

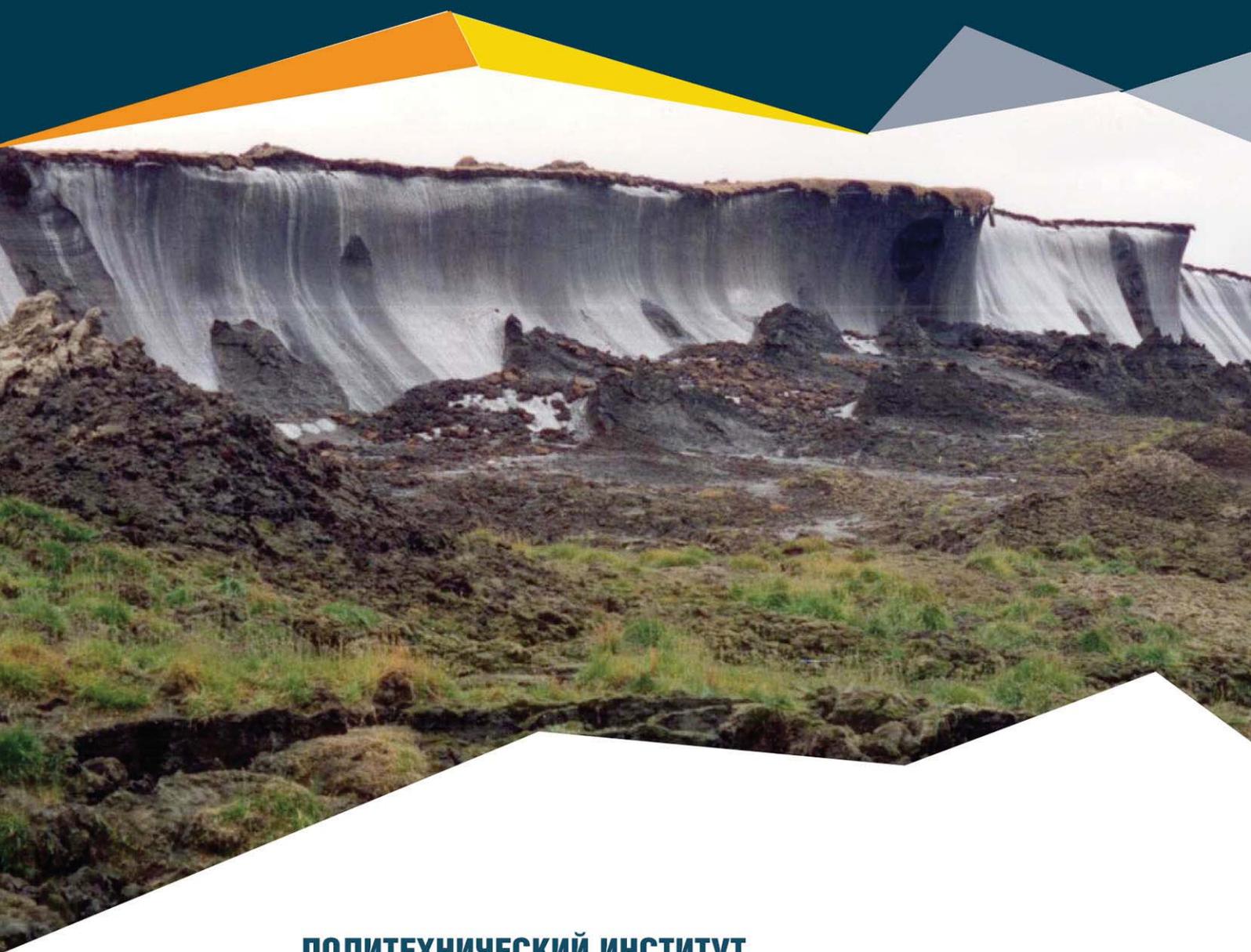


СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Г. И. Кузнецов, Н. В. Крук

ИНЖЕНЕРНОЕ МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

УДК 624.139:541.34(07)
ББК 26.328.7я73
К891

Рецензенты:

Д. А. Озерский, кандидат технических наук, заместитель директора АО «МОНИТЕК»;

В. Ф. Кошкин, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ОАО «Красноярскгеология»

Кузнецов, Г. И.

