

Н. А. ЦЫТОВИЧ,
С. П. КАЧУРИН,
Л. А. МЕЙСТЕР

МЕРЗЛЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ


ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЗНАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ и ГЕОГРАФИЯ

1961
СЕРИЯ XII

14

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Н. А. ЦЫТОВИЧ, С. П. КАЧУРИН и Л. А. МЕЙСТЕР

МЕРЗЛЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

(их роль в природе и жизни человека)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1961

Брошюра знакомит читателя с условиями образования многолетне-мерзлых горных пород, их залеганием в земной коре, а также со свойствами этих пород.

Авторы рассказывают о распространении многолетнемерзлых горных пород, занимающих около половины территории СССР и почти 25% суши земного шара, о специфических природных явлениях и процессах, обусловленных промерзанием земной коры, о затруднениях при хозяйственном освоении территорий с мерзлыми породами и о других вопросах, связанных с промерзанием горных пород.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Основные положения. Понятия и определения	4
Некоторые сведения из истории исследований области мерзлых горных пород	6
Основные сведения о мерзлых горных породах и природных особенностях области их распространения	9
Некоторые методы освоения области распространения мерзлых горных пород	22
Изменения свойств грунтов при промерзании и протаивании	23
Методы освоения территорий с мерзлыми и многолетнемерзлыми породами	27
Литература	32

Николай Александрович Цытович,
Сергей Петрович Качурин,
Леонид Антонович Мейстер

Редактор Н. П. Смирнова
Техн. редактор И. Т. Ракитин
Корректор Н. М. Краснопольская

Обложка художника Б. В. Макарова

Сдано в набор 27/V 1961 г. Подписано к печати 18/VII 1961 г. Изд. № 184.
Формат бум. 60×92¹/₁₆. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,98.
А01344 Цена 6 коп. Тираж 15 000 экз. Заказ 2101.

Типография изд-ва «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ВВЕДЕНИЕ

Почти на половине территории нашей страны распространены многолетнемерзлые горные породы. В результате длительного охлаждения земной коры рыхлые песчаные и глинистые, а также трещиноватые коренные горные породы, содержащие воду в порах и трещинах, промерзли в глубину на десятки и сотни метров и превратились в крепко сцементированные льдом массивы, не оттаивающие в течение многих веков и тысячелетий. Промерзание или протаивание горных пород вызывает многие специфические процессы и явления, значительно осложняющие проведение хозяйственных мероприятий. История освоения области многолетнемерзлых горных пород насчитывает много примеров разрушения или опасных деформаций различных сооружений — промышленных и жилых зданий, наземных и подземных коммуникаций, транспортных сооружений, вызываемых промерзанием или протаиванием горных пород. Всем известно, насколько трудоемка разработка мерзлых пород.

В настоящее время ни одно сколько-нибудь значимое практическое решение в области строительства, поисков и разведки полезных ископаемых, горного производства, водоснабжения, сельского хозяйства в районах с многолетнемерзлыми горными породами не может быть правильно осуществлено без учета сложных природных особенностей этих районов.

Широкое развитие на севере, востоке и северо-востоке страны промышленности, сельского хозяйства и связанное с этим развитием заселение районов хозяйственного освоения уже требует и потребует в дальнейшем не только умения использовать свойства мерзлых грунтов и бороться с их вредным влиянием, но, что более важно, и умения изменять эти свойства в желаемом направлении.

Эти задачи науки и практики относятся не только к области распространения многолетнемерзлых горных пород. Исследование процессов промерзания и протаивания почв и грунтов и направленное регулирование этих процессов не менее важное значение имеет и в районах, где происходит только сезонное промерзание почв и грунтов, например в средней и южной частях территории европейской части СССР, южной

Сибири и других местах. Прокладка подземных коммуникаций, повышение плодородия почв в засушливых районах и другие хозяйственные задачи требуют изучения и умения регулировать тепловые процессы, промерзание и протаивание почв и грунтов.

Под влиянием настойчивых требований практики народно-хозяйственного освоения северных и восточных районов нашей страны около 30 лет назад начала формироваться и развиваться новая отрасль знаний — мерзловедение как наука о «вечной мерзлоте и мерзлых грунтах», которая в последние годы развилась в науку геокриологию.

В задачу геокриологии входит изучение закономерностей формирования, развития и распространения зон сезоннопромерзающих почв и многолетнемерзлых пород, особенностей состава, строения промерзающих, мерзлых и протаивающих почв и горных пород и их физико-механических свойств, а также физико-геологических, геоморфологических и гидрогеологических явлений, связанных с промерзанием и протаиванием земной коры. Важнейшей задачей геокриологии является изучение тепловых, физико-химических и механических процессов, протекающих в промерзающих, мерзлых и протаивающих почвах и горных породах, разработка теоретических основ и приемов управления этими процессами в интересах строительства и эксплуатации сооружений, горных работ, сельскохозяйственного освоения и других задач.

Геокриология зародилась и получила развитие в нашей стране. В Советском Союзе геокриологическими исследованиями в основном занимаются Институт мерзловедения имени В. А. Обручева с его отделением в г. Воркуте и стационаром в Московской области, Институт мерзловедения в составе Сибирского отделения АН СССР в Якутске с научно-исследовательскими мерзлотными станциями в Игарке, Анадыре и Алданском районе на юге Якутской АССР; научно-исследовательские работы проводятся Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова и некоторыми отраслевыми научно-исследовательскими учреждениями.

Молодость науки, большое разнообразие задач, которые практика ставит перед ней, а главное сложность объекта изучения и связанных с ним процессов определяют значительные трудности в развитии исследований; некоторые важные и первоочередные проблемы еще только начинают разрабатываться.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Прежде чем перейти к изложению сведений о мерзлых горных породах и их значении в жизни и деятельности человека, следует дать определение основных понятий.

Определим прежде всего понятие «мерзлый» применительно к почвам, грунтам, горным породам. Мерзлыми называются почвы, грунты, горные породы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть содержащейся в них воды замерзла, т. е. превратилась в лед, цементирующий их частицы. Именно цементация льдом частиц почв или горных пород придает последним новое качество, новые свойства, имеющие важное практическое значение.

Горные породы, грунты, которые находятся непрерывно в мерзлом состоянии продолжительное время — от нескольких лет до многих тысячелетий, называются многолетнемерзлыми¹.

Многолетнемерзлые горные породы залегают на некоторой глубине от поверхности почвы и обычно сравнительно легко отлущиваются от окружающих их немерзлых пород.

Мерзлые слои земной коры представляют собой составную часть особой земной оболочки — криосферы, характеризующей отрицательной температурой, т. е. наличием или возможностью существования льда.

Расстояние между нижней и верхней поверхностями слоя мерзлых пород называется его мощностью. Толща мерзлых горных пород, как в плане, так и в вертикальном разрезе, может быть непрерывной или прерывистой; в последнем случае мерзлые породы чередуются с немерзлыми.

Над многолетнемерзлыми горными породами у самой поверхности земли находится слой почвы и подпочвы, промерзающий и протаивающий ежегодно. Такой слой почвы и подпочвы называют сезонноталым или сезонномерзлым в зависимости от того, происходит соединение промерзающей зимой почвы с залегающими ниже многолетнемерзлыми породами или не происходит; в первом случае глубина протаивания почвы определяется летним теплоприходом, а во втором глубина ее промерзания — зимними теплотерями. Это различие имеет существенное значение, так как физические и физико-химические процессы в почвах и горных породах, обусловленные их промерзанием и протаиванием, в том и дру-

¹ Некоторые исследователи считают основным признаком мерзлых почв и горных пород только их отрицательную температуру, независимо от того, имеется в породах цементирующий их частицы лед или нет. В этом случае почвы и горные породы, не содержащие льда, ничем практически не будут отличаться от немерзлых.

До сих пор нередко применяются термины «мерзлота», «вечная мерзлота», которые разными лицами понимаются по-разному: как мерзлое состояние породы, сама мерзлая порода, ее отрицательная температура, процесс или явление промерзания, особый случай воднотеплового режима грунтов и т. п. В силу неопределенности своего значения эти термины являются ненаучными и постепенно исчезают из научной литературы.

Кроме того, «мерзлота», как особое состояние горных пород, совсем не вечная и, хотя может быть очень длительной, все же имеет свое начало и конец.

гом случае часто протекают по-разному. Разумеется, что в области, где многолетнемерзлых пород нет, имеет смысл говорить только о сезонномерзлом слое почвы.

Не так давно еще считалось, что мерзлые породы представляют собой нечто застывшее, неподвижное. Однако научные исследования показали, что эти породы представляют собой сложные природные тела, в которых протекают различные физико-химические процессы, а границы их изменчивы.

Промерзание и протаивание земной коры сопровождается специфическими физико-геологическими или так называемыми криогенными процессами или явлениями, такими, например, как пучение грунтов при промерзании, термокарст, наледи, солифлюкция и др. О них будет сказано в соответствующих разделах брошюры.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЛАСТИ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Несколько веков назад наши соотечественники знали о том, что в ряде мест Восточной Сибири на некоторой глубине от земной поверхности промерзшие горные породы в теплое время года не оттаивают. В 1642 году якутские воеводы сообщали московскому царю: «Хлеба-де в Якутском не чаять, земля-де, государь, и среди лета вся не растаивает». В конце XVII века ленский воевода М. Кровков сообщал в Москву: «А колодезя, великие государи, в Якутском сделать никакими мерами нельзя, потому что земля летом только тает в полтора аршина, и больше двух аршин земли никогда не тает, а в исподи на дне бывает земля всегда мерзла». Из документов, относящихся к концу XVI века, известно, что уже тогда русские пытались дать научное объяснение причинам промерзания горных пород.

