нагрузка незначительна; делать анкеры в основании таких опор дорого и сложно. Но если применить термосваи и создать вокруг основания мостовых опор цилиндр из замороженного грунта, то этим решаются две проблемы. Во-первых, можно увеличить нагрузку, передаваемую на каждую опору, и, во-вторых, предотвратить выпучивание опор: для выдерживания опоры с примерзшим к ней мерзлым грунтом нужны очень большие усилия.

Термосваи используются также для создания и поддержания мерзлых противофильтрационных завес в плотинах гидротехнических сооружений.

Мерзлые завесы создаются в теле земляных и каменнонабросных плотин в условиях вечной мерзлоты и сурового климата для предотвращения фильтрации через них воды и оттаивания мерзлых грунтов в их основании. Сейчас многие плотины гидротехнических сооружений строят таким образом, чтобы сохранить мерзлое состояние пород в их основании и в боковых примыканиях. Делают это по следующим причинам. Скальные грунты, на которых возводят плотины, обычно обладают трещиноватостью, иногда значительной. Создание водохранилища приводит к появлению напорной фильтрации воды через эти породы. В местах с высокой трещиноватостью пород фильтрация может быть столь велика, что это создаст угрозу размыва породы и потери устойчивости сооружения. Кроме того, возможны большие потери воды из водохранилища и т. д. Для предотвращения недопустимой фильтрации вне области вечной мерзлоты до создания плотины трещины в ее основании цементируются. Но если породы находятся в мерзлом состоянии и трещины заполнены льдом, то такое решение вопроса встречает сложности. Во-первых, трудно определить, где находятся наиболее трещиноватые зоны и сколь велика трещиноватость. Но если это даже и удастся сде-

лать, то зацементировать трещины, заполненные льдом, технически чрезвычайно трудно.

Поэтому гидротехники предложили другой путь: пусть роль цемента выполняет подземный лед. Чтобы предотвратить оттаивание мерзлой породы, следует создать в теле плотин охлаждающие устройства. А в качестве наиболее дешевых, удобных в эксплуатации и не требующих затрат энергии охлаждающих устройств могут использоваться термосваи, установленные рядами в плотине и создающие в ее теле и основании мерзлые нефилтрующие завесы.

Промышленное освоение севера Сибири требует большого количества дешевой энергии, поставщиком которой могут служить гидроэлектростанции, построенные на вечной мерзлоте. Возведена и много лет эксплуатируется Вилюйская ГЭС, снабжающая электроэнергией Якутский алмазодобывающий район. Введена в эксплуатацию Хантайская ГЭС, поставляющая энергию северным центрам горнодобывающей промышленности — Норильску и Талнаху. Запроектирована и строится Колымская ГЭС. На очереди многие электростанции, призванные снабжать энергией Чукотку, Северное Забайкалье и другие развивающиеся районы. Строительство ГЭС в условиях вечной мерзлоты породило много интересных и важных проблем. Как сочетать концентрацию огромных масс воды в водохранилищах с мерзлым состоянием пород, часто насыщенных льдом, сочетать так, чтобы огромные сооружения стояли надежно и стоили недорого? Рассказ об этих проблемах и путях их решения может быть темой особой книги.

Быстро и экономично осваивать удаленные районы невозможно без создания путей сообщения. Строительство шоссейных и железных дорог в условиях вечной мерзлоты и глубокого сезонного промерзания осложнено появлением наледей подземных вод, о которых рассказывалось в главе III, пучением земляного полотна, термокарстом, термоэрозией и другими мерзлотными процессами. Одним из самых сложных вопросов является вопрос о влиянии насыпи на термический режим и состояние грунтов в ее основании. Этот вопрос, а точнее, проблема встала еще в период строительства Забайкальской железной дороги. Позднее с ней остро столкнулись изыскатели, проектировщики, строители и эксплуатационники железнодорожных линий, проложенных на Воркуту, на север Западной Сибири через Поляр-



ный Урал, линий Тайшет — Братск — Усть-Кут, Ургал — Известковая, Хребтовая — Усть-Илимская ГЭС и др. Сейчас эта проблема стоит перед создателями Байкало-Амурской магистрали. На построенных линиях в одних случаях под насыпями, возведенными на мерзлых грунтах, последние протаяли и сами насыпи осели. В других случаях ядро насыпи промерзло и деформаций не наблюдалось. Под некоторыми насыпями, возведенными на талых породах, появились линзы многолетнемерзлых пород. Поэтому встает вопрос: с учетом каких изменений мерзлотной обстановки должны все-таки возводиться насыпи? Оказалось, что в районах с разными климатическими и мерзлотными условиями и под насыпями разной высоты изменения будут различными.

Поясним это положение на примерах. Представьте себе невысокую насыпь, возведенную из дренирующих грунтов, например хорошо водопроницаемых галечников и песков, отсыпанных на льдистых оторфованных суглинках, покрытых моховым покровом. Вблизи южной границы мерзлоты в малоснежных районах с большим количеством теплых летних дождей такая насыпь будет действовать обогревающе на свое основание. Связано это с тем, что теплые атмосферные осадки, просачиваясь в насыпь, отдают ей свое тепло, а та, в свою очередь, воздействует обогревающе на подстилающие мерзлые породы, создавая условия для их оттаивания. Изменения за счет плотности и мощности снега невелики и существенного влияния на температурный режим не оказывают.

Такая же насыпь в условиях климата с прохладным сухим летом и снежной зимой может действовать охлаждающе. Зимой с насыпи убирается снег; тем самым создаются условия, способствующие понижению температур, а летом при малом количестве дождей и их низкой температуре, инфильтрирующие осадки повышают температуру грунтов насыпи незначительно.

Если в первом случае насыпь будет отсыпана нефилтрирующими глинистыми грунтами и иметь высоту в несколько метров, то она может оказать не обогревающее, а охлаждающее воздействие.

Количество примеров можно увеличить, но очевидно одно: для оценки воздействия насыпей даже на мерзлотные и инженерно-геологические условия, для правильного их проектирования и строительства необходимо делать спе-

циальный мерзлотный прогноз. Для этого, изучив закономерности формирования мерзлотных условий в естественной обстановке и правильно используя их, следует проводить специальные теплофизические расчеты, определив влияние насыпей различной высоты, отсыпанных грунтами разного состава и свойств, на температурный режим пород в их основании. Тем самым можно научно предвидеть те последствия, которые возникнут в результате строительства. Если мы будем знать, что произойдет при хозяйственном освоении территории при определенных видах строительства, то можно заранее выбрать наиболее оптимальные решения, предотвратить появление нежелательных мерзлотных явлений: термокарста, осадок при оттаивании, пучения и др.

**Об особенностях разработки полезных ископаемых.** В Советском Союзе на территории, занятой вечной мерзлотой, в недрах земли сосредоточены запасы различных полезных ископаемых: рассыпного золота и оловоносного касситерита, алмазов, угля, железной руды, нефти и газа. Охлаждение верхних горизонтов земной коры ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , наличие подземного льда в породах, высокая механическая прочность мерзлых грунтов — все это вносит большие затруднения в условиях поиска, разведки полезных ископаемых и особенно их добычи.

При разведке и добыче нефти и газа вокруг буровых скважин в мерзлой толще образуются ореолы оттаивания. Рыхлые льдистые отложения теряют механическую прочность, и колонны буровых труб, особенно в верхней части разреза скважин, на десятки и даже сотни метров оказываются заключенными в цилиндры разжиженного грунта. Возникает возможность их изгиба, бокового смещения, которые могут привести к аварии скважин. Чтобы не допустить деформации колонн буровых труб, необходимо их закреплять, что технически сложно и дорого.

Это одна сторона проблемы. Другая заключается в том, что нефть, поднимающаяся по стволам скважин в мерзлой толще, быстро охлаждается. При понижении температуры увеличивается ее вязкость и, как следствие, снижается производительность скважин. Бороться с этим явлением можно, подогревая нефть в стволах скважин электрическими нагревателями. Однако, подогрев увеличивает ореолы оттаивания мерзлых пород вокруг скважин и ухудшает условия их эксплуатации.