К891 Инженерное мерзлотоведение : учеб. пособие / Г. И. Кузнецов, Н. В. Крук. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 140 с.
ISBN 978-5-7638-4016-2

Рассмотрены вопросы, существенно важные для обоснования техносферной безопасности и защиты окружающей среды при строительстве и эксплуатации объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера – гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений.

Предназначено для студентов направления подготовки «Техносферная безопасность».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 624.139:551.34(07)
ББК 26.328.7я73

ISBN 978-5-7638-4016-2

© Сибирский федеральный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Г л а в а 1. ВЕЧНОМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КРИОЛИТОЗОНЕ.....	6
1.1. Распространение вечномерзлых грунтов	6
1.2. Температура и мощность массива вечномерзлых грунтов.....	9
1.3. Мерзлотно-геологические процессы и явления	10
Г л а в а 2. СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ, ОТТАИВАЮЩИХ И ТАЛЫХ ГРУНТОВ.....	22
2.1. Состав и классификация грунтов	22
2.2. Физические и теплофизические свойства грунтов.....	27
2.2.1. Физические свойства грунта, определяемые опытным путем	28
2.2.2. Физические свойства грунта, вычисляемые по формулам.....	28
2.3. Теплофизические свойства грунта.....	31
2.4. Механические свойства грунтов	33
Г л а в а 3. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ.....	36
3.1. Охлаждение и предварительное оттаивание вечномерзлых грунтов.....	36
3.2. Глубинное охлаждение и замораживание грунтов	46
3.3. Расчет глубинного охлаждения (замораживания) грунта	55
Г л а в а 4. НАРУЖНЫЕ И САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СЕТИ И МАГИСТРАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ.....	59
4.1. Способы прокладки сетей.....	59
4.2. Способы прокладки магистральных трубопроводов	63

Г л а в а 5. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ	73
5.1. Общие вопросы проектирования	73
5.2. Выбор типа плотины. Компоновка гидроузла	75
5.3. Плотины мерзлого типа (принцип 1).....	77
5.4. Талые плотины (принцип 2)	82
5.5. Водосбросные сооружения	89
Г л а в а 6. НАКОПИТЕЛИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	91
6.1. Общие сведения	91
6.2. Эксплуатация и натурные исследования накопителей	92
Г л а в а 7. ПРИРОДООХРАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ НАРУШЕНИЯХ ПОВЕРХНОСТИ	110
7.1. Общие сведения	110
7.2. Меры защиты многолетнемерзлых грунтов от оттаивания.....	113
Г л а в а 8. РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ И ОСНОВАНИЯ	118
8.1. Основные положения и вводные понятия	118
8.2. Прогноз оттаивания вечной мерзлоты водохранилища под дном.....	120
8.3. Предельное температурное состояние ложе водохранилища (основания промбассейна)	123
8.4. Динамика оттаивания берегового склона после заполнения водохранилища	125
8.5. Теплотехнический расчет мерзлотной завесы в земляной плотине (дамбе промбассейна).....	128
8.6. Расчет глубины сезонного оттаивания и промерзания грунта	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ	137

ВВЕДЕНИЕ

В пособие включены вопросы, существенно важные для обоснования техносферной безопасности и защиты окружающей среды при строительстве и эксплуатации объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера – гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений. К таким объектам, оказывающим наиболее опасное воздействие на вечную мерзлоту, вплоть до ее катастрофического разрушения, относятся:

- плотины, водохранилища и другие искусственные водоемы [4];
- нефте- и газопроводы;
- различные тепловыделяющие здания и сооружения;
- комплексные воздействия при интенсивном освоении северных территорий.