Интерес к природе этих далеких окраин царской России заметно повысился в конце XVII — начале XVIII века в связи с развитием там торгового капитала. Сведения о мерзлой подпочве в Сибири появляются в научной литературе в первой половине XVIII века.

Эти сведения дали возможность великому русскому ученому М. В. Ломоносову составить первые обоснованные представления о зависимости промерзания земной коры от географической широты и высоты местности и о значении внутреннего тепла Земли в этом процессе.

Однако некоторые ученые Западной Европы еще и в XIX веке не верили в возможность существования непрерывно мерзлой земли в Сибири.

Большое значение в изучении мерзлых горных пород имела в то время проходка колодца на воду в Якутске (в 1828—1836 гг.) на глубину 116,4 м (получившего название шахты

Шергина), но так и не пройденного на всю мощность мерзлой толщи.

Российская Академия наук поручила академику А. Ф. Мидендорфу провести в Сибири исследования мерзлых пород, результаты которых явились убедительным доказательством существования многолетнемерзлых горных пород, и закрепили приоритет русских людей как в открытии, так и в изучении этого своеобразного природного явления и области его распространения.

Проникновение в 60-х годах прошлого столетия в Сибирь промышленного капитала усилило поиски, разведку и эксплуатацию месторождений золота и других цветных металлов, вызвало строительство железных дорог, переселение в Сибирь и на Дальний Восток многих жителей европейской части России. Развитие в этих районах горнодобывающей промышленности, транспортного и гражданского строительства, сельского хозяйства неизбежно сталкивало людей с большими трудностями, вызванными наличием мерзлых пород, — чрезвычайной трудоемкостью их разработки, деформациями (а иногда и разрушением) зданий и сооружений при промерзании или протаивании горных пород, трудностями водоснабжения, низким плодородием холодных почв и т. д.

Поэтому приходилось все больше уделять внимания изучению основных свойств, состава, условий залегания и распространения мерзлых горных пород, промерзания и протаивания почв и горных пород, условий и приемов обеспечения устойчивости промышленных, гражданских и транспортных сооружений и другим важным вопросам. Русские горные инженеры, строители, геологи, климатологи и другие специалисты много сделали для познания многолетнемерзлых горных пород и их значения для хозяйственного развития. Но все же научные исследования развивались медленно, непланомерно, от случая к случаю и зависели преимущественно от личной инициативы и патристического отношения к делу специалистов-одиночек.

Систематическое и наиболее быстрое развитие научных исследований мерзлых горных пород началось после Великой Октябрьской социалистической революции, особенно в связи с индустриализацией страны и хозяйственным освоением восточных и северных районов. Важное значение для роста исследовательских работ имело освоение Северного морского пути.

В 1927 году был опубликован капитальный труд М. И. Сумгина «Вечная мерзлота почвы в пределах СССР», а через 10 лет крупная работа Н. А. Цытовича и М. И. Сумгина «Основания механики мерзлых грунтов». В этих книгах впервые были обобщены знания о мерзлых горных породах, результаты исследований их физических, физико-механических

свойств, взаимодействия с сооружениями, процессов промерзания горных пород и связанных с ними явлений, а также изложены основы расчета и конструирования фундаментов сооружений на мерзлых грунтах. С выходом в свет этих работ началось становление геокриологии (мерзловедения) как науки. С тех пор геокриология далеко шагнула вперед.

За истекшие 30 лет значительно уточнились наши знания о распространении мерзлых пород, о размерах занимаемой ими территории и ее границах; неисследованных площадей («белых пятен») стало меньше. Это дало возможность составить более точные карты с указанием главнейших характеристик мерзлых пород и учетом их состава, мощности, льдистости, температуры, залегания, глубин сезонного промерзания и протаивания грунтов.

Изменились представления об условиях промерзания земной коры и формировании толщ многолетнемерзлых пород. Прежде считалось, что «вечная мерзлота» — продукт климата и существует она неизменно многие тысячелетия («вечно»). Исследования показали, что промерзание верхних слоев земной коры происходит и в современную эпоху при определенных условиях теплового взаимодействия этих слоев с почвой и атмосферой. В числе этих условий в таких процессах исключительное значение имеют состав пород, подземные воды, снежный покров, растительность и другие. В зависимости от состава и интенсивности промерзания пород формируется различное их строение, выражающееся в формах, количестве и характере распределения в них льда. Во многих местах в горных породах образовались огромные ледяные жилы, достигающие в глубину нескольких десятков метров.

Особое значение приобретало изучение взаимодействия сооружений различного назначения с промерзающими, мерзлыми и протаивающими породами и производства в них горных работ. Пучение грунтов при промерзании и осадка льдистых грунтов при протаивании явились и являются еще причиной многочисленных, часто серьезных деформаций сооружений, а в ряде случаев и разрушения их. В итоге длительных исследований и наблюдений за состоянием сооружений определились три способа обеспечения их устойчивости в зависимости от конструкции сооружений, их теплового влияния на основания и качества оснований: предохранение грунтов основания от протаивания, конструктивное приспособление фундаментов к осадкам протаивающих грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений и предпостроечное улучшение оснований. Наиболее широкое распространение получил первый способ как самый простой и выгодный, но применение его иногда затруднительно. Разработаны в первом приближении методы расчета глубины промерзания и протаивания грунтов, предложены расчетные формулы.

Физико-механические свойства мерзлых грунтов зависят от их состава, строения, температуры, влажности (льдистости). Длительные исследования этих свойств позволили уточнить нормативные расчетные данные для проектирования сооружений на таких грунтах и сократить расходы на их строительство.

Важнейшей задачей геохронологических исследований является научное обоснование приемов и методов управления процессами промерзания, протаивания и упрочнения мерзлых грунтов в практических целях. Система таких мер называется тепловой или воднотепловой мелиорацией.

Необходимость повышения эффективности разработки мерзлых россыпных месторождений полезных ископаемых потребовала изыскания более дешевых способов протаивания россыпей путем использования солнечного тепла и воды как теплоносителя. В итоге теоретических исследований и опытных работ в производственных условиях определилось несколько способов воднотепловой мелиорации применительно к разному составу пород и рельефу местности. Установлено также, что применение воднотепловой мелиорации в южных засушливых районах, например в Сталинградской области, может заметно повысить плодородие почв.

Тепловая мелиорация применяется и тогда, когда необходимо повысить устойчивость наземных сооружений или горных выработок, основанием или вмещающей средой которых являются мерзлые горные породы. В этих случаях применяется искусственное дополнительное охлаждение этих пород (морозным воздухом или другими средствами) и тем самым повышается их прочность.

Здесь перечислены исследования лишь в некоторых важных областях науки. Дополнительно о них будет сказано при последующем рассмотрении специальных вопросов.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ПРИРОДНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ОБЛАСТИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Природные условия территории с многолетнемерзлыми горными породами отличаются большим своеобразием. Под влиянием промерзания или протаивания земной коры, а также под воздействием залегающих на различной глубине мерзлых пород, по-иному формируются и развиваются почвы и растительность, рельеф, климат, условия существования животного мира, создается определенный режим поверхностных и подземных вод.

Климатические условия рассматриваемой области разнообразны — морской климат побережий северных и восточных морей в направлении к центральным районам постепенно пе-

реходит в континентальный. В общем же эта область отличается суровым климатом и характерной чертой для нее является отрицательная среднегодовая температура воздуха, обычно в среднем ниже -3° . Наибольшей континентальностью и суровостью климата, как известно, отличаются районы центральной Якутии, в частности районы Оймякона и Верхоянска, для которых характерны очень холодная зима и жаркое, сухое лето. В горных районах Восточной Сибири зимой температура воздуха понижается до -70° , массы холодного воздуха застаиваются в понижениях рельефа, усиливая охлаждение почвы.

Мерзлые породы являются как бы холодным экраном; находясь вблизи от поверхности, они угнетающе действуют на растительность и другие живые организмы. В холодных почвах затрудняется усваивание питательных веществ корнями растений, вследствие чего замедляется развитие растительности, стволы деревьев часто бывают искривлены, корневая система располагается у самой поверхности почвы. Еще в первой четверти XIX столетия мичман Ф. Ф. Матюшкин (участник экспедиции Ф. П. Врангеля, лицейский товарищ А. С. Пушкина) сообщал: «...от Якутска до самого Нижне-Колымска и далее корень лиственницы стелется всегда по земле и почти совершенно снаружи, и это на всех почвах земли». В нижнем течении реки Колымы она растет «почти на одном мхе, потому что и посреди лета в лесах под мхом чистый лед».

В этих районах распространены главным образом лиственница, кедр, карликовая береза, болотные виды кустарников и трав. Часто по составу и внешнему виду растительного покрова можно судить о составе и качестве почв и насколько близко от поверхности находится мерзлая подпочва.