Существенные сложности в районах с глубоким охлаждением земной коры создаются с поисками и эксплуатацией залежей природного газа, находящихся на глубинах 1,5—2 км от поверхности земли. При мощности криолитозоны 500—600 м и более температуры пород, вмещающих залежи, на 10—20 °С ниже, чем вне области вечной мерзлоты. При существующих на этих глубинах давлениях и пониженных температурах природные газы способны образовывать с подземной водой твердообразные соединения — кристаллогидраты газов. Наличие в земных недрах севера Западной Сибири газа в виде кристаллогидратов было открыто советскими учеными-геологами, нефтяниками, гидрогеологами, геохимиками. Понятно, что эксплуатировать месторождения природного газа, находящегося в состоянии криогидратов, или природного газа, образующих криогидраты, при вскрытии залежей буровыми скважинами (известно и такое явление) значительно сложнее, чем находящиеся в обычных условиях. Для этого необходима разработка новых методов и технологических приемов добычи.

Добавим к сказанному, что образование и разрушение залежей кристаллогидратов природных газов в недрах земли происходит с выделением и поглощением тепла. В результате этого поток тепла, идущий из недр земли, над пластами породы, содержащими криогидраты, меняет свое значение. Следовательно, изменяются и условия на нижней границе мерзлых пород. На одних этапах развития мерзлых толщ при уменьшении теплотока снизу это может способствовать глубокому многолетнему промерзанию, на других — при увеличении теплотока, напротив, сокращать мощность многолетнемерзлых пород. Эта проблема еще малоизученная, требует своего разрешения.

Еще первые золотоискатели Сибири столкнулись со сложностью добычи рассыпного золота из мерзлых песков и галечников. В шурфах для оттаивания мерзлых золотоносных песков они устраивали костры-пожог, после чего извлекали и промывали оттаявшую руду.

Промышленные методы добычи золота и других рассыпных полезных ископаемых потребовали совершенствования приемов оттаивания мерзлых пород перед добычей их драгами, перед промывкой на специальных устройствах — промышленных приборах и т. д. Возникло целое направление — водно-тепловая мелиорация мерзлых пород.

Были разработаны методы оттаивания при помощи гидроигл, поверхностной воды, искусственно создаваемых потоков надмерзлотных вод, фильтрирующихся по сезонноталому слою, оттаивания под действием солнечного тепла, включая применение специальных пленочных покрытий, создающих тепличный эффект, повышающий температуру пород. Широкое применение нашел метод послойного оттаивания мерзлых пород. Сущность его заключается в том, что оттаивающие под действием солнечного тепла, небольшие по мощности слои породы снимаются бульдозером. Отопленная мерзлая порода вновь оттаивает и снова счищается. Таким образом за летний сезон даже в северных районах можно оттаять и разработать пласт мощностью 4—8 м и более. Этот метод применяют как для снятия вскрыши над промышленными пластами, так и для разработки самих золотоносных песков. При этом породы вскрыши — «торфа», по терминологии золотопромышленников, складываются в отвалы, а «пески» подаются на промприборы для промывки.

При водно-тепловой мелиорации россыпей важно не только оттаять в теплый сезон содержащие металл породы, но и предохранить их от глубокого зимнего промерзания, с тем чтобы весной при появлении воды в реках как можно раньше начать их промывку. В короткое северное лето важно экономить каждый день, чтобы продлить промывочный сезон и переработать большее количество металлоносных «песков». Для предохранения пород от промерзания были разработаны приемы, включающие затопление оттаиваемых различными способами участков водой, создание слабо проводящих тепло слоистых экранов из льда и воздуха, искусственные теплоизоляционные покрытия из пенопласта и других материалов, снегозадержание и так далее. Особенно больших успехов в водно-тепловой мелиорации мерзлых пород на россыпных месторождениях достигли магаданские специалисты В. Г. Гольдтман, С. Д. Чистопольский, А. И. Калабин и др. Разработанные ими методы нашли широкое внедрение в практику на горнодобывающих предприятиях Северо-Востока СССР.

Применение современной мощной техники повысило возможности добычи полезных ископаемых и открыло новые пути в подготовке металлоносных «песков» для промывки. Принципиально возможным стала разработка пород, находящихся в мерзлом состоянии. Однако высокая

прочность этих пород оставляет их разработку малопроизводительной и дорогой.

Ну а если уменьшить их прочностные свойства, свести их до таких значений, когда современные бульдозеры и рыхлители легко смогут их разрабатывать зимой? Это позволит, во-первых, перейти с сезонного использования техники к круглогодичному, во-вторых, исключить дорогостоящие мероприятия по предохранению талых пород от зимнего промерзания, в-третьих, к началу весеннего снеготаяния подготовить необходимое количество «песков» и сразу начать их переработку, используя промывные приборы на полную мощность.

Такой подход к проблеме потребовал исследования и решения многих вопросов водно-тепловой и технической мелиорации мерзлых и промерзающих пород. Сама же идея была внешне подкупающе проста. Прочность мерзлых песчано-гравийно-галечных отложений, главным образом содержащих металл, определяется цементирующим их льдом. Уменьшив количество льда в породе, можно снизить их прочность. В свою очередь, льдистость мерзлых глубообломочных отложений соответствует тому количеству влаги, которое было в них перед промерзанием. Значит, если оттаять льдистые галечники, а затем их дренировать, тем самым удалив большую часть влаги, то при последующем промерзании количество льда и механическая прочность породы понизятся. В дренированной перед промерзанием породе, сусенце, лед остается только на контактах частиц, а крупные поры, каналы, полости заполнены воздухом. Очевидно, это наименьшее количество льда сохранится в дренированных грубообломочных отложениях, лишенных песчано-глинистого заполнителя и обладающих высокой водоотдачей. Из галечников с большим количеством глинистого заполнителя удалить влагу не удастся, поэтому они сохраняют высокую прочность в мерзлом состоянии. Следовательно, не все породы, содержащие металл в россыпях, можно подготовить к разработке таким способом. Нужно выбрать участки с соответствующими водными свойствами пород, к тому же занимающие такое положение в рельефе долин, которое позволяет простыми и дешевыми способами осушить их после оттаивания. Это порождает одно важное требование к геологической разведке месторождений: изучить не только распределение металла в россыпи, но и исследовать водно-фильтрационные свойства

пород и их прочностные свойства в мерзлом, но осушенном состоянии.

Скажем, что проблема водно-тепловой и технической мелиорации мерзлых золотоносных галечников успешно решается в настоящее время во всех ее аспектах и внедрение кратко описанного выше метода приносит большую выгоду народному хозяйству.

Может создаться впечатление, что наличие мерзлых толщ всегда ухудшает условия разработки полезных ископаемых. В действительности это не так. Например, в угольных шахтах, пройденных в мерзлых толщах пород, отсутствует рудничный газ, а следовательно, нет опасности взрывов. В шахтах, не углубляющихся ниже подошвы мерзлой толщи, нет подземных вод, мешающих эксплуатации.

**Вопросы охраны природы области вечной мерзлоты.** Северная природа очень ранима. Живительные силы биосферы здесь существенно меньше, чем в умеренных и средних широтах. Нарушенные человеком растительные покровы восстанавливаются крайне медленно и, видимо, далеко не всегда в своем первоначальном виде. Следы таежных пожаров, возникших при ударах молний или из-за людской неаккуратности, сохраняются десятки и сотни лет. Гусеницы трактора, прошедшего по тундре несколько лет назад, долго зеленеют ярким травяным шрамом и цепочками неглубоких луж на темном зелено-коричневом покрове из мхов и мелких кустарников.

Ранимость природы усугубляется в условиях вечной мерзлоты тем, что часто непосредственно подо мхом и маломощным слоем оторфованного суглинка залегают льдистые породы или чистый подземный лед. Нарушили покров, увеличили глубину сезонного оттаивания, просела земля и на ее поверхности появилось понижение. Скопилась в понижении вода, вобрала в себя летом солнечное тепло и еще глубже осела под ней поверхность. Возникла термокарстовая просадка, заполненная водой. А это, в свою очередь, изменило влажностный режим маломощных и слаборазвитых мерзлотных почв и условия прорастания на них растительности. В термокарстовых просадках отмирают погружившиеся под воду деревья и кустарники, гибнет ягель — основной корм северных оленей, а на их месте появляются влаголюбивые осоковые травы.



Рис. 68. Тракторная дорога на склоне, по которой идет термоэрозия.