Вопросы техносферной безопасности накопителей различных отходов рассмотрены в других учебных пособиях, вышедших в свет в СФУ (Кузнецов Г. И., Балацкая Н. В., Озерский Д. А. Накопители промышленных отходов: учеб. пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008; Кузнецов Г. И., Балацкая Н. В., Гончаров Ю. М. Основы природоохранной гидротехники: учеб. пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011.).

Вопросы, относящиеся к горнопромышленной сфере, устройству дорог, проектированию оснований и фундаментов на Крайнем Севере, требуют отдельного рассмотрения; в дальнейшем предполагается выпуск других учебных пособий, развивающих арктическую и мерзлотную тематику.

Для самостоятельного изучения рекомендуются также и другие источники (Интернет, научно-техническая периодика, труды конференций, описания патентов и т. п.).

Глава 1

ВЕЧНОМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КРИОЛИТОЗОНЕ

1.1. Распространение вечномерзлых грунтов

Вечномерзлыми грунтами (ВМГ) называются горные породы, находящиеся при отрицательной температуре и содержащие в своем составе лед. Они занимают порядка 25 % территории всей суши и 65 % в России. По характеру распространения этих грунтов по площади можно выделить четыре области:

- 1) сплошного распространения вечномерзлых грунтов (мерзлые породы занимают более 95 % площади), их температура T_0 ниже -3 °С;
- 2) преимущественно сплошного распространения (90–95 % площади $T_0 = -0,2 \dots -2$ °С);
- 3) прерывистого распространения (75–90 %, $T_0 = -0,2 \dots -2$ °С);
- 4) массивно-островного распространения (менее 25 %, $T_0 > -0,5$ °С).

Карта распространения вечномерзлых пород на территории России приведена на рис. 1.1. Границы между областями в пределах криолитозоны весьма условны. В целом распространение мерзлых толщин подчиняется широтной и высотной зональности: их количество возрастает, и температура понижается с юга на север и снизу вверх.

При общих закономерностях возможны зональные отличия, обусловленные местными условиями теплообмена в системе литосфера – атмосфера. Наибольшим разнообразием характеризуется территория, прилегающая к южной границе вечномерзлых грунтов. В криолитозоне мерзлые породы могут отсутствовать на участках речных долин, под реками, озерами и водохранилищами, под наиболее прогреваемыми солнцем горными склонами и водоразделами, в местах концентрированной разгрузки подземных вод или площадках их инфильтрационного питания, под частью современных ледников, над геотермическими аномалиями, связанными с вулканическими и другими процессами.

По строению мерзлых толщ по вертикали выделяют три возможных типа:

- 1) вечномерзлые толщи сливающегося типа (кровля ВМГ совпадает с подошвой слоя сезонного оттаивания);

2) вечномерзлые толщи несливающегося типа (кровля ВМГ не совпадает с подошвой слоя сезонного промерзания, между ними находится талый слой);

3) вечномерзлые толщи слоистого типа (два слоя ВМГ находятся друг над другом и разделены талой прослойкой).



Рис. 1.1. Карта распространения вечномерзлых пород на территории России

В мерзлых породах часто бывают включения чистого льда, оттаивание которого приводит к большим осадкам поверхности. Различают следующие формы залегания льда:

пластовая – лед залегает слоем сравнительно одинаковой мощности (от нескольких сантиметров до десятков метров);

линзовидная – лед имеет увеличенную в средней части площадь (до нескольких десятков квадратных метров);

клиновидная – лед заполняет морозобойные трещины на глубину до 20 м, а местами и более;

гнездовидная – лед заполняет отдельные полости в виде небольших включений.

В пределах массива мерзлых грунтов могут находиться талые грунты, так называемые *талики*, которые могут быть сквозными и несквозными. Сквозные талики, как правило, образуются под крупными реками, озерами и водохранилищами, несквозные – под отрицательными формами рельефа,

мелкими водоемами и др. Число таликов с севера на юг возрастает, их суммарная площадь увеличивается – и мерзлые грунты исчезают (рис. 1.2).