Мерзлая подпочва, практически водонепроницаемая, препятствует просачиванию поверхностных и почвенных вод, в связи с чем происходит заболачивание, развивается торфяно-моховой покров. Область мерзлых горных пород отличается заболоченностью больших площадей. Много тепла расходуется на испарение влаги, пропитавшей торфяно-моховой покров, вследствие чего он медленно протаивает, а зимой, смерзаясь в плотный монолит, наоборот, быстрее теряет тепло и глубже промерзает. В связи с этим происходит охлаждение приземного слоя воздуха, оказывающее влияние как на климатические условия района, так и на тепловой режим горных пород.

Горные породы по длительности их мерзлого состояния принято разделять на несколько типов: кратковременно и несистематически промерзающие — от нескольких часов до нескольких суток, сезонномерзлые — находящиеся в мерзлом состоянии весь зимний сезон года и многолетнемерзлые — непротаивающие на протяжении многих лет. Промежуточным

типом являются перелетки мерзлых горных пород, которые подобно перелеткам снега сохраняются более одного года, а затем в последующий, более теплый сезон полностью протаивают.

Географическое распространение разных типов мерзлых горных пород на земном шаре показано на схематической карте (рис. 1).

На карте видно, что на преобладающей части суши распространены сезонно- и многолетнемерзлые породы; они имеются на всех материках, не исключая Австралии, но более всего распространены на материках северного полушария.

В пределах СССР сезонное промерзание и протаивание почв и горных пород распространяется почти на всей территории, за исключением лишь незначительных участков на самом юге страны, на берегах Черного и Каспийского морей.

Многолетнемерзлые горные породы с включенными в них подземными льдами занимают около 25% всей площади суши земного шара. В пределах СССР площадь с многолетнемерзлыми породами превышает 10 млн. км², что составляет почти 49% территории страны, и примерно равно площади всей Европы.

Южная граница области распространения многолетнемерзлых горных пород в СССР, проходит, начиная от Кольского полуострова, на северо-западе европейской части СССР, далее вдоль границы тундры и лесотундры, пересекая Уральские горы у Полярного круга; затем в Западной Сибири граница идет вдоль среднего течения рек Оби и Енисея, после чего вблизи устья Ангары круто поворачивает к югу, огибает горные массивы Алтая и Саян, и далее прослеживается уже за пределами Сибири, в Монголии. На востоке граница многолетнемерзлых пород устанавливается в бассейне Амура; затем она резко меняет свое направление на северо-восточное и идет вдоль низовий Амура до берегов Охотского моря; далее, обогнув южную оконечность Камчатского полуострова, граница уже продолжается на материке Северной Америки.

Отдельные крупные острова многолетнемерзлых горных пород имеются вне границ описанной области как на равнине Западной Сибири, так и в горах Сихотэ-Алиня, Тянь-Шаня, Памира, Кавказа, Урала.

Южная граница области многолетнемерзлых горных пород только условно показывается линией на картах мелкого масштаба. Между зоной сезоннопромерзающих почв и областью многолетнемерзлых пород расположена переходная зона, представленная островами многолетнемерзлых пород среди немерзлых; ширина этой переходной зоны достигает местами сотен километров.

Мощность многолетнемерзлых горных пород в различных частях области их распространения различна. Она зависит

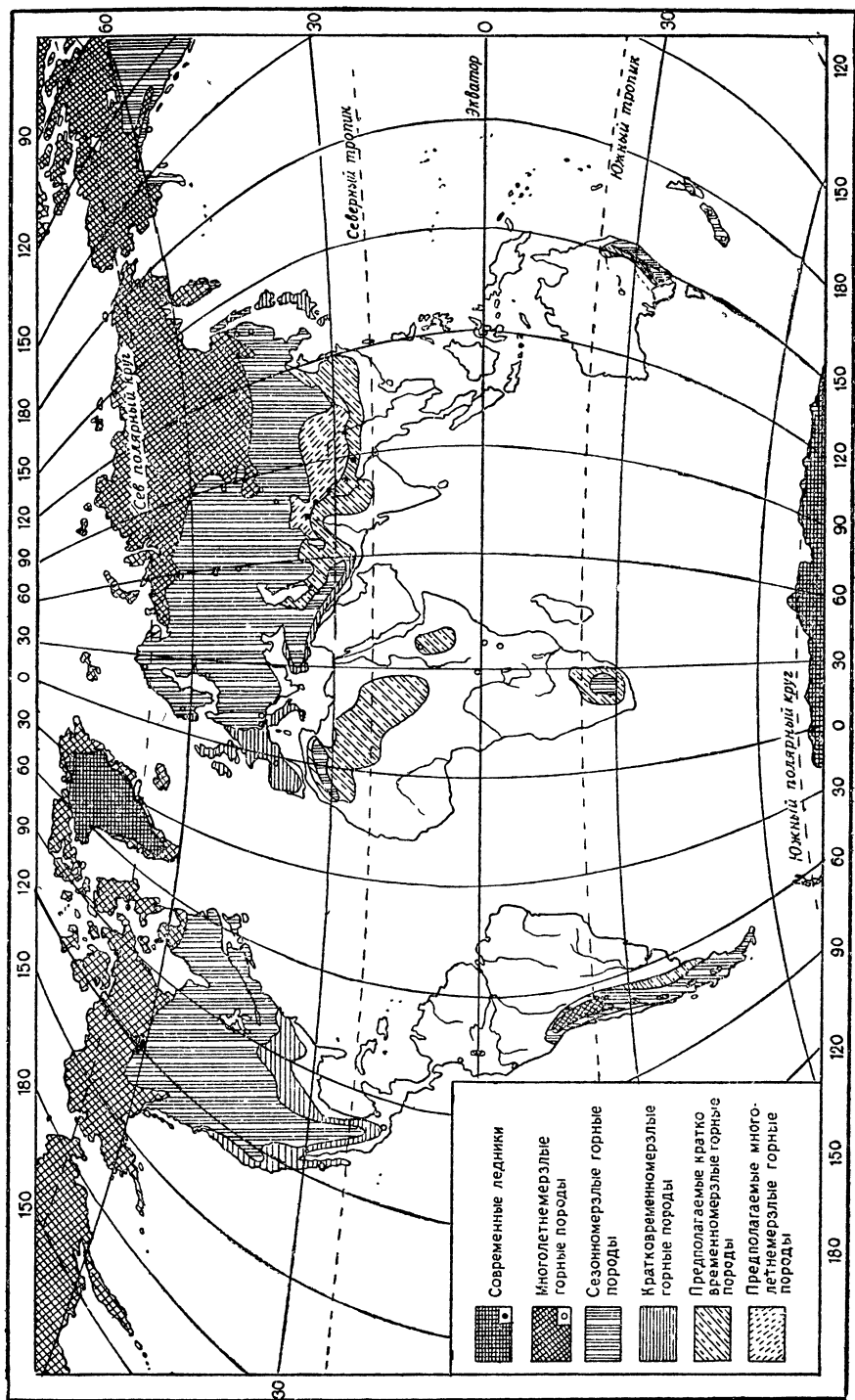


Рис. 1. Схематическая карта географического распространения разных типов мерзлых горных пород на земном шаре.

от широты и долготы местности, рельефа, состава и строения горных пород и других условий.

Мощность толщ мерзлых горных пород увеличивается с юга на север, от нескольких метров на юге до многих сотен метров в северных районах.

На севере Якутии мощность многолетнемерзлых пород свыше 500 м; в среднем течении Вилюя она достигает 575 м, в Якутске, расположенном в долине Лены, около 210 м. К востоку и западу мощность мерзлых горных пород уменьшается.

Большое различие в мощности мерзлых пород наблюдается в горах и межгорных впадинах.

Мерзлую толщу земной коры можно разделить на три вертикальные последовательно сменяющиеся горизонта. Верхний горизонт, мощность которого в зависимости от разных природных условий составляет от нескольких сантиметров до нескольких метров, представляет собой слой сезонного промерзания и протаивания почв и горных пород.

Средний горизонт составляют непрерывно-мерзлые в течение всего года породы; в этом слое происходят сезонные колебания температуры в пределах их отрицательных значений; толщина слоя от 3—4 до 25—30 м.

Нижний горизонт многолетнемерзлых горных пород характеризуется неизменной в году отрицательной температурой; изменения температуры происходят лишь под влиянием вековых колебаний климата. Ниже этого слоя залегают немерзлые породы с постоянной положительной температурой. Ранее отмечалось, что толща мерзлых пород прерывиста; даже в самых северных районах она часто пронизана участками немерзлых пород как под руслами крупных рек, так и в местах тектонических нарушений, где по трещинам на поверхность выходят подземные воды, иногда термальные. В южных районах сплошность толщ мерзлых пород прерывается под озера-

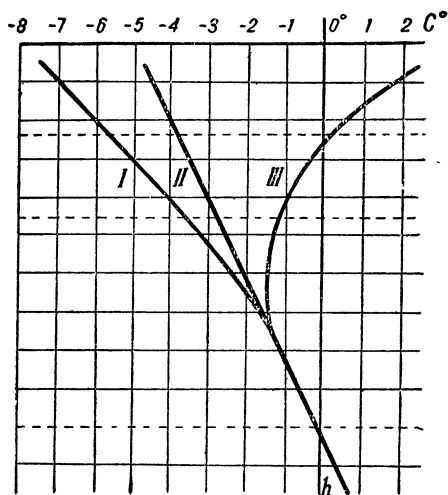


Рис. 2. Графики типичных изменений средних годовых температур мерзлых горных пород по глубине:

I — при продолжающемся охлаждении горных пород; *II* — при относительно устойчивой температуре; *III* — при потеплении пород.