А на склонах студёные ручейки по следам вездеходов и тракторов протаивают и размывают льдистый грунт, весело и легко пропиливают ледяные жилы, давая начало крутостенным глубоким оврагам. Идет термоэрозия (рис. 68).

Сняли моховой покров на склоне, сложенном «ледовым комплексом» с мощными повторно-жильными льдами (рис. 69), и через несколько лет оцетинился безобидный склон грозными конусами — башнями байджерахов (рис. 70). Правда, временно скроет северная природа безобразную наготу разрушающейся земли пышными зарослями крестовника. Но под этим ковром, существующим три месяца в году, прячется обезображенный склон: ни пройти по нему, ни проехать.

Унылые и, можно прямо сказать, малоприятные для жизни ландшафты создает иногда человек около поселков на Севере, если хозяйственное освоение велось здесь без учета чуткой, быстрой реакции мерзлотной обстановки на нарушение природной среды. Солифлюкционное течение грунта на склонах и термоэрозионные овраги, байджерахи и термокарстовые понижения, заполненные водой,



Рис. 69. Поверхность «ледового комплекса», вскрытая бульдозерами. Из-под мохово-растительного покрова начинается протаивание ледяных жил и образование байджерахов.

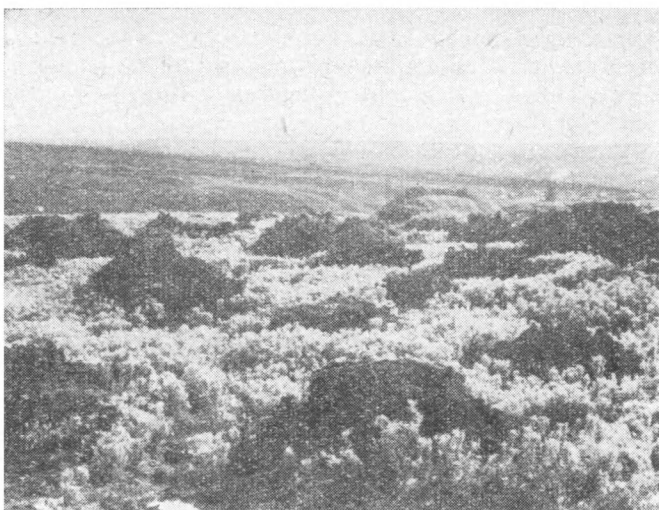


Рис. 70. Байджерахи на склоне долины, образовавшиеся после удаления растительного покрова



с умершими и покосившимися деревьями, болотистые кочкарники и лишённые растительности пыльные пустыри с растрескавшимся серым суглинком — вот что возникает, если не обращаться с суровой природой бережно.

Каков же выход? Есть ли он при все увеличивающейся мощи человека, мощи созидательной и разрушительной?

Да, он существует. Это охрана природы и ее рациональное использование.

Охрана — это значит, где только возможно в минимальной степени изменять своей деятельностью природную среду Севера. Строя дорогу, следует насыпь отсыпать перед собой, пуская самосвалы по ней, а не в объезд по болотистой, замшелой мерзлой мари. Пользуясь вездеходами, великими помощниками геологов, изыскателей и строителей, которых сейчас очень много на вооружении полевых отрядов, партий и экспедиций, нужно придерживаться проторенных ранее дорог, стараясь не заезжать на нетронутые участки. Конструкторы сейчас заняты поисками и разработкой таких видов наземного транспорта, которые, обладая высокой проходимостью, минимально нарушали бы покровы.

Например, в США появились опытные экземпляры машин — ролигонов на широких резиновых катках-болонах, дающих крайне незначительную удельную нагрузку, способных двигаться по снегу и по тундре, не оставляя на них следов.

Охраняя природу, следует жестко регламентировать правила поведения людей в тундре, тайге, горах и т. д., больше создавать заповедников и заказников.

Но можно ли просто охранять природу в ее первозданном виде?

Конечно, нет! Второй и наиболее важный путь — рациональное использование северной природы. Люди, вынужденные вторгаться в нее и использовать ее богатства, должны научиться предвидеть результаты своей деятельности, выбирать варианты природопользования не только с позиций наибольшей их экономичности сегодня, но и с позиции «а к чему это приведет завтра?». Одним из средств предвидения является «мерзлотный прогноз», точнее, прогноз изменения мерзлотно-геологических усло-

вий при хозяйственном освоении территории — научно обоснованное предсказание изменения мерзлотной обстановки и хода мерзлотных геологических процессов.

Мерзлотный прогноз позволяет выработать систему мероприятий, которая, в свою очередь, дает возможность управлять ходом мерзлотных процессов в нужном направлении, не допускать появления нежелательных явлений или резко их ограничивать, создавать оптимальные условия для жизни и производственной деятельности человека.

## Глава VI

### «ПУСТЬ МЕНЯ НАУЧАТ»

**К**ак стать мерзлотоведом? Где можно приобрести эту интересную специальность, связанную с путешествиями в далекие уголки нашей Родины, с нелегкими маршрутами по неизученным местам, с радостями познания нового, неизвестного? На эти вопросы мы постараемся ответить в настоящей главе.

**Кем были первые исследователи мерзлоты.** Первые сведения о мерзлых, никогда не оттаивающих полностью породах стали известны в России и Западной Европе в XVI—XVII вв. благодаря донесениям сибирских воевод и кратким литературным свидетельствам путешественников, посещавших Новую Землю и Северную Америку. Первое обобщение данных о мерзлоте принадлежит перу В. Н. Татищева, русского историка и географа начала XVIII в., писавшего о наличии постоянно мерзлых пород и о находках в них трупов и бивней мамонтов.

В дальнейшем сведения о мерзлых породах Якутии и Забайкалья поступали от участников северных экспедиций, изучавших в XVIII — начале XIX в. эти мало изученные районы: Г. Гемелина, А. Е. Фигурина, А. Эрдмана, П. Ф. Врангеля, Ф. Ф. Матюшкина, И. Козмина и других. В 1828 г. Ф. Шергин, служащий в Русско-Американской компании, начал копать в Якутске колодец, который через девять лет достиг глубины 116 м, так и не пройдя насквозь мерзлую толщу. Этот колодец — «Шахта Шергина» — сохранился в Якутске до сих пор как исторический памятник. Во время своей трехлетней экспедиции в 1843—1846 гг. академик А. Ф. Миддендорф измерил температуру в Шергинской шахте на всю глубину ее, установил

наличие геотермического градиента в мерзлой толще пород. По этому градиенту он рассчитал мощность мерзлоты в Якутске, равную 184,6 м. Исследования А. Ф. Миддендорфа показали широкое распространение мерзлоты в Сибири от Енисея до берегов Охотского моря. Наличие постоянно мерзлых пород в Сибири и Северной Америке не стало уже ставиться под сомнение.

Начало становления мерзлотоведения как науки можно отнести к концу прошлого — началу нынешнего, XX века. Связано оно было с освоением Сибири, изучением ее геологического строения, поиском полезных ископаемых, развитием горнодобывающей промышленности, строительством железных и шоссейных дорог. Поэтому в этот период исследователями вечной мерзлоты — мерзлотоведами — становились горные инженеры и геологи, инженеры-путейцы, строившие Забайкальскую железную дорогу, и гидрогеологи, изыскивавшие воду для городов и станционных поселков, боровшиеся с наледями. Это И. А. Лопатин, изучивший в 1866 г. жильные льды и мерзлотные явления в низовьях Енисея и обративший внимание на их значение для строительства на Севере, Л. Я. Ячевский, впервые нанесший на карту южную границу распространения мерзлых пород, А. И. Воейков, опубликовавший в 1889 г. первую сводку о мерзлых породах по линии строительства железной дороги в Сибири, С. А. Подъяков, заложивший основы учения о наледях, Н. С. Богданов, впервые рассмотревший в своей книге «Вечная мерзлота и сооружения на ней» приемы строительства, А. В. Львов, написавший первую сводку по гидрогеологии области вечной мерзлоты, А. В. Обручев, изучавший мерзлоту Олёкмо-Витимской горной страны и Монголии и обобщивший свои наблюдения за мерзлыми породами в курсе «Полевая геология» и в лекциях в Московской горной академии, которые он читал в 1921—1922 гг. Наконец, это первый «полный» мерзлотовед, основоположник этой науки Михаил Иванович Сумгин, опубликовавший в 1927 г. книгу «Вечная мерзлота в пределах СССР» и создавший в дальнейшем настоящую научную школу советского мерзлотоведения.