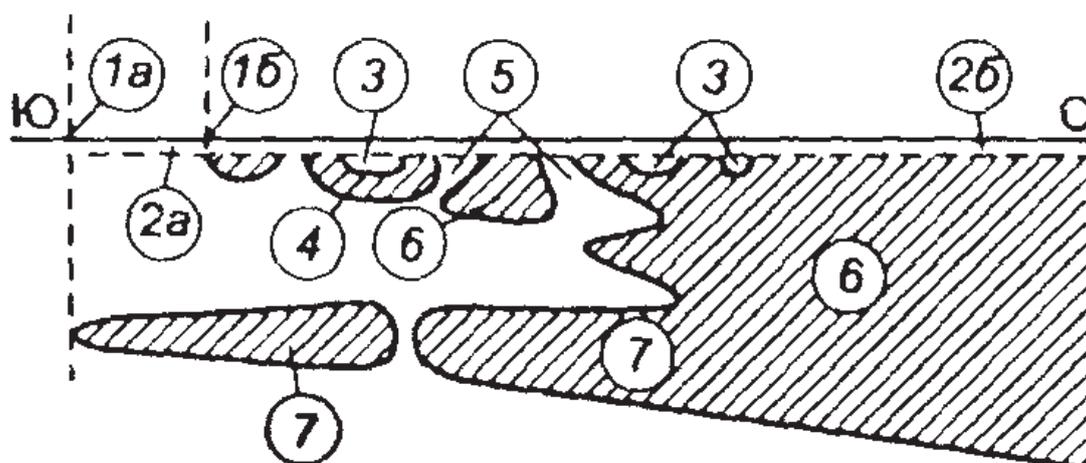


Рис. 1.2. Вертикальное строение мерзлых толщ с юга на север: 1 – южная граница реликтовых (1а) и современных (1б) вечномерзлых толщ; 2 – слой сезонного промерзания (2 а) и протаивания (2 б); 3 – несквозные талики; 4 – современные несливающиеся вечномерзлые толщи; 5 – сквозные талики; 6 – современные сливающиеся вечномерзлые толщи; 7 – реликтовые сливающиеся и несливающиеся вечномерзлые толщи

Наличие в толще вечномерзлых грунтов талых зон определяет особенности подземных вод, которые встречаются в талых и сезонноталых слоях и подразделяются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные. Они могут сообщаться между собой и водоемами.

Надмерзлотные воды питаются в основном атмосферными осадками. Их зеркало часто повторяет рельеф поверхности; воды двигаются в сторону уклона местности, при этом кровля ВМГ служит для них водупором.

Межмерзлотные воды встречаются реже. Они существуют благодаря связи с надмерзлотными и подмерзлотными водами и постоянному переносу водой тепла в межмерзлотную талую зону. Возможно также наличие межмерзлотных вод в замкнутых таликах, если эти воды засолены и температура их замерзания понижена.

Подмерзлотные воды распространены повсеместно. К ним относятся воды артезианских бассейнов, расположенных непосредственно под мерзлой толщей, и воды более глубоких горизонтов. Подмерзлотные воды подпитываются главным образом за счет просачивания надмерзлотных и речных вод через сквозные талики и трещиноватые зоны. Подмерзлотные воды обычно имеют напор и изливаются на поверхность через естественные выходы. Иногда подмерзлотные воды, поднимаясь с больших глубин, имеют высокую температуру, что обеспечивает существование незамерзающих источников.

Кроме талых пород с положительной температурой, в толще мерзлых пород встречаются талые породы с отрицательной температурой (переохлажденные породы), которые не замерзают благодаря их большой засоленности. Особенно опасны находящиеся в грунте незамерзающие солевые растворы (криопэги), которые могут мигрировать с оттаиванием прилегающих мерзлых грунтов.

1.2. Температура и мощность массива вечномерзлых грунтов

Температурный режим грунтов определяется структурой радиационно-теплового баланса поверхности с учетом теплового влияния наземных покровов (снег, растительность) и теплоток из недр Земли. Температурный режим массива грунтов зависит от средней годовой температуры поверхности, амплитуды колебаний температуры поверхности в течение года и геотермического градиента (рис. 1.3). В некоторых случаях температурный режим грунтов зависит также от тепла, выделяемого при радиоактивном распаде, при экзотермических химических реакциях в грунтах или от тепла, приносимого в грунт фильтрующейся водой.