ми, в долинах рек, на участках с мощным снежным покровом. Таким образом, талики разделяют толщу мерзлых пород на отдельные массивы, размеры которых наименьшие в южных районах, и постепенно увеличиваются по направлению к северу. Наиболее сложное залегание мерзлых и немерзлых пород наблюдается в горных районах.

Термические условия почв и горных пород выражаются температурой, которая является как бы результирующим показателем влияния всех процессов на тепловой режим горных пород.

Средняя годовая температура почвы всегда на несколько градусов выше средней годовой температуры воздуха. Наиболее низкая средняя годовая температура многолетнемерзлых горных пород зафиксирована на севере Таймырского полуострова, где на глубине 10—15 м она равна -13° , -15° , и в районе Оймякона около $10-12^{\circ}$ ниже нуля. В районе Якутска температура грунтов на глубине 10—12 м около -4° , в Чите около -2° , в Салехарде, в долине Оби, около -1° , а вдоль южной границы области — около 0° .

Для сравнения можно указать, что в районе Москвы температура горных пород на той же глубине около $+7^{\circ}$.

О современном направлении изменения термического режима мерзлых толщ может дать представление график (рис. 2) трех типов кривых температуры мерзлых горных пород: *I* кривая продолжающегося охлаждения мерзлых пород; она свойственна преимущественно северным районам; *II* — кривая относительно устойчивого температурного режима мерзлой толщи, соответствующая современным природным условиям; она наиболее типична для центральных районов области мерзлых пород; *III* — кривая повышающейся температуры пород под влиянием современных климатических условий; она отражает деградационное направление развития мерзлой толщи горных пород, их потепление. Такое состояние наиболее типично для южной пограничной зоны области многолетнемерзлых горных пород.

Термический режим прерывистой (слоистой) толщи мерзлых пород выражается графиком, на котором кривая температуры имеет несколько переходов через 0° ; число этих переходов соответствует количеству мерзлых и немерзлых слоев.

Наличие льда является главной характерной особенностью толщи мерзлых горных пород. Лед представляет собой составную часть этих пород, определяет их специфические свойства, структуру, особенности состава и строения.

Подземный лед имеет несколько разновидностей: 1) конституционный, происходящий от замерзания содержащейся в породах воды, и представляет обычно небольшие линзы, прослойки, прожилки; льды этого типа более всего распространены в мерзлых толщах и составляют наибольшую массу

в породах; 2) пещерножильный, образующийся в пустотах и трещинах горных пород; линзы льда этого типа по объему отдельных тел наиболее крупные, но по общей массе в породах уступают первому типу льдов; распространен локально и не везде; 3) погребенный лед, образовавшийся из наземного льда и снега в результате последующего перекрытия толщей наносов, например льды промерзших водоемов, ледников, наледей и т. п. Льды этого типа менее распространены. Каждый из названных типов льдов имеет несколько разновидностей

В первом типе подземных льдов большое распространение имеют такие разновидности, как лед-цемент и сегрегационный лед, образующиеся при отделении воды от минеральных масс в процессе их промерзания; лед-цемент облекает собой частицы минеральных пород, а сегрегационный выделяется в линзочки и жилки.

Во втором типе большое значение имеет жильный лед, в особенности его разновидность — повторножильный лед, образующийся в результате многократного замерзания воды в морозобойных трещинах на одних и тех же местах, идущих с поверхности в глубь толщи пород. Характерной особенностью повторножильных льдов является расположение их в плане и по глубине в виде объемной решетки из клиновидных жил, острием направленных вниз. Они отличаются близкой к вертикальной слоистостью или полосчатостью, создающейся при накоплении льда и примесей на одних и тех же местах в течение многих (даже сотен) лет.

Повторножильные льды широко распространены и часто имеют большую мощность. Нередко они обнажаются на склонах берегов рек на высоту 40 и более метров и составляют по объему свыше 50% массы вмещающих их горных пород (рис. 3).

Льды третьего типа, т. е. погребенные, залегают в мерзлых породах лишь местами, локально, большие массы их образуются редко. Долгое время господствовало мнение, что именно льды этой группы, т. е. погребенные, — отторженцы древних ледников и являются самыми мощными и самыми распространенными. Это ошибочное мнение ныне отвергнуто; доказано, что подобные льды — повторножильного происхождения.

Географическое распространение разных категорий подземных льдов различно; в некоторых отношениях в распределении их намечается зональность.

В холодном поясе, расположенном преимущественно к северу от Полярного круга, в тундрах, а на востоке страны и несколько южнее, широко распространены как льды конституционные (образующиеся за счет замерзания находящейся в порах породы влаги), так и повторножильные; последние в виде разновидностей древних и современных. Они развиты

в пределах обширных низменных равнин Западной Сибири, Таймыра, Яно-Колымской и Лено-Вилуйской. Погребенные льды имеют лишь локальное распространение.

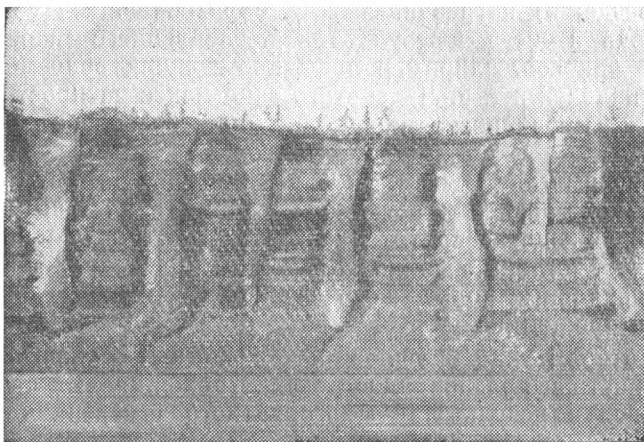


Рис. 3. Обнажение берега реки с мощными жилами подземного льда, чередующимися со слоистыми мерзлыми осадочными породами.

В умеренном поясе, к югу от Полярного круга, в азиатской части Союза, в условиях тайги, в меньшей степени распространены повторножильные льды, преимущественно древнего происхождения, тогда как современные не формируются. Встречаются они преимущественно на низменных и равнинных участках.

Вдоль южной окраины области распространения многолетнемерзлых пород подземные льды названных типов встречаются редко. На местах прежнего залегания льдов здесь часто отмечаются земляные жилы и даже пустоты в рыхлых породах, представляющие собой следы от вытаявших льдов. Такие следы отмечаются и за пределами области с многолетнемерзлыми породами, что свидетельствует о более широком распространении прежде мерзлых пород.

Важнейшую роль в развитии криогенных явлений играют многократная смена промерзания и протаивания (режелация), морозное растрескивание почв и горных пород, передвижение (миграция) влаги и переувлажненных грунтов при промерзании и протаивании, кристаллизация воды, образование ледяных прослоек, линз, жил и т. п. Все эти процессы сопровождаются, как правило, изменениями структуры горных пород, изменениями их физико-механических свойств, возникновением характерных специфических форм рельефа.

Самым распространенным криогенным явлением можно считать пучение горных пород, которое выражается в различных формах: бугры-пучения (мелкобугристые и крупнобугристые образования на торфяниках), бугры-гидролакколиты (по аналогии с лакколитами минеральных пород), бугры-булгунняхи (в Якутии), бугры — пинго (в Северной Америке) и другие.

Пучение при промерзании развивается во всех наполненных влагой рыхлых горных породах и в особенности на тех участках, куда поступает вода со стороны. При этом увеличивается объем промерзших масс как за счет расширения имевшейся влаги при переходе ее в лед, так и за счет промерзания дополнительно поступающей (передвигающейся) воды снизу и сбоков.

На обширных площадях в районах Крайнего Севера и в горах распространены криогенные образования, называемые полигональными за их внешний вид в форме полигонов иногда правильной четырех-, пятиугольной или округлой формы, но чаще неправильных линейных очертаний. Все многообразные виды полигональных образований относятся к трем главным типам; некоторые из них могут развиваться и вне области многолетнемерзлых пород: 1) каменные многоугольники, состоящие из осколков скальных пород, земляные пятна среди сплошного растительного покрова или среди каменных россыпей, кольца, сети, у которых мелкоземистые массы окружены бордюрами из каменных осколков или растительной дерниной и т. п.; 2) трещинные полигоны, в их числе плоские, выпуклые и вогнутые; 3) полигонально-валиковые или тетрагональные (четырёхугольные) образования, которые разделяются между собой двумя рядами валиков и прямолинейными трещинами, идущими вдоль границ полигонов; под трещинами-ложбинами на некоторой глубине находится жильный лед (рис. 4).

Если первые два типа форм рельефа характеризуются преимущественно небольшими размерами — от долей метра до 2—3 м и несколько больше, то третий тип, т. е. полигонально-валиковый, — сравнительно крупными образованиями, достигающими десятка и даже нескольких десятков метров в поперечнике. Последний тип форм отличается в то же время и более сложным строением профиля (в разрезе) по сравнению с двумя первыми.