Русские исследователи конца прошлого — начала двадцатого века определили ее общие контуры и заложили различные направления: геологическое и географическое, инженерно-строительное и гидрогеологическое,

**Становление мерзлотоведения в СССР и начало его преподавания.** В 30-х годах происходит организационное становление мерзлотоведения. В 1930 г. по инициативе академика В. И. Вернадского в системе Академии наук СССР создается Комиссия по изучению вечной мерзлоты, целью которой была координация всех мерзлотных исследований, проводимых в СССР. Председателем этой комиссии стал академик В. А. Обручев.

В 1936 г. Комиссия по изучению вечной мерзлоты была реорганизована в Комитет, а на его базе в 1939 г. был создан Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева, который имел научно-исследовательские станции в Воркуте, Игарке, Якутске, Анадыре, Чульмане и под Москвой, в Загорске.

В этот же период, т. е. в 30-х — начале 40-х годов, в некоторых вузах страны начинают читать первые лекции по мерзлотоведению, а в лекционных курсах по гидрогеологии, инженерной геологии, механике грунтов и строительству специальные разделы посвящаются вечной мерзлоте и принципам строительства на ней.

В начале 30-х годов необходимость подготовки специалистов-мерзлотоведов побудила М. И. Сумгина прочесть лекции по мерзлотоведению в Ленинградском горном институте и Ленинградском университете. В дальнейшем чтение таких лекций продолжали его ученики.

Пожалуй, особую роль в подготовке инженеров-геологов и гидрогеологов, специализировавшихся по мерзлотоведению и внесших очень большой вклад в развитие этой науки, сыграл Ленинградский горный институт им. Плеханова. В его стенах гидрогеолог Н. И. Толстихин, трудами которого были заложены основы гидрогеологии мерзлотной зоны литосферы, начал подготовку специалистов, имена которых теперь знают мерзлотоведы всего мира. Среди них — член-корреспондент АН СССР, директор института мерзлотоведения Сибирского отделения АН СССР П. И. Мельников, заведующий кафедрой мерзлотоведения МГУ, профессор В. А. Кудрявцев и многие другие.

В эти же годы мерзлотоведение начинают преподавать на геологическом факультете МГУ и в Московском инженерно-строительном институте.

В 1940 г. была опубликована книга М. И. Сумгина, С. П. Качурина, Н. И. Толстихина и В. Ф. Тумеля «Общее мерзлотоведение», которая по существу явилась пер-

вым учебным пособием, в котором были изложены основные закономерности распространения и развития вечной мерзлоты и мерзлотных явлений. По этой книге мерзловедение изучало не одно поколение исследователей северных и восточных районов нашей страны.

Огромная потребность в мерзлововедах не могла быть удовлетворена путем чтения отдельных лекционных курсов студентам геологических, географических и строительных специальностей. Освоение северных и восточных районов СССР требовало подготовки специалистов, владеющих всем комплексом мерзлотных дисциплин. Следствием этой объективной необходимости было создание первой в мире кафедры мерзловедения.

**Где и как готовят мерзловедов.** Кафедра мерзловедения была организована в 1953 г. на геологическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и вошла в отделение гидрогеологии и инженерной геологии. Ее созданию в стенах главного университета страны способствовали крупные ученые, инженеры-геологи профессора Сергей Сергеевич Морозов и Евгений Михайлович Сергеев, ныне академик, президент Международной ассоциации инженеров-геологов.

1953 год был годом переезда естественных факультетов МГУ в прекрасное здание на Ленинских горах. Получение Московским университетом нового здания и современного нового оборудования позволило организовать в его стенах целый ряд учебных специальностей для подготовки кадров ученых и инженеров высокой квалификации, в которых остро нуждалась наша Родина. В числе их было и мерзловедение.

Кафедру мерзловедения возглавил профессор Владимир Алексеевич Кудрявцев, ученик и продолжатель основоположника советского мерзловедения М. И. Сумгина. Первоначально кафедра занимала небольшую площадь: три кабинета, лаборатория, мерзлотная камера, в которой проводились учебные занятия и эксперименты с мерзлыми породами и подземными льдами. В первые годы существования кафедры ежегодно только четыре студента защищали дипломные работы и получали квалификацию геолога-мерзлововеда.

Сейчас это история. Почти все выпускники первых лет стали известными учеными, кандидатами и докторами наук. Многие из них имеют уже своих учеников и

последователей. Но все они входят в научную школу, которую можно назвать школой кафедры мерзлотоведения или школой Владимира Алексеевича Кудрявцева — ее основателя и бессменного руководителя.

Пусть простят меня мои товарищи по специальности, если в этой главе я буду больше говорить о кафедре мерзлотоведения МГУ и школе Кудрявцева, чем о кафедрах других вузов, где сейчас идет подготовка мерзлотоведов. Но согласитесь с тем, что кафедра мерзлотоведения МГУ была первой в СССР и в мире и в течение четверти века оставалась единственной специализированной кафедрой. И мне хочется рассказать молодым людям, изберущим нелегкий труд геолога-мерзлотоведа, о школе Кудрявцева — особой научной школе, созданной трудом и научным талантом этого замечательного ученого.

Начнем с учителей, приглашенных В. А. Кудрявцевым на организованную им кафедру и преподававших в первые годы основные мерзлотные дисциплины.

Среди них первое место занимал профессор Борис Николаевич Достовалов. В нем сочеталась неповторимая тонкая интеллигентность ленинградца, мягкость и доброжелательность, обширные знания не только в области мерзлотоведения, но и в физике, физической химии и геотектонике. Он был одним из первых, кто с успехом применил в СССР геофизические методы исследования мерзлых пород; им была создана физическая модель морозобойного растрескивания пород и заложены основы термодинамики мерзлых толщ. Общение с ним обогащало студентов и молодых ученых не только специальными знаниями, но и мудрым и добрым отношением к людям.

Доцент Николай Федорович Полтев вместе с В. А. Кудрявцевым участвовал в организации кафедры и с тех пор постоянно проводил и проводит огромную работу по сплочению ее коллектива и воспитанию студентов и молодых ученых, оставшихся работать в университете. Грунтовед по образованию, Н. Ф. Полтев внес большой научный вклад в методику мерзлотной съемки и в изучение криогенеза пород, т. е. тех изменений, которые вносят в состав и свойства дисперсных отложений их многократное промерзание и оттаивание. Он принес на кафедру высокую геологическую культуру и строго требовал ее соблюдения.

Профессор Борис Александрович Савельев — ученый-энтузиаст, проработавший много лет в Арктике и одним из

первых прошедший с научными исследованиями к Южному полюсу. Он посвятил себя изучению физических свойств льдов и мерзлых пород.

И наконец, в первые годы работы кафедры курс механики мерзлых грунтов и инженерного мерзлотоведения читал профессор Сергей Степанович Вялов, замечательный лектор и яркий ученый. Его блестящие работы в области механики мерзлых грунтов сыскали ему международную известность.

По прошествии многих лет, анализируя прошлое, понимаешь, что В. А. Кудрявцев создавал учебные программы для студентов-мерзлотоведов и подбирал преподавательский состав кафедры, следуя определенной идее: готовить специалистов, равно хорошо знающих генетическую, геологическую сторону мерзлотоведения, его инженерно-геологические аспекты, а также геофизические законы многолетнего промерзания и протаивания горных пород. Геофизические проблемы требуют от студентов-мерзлотоведов углубленного изучения математики и физики, знакомства с моделирующими устройствами и применением электронных вычислительных машин для решения мерзлотоведческих задач.

В. А. Кудрявцев постоянно ставил перед собой и своими сотрудниками задачу не только брать готовые решения, но и развивать, заново разрабатывать научную и прикладную сторону теплофизики сезонно- и многолетнепромерзающих и протаивающих горных пород. Для решения этой задачи на кафедре была создана математическая группа, во главе которой встал молодой математик В. Г. Меламед, ныне доктор физико-математических наук.

Для конца 50-х годов комплексный геофизический и генетический подход к решению мерзлотно-геологических задач, предложенный и развиваемый В. А. Кудрявцевым, был новым и для многих ученых непривычным.