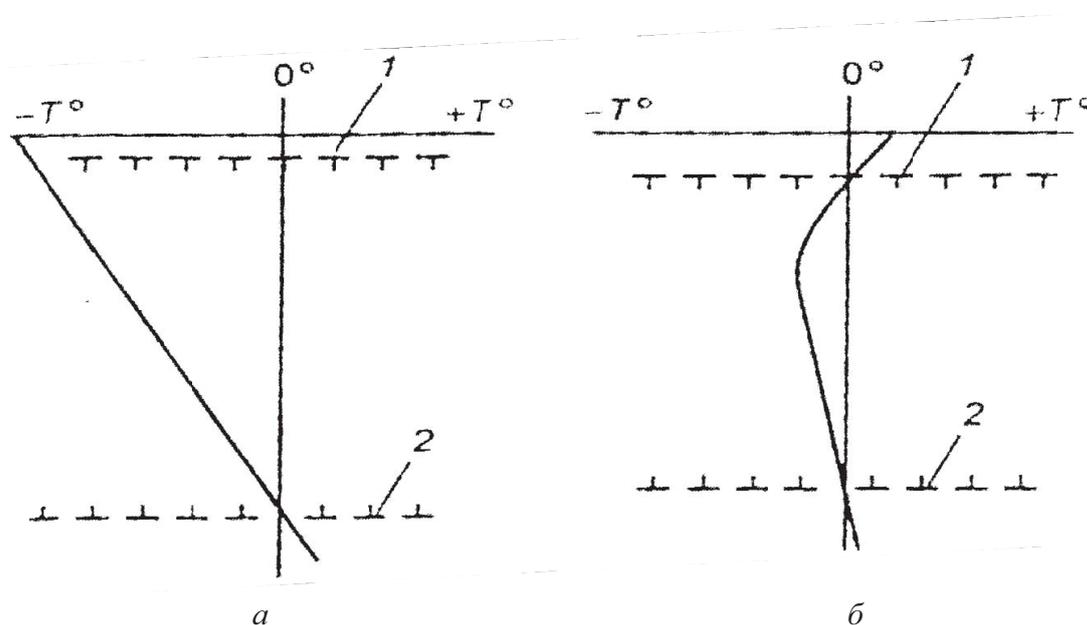


Рис. 1.3. Распределение средней годовой температуры грунта по вертикали на участках с вечномерзлыми грунтами сливающегося (*а*) и несливающегося (*б*) типов: 1 – кровля ВМГ; 2 – подошва ВМГ

Поверхностный слой грунта, подвергающийся сезонному оттаиванию или промерзанию, называется *деятельным слоем*. Толщина его опре-

деляется глубиной зимнего промерзания или летнего оттаивания. Слой грунтов, замерзший зимой и не оттаивающий в течение нескольких лет, называется *перелетком*. Мощность деятельного слоя зависит в основном от географической широты местности, термического сопротивления покровов (растительного и снежного) и состава грунтов. Она меняется от 0,2–0,3 м (в высоких широтах) до 3–4 м (на широте 55–60°). Величину деятельного слоя можно рассчитать, как и среднюю годовую температуру грунта на подошве деятельного слоя. Эти два параметра в основном определяют температуру вечномерзлых грунтов. В формировании температуры и мощности ВМГ участвует геотермический градиент, который в пределах криолитозоны изменяется от 0,02 до 0,035 °С на 1 м. Следует различать однородный по площади и неоднородный температурный режим грунтов. Условия теплообмена на дневной поверхности постоянны на площади, размеры которой превосходят мощность ВМГ в 5–6 раз.