В основе развития всех перечисленных типов полигональных образований заключены процессы, происходящие при промерзании и протаивании почв, начиная с морозных трещин, миграции воды внутри промерзающих слоев и кончая очень характерным явлением «вымораживания» (выпучивания) крупных каменных осколков из промерзающих и протаивающих сильно увлажненных мелкозернистых горных пород.

Под влиянием «вымораживания» каменные осколки постепенно выдвигаются на поверхность, а затем другими процессами сдвигаются по наклону в ближайшие понижения. На склонах горного рельефа полигональные образования приобретают вытянутые формы, часто в виде параллельных полос.

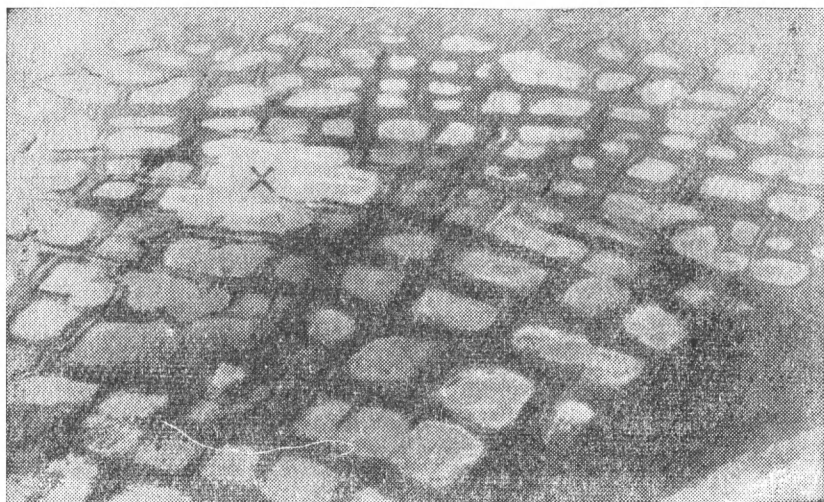


Рис. 4. Начальная стадия развития термокарстового озера (х) на участке полигонально-валикового рельефа с мощными подземными жильными льдами; белые пятна — озера.

Специфическое явление в области распространения многолетнемерзлых горных пород представляет термокарст. Термокарст, или термический карст, — это природное явление, развивающееся при вытаивании подземного льда под влиянием изменений термического режима в слоях горных пород, приводящих к образованию просадок и провалов на поверхности земли, часто заполненных водой.

Развитие термокарста происходит там, где большие массы подземных льдов располагаются вблизи поверхности земли. Термокарст образуется при вытаивании всех видов льдов, но чаще всего при таянии повторножильных льдов.

Для термокарста, как и для многих других явлений природы, характерна зональность. Намечаются три термокарстовые зоны: южная, северная и промежуточная между ними. В южной зоне термокарст развивается преимущественно под влиянием изменений климатических условий, приводящих к протаиванию (деградации) толщ мерзлых горных пород и к образованию просадок и провалов. В северной зоне термокарст развивается вне зависимости от изменений климатичес-

ких условий, которые там достаточно суровы и не приводят к общей деградации мерзлых горных пород; главное значение там имеют местные изменения термического режима почв и горных пород и в особенности на участках с застойными поверхностными водами, в которых, как известно, аккумулируется больше тепла от солнечной радиации, чем в горных породах; в результате вытаивания льда образуются просадочные формы. Третья зона, промежуточная, находится в средней части области многолетнемерзлых горных пород; в ней развитие термокарста находится под совместным влиянием условий, характерных как для южной, так и для северной зоны.

Термокарст во многих районах занимает до 30% площади и более. От него часто страдают различные инженерные сооружения, поэтому при хозяйственном освоении новых территорий необходимо производить специальные исследования в целях выяснения условий развития этого явления.

Своеобразные образования на мерзлых породах развиваются в горных районах и на склонах пересеченного рельефа под влиянием процесса солифлюкции. Солифлюкция означает течение почвы. В условиях Севера течение почв и грунтов происходит в период протаивания грунтов с большим содержанием льда. Из-за неравномерности таяния и по другим причинам в разных частях склонов возникают характерные формы рельефа солифлюкционного происхождения; к ним относятся валики, гряды, натечные ступени и различные террасовидные образования на наклонных поверхностях под названиями нагорных и солифлюкционных террас, только внешне напоминающих речные или озерные террасы. Под влиянием солифлюкции создаются своеобразные скопления из выветрившихся горных пород, получившие наименование солифлюксий. Солифлюксий по виду напоминает ледниковую морену. Это нередко вводит в заблуждение исследователей.

Солифлюкционные образования развиваются в горах, вне зоны распространения многолетнемерзлых горных пород, но при глубоком сезонном промерзании почв. Более же типичны они на Крайнем Севере, в районах с близким залеганием к поверхности многолетнемерзлых горных пород.

К числу специфических криогенных образований относятся и наледи — намерзание льда на поверхности земли или на льду рек. В первом случае образуются так называемые грунтовые или наземные наледи, во втором — речные; возможны наледи смешанного происхождения. Наледи развиваются зимой в местах сужения сечения потока или под влиянием промерзания подруслового слоя, а также у выходов источников подземных вод. Размеры наледей варьируют в больших пределах, от нескольких метров до многих десятков и сотен метров в длину и ширину. Самые крупные наледи в Якутии,

называемые тарынами, достигают по площади многих десятков квадратных километров.

В районах распространения мерзлых горных пород, как и вне этих районов, широко развиты различные образования эрозионного происхождения под воздействием текущих вод. Особенно часто это наблюдается при вытаивании подземных льдов. При этом образуются ниши, карнизы, пещеры, внутри-грунтовые каналы и другие формы.

Известны и другие явления, связанные с промерзанием и протаиванием почв и горных пород, например термообразия или разрушение мерзлых берегов водоемов, и другие; многие из них еще недостаточно изучены или они имеют небольшое значение для развития ландшафта страны.

Толща многолетнемерзлых горных пород, сезонное промерзание и протаивание почв и грунтов существенным образом влияют на режим поверхностных и подземных вод. В районах с суровым климатом и малым количеством осадков, где бассейны рек полностью расположены в районах с мерзлыми горными породами, речной сток зимой резко снижается и составляет очень малую долю годового стока. В это время прекращается грунтовое питание рек, так как породы водоносных горизонтов промерзают целиком или в значительной своей части. Многие источники подземных вод, питающиеся из более глубоких водоносных горизонтов, также промерзают и временно прекращают свое существование. Мерзлые горные породы затрудняют или совсем прерывают взаимосвязь и взаимодействие поверхностных и подземных вод.

Сокращение питания и снижение стока рек зимой приводит к тому, что даже такие довольно крупные северные реки, как Яна и Индигирка, во многих местах промерзают до дна и движение воды происходит лишь под руслом реки в самих горных породах. Что же касается малых рек и ручьев, то, подстилаемые мерзлыми породами и не имея связи с артезианскими водами (например, в тундровых условиях), они существуют исключительно за счет атмосферных осадков, а зимой промерзают полностью и прекращают свою деятельность.

Подземные воды на территории с многолетнемерзлыми породами имеют большое распространение; они образуют обширные артезианские бассейны и нередко служат единственным источником водоснабжения промышленных и транспортных предприятий и населенных пунктов.

Водоносные горизонты могут находиться над мерзлой толщей, внутри ее и, наконец, под ней на различной глубине, достигающей сотен метров, причем они часто гидравлически связаны между собой. Подземные воды, находящиеся над мерзлой толщей, в зимний период промерзают полностью или частично или совсем не промерзают; промерзая, они часто

становятся напорными и нередко фонтанируют, образуя наледи. Так, на некоторых автомобильных магистралях зимой приходится бороться с образованием ледяных покровов на полотне дороги за счет выступающей на поверхность подземной воды в виде наледей.

При изучении подземных вод всегда необходимо выяснять условия их залегания относительно мерзлых горных пород и циркуляции для определения путей использования подземных вод или борьбы с их вредным влиянием.

При исследовании многолетнемерзлых горных пород и сопровождающих их явлений необходимо выяснить, как формировались и развивались эти породы, при каких условиях происходило промерзание горных пород, как увеличивались их мощность и площадь распространения, как эти явления происходили во времени в разные периоды развития Земли. Существует несколько точек зрения на затронутые вопросы. Однако во всех них имеются и общие взгляды.

Основное условие формирования слоев многолетнемерзлых горных пород — преобладание теплопотерь над теплоприходом в годовом балансе тепла в верхних слоях земной коры. Важнейшее значение в этом процессе имеет слой сезонного промерзания и протаивания, так как в нем совершаются основные годовые теплообороты.

Начало образования многолетнемерзлого слоя Земли на значительной части территории, по мнению исследователей, относится к похолоданию в северном полушарии, начавшемуся с конца третичной эпохи (плиоцена) и продолжавшемуся большую часть четвертичного периода (плейстоцена) с некоторыми перерывами. В полярных странах период с малым приходом и большим расходом тепла в горных породах продолжается и до настоящего времени.

Как известно, следствием общего похолодания климата явилось древнее оледенение обширных территорий Евразии и Северной Америки, одновременно формировались и толщи мерзлых горных пород.

На большей части территории глубокое промерзание горных пород происходило после исчезновения ледника.