Как геолог, много лет проработавший в полевых партиях, участвовавший в предвоенных изысканиях трассы БАМа, и как ученый с острым аналитическим умом, В. А. Кудрявцев понимал, что применение физико-математических методов для решения мерзлотно-геологических задач требовало получения высококачественных полевых данных по распространению и условиям залегания, составу мерзлых и талых толщ, по их температурному режиму, сезонному оттаиванию и промерзанию. Но нужно не только зафиксиро-



ровать существующую картину, но и изучить влияние на мерзлотные условия растительных покровов, снега, дождевых осадков, водоемов и водотоков, геологических структур и т. д.

Поэтому на кафедре активно началось развитие еще одного направления, а именно создание и разработка методики мерзлотно-геологической съемки. Под мерзлотной съемкой понимается не просто фиксация существующей мерзлотно-геологической обстановки и составление мерзлотной карты, как застывшей картины изученных условий. Мерзлотная съемка — это изучение качественных и количественных закономерностей формирования мерзлотных условий. Закономерности должны быть установлены при помощи различных методов, включая специальные мерзлотные, геофизические, геологические, в том числе полевые, лабораторные и расчетные. Такое изучение закономерностей влияния факторов природной среды на распространение, температурный режим, свойства талых и многолетнемерзлых пород, их сезонное промерзание и оттаивание, на мерзлотно-геологические явления позволяет ответить на вопросы: что произойдет, если человек изменит составляющие природной обстановки? Как изменятся мерзлотные условия, если мы сделаем то-то и то-то? Что случится, если на освоенной территории будут изменены естественные ландшафты: вырублен лес, снят моховой покров, убран снег, дренирована местность или, напротив, созданы искусственные водоемы?

В. А. Кудрявцев своим подходом к решению научных задач и обучению студентов заложил основы нового направления в мерзлотоведении — *мерзлотного прогноза*, научного предвидения, основанного на изучении природной мерзлотно-геологической обстановки и применении точных количественных методов. При таком подходе можно рассчитывать, что произойдет, как изменится мерзлотно-геологическая обстановка, когда человек начнет хозяйственное освоение любого района, где распространены мерзлые толщи пород или имеет место глубокое сезонное промерзание грунтов. Можно предсказать появление новых или изменение интенсивности старых, уже имевших место экзогенных мерзлотных процессов, особенно таких, как термокарстовые просадки, пучение грунтов при промерзании, морозобойное растрескивание при охлаждении массивов пород в суровые зимы. Был найден путь к решению важнейших проблем

при строительстве в суровых условиях Сибири, Арктики, Дальнего Востока. А самое главное, что при таком подходе мерзлотовед может не только предсказать, что произойдет в тех или иных условиях, но и способен предложить мероприятия, позволяющие предотвратить появление нежелательных процессов, изменить мерзлотные условия в нужном направлении. Здесь открывается дорога к управлению мерзлотными процессами и явлениями, а это, в свою очередь, путь к охране и рациональному использованию природной среды в области вечной мерзлоты.

Решение научных и прикладных мерзлотных задач невозможно без экспериментальных лабораторных исследований. Поэтому в лаборатории кафедры мерзлотоведения, в специальных мерзлотных камерах проводится широкий круг исследований состава и физико-механических свойств мерзлых пород. Группа сотрудников изучает теплофизические свойства пород, а также связанную воду в мерзлых дисперсных отложениях. Большой круг интересных лабораторных исследований по изучению миграции влаги, сегрегационного льдообразования в глинистых грунтах и формированию их криогенных текстур проводит проблемная группа лаборатории. При лабораторных экспериментах используется современная аппаратура. Многие приборы и новые методы исследований были созданы сотрудниками лаборатории кафедры в процессе постановки и проведения экспериментов.

Таким образом, подход к мерзлотным проблемам, характерный для «школы Кудрявцева», можно суммировать так: комплексный геофизический, геолого-генетический и исторический подход к мерзлоте как к геологическому процессу и явлению. Это не просто изучение существующей сегодня мерзлотной картины, а установление влияния факторов развивающейся природной среды на параметры мерзлотной обстановки путем проведения комплексных мерзлотных съемок. Это применение расчетных и лабораторных методов для определения мерзлотных характеристик и для их прогноза, т. е. для количественной оценки их изменения при хозяйственном освоении. Кроме того, это выработка приемов управления мерзлотными геологическими процессами. Научное и практическое значение такого подхода было понято и принято далеко не сразу многими геологами, проектировщиками и другими специалистами. Правда, сейчас скептическое отношение к прогнозу

и к применению расчетных методов в геологическом мерзлотоведении забыто. Сегодня слово «прогноз» стало общепринятым во многих областях геологии, географии и, конечно, в мерзлотоведении (хотя и понимаются под ними разные вещи). Поэтому можно считать, что испытание временем прошло успешно.

Описанный кратко научный подход, разработанный профессором В. А. Кудрявцевым, вообрал в себя все новое и прогрессивное, что создало советское мерзлотоведение, и именно он определяет сегодня программу подготовки студентов-мерзлотоведов. Эта подготовка состоит из нескольких частей. Студенты геологического факультета, специализирующиеся в области инженерной геологии, гидрогеологии и мерзлотоведения, на первых трех курсах слушают лекции по комплексу геологических дисциплин: общей и исторической геологии, палеонтологии, тектонике, минералогии и петрографии, геоморфологии и четвертичной геологии. В это же время они изучают в большом объеме математику, физику и химию. Начиная с третьего курса они слушают лекции и проходят практические занятия по грунтоведению и инженерной геологии, гидрогеологии, общему мерзлотоведению, динамике подземных вод. Студенты, выбравшие своей основной специальностью мерзлотоведение, изучают широкий круг специальных мерзлотных дисциплин, содержание и последовательность преподавания которых определяются в полной мере методологическим подходом, изложенным выше. К числу специальных дисциплин относятся методика мерзлотных исследований, геофизические методы исследования в области вечной мерзлоты, курсы регионального мерзлотоведения СССР и подземных вод области вечной мерзлоты, теплофизических основ мерзлотоведения, курса, в который входит знакомство с применением моделирующих устройств (рис. 71) и ЭВМ для решения мерзлотных задач. Студенты-мерзлотоведы слушают и проходят практические занятия по физике и механике мерзлых пород и инженерному мерзлотоведению.

На пятом курсе студенты кафедры мерзлотоведения могут прослушать (по выбору) спецкурсы по гляциологии, криолитологии и мерзлотно-фациальному анализу, основам криолитогенеза, охране и рациональному использованию природной среды в области вечной мерзлоты.