1.3. Мерзлотно-геологические процессы и явления

Мерзлотно-геологические процессы в криолитозоне могут быть подразделены на три группы [2; 5; 7]:

1) мерзлотные процессы (морозобойное растрескивание, льдообразование, криогенное выветривание, морозное пучение, наледообразование и термокарст);

2) склоновые процессы (солифлюкция и курумообразование);

3) процессы, обусловленные механическим воздействием на мерзлые грунты водоемов и водных потоков (термоэрозия, термообразия).

Особенности распространения, интенсивности развития и проявления перечисленных процессов в целом определяются ландшафтно-климатическими и мерзлотно-геологическими факторами.

Опишем мерзлотно-геологические процессы.

Морозобойное растрескивание происходит в основном по двум причинам:

- вследствие разной (для отдельных слоев мерзлого грунта) величины отрицательной температуры, обуславливающей неодинаковое сжатие отдельных слоев;

- в результате образования местных бугров пучения из-за неравномерной миграции влаги.

В зимнее время при охлаждении грунта с поверхности отдельные слои промерзшего грунта будут иметь разную отрицательную температуру, убывающую с глубиной (рис. 1.4). Это вызывает неравномерное сжатие грунтов – большее там, где ниже температура. При этом величина макси-

мального сдвигающего напряжения τ_x (напряжения у поверхности грунта) ориентировочно определяется формулой

$$t_x = \frac{1}{2} n a_f G_f x \frac{\Delta T}{h}, \quad (1.1)$$

где $\Delta T/h = (T_{\text{дп}} - T_h)/h$ – градиент температуры, °С/м; $T_{\text{дп}}$ – температура грунта на дневной поверхности, °С; T_h – температура грунта на глубине h , °С; $G_f = 0,5 E_f/(1+\mu_f)$ – модуль упругости при сдвиге, Па; E_f – модуль нормальной упругости, Па; μ_f – коэффициент бокового расширения мерзлого грунта; a_f – коэффициент линейного сжатия мерзлого грунта, 1/°С; n – коэффициент пропорциональности, близкий к единице.

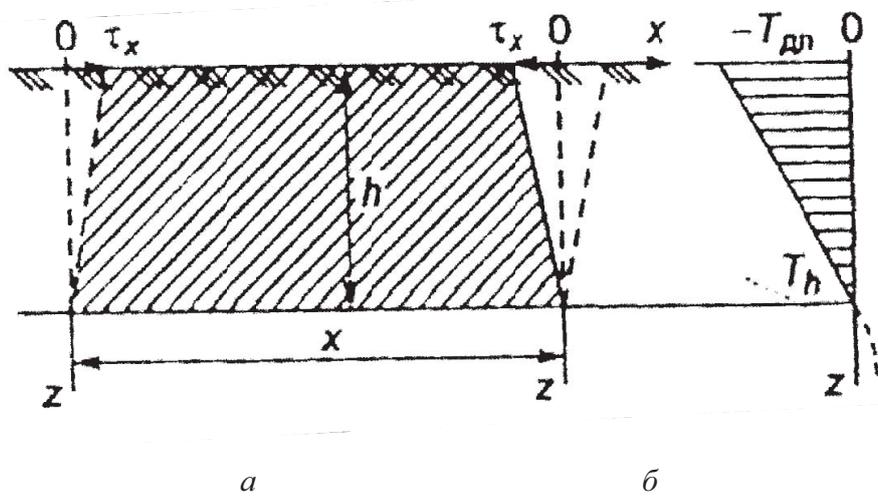


Рис. 1.4. Схема образования трещин в мерзлых грунтах:
а – расчетная схема; б – принятое в расчете изменение температуры мерзлого слоя с глубиной

Когда сопротивление мерзлого грунта сдвигу $\tau_{\text{вр}}$ будет меньше сдвигающего напряжения τ_x , то произойдет разрыв грунта и появится трещина. Расстояние между трещинами X определяется по формуле

$$X = \frac{2\tau_{\text{вр}}}{a_f c_f \frac{\Delta T}{h}}. \quad (1.2)$$

Ширина первичных трещин поверху чаще всего составляет 2–4 см, иногда 10 см, глубина – до 6 м. После образования первой трещины в массиве мерзлого грунта и дальнейшего понижения температуры возникают поперечные трещины, а постепенно весь промерзающий массив разбивается на отдельные полигоны; при этом трещины возникают также и внутри полигона из-за появления значительных напряжений при изгибе верхних слоев грунта.