Таким образом, в различных географических районах формирование мерзлых горных пород в разные геологические периоды и в разных условиях происходило различно. Поэтому выяснение истории развития мерзлых толщ представляет весьма трудную задачу, требующую анализа большого материала и специальной методики. В этом отношении приобретает большое значение установленная в последние годы важная закономерность, позволяющая судить об условиях развития мерзлых толщ. Эта закономерность связана с распределением льда в мерзлых горных породах. В настоящее время появилась возможность во многих случаях выяснить происхождение этих

пород по текстуре (сложению) и структуре подземного льда и вмещающих горных пород.

В современных условиях можно наметить следующие три более или менее устойчивых направления в развитии толщ мерзлых пород. В южных частях зоны распространения многолетнемерзлых пород (в северном полушарии) при современном климате происходит в основном повышение температуры и протаивание ранее образовавшихся толщ многолетнемерзлых пород, сокращение площади их распространения. В северных частях материков и на большинстве островов Северного Ледовитого океана происходит сохранение толщ мерзлых пород и нарастание мощности мерзлых пород (как, например, на вновь образовавшихся островах в дельтах рек, на морских косах и т. д.), а местами протаивание (развитие термокарста). В средней части зоны многолетнемерзлых пород одновременно существуют все три направления: устойчивое состояние при современном климате, местное протаивание и образование новых массивов мерзлых пород. Иначе говоря, многолетнемерзлые горные породы как компонент геолого-географической среды отражает в себе всю сложную природную обстановку с древних времен до современного периода в каждом конкретном участке Земли.

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ОСВОЕНИЯ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Освоение огромных природных богатств — рудных и нерудных полезных ископаемых: золота, железа, цветных металлов, каменного угля, алмазов, лесных массивов, гидроэнергетических ресурсов и т. п., которыми столь богата область распространения многолетнемерзлых пород в СССР, затруднено из-за скованности их льдом. Эта скованность обуславливает значительную трудоемкость разработки полезных ископаемых и рытья строительных котлованов. Мощные физико-механические процессы, протекающие при промерзании и протаивании грунтов, создают сложные условия возведения и эксплуатации промышленных, гидротехнических, сельскохозяйственных и жилых сооружений и строений, а общая суровость климата — тяжелые условия труда, особенно в зимнее время.

Физико-механические процессы, происходящие в рыхлых горных породах при их промерзании и протаивании, могут вызвать деформации поверхности, дорожного полотна и сооружений, просадки грунтов, например, от действия тепла оттаиваемых сооружений и другие.

На рис. 5 приведены фотографии деформированных зданий на мерзлых грунтах: *а* — трещины, возникшие от морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов; *б* — трещины, образовавшиеся в результате морозного пучения грунтов воз-

ле наружных стен и просадок внутренних стен при оттаивании мерзлых грунтов под ними; *в* — разрушение пола здания вследствие неравномерного протаивания грунтов основания под стенами и внутри здания.

Однако сцементированность горных пород льдом имеет и свою положительную сторону; при соблюдении определенных технических условий мерзлые горные породы могут воспринимать большие нагрузки от современных капитальных сооружений, а их водонепроницаемость имеет весьма существенное значение для шахтного строительства.

Изменения свойств грунтов при промерзании и протаивании

При промерзании грунтов резко изменяются их свойства: увеличивается объем вследствие замерзания воды, содержащейся в порах породы, и воды, передвигающейся в грунте к фронту промерзания из расположенных ниже слоев; происходит так называемое морозное пучение грунтов, иногда значительное и неравномерное; наблюдается резкое изменение сложения грунтов вследствие льдовыделения, возникает сцементированность (спаянность) льдом частиц грунта.

На рис. 6, в верхней его части, графически показана величина морозного пучения (увеличение объема при промерзании, в процентах) различных грунтов:

а — песчаного, *в* — глинистого и *с* — пылеватого с подтоком воды извне, а в нижней части рисунка три основных вида текстуры (сложения) мерзлых грунтов: *слитная*, которая формируется при интенсивном (резком) промерзании грунтов с образованием только зерен льда в порах грунта, цементирующих его частицы (так называемого льда-цемента); *слоистая*, возникающая при промерзании мелкозернистых грунтов (глин, суглинков и супесей) с образованием ледяных прослоек; *слоистая* текстура формируется преимущественно при одностороннем промерзании грунта и при подтоке воды извне или в случае, когда грунт сильно увлажнен и прослойки льда

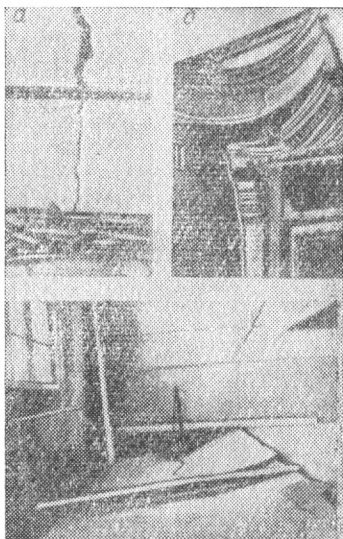


Рис. 5. Деформации зданий, построенных на мерзлых грунтах:

а — трещины в рандбалке промышленного здания в Забайкалье; *б* — осадки и трещины здания кумирни в Монголии; *в* — разрушение пола здания мастерской рыбзавода в Анадыре.

образуются вследствие перераспределения влаги в процессе промерзания грунта; ячеистая (сетчатая), формирующаяся при подтоке или перераспределении влаги преимущественно при неодностороннем промерзании грунтов.

Пучение пылеватых грунтов с подтоком воды происходит особенно интенсивно и при смерзании таких грунтов с фундаментами строений и вызы-

вает выпучивание последних. На рис. 7 наглядно иллюстрируется это явление.

Мерзлые грунты массивной текстуры (сложения) обладают большой прочностью и выдерживают длительное действие нагрузки; грунты ячеистой текстуры более пластичны и под действием нагрузки скорее как бы расползаются; прочность грунтов слоистой текстуры зависит от направления действия нагрузки относительно ледяных прослоек — вдоль их или в поперечном к ним направлении.

Важно отметить, что, как показали исследования, в мерзлых грунтах при любой отрицательной температуре всегда содержится незамерзшая вода. Количество незамерзшей воды не остается

постоянным, а меняется с изменением внешних воздействий (температуры, давления), находясь в подвижном равновесии с последними. Это положение формулируется так называемым принципом динамического равновесия воды и льда в мерзлых грунтах, имеющим важное значение для установления связи между физическим состоянием и механическими свойствами мерзлых грунтов.

Изменение количества незамерзшей воды существенно влияет на все механические свойства мерзлых грунтов и особенно на их пластичность и ползучесть под действием постоянного давления.

На рис. 8 представлен график, показывающий изменение количества незамерзшей воды в мерзлом глинистом грунте ($W_{\text{вз}}$) при различной отрицательной температуре: чем ближе температура мерзлого грунта к 0° , тем больше незамерзшей воды (иногда больше половины) в нем содержится;

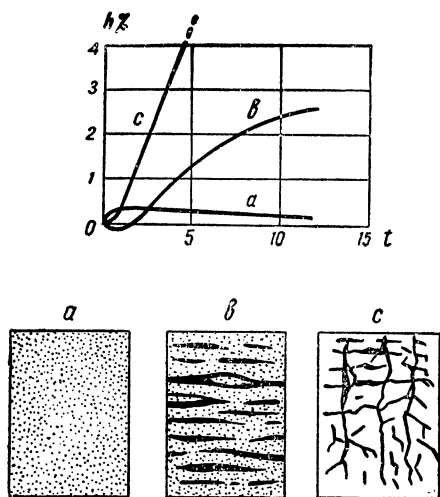


Рис. 6. Пучение и льдообразование в грунтах при их промерзании; вверху — кривые пучения грунтов, внизу — типичные виды текстуры грунтов:

a — слитная (массивная); *b* — слоистая; *c* — ячеистая.

и даже при очень низких температурах в мерзлом грунте содержится некоторое количество незамерзшей воды.

Механические свойства мерзлых грунтов резко отличаются от свойств грунтов немерзлых. Их сопротивление внешним

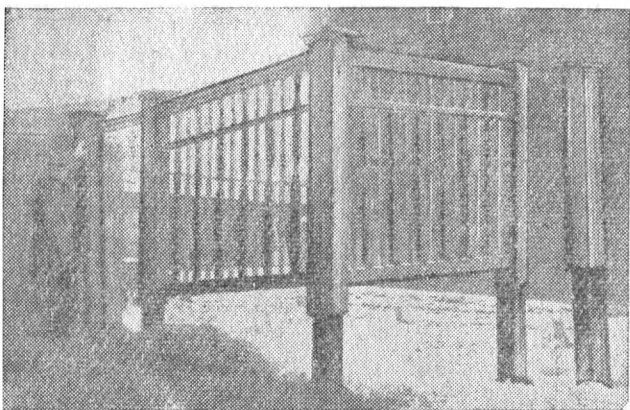


Рис. 7. Деревянный забор в Воркуте, выпученный при промерзании грунта.

силам во много раз больше сопротивления немерзлых грунтов и зависит не только от состава и влажности (льдистости), но и от величины отрицательной температуры и времени действия нагрузки. Так, на рис. 9 приведены кривые изменения сопротивления сжатию ($P_{сж}$) мерзлых грунтов: слева — для песка и глины в зависимости от величины отрицательной температуры, справа — изменение сопротивления сжатию мерзлой глины при температуре -2° и длительном действии постоянной нагрузки ($P_{лит}$).