Практические занятия проводятся в лабораториях ка-

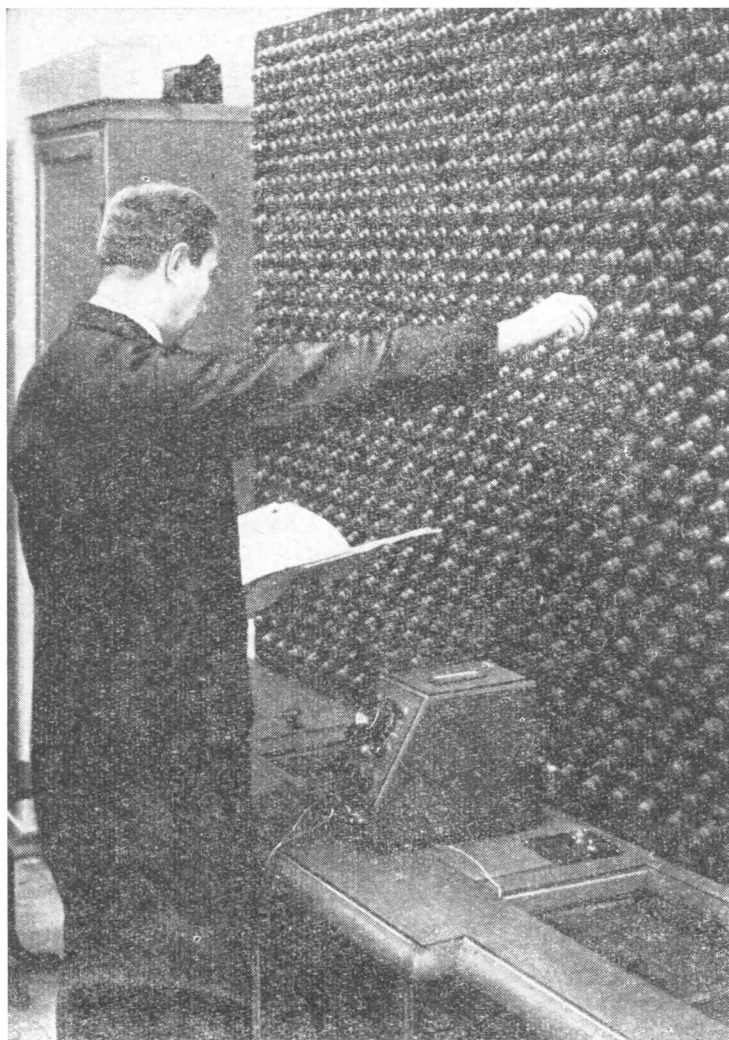
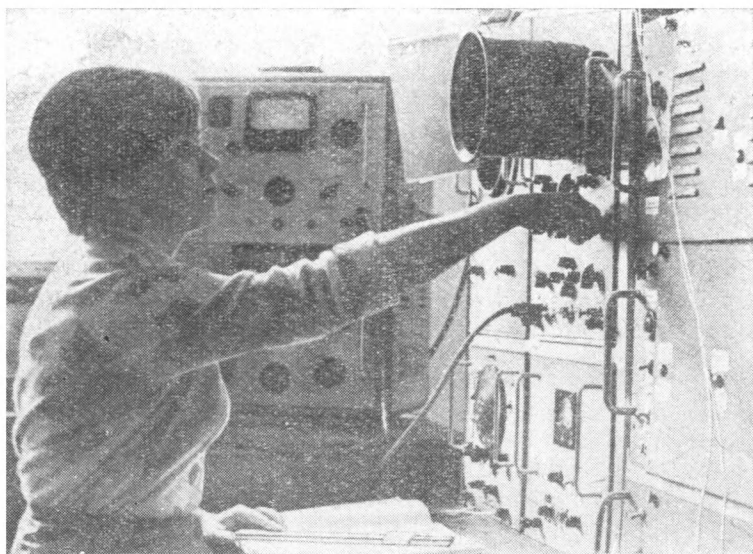


Рис. 71. Электроинтегратор, на котором студенты моделируют мерзлотные процессы,



**Рис. 72.** Изучение свойств связанной воды в мерзлых грунтах на установке ядерно-магнитного резонанса в лаборатории физики и механики мерзлых грунтов.

федры, оснащенных современным холодильным оборудованием и приборами (рис. 72).

По окончании первого, второго и третьего курсов студенты отделения проходят геологические, топографические, гидрогеологические и инженерно-геологические учебные практики в Крыму и в Подмосковье на специально оборудованных учебных базах — полигонах геологического факультета МГУ.

После третьего и четвертого курсов студенты-мерзлотоведы выезжают на производственные практики в северные и восточные районы нашей страны, где ведутся грандиозные работы по их хозяйственному освоению. Западная Сибирь и БАМ, Северная Якутия и Чукотка, Воркута и алмазодобывающая провинция Средней Сибири — здесь начинают свою практическую деятельность будущие мерзлотоведы. Большая часть студентов работает в экспедициях геологического факультета МГУ.

Материалы полевых мерзлотных исследований, полученные студентами на производственных практиках, ис-

пользуются ими для написания курсовых и дипломных работ. Курсовые и дипломные работы большинства студентов — это начало их самостоятельной научной работы. Руководители этих работ, опытные преподаватели и научные сотрудники кафедры, стараются привить студентам интерес к самостоятельным исследованиям. И очень часто работы, начатые на студенческой скамье, — это начало серьезного научного исследования.

Кто же преподает специальные дисциплины на кафедре мерзлотоведения? Это профессора В. А. Кудрявцев, Н. Н. Романовский, Б. А. Савельев, Э. Д. Ершов, доктор наук В. Г. Меламед, доценты Н. Ф. Полтев, Л. С. Гарагуля и др. Все преподаватели кафедры — это известные в СССР и за рубежом специалисты, ведущие активную научную работу.

Кафедра мерзлотоведения геологического факультета МГУ — это не только учебное учреждение, это крупный научный центр, постоянно ведущий широкий круг научных исследований. Здесь решаются и фундаментальные проблемы, ставящие своей целью глубокое познание криогенных геологических процессов и явлений в земной коре. Здесь разрабатываются и прикладные мерзлотные задачи, связанные со строительством городов и гидроэлектростанций, железных дорог и газопроводов на вечной мерзлоте, добычей рассыпного золота, нефти, газа, угля из скованных льдом недр Земли.

Научные исследования теоретического, прикладного и регионального направлений очень тесно связаны между собой. Если ученые кафедры решают теоретическую задачу, то непременно тут же ищут пути ее практического применения, учитывают полученные результаты при разработке новых методик, рассказывают о них студентам на лекциях и практических занятиях. Процесс познания всегда очень увлекателен, а рассказ о новом в науке пробуждает к ней интерес, будит живую мысль в молодых исследователях. Комплексные мерзлотные исследования в разных регионах нашей страны, которые ведут научные сотрудники, аспиранты и студенты кафедры, разработка прикладных вопросов для решения практических задач освоения мерзлотных районов всегда приносят новый материал, новые данные, которые в дальнейшем проходят стадию научного анализа и обобщения. В результате региональных и прикладных мерзлотных исследований мы получаем важные

научные теоретические выводы. Они входят в основной фонд науки мерзлотоведения, включаются в учебники.

За четверть века своего существования ученые и преподаватели кафедры участвовали в исследованиях мерзлотных условий Вилюйской и Братской ГЭС, нефтегазоносных районов Западной Сибири, алмазонасной Сибирской платформы, угольных и железорудных районов Южно-Якутского территориально-производственного комплекса, золотоносных россыпей Витимо-Патомского нагорья и Северной Якутии. Большие работы в настоящее время проводятся кафедрой в зоне Байкало-Амурской магистрали, на территории, слабо изученной в мерзлотном отношении, очень сложной и разнообразной. В одних районах вечная мерзлота здесь маломощная, островная, неустойчивая. Нарушения природных условий, строительство шоссе и железных дорог, зданий приводят как к деградации, так и к новообразованию мерзлоты. Они сопровождаются термокарстовыми процессами и пучением. Все это необходимо изучить и прогнозировать. В других частях зоны БАМа распространены сплошные, мощные низкотемпературные мерзлые толщи, содержащие большие скопления подземных льдов. Сложные мерзлотные условия сочетаются здесь с изрезанным горным рельефом и высокой сейсмичностью. Землетрясения приводят к тому, что каменные россыпи и курумы на склонах приобретают большую подвижность и их медленное движение, о котором мы рассказывали в третьей главе, сменяется быстрым катастрофическим смещением грунтовых масс в сезоннооттаивающем слое. Эти опасные явления еще мало изучены, и против них необходимо выработать систему защитных мероприятий. Задача сложная и важная.

Во всех исследованиях кафедры всегда принимали и принимают участие студенты кафедры мерзлотоведения, приобретая опыт полевых научных исследований и производственные навыки геологов-мерзлотоведов. С использованием материалов, полученных на практиках, написаны и защищены сотни курсовых и дипломных работ. И почти во всех этих работах есть зерна новых научных результатов. Лучшие студенческие работы докладываются и обсуждаются на заседаниях научного студенческого общества (НСО), на днях студенческого творчества, выдвигаются на конкурсы студенческих работ.

Расскажу об одной научной работе. В 1974 г. студент

третьего курса Александр Тюрин заинтересовался проблемой курумов — каменных потоков,двигающихся на склонах. Много труда вложил он, делая раскопки курумов, изучая их геологическое строение как в сезоннооттаивающем слое, так и ниже его, в горизонтах, где каменные глыбы монолитно спаяны льдом. Собранный фактический материал позволил ему блестяще защитить курсовую, а потом и дипломную работу. Он был оставлен в аспирантуре и продолжил начатые в студенческие годы исследования. Им изучены разные по строению курумы, находящиеся в разных мерзлотно-геологических условиях,двигающиеся с различной скоростью. А. Тюрин установил, что механизм движения глыбового материала в разных частях курумов неодинаков. Это и вымораживание камней, и медленное их оползание под влиянием процессов нагревания и охлаждения, «течение» глыб по ледяному основанию и т. д. В результате им были созданы модели курумов, позволяющие рассчитывать скорости движения глыбового материала и оценивать степень вредного влияния курумов на инженерные сооружения: дороги, здания, опоры ЛЭП. Научные результаты изучения курумов легли в основу кандидатской диссертации и нашли практическое использование при инженерно-геологической оценке территории для строительства.