Вторая причина образования трещин в промерзающих грунтах – это образование бугров пучения. Внутреннее давление в буграх пучения может достигать нескольких десятков атмосфер, что приводит к изгибу верхнего слоя грунта и образованию трещин. В эти трещины обычно изливается напорная вода, которая, замерзая, образует грунтовые наледи.

Льдообразование. Попадая в трещины, вода замерзает и образует ледяные жилы. Они могут расти за счет вторичного растрескивания и заполнения трещин льдом и оттаивать с заполнением образовавшейся полости грунтовым материалом (грунтовые жилы).

Жильные структуры подразделяются на четыре типа:

- 1) повторно-жильные льды;
- 2) изначально-грунтовые жилы;
- 3) первично-песчаные жилы;
- 4) псевдоморфозы по повторно-жильным льдам.

Повторно-жильные льды образуются ниже слоя сезонного оттаивания на периодически покрывающихся водой участках рельефа. Изначально грунтовые жилы возникают в слое сезонного промерзания в условиях недостаточного увлажнения. Первично-песчаные жилы образуются главным образом в арктических и субарктических районах в условиях недостаточного увлажнения и интенсивного ветра. Зимой сильный ветер сдувает снежный покров и заполняет появляющиеся морозобойные трещины песком. Псевдоморфозы по повторно-жильным льдам возникают в результате вытаивания ледяных жил и заполнения этого пространства грунтом. Характерные примеры развития мощных повторно-жильных (клиновидных) льдов приведены на рис. 1.5–1.7 а, б. Интенсивность морозобойного растрескивания и частота появления морозобойных трещин возрастают с юга на север.

Криогенное выветривание. Процесс развивается в скальных грунтах за счет периодического замерзания и оттаивания воды в трещинах. Интенсивность процесса зависит от числа циклов промерзания–оттаивания скального грунта, амплитуды температурных колебаний, градиента температуры в грунте и количества воды в трещинах. Увлажненные грунты больше подвержены разрушению, чем сухие. Продуктами разрушения являются глыбы, щебень, дресва, песок и пыль.

Морозное пучение. Увеличение объема грунтов при промерзании, которое в природных условиях (вследствие неоднородности их состава, неравномерности распределения влаги и различия в условиях питания подземными водами) всегда бывает неравномерным, называется *морозным пучением* грунтов. При промерзании пучение грунтов происходит как в связи с увеличением объема содержащейся в них воды (на 9 %) при переходе ее из жидкого в твердое состояние, так и в результате замерзания новых порций воды, мигрируемой под действием молекулярных сил из соседних непромерзших областей грунта.

