



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# ГЕОКРИОЛОГИЯ. ЧАСТЬ 2

БРУШКОВ  
АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ

---

ГЕОЛФАК МГУ

---

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН  
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ  
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ  
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.  
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ  
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ  
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,  
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,  
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ  
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

## Содержание

<b>1</b>	<b>Лекция 1. Структурные грунты</b>	<b>7</b>
1.1	Развитие структурных грунтов . . . . .	7
1.2	Процессы, приводящие к упорядоченности . . . . .	7
1.3	Пятна-медальоны . . . . .	7
1.4	Сортированные круги . . . . .	8
1.5	Могильные камни . . . . .	8
1.6	Выпучивание свай . . . . .	8
1.7	Каменные потоки . . . . .	9
1.8	Каменные кольца . . . . .	9
1.9	Морозобойное растрескивание. Жильные льды . . . . .	9
1.10	Ледяные жилы и полигональные формы . . . . .	9
1.11	Рост ледяных жил и образование валиков . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Лекция 2. Криогенные процессы.</b>	<b>13</b>
2.1	Морозобойное растрескивание и жильные льды . . . . .	13
2.1.1	Формирование ледяных жил в криолитозоне . . . . .	13
2.2	Формирование ледяных жил . . . . .	13
2.3	Пластовые льды . . . . .	16
2.4	Основные концепции происхождения пластовых льдов . . . . .	16
2.5	Виды льда Строение, химический и изотопный состав пластовых льдов. Пузырчатый лёд. Строение льда . . . . .	17
2.6	Химический состав пластовых льдов и водной вытяжки из вмещающих отложений . . . . .	18
2.7	Захороненные льды . . . . .	19
2.8	Ледяные образования в пещерах . . . . .	19
2.9	Морозное выветривание . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Лекция 3. Криогенные процессы и явления</b>	<b>22</b>
3.1	Склоновые процессы в криолитозоне . . . . .	22
3.2	Криогенный крип . . . . .	22
3.3	Морозный крип . . . . .	22
3.4	Солифлюкция . . . . .	24
3.5	Грязевой поток . . . . .	28
3.6	Каменные глетчеры . . . . .	30
3.7	Наледи . . . . .	30
3.8	Криотурбация. . . . .	33
3.9	Засоление . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Лекция 4. Химические процессы криолитозоны</b>	<b>37</b>
4.1	Химические реакции и процессы в промерзающих и протаивающих по- родах . . . . .	37
4.2	Железомарганцевые конкреции . . . . .	40
4.3	Процессы и явления, связанные с деятельностью ледников . . . . .	40
4.4	Ледники и ледниковый рельеф . . . . .	41



4.5	Типы ледников . . . . .	42
4.6	Процессы льдообразования . . . . .	42
4.7	Зоны льдообразования . . . . .	42
4.8	Морены . . . . .	43
4.9	Питание и абляция в леднике . . . . .	44
4.10	Виды абляции по месту расположения . . . . .	44
4.11	Открытый и закрытый ледник . . . . .	44
4.12	Различие тёплых и холодных ледников . . . . .	45
4.13	Работа ледника. Механическая аналогия . . . . .	46
4.14	Шельфовый ледник. Айсберг . . . . .	47
4.15	Фьорды . . . . .	49
4.16	Каменные глетчеры . . . . .	50
4.17	Различия явлений и процессов . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Лекция 5. Природная динамика</b>	<b>52</b>
5.1	Природная динамика . . . . .	52
5.2	Естественная динамика мерзлых толщ . . . . .	55
5.3	Астрономические причины . . . . .	57
5.4	Прецессия оси . . . . .	57
5.5	«Парадокс молодого Солнца» . . . . .	58
5.6	Палеотемпературы: докембрий . . . . .	58
5.7	Период «ледяного шара (снежка)» . . . . .	58
5.8	Отсутствие выветривания . . . . .	58
5.9	Палеотемпературы: фанерозой . . . . .	60
5.10	Палеотемпературы: кайнозой . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Лекция 6. Динамика мерзлотных условий</b>	<b>62</b>
6.1	Динамика мерзлотных условий . . . . .	62
6.1.1	Что происходило в последние 5 млн лет . . . . .	63
6.2	Динамика мерзлых толщ . . . . .	64
6.3	Влияние изменений климата и поверхности на температурный режим горных пород . . . . .	65
6.3.1	Изменения . . . . .	65
6.3.2	Криология планет . . . . .	65
6.3.3	Спутник Ганимед . . . . .	70
6.3.4	Спутники Сатурна . . . . .	70
6.3.5	Плутон и спутник Харон . . . . .	72
6.3.6	Подземные воды в криолитозоне . . . . .	73
6.4	Образование и существование мерзлоты мощности . . . . .	73
6.4.1	Мерзлые толщи как криогенные водоупоры, типизация подзем- ных вод в криолитозоне . . . . .	73
6.4.2	Классификация таликов – типы . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Лекция 7. Подземные воды криолитозоны. Методы исследования геокриологии</b>	<b>77</b>
7.1	Талики . . . . .	77