Сопротивление сжатию мерзлого песка намного больше сопротивления сжатию мерзлой глины, что можно объяснить в первую очередь содержанием незамерзшей воды, которой значительно больше в глине, чем в песке. С понижением отрицательной температуры количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах уменьшается, что главным образом и обуславливает увеличение их сопротивления одностороннему сжатию. Под действием постоянного давления вследствие расслабления (релаксации) внутрен-

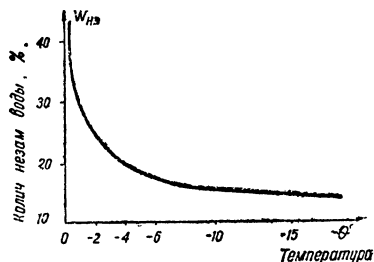


Рис. 8. График изменения содержания незамерзшей воды в мерзлом грунте.

них связей в мерзлом грунте сопротивление его нагрузке с течением времени падает, приближаясь при достаточно длительном действии нагрузки к некоторому пределу, который носит название «длительного сопротивления» в отличие от мгновенного сопротивления (при весь-

ма кратковременном действии нагрузки ($P_{\text{мгн}}$), которое во много раз (от 5 до 15) больше. При повышении температуры сопротивление мерзлых грунтов уменьшается, но даже при отрицательных температурах, близких к 0° , оно все еще велико и в несколько раз превосходит сопротивление немерзлых грунтов.

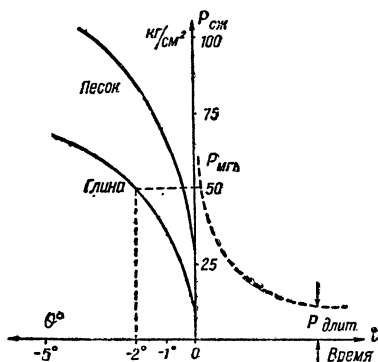


Рис. 9. Зависимость сопротивления сжатию мерзлых грунтов от величины отрицательной температуры и времени действия нагрузки.

С повышением температуры до положительной в результате таяния льда в порах грунта цементационные связи резко нарушаются и изменяется текстура (сложение) грунта, что вызывает значительное

уменьшение его сопротивления нагрузке.

При протаивании происходит значительная относительная деформация грунта (осадка), возникает так называемая просадка, величина которой во много раз больше осадки грунта в мерзлом состоянии (рис. 10).

Как показали исследования, величина относительной осадки мерзлых грунтов при протаивании состоит из двух частей; одной, независимой от величины внешнего давления, так называемой осадки оттаивания, и другой, зависящей от внешнего давления, так называемой осадки уплотнения. В настоящее время уже разработаны достаточно точные методы для определения как осадки оттаивания, так и осадки уплотнения мерзлых грунтов при оттаивании, что позволяет заранее определить их величину при проектировании фундаментов сооружений, возводимых с учетом осадок оттаивающих грунтов основания.

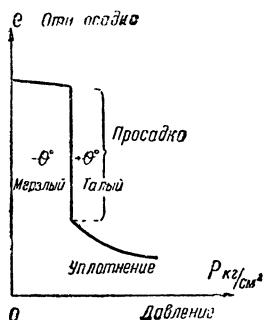


Рис. 10. График изменения относительной осадки мерзлого грунта при изменении его температуры от отрицательной к положительной и при действии уплотняющей нагрузки.

Методы освоения территорий с мерзлыми и многолетнемерзлыми породами

Освоение территорий с мерзлыми и многолетнемерзлыми породами, как указывалось ранее, сопряжено с рядом трудностей, в частности при строительстве различного рода сооружений. Однако результаты научных исследований условий строительства на многолетнемерзлых породах, проведенные за последнюю четверть века, и учет опыта строительства позволяют уже в настоящее время успешно преодолевать эти трудности.

При сельскохозяйственном освоении территорий с мерзлыми породами возникает ряд трудностей, обусловленных близким залеганием мерзлых грунтов к поверхности почвы, образованием ледяных прослоек, нередко разрывающих корни растений.

Однако и в этом деле в настоящее время имеется существенный прогресс: применение тепловой мелиорации почв позволяет повысить их производительность. Что же касается строительства сельскохозяйственных зданий и помещений в районах распространения многолетнемерзлых пород, то они имеют те же особенности, как и другие гражданские и промышленные сооружения, что будет рассмотрено ниже.

Укажем попутно на использование свойств льда и мерзлых грунтов для строительства так называемых ледяных изотермических складов системы М. М. Крылова для хранения сельскохозяйственной продукции, не требующих дорогого машинного охлаждения, так как холодильным агентом является лед, намораживаемый в зимнее время. Основным материалом стен и перекрытий ледяных складов служит лед и очень небольшое количество лесных материалов для устройства простейшей опалубки.

Замечательным свойством ледяных складов Крылова является прекрасная сохранность в них сельскохозяйственных продуктов (картофеля, овощей, фруктов) длительное время (иногда при необходимости в течение круглого года и более); при таком хранении вес овощей и фруктов не убывает вследствие поглощения ими влаги, источником которой является лед стен и перекрытий. На рис. 11 дан общий вид и план ледяного склада системы Крылова емкостью на 250 т.

Возводится такой склад в зимнее время путем намораживания льда методом набрызгивания водопроводной воды на простейшую опалубку (арки из жердей или горбылей, покрытые толем, плотной бумагой, старыми циновками или другими подручными материалами) толщиной 1—2 м, после чего слой льда покрывается изоляцией из слоя опилок и земли. Для строительства разработаны типовые проекты на объем от 20 до 500 т сельскохозяйственной продукции.

Как показывают теоретические расчеты и практика строительства, ледяные склады можно возводить в местностях, где число зимних дней с температурой ниже -10° не менее 15 и наиболее просто намораживать лед в местностях с числом

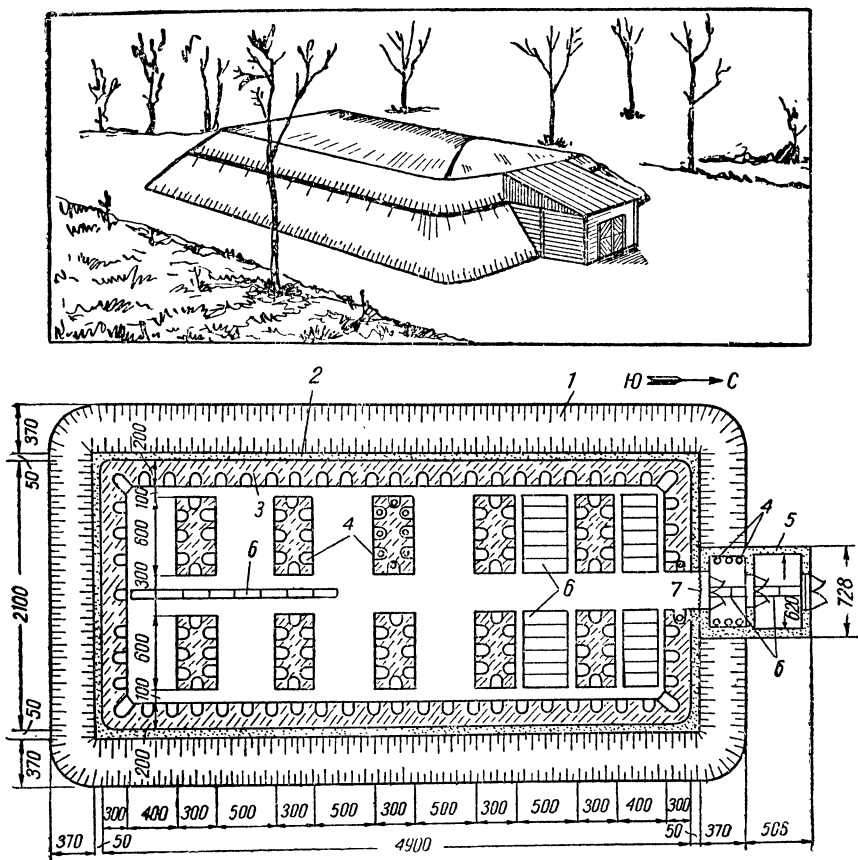


Рис. 11. Общий вид и план ледяного склада системы М. М. Крылова емкостью 250 т:

1 — земляная насыпь; 2 — термоизоляция; 3 — ледяная стена; 4 — ледо-
соляные камеры; 5 — тамбур; 6 — щиты; 7 — шторы.

дней с температурой ниже -10° более 100 в году. Южная граница зоны, где еще возможно возводить ледяные склады, используя зимний холод, проходит примерно через города Ригу, Вильнюс, Киев, Днепропетровск, Ростов-на-Дону, Кзыл-Орду, Алма-Ату. Во всех районах, расположенных к северу и востоку от указанной границы, ледяные склады могут быть сооружены без особых затруднений, причем иногда для ускорения работ часть стен и перекрытий ледяного склада выпол-

няются из кусков речного льда или куски льда добавляются в намораживаемую массу.

В настоящее время есть ледяные склады, существующие уже более 15 лет (Ростокино под Москвой и др.). Эти склады требуют незначительного ухода при эксплуатации и ежегодного намораживания (главным образом на полу) сработанного за лето льда.