Это только один пример. А с момента организации кафедры мерзловедения ее выпускниками защищено более пятидесяти кандидатских диссертаций. Трое стали докторами наук, решив крупные научные проблемы в области мерзловедения. Один из них, В. В. Баулин, с первых дней своей самостоятельной работы занимался проблемами вечной мерзлоты Западной Сибири. Он был в числе тех, кто установил наличие реликтовых и двухслойных мерзлых толщ и дал научное объяснение их происхождению. Он много сделал в разработке проблемы влияния геологических структур на изменение мощностей мерзлых толщ, о чем говорилось в первой главе. Под его руководством составлены прекрасные мерзлотно-геологические карты Западной Сибири, обобщившие огромные материалы геотермических исследований мерзлых толщ этой геологической провинции, имеющей крупные месторождения нефти и газа. За решение важнейшей задачи по мерзлотному и инженерно-геологическому обеспечению практики народнохозяйственного освоения этой территории вместе с группой других



исследователей он удостоен Государственной премии СССР. В работе В. В. Баулина нашла свое решение интересная научная проблема истории развития мерзлых толщ Западной Сибири в четвертичное время. Палеомерзлотные реконструкции, подкрепленные расчетами и моделированием, сделанные этим ученым, явились ключом к познанию истории формирования мерзлых толщ двух сопредельных регионов: с запада — северной части Русской равнины, а с востока — Среднесибирского плоскогорья.

В Московском университете есть вторая кафедра, которая занимается проблемами мерзлотоведения. Это кафедра гляциологии и криолитологии географического факультета МГУ. Ею заведует профессор А. И. Попов, имя которого неоднократно упоминалось на страницах этой книги. Преподавание и научная работа на этой кафедре ведется в двух основных направлениях. Одно из них — это изучение явлений, связанных с ледниками, снежными лавинами и селями — грязекаменными потоками, образующимися при катастрофическом таянии снега, льда и при обильном выпадении дождей в горах. Возглавлял его известный гляциолог, профессор Г. К. Тушинский.

Второе направление — криолитологическое. Во главе его профессор А. И. Попов. Криолитология является частью мерзлотоведения и изучает происхождение, вещественный состав и криогенные особенности мерзлых пород и подземных льдов.

Таким образом на кафедре гляциологии и криолитологии представлены направления, изучающие как наземное, так и «подземное» оледенение в земной коре. В этих двух направлениях и специализируются студенты, обучающиеся на этой кафедре. Помимо общего и инженерного мерзлотоведения, методики мерзлотных исследований, на кафедре читаются курсы лекций по криолитологии, четвертичным отложениям и геоморфологии области вечной мерзлоты. Большое внимание уделяется мерзлотным геологическим процессам и явлениям, влияющим на рельеф, состав и свойства четвертичных отложений, накапливающихся одновременно с их промерзанием. Специальные разделы учебной программы посвящены всестороннему изучению макро- и микростроения подземных льдов и мерзлых глинистых отложений различного происхождения (рис. 73).

Студенты-криолитологи проходят специальную учебную практику на мерзлотном стационаре, находящемся на Ени-



Рис. 73. Работа на приборе для изучения микростроения мерзлых дисперсных пород.

сее, в нижнем его течении. Здесь на специально оборудованных площадках они знакомятся с методами термометрических измерений в скважинах, приемами изучения мерзлых пород и подземных льдов в естественных обнажениях и горных выработках. На производственные практики студенты едут в геологические и географические экспедиции, работающие в районах вечной мерзлоты.

Специальные мерзлотные дисциплины на кафедре читают профессор А. И. Попов, доктор географических наук В. Н. Конищев, доценты В. И. Соломатин, В. В. Смирнов, Н. В. Тумель и др. Все преподаватели кафедры — известные специалисты, ведущие активные научные исследования.

В последние годы курс лекций по мерзлотоведению введен как обязательный для всех студентов, обучающихся специальности «инженерная геология и гидрогеология» в университетах, политехнических и горных институтах СССР. Связано это с тем, что все больше гидрогеологов и инженеров-геологов работают в восточных и северных рай-

онах нашей Родины, где проблемы строительства и снабжения водой тесно связаны с наличием мерзлых толщ горных пород и мерзлотными процессами.

**Где работают студенты, окончившие курс по специальности мерзлотоведение и криолитология.** Область приложения знаний геологов и географов-мерзловедов чрезвычайно обширна и разнообразна.

В области вечной мерзлоты для составления гидрогеологических и инженерно-геологических карт обязательно изучаются мерзлые толщи горных пород, их криогенное строение, водоносные талики и различные мерзлотные явления, такие, как пучение, термокарст, солифлюкция, наледи и др. Без специальных знаний по мерзлотоведению правильное их исследование, картирование и оценка их влияния на инженерно-геологические условия строительства, условия залегания, питания, движения и разгрузки подземных вод, на запасы этих вод и их количество совершенно невозможно. Во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрогеологии и инженерной геологии создан и активно развивается отдел мерзлотоведения, призванный разрабатывать методические вопросы инженерно-геологической съемки в условиях вечной мерзлоты и изучения мерзлотных (криогенных) процессов и явлений. Исследования мерзлоты и подземных вод Арктики проводят сотрудники научно-производственного объединения СЕВМОРГЕО с центром в Ленинграде. Таким образом, мерзловеды работают во всех территориальных геологических управлениях и в ряде научно-исследовательских институтов Министерства геологии СССР.

Мерзловеды работают в полевых экспедициях и партиях, проводящих изыскания под строительство, в специальных лабораториях, изучающих состав, строение, механические и теплофизические свойства мерзлых, оттаивающих и промерзающих пород, в отделах и лабораториях, занимающихся прогнозом изменения мерзлотных условий при строительстве с применением аналоговых моделирующих устройств и расчетов на ЭВМ. Прогнозные данные по мерзлотным условиям, которые возникают в период строительства и после возведения сооружений, ложатся в основу проектов. Именно прогнозные данные, а не просто результаты изучения существующей на момент изысканий мерзлотной обстановки. Поэтому в проектно-изыскательских организациях, работающих в области вечной мерзлоты, су-



Рис. 74. Изображение мамонта перед зданием Института мерзлотоведения в Якутске. (Фото И. А. Некрасова.)

ществует большой спрос на мерзлотоведов, владеющих методами мерзлотного прогнозирования.

Мерзлотоведение — молодая наука. И мне не хотелось бы, чтобы у читателя создалось впечатление, что все проблемы мерзлотоведения решены. Напротив, чем больше центр тяжести геологических исследований, строительства, развития разных отраслей народного хозяйства переносится в область вечной мерзлоты, тем больше научных и практических проблем и задач ставит перед нами вечно меняющаяся, динамичная и норовистая мерзлота. Поэтому мерзлотоведение играет все большую роль в решении научных и практических задач, особенно в районах Сибири и Дальнего Востока.

Самым крупным институтом — настоящим научным мерзлотным центром Сибири является Институт мерзлотоведения, находящийся в городе Якутске. Институт расположен на окраине города, в живописной местности Сергелях. Перед зданием института — скульптура-фонтан, изображающая мамонта (рис. 74). Из главного корпуса института ведет ход вниз, в мерзлотное подземелье — ла-

бораторию. Мерзлотное подземелье велико: площадь его составляет более 500 м<sup>2</sup>. Оно состоит из галерей, находящихся на трех ярусах, и отдельных исследовательских камер. В камерах нижнего яруса постоянно сохраняется естественная температура грунта, составляющая около 4 °С. При этой неизменной во времени температуре проводится широкий круг исследований, особенно длительных испытаний физико-механических, а также теплофизических свойств мерзлых пород и льда (рис. 75). В специальных помещениях мерзлотного подземелья хранятся образцы древних подземных льдов и мерзлых пород, отобранные учеными в самых отдаленных частях Якутии. Интересно, что в одной из камер подземной лаборатории хранятся контейнеры с семенами зерновых культур. Проводится многолетний эксперимент, поставленный московскими и якутскими биологами. Цель его — определение питательных свойств и всхожести зерна после длительного (до 50 лет) хранения при отрицательных температурах.