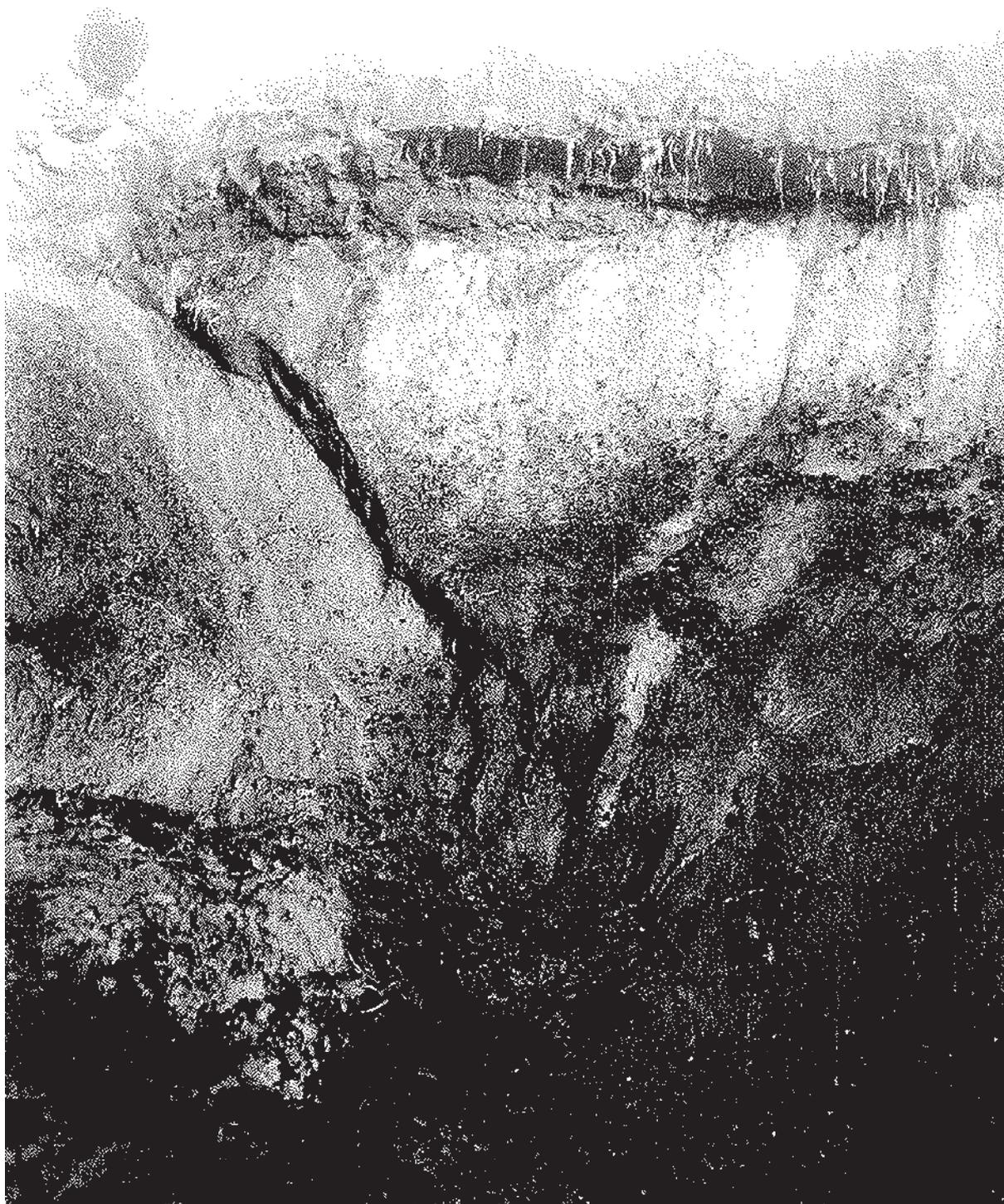


Рис 1.5. Характерная клиновидная жила подземного льда в обнажении на террасе р. Казачка (Чукотка, фото С. В. Томирдиаро)

В процессе морозной миграции, особенно в случае отсутствия подтока воды извне, возникает значительное перераспределение влаги. Минеральные прослойки при этом испытывают внутриобъемную компрессию и оказываются несколько обезвоженными в результате удаления из них воды в места образования ледяных прослоек. При отсутствии подтока воды извне (замкнутая система) общая величина морозного пучения грунтов будет значительно меньше, по сравнению с увеличением их объема при возможности подтока воды извне (открытая система); есть область питания водой, например грунтовые воды или талые обводненные грунты.



Рис . 1.6. Ледяные жилы в обрыве высотой около 40 м, размываемом рекой (по П. Ф. Швецову)

Чем медленнее происходит процесс промерзания грунтов, тем больше их пучение, так как к фронту промерзания успевают подтягиваться большие количества воды, преодолевая сопротивление трению по пути движения. Способность к пучению грунтов возникает в пылеватых, глинистых и (слабее) в песчаных грунтах. Крупнозернистые песчаные грунты не подвержены пучению. С понижением отрицательной температуры пучение замедляется, а затем прекращается вовсе.