Для обеспечения устойчивой отрицательной температуры применяется ледо-соляное охлаждение путем добавления соли в специальные камеры (ниши), устроенные в стенах ледяных складов.

При строительстве гражданских и промышленных зданий на мерзлых и многолетнемерзлых грунтовых основаниях необходимо учитывать, что физическое состояние и механические свойства этих оснований прежде всего зависят от их температуры. Нигде строителю не приходится так внимательно и тщательно учитывать изменение температуры оснований, как при строительстве на мерзлых и многолетнемерзлых грунтах. Действительно, повышение температуры мерзлых грунтов лишь на 1° даже в области отрицательных температур уменьшает их сопротивление на величину порядка 10 кг/см^2 и более, а при переходе температуры от отрицательной к положительной несущая способность грунтовых оснований уменьшается во много раз и часто возникают просадки.

Серьезные затруднения строителей первых железных дорог (Забайкальской и Амурской) в области распространения многолетнемерзлых грунтов вызвали необходимость исследования строительных свойств этих грунтов. Однако плановое изучение мерзлых грунтов, со строительной точки зрения, началось лишь в годы выполнения пятилетних планов индустриализации СССР, когда развернулось строительство заводов, рудников, железных дорог и жилищ в области распространения многолетнемерзлых грунтов.

В настоящее время уже разработаны основы механики мерзлых грунтов и установлены в первом приближении величины расчетных характеристик для многолетнемерзлых грунтов, что позволяет с достаточным обоснованием проектировать и строить прочные, устойчивые и долговечные сооружения на многолетнемерзлых грунтах.

При строительстве сооружений на многолетнемерзлых грунтах в настоящее время применяются следующие три метода строительства (не считая строительства на скальных основаниях):

- 1) сохранение мерзлого состояния грунтов основания;
- 2) учет осадок при протаивании многолетнемерзлых грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений;
- 3) предпостроечная подготовка основания (например, предварительное протаивание).

Первый метод может применяться при строительстве на любых мерзлых грунтах (пылеватых, глинистых, перенасыщенных льдом и др.); по этому методу построены целые города (Норильск, Якутск и др.), но он требует специальных устройств и теплотехнических расчетов мерзлых оснований на устойчивость их температурного режима, обеспечивающего сохранение мерзлого состояния грунтов оснований в течение всего периода эксплуатации сооружений. Как показывают соответствующие теоретические расчеты, полностью подтвержденные практикой строительства за последнюю четверть века, для сохранения в мерзлом состоянии грунтов основания под зданиями и сооружениями необходимо отводить от оснований излишнее тепло, выделяемое зданиями и сооружениями.

Наиболее целесообразной конструкцией фундаментов при возведении сооружений по методу сохранения их оснований в мерзлом состоянии является устройство проветриваемого зимой подполья, т. е. возведение всего здания над поверхностью земли так, чтобы между зданием и поверхностью грунта всегда оставалось пространство (высотой 0,5—1,5 м), сообщаемое с наружным воздухом и проветриваемое путем естественной или искусственной вентиляции.

Метод строительства с проветриваемым зимой подпольем вполне оправдывается многолетней практикой. Так, построенные по этому методу здания и сооружения, например Якутская электростанция в 1933 году, многие жилые здания в Норильске и Якутске, построенные позже, существуют без каких бы то ни было недопустимых деформаций уже многие годы, и, как показывают соответствующие обследования, верхняя граница многолетнемерзлых грунтов при этом не только не опускается, а даже несколько поднимается.

Схематический разрез такого здания показан на рис. 12.

Фундаменты зданий в этом случае закладываются на 0,5—1 м ниже верхней границы многолетнемерзлых грунтов (глубже сезоннопротаивающего слоя) и применяются меры по уменьшению или ликвидации сил морозного пучения грунтов возле фундаментов. Такими мерами могут быть устройство засыпки из гальки, покрытой водонепроницаемым материалом, или пропитывание грунтов возле фундаментов незамерзающими жидкостями, их засоление и пр.

Второй метод — возведение сооружений на многолетнемерзлых грунтах с учетом осадок при их последующем протаивании — обычно применяется для сооружений, выделяющих значительные количества тепла или занимающих большую площадь в плане, если при протаивании мерзлых грунтов в основании (галечных, крупнопесчаных и т. п.) не происходит больших осадок. При этом обязателен прогноз возможных осадок протаивающих грунтов основания, их нерав-

номерности и скорости протекания во времени. Величина осадки должна быть меньше величины, предусмотренной нормами. Желание уменьшить как величину осадки, так и ее неравномерность и скорость протекания заставляет конструировать фундаменты в виде сплошных жестких массивных блоков, мало реагирующих на неравномерность осадок.

При возведении сооружений по этому методу иногда применяются меры, позволяющие впоследствии регулировать величину и скорость осадки протаивающих грунтов основания (прокладка в соответствующих местах теплопроводов и пр.).

Следует, однако, заметить, что второй метод еще мало применяется на практике.

Третий метод — предпостроечной подготовки оснований — целесообразно применять при небольшой мощности слоя многолетнемерзлых грунтов под фундаментами (порядка 3—7 м) или в случае

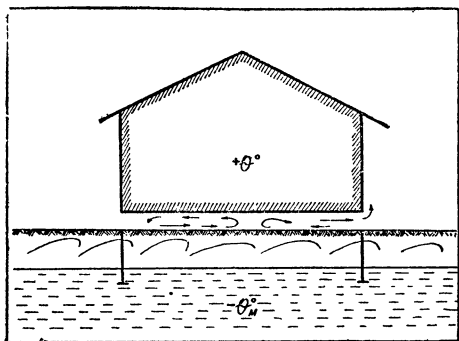


Рис. 12. Схема отопляемого здания, возводимого на многолетнемерзлых грунтах по методу сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии с применением проветриваемого зимой подполья.

наличия на достигаемой глубине скальных пород, почти не меняющих своих свойств при оттаивании. Как способы предпостроечной подготовки многолетнемерзлых оснований применяются: предпостроечное оттаивание с помощью воды, пара или электропрогрева с последующим механическим уплотнением оттаявших грунтов, обезвоживание глинистых грунтов с помощью постоянного электрического тока, устройство поверхностных мощных галечных и щебенистых покрытий, общее осушение территории застройки с помощью водоотводных канав и дренажных устройств. Возведение сооружений по методу предпостроечной подготовки оснований производится по специальному проекту, составленному в результате полевых инженерно-геологических исследований.

При возведении сооружений по всем трем методам необходимо применять меры против морозного выпучивания фундаментов.

Наличие многолетнемерзлых грунтов существенно сказывается и на технике горных работ. С одной стороны, мерзлое состояние пород увеличивает трудность их разработки, проходки выработок и т. п., а с другой, обеспечивает водонепроницаемость пород, что облегчает проходку выработок. Кроме

того, для заполнения выработанных пространств в толще мерзлых пород иногда с успехом применяется частичная их закладка льдом.

При проходке горных выработок в плавунных грунтах или в разжиженных глинах существенную помощь оказывает применение искусственного (машинного) промораживания грунтов и создание ледо-грунтовых ограждений, например при проходке шахт, тоннелей для метрополитена и т. л.

Таким образом, затруднения при хозяйственном освоении территорий с мерзлыми и многолетнемерзлыми грунтами в настоящее время с успехом преодолеваются. В ряде случаев успешно используются свойства многолетнемерзлых грунтов, их большая прочность и водонепроницаемость в строительном и горном деле.

В настоящем кратком изложении о роли мерзлых пород в природе и жизни человека затронуты лишь основные закономерности, процессы и явления, происходящие при промерзании горных пород. Многие вопросы, связанные с освоением области мерзлых горных пород, не получили здесь достаточного освещения. Все интересующиеся этими вопросами могут обратиться к литературным источникам, часть которых приведена в списке литературы.

ЛИТЕРАТУРА

- Д а д ы к и н В. П. Особенности поведения растений на холодных почвах. М., Изд-во АН СССР, 1952. 279 стр., с илл.
- К р ы л о в М. М. Ледяные изотермические склады. М., Изд-во АН СССР, 1951. 88 стр., с илл.
- Основы геокриологии (мерзотоведения). Часть первая — Общая геокриология. 459 стр., с илл. и карт. Вторая часть — Инженерная геокриология 366 стр. с илл. и карт. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- П о н о м а р е в В. М. Подземные воды территории с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1960. 200 стр., с илл.
- С а л т ы к о в Н. И. Основания и фундаменты в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М., Изд-во АН СССР, 1959. 206 стр., с черт. и карт.
- С у м г и н М. И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Изд. 2-е. М., Изд-во АН СССР, 1937. 379 стр., с илл.
- С у м г и н М. И. и Д е м ч и н с к и й Б. Н. Область вечной мерзлоты. М., Изд-во Главсевморпути, 1940. 240 стр., с илл. и карт.
- Технические условия проектирования оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах (СН 91—60). М., Госуд. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строит. материалам, 1960.
- Ц ы т о в и ч Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. М., Изд-во АН СССР. 1958. 168 стр., с илл. и карт.
- Ш в е ц о в П. Ф. и С е д о в В. П. Гигантские наледы и подземные воды хребта Тас-Хаяхтах. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1941. 82 стр. с илл.
-

6 коп.