М. И. Сумгин мечтал создать музей в вечной мерзлоте, где можно было бы сохранять остатки ископаемых мамонтов, шерстистых носорогов, древних быков, лошадей и других животных, встречающихся в мерзлых наносах Центральной Якутии и арктических низменностей Колымы и Чукотки. Якутский институт мерзлотоведения с его подземельями, сохраняющими вечный холод, является местом, где такой музей ископаемых животных может быть создан.

Ученые Института мерзлотоведения Сибирского отделения АН СССР разрабатывают самый широкий круг научных, теоретических и прикладных проблем мерзлотоведения. К числу их относится изучение мерзлотных условий различных регионов Сибири. Сотрудники института проводят многочисленные наблюдения на специально оборудованных стационарных площадках, находящихся на территории института в разнообразных природных условиях. Эти наблюдения ложатся в основу расчетных методов определения температурного режима пород и разработки приемов водно-тепловой мелиорации мерзлых пород.

Геофизические методы исследования распространения и мощностей мерзлоты, геотермические изменения в глубоких скважинах для изучения тепловых потоков в мерзлых толщах пород, исследование подземных вод мерзлой зоны земной коры и воздействия морей, озер, рек на берега, сложенные льдистыми породами, изучение механических



Рис. 75. Одна из камер мерзлого подземелья в Институте мерзлотоведения, где проводятся эксперименты по изучению физико-механических свойств мерзлых пород при постоянной температуре. (Фото И. А. Некрасова.)

свойств мерзлых пород и взаимодействия зданий и сооружений с мерзлыми грунтами — вот небольшая часть вопросов, решаемая в стенах института.

В институте имеется несколько научно-исследовательских мерзлотных станций. Старейшая из них находится в Игарке на Енисее. Она была основана еще в 1935 г., и ее сотрудники занимаются решением большого числа вопро-

сов инженерного мерзлотоведения, изучением мерзлоты приближенной зоны северных морей и др. Вторая станция находится в городе Чернышевском и изучает проблему воздействия водохранилища Вилуйской ГЭС на мерзлые берега. Третья станция создана в молодом городе Нерюнгри — центре Южно-Якутского территориально-производственного комплекса. Помощь строителям и проектировщикам этого комплекса по вопросам инженерного мерзлотоведения — вот ее главная задача. Четвертая станция находится в горах Западного Тянь-Шаня, неподалеку от Алма-Аты. Изучение формирования мерзлоты в высокогорьях Памира и Тянь-Шаня — основная проблема, стоящая перед сотрудниками станции.

В Якутске, в стенах Института мерзлотоведения, регулярно проводятся всесоюзные и международные конференции, совещания и симпозиумы по мерзлотоведению. В 1973 г. здесь происходила международная конференция по мерзлотоведению, на которую собралось более 200 советских мерзлотоведов и более 100 ученых из США, Канады, Англии, Франции, Японии, Швеции, Польши, Чехословакии, Венгрии, Монголии. Конференция проходила в городе, построенном на вечной мерзлоте. Заседания проходили в прекрасных зданиях, стоящих на сваях, вмороженных в мерзлые грунты. Участники конференции прямо на месте могли познакомиться с методами строительства на мерзлоте, увидеть лаборатории, наблюдательные площадки, научные стационары, где проводятся исследования мерзлотных процессов и свойств мерзлых пород. Даже самые скептически настроенные представители капиталистических стран не могли не признать не только высокий теоретический уровень советского мерзлотоведения, но и огромные достижения в практике строительства на вечной мерзлоте и в освоении северных районов.

Институт мерзлотоведения в Якутске и его мерзлотные станции являются одними из основных научно-исследовательских организаций, где работают выпускники кафедр мерзлотоведения и гляциологии и криолитологии МГУ.

Трудно перечислить все институты и производственные организации, где работают или которым остро необходимы мерзлотоведы. Потребность в специалистах этого профиля очень высока и в настоящее время не удовлетворяется выпускниками Московского университета. Поэтому организована кафедра мерзлотоведения в Якутском университете,

в ближайшие годы планируется создание таких кафедр в Читинском политехническом институте, а также в Иркутском государственном университете. Высшая школа ожидает тех, кто заинтересуется мерзлотоведением и решит посвятить себя изучению холода нашей планеты.

Охватывая обширный круг вопросов, мерзлотоведение, как уже знает читатель, использует различные методы исследований: комплекс полевых (экспедиционных) и камеральных методов геологических, географических и геофизических наук, различные лабораторные методы. В мерзлотоведении сочетаются экспериментальные исследования с теоретическими, применяются и математические методы. Значение мерзлотоведения в развитии производительных сил нашей страны определяется интенсификацией народнохозяйственного освоения северных и восточных районов Советского Союза, лежащих в области распространения многолетней мерзлоты.



## ЧТО ЧИТАТЬ

Швецов П. Ф. Мерзлые слои земные, их распространение и значение. (Беседы на геокриологические темы). М., Изд-во АН СССР, 1963.

Томирдиаро С. В. Вечная мерзлота и освоение горных стран и низменностей. Магадан, 1972.

Крючков В. А. Чуткая Субарктика. М., Наука, 1976.

Толстихин О. Н. В краю великих наледей. Л., Гидрометеиздат, 1977.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i>	3
<i>Глава I</i>	
ЧТО ЕСТЬ МЕРЗЛОТА	7
<i>Глава II</i>	
РАССКАЗ О МЕРЗЛОТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ЯВЛЕНИЯХ	38
<i>Глава III</i>	
ПРОБЛЕМЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И НАЛЕДЕЙ	95
<i>Глава IV</i>	
КАК ВОЗНИКЛА И РАЗВИВАЛАСЬ ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА	126
<i>Глава V</i>	
О ТОМ, КАК СТРОИТЬ, ДОБЫВАТЬ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ И ОХРАНЯТЬ ПРИРОДУ В ОБЛАСТИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	145
<i>Глава VI</i>	
«ПУСТЬ МЕНЯ НАУЧАТ»	167
ЧТО ЧИТАТЬ	189

Николай Никитич Романовский

## ХОЛОД ЗЕМЛИ

---

Редактор *В. П. Голов*  
Редактор карт *Н. И. Кожикова*  
Обложка с фотографии *Л. Д. Сулержицкого*  
Художественный редактор *Е. Л. Ссорина*  
Технический редактор *Е. Кузьмина*  
Корректор *О. С. Захарова*



ИБ 4805

Сдано в набор 28.09.79. Подписано к печати 13.06.80. А 07014. 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. типограф. № 2. Гарнит. об. нов. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 10,08. Тираж 100 000 экз. Заказ 2676, Цена 30 коп.



Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство «Просвещение»  
Государственного комитета РСФСР  
по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли.  
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41

Полиграфкомбинат им. Я. Коласа Госкомиздата  
БССР 220827 Минск, Красная, 23.

**Романовский Н. Н.**

**Р69 Холод Земли: Пособие для учащихся.— М.: Просвещение, 1980.— 191 с., ил.— (Мир знаний).**

Более половины территории Советского Союза охвачено многолетней мерзлотой. Это уникальное природное явление, оказывающее воздействие на все стороны деятельности человека.

Решения XXIV и XXV съездов КПСС, направленные на освоение природных богатств Сибири и Дальнего Востока, сделали познание многолетней мерзлоты не только интересной научной, но и важнейшей практической задачей, имеющей огромное народно-хозяйственное значение.

В книге в доступной и популярной форме рассказывается о процессах и явлениях, протекающих в мерзлых грунтах, о влиянии мерзлоты на природу и хозяйственную деятельность человека. Но книга имеет не только познавательный интерес. Она будет способствовать профессиональной ориентации молодежи, привлечению ее внимания к замечательной профессии мерзлотоведа,

Р 60601—567  
103(03)—80 289—80 4306030000

ББК 26.3  
552

30 к.