7.2	Гидрогенные талики: . . . . .	77
7.3	Классификация таликов . . . . .	77
7.3.1	По типам . . . . .	77
7.3.2	По классам . . . . .	78
7.3.3	Общая классификация таликов . . . . .	78
7.4	Типы подземных вод в клиолитозоне, их особенности динамики . . . . .	79
7.5	Криогенная метаморфизация подводных вод . . . . .	80
7.6	Эвтектические температуры водно-солевых систем . . . . .	80
7.7	Эвтектические температуры водно-солевых систем . . . . .	81
7.8	Моделирование процесса промерзания . . . . .	82
7.9	Артезианская система . . . . .	84
7.10	Многолетнемерзлые породы . . . . .	84
7.11	Гидрогеологические массивы . . . . .	85
7.12	Гидрогеологические адмассивы . . . . .	86
7.13	Адартезианские бассейны . . . . .	86
7.14	Гидрогеологические массивы . . . . .	87
7.15	Методы исследований геокриологии . . . . .	90
7.15.1	Цель геокриологической съемки . . . . .	90
7.15.2	Задачи геокриологической съемки – изучение: . . . . .	90
7.16	Этапы проведения геокриологической съемки. Ландшафтно-ключевой метод . . . . .	90
7.17	Временные этапы проведения геокриологической съемки . . . . .	91
7.18	Маршрутные исследования при геокриологических исследованиях . . . . .	91
7.19	Методы изучения свойств мерзлых грунтов . . . . .	95
7.20	Определение температуропроводности . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Лекция 8. Методы исследования геокриологии</b>	<b>98</b>
8.1	Развитие структурных грунтов . . . . .	98
8.2	Реологические деформации . . . . .	98
8.2.1	Ползучесть и разрушение . . . . .	98
8.2.2	Кривая длительной прочности . . . . .	99
8.2.3	Механические свойства . . . . .	99
8.2.4	Длительное деформирование . . . . .	99
8.3	Методы определения механических свойств мерзлотных грунтов . . . . .	99
8.3.1	Применение геофизических методов при геокриологической съемке . . . . .	100
8.3.2	Методы прогноза изменения геокриологических условий при освоении криолитозоны . . . . .	100
8.3.3	Методы мелиорации мерзлых пород как оснований сооружений . . . . .	101
8.3.4	Методы мелиорации мерзлых пород как оснований сооружений . . . . .	101
8.4	Принципы строительства инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах и способы обеспечения устойчивости оснований фундаментов . . . . .	101
8.4.1	Строительство дорог . . . . .	102
8.4.2	Строительство трубопроводов . . . . .	102

8.5	Глобальное изменение климата и его последствия . . . . .	102
8.5.1	Разрушение берегов . . . . .	103
8.6	Мониторинг криолитозоны и моделирование тепловых процессов . . . .	103
8.7	Геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации соору- жений на многолетнемерзлых грунтах . . . . .	105
8.8	Эмиссия парниковых газов . . . . .	106
8.9	Арктический шельф . . . . .	106
8.10	Устойчивость сооружений в криолитозоне . . . . .	106
8.11	Лабораторные испытания мерзлых грунтов. Отображение результатов испытаний на карте . . . . .	108
8.12	Основные современные проблемы . . . . .	109
8.13	Газ и газовые гидраты . . . . .	110
8.14	Эффект самоконсервации гидратов газов . . . . .	110
8.15	Ямальский кратер . . . . .	110
8.16	Живое вещество в криолитозоне . . . . .	111
8.17	Криология планет . . . . .	111
8.18	Приливы на Земле . . . . .	111

## Лекция 1. Структурные грунты

### Развитие структурных грунтов

Развитие структурных грунтов зависит от:

- состава отложений
- водонасыщения (влажности пород)
- условий замерзания (формирующегося температурного режима)
- времени и истории развития этих форм

### Процессы, приводящие к упорядоченности

*Структурные грунты* (*структурные почвы*) включают формы и процессы, которые приводят к определенной упорядоченности поверхности и строения верхних горизонтов литосферы. К таким формам относятся и *пятна-медальоны* (наиболее распространены в тундровой зоне) – грязевые пятна. При высыхании этих пятен образуются трещины небольшого размера. Первые десятки сантиметров окружены либо остатками растительного покрова, либо небольшим крупнообломочным материалом.

### Пятна-медальоны

Развитие пятен-медальонов (Рис. 1.1) начинается со стадии образования трещин (высыхание, а значит изменение влажности). Происходит разрыв сплошности верхних горизонтов, начинается промерзание. Поверхность промерзания часто параллельна фронту промерзания, в связи с чем фронт промерзания промерзает сверху. При этом открытая трещина приводит к отводу тепла, что делает фронт неоднородным с выпуклой конфигурацией.

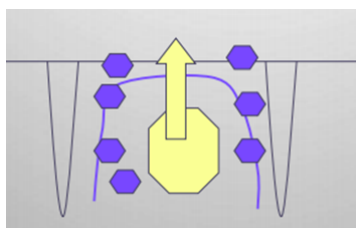


Рис. 1.1. Развитие пятен-медальонов

**Процесс выпучивания** вокруг обломочного материала представляет собой следующее: крупнообломочный материал вытягивается к поверхности, благодаря выпучивания поднимается и за счет выпуклой конфигурации оказывается на границах образования. Данный процесс приводит к дифференциации этого материала. Подобные процессы характерны для криолитозоны.

## Сортированные круги

Особенность возникновения сортированных кругов (sorted circles) заключается в том, что из-за большого размера объем не становится замкнутым, следовательно, высокого давления не возникает, сортировка происходит по краям к границам, где происходит промерзание и появляются сортированные круги.

Такие образования называют *кипящими котлами*, так как из-за перемешанного материала кажется, будто внутри действительно идет кипение. На деле, при заполнении пространства возникает циркуляция, появляется конвекция, в некоторых случаях даже конвективные ячейки, что может длиться многие столетия. Подобное многократное повторение приводит к тому, что в результате возникают структурированные формы.

## Могильные камни

Иногда возникают формы, которые в международной номенклатуре называют *могильными камнями* из-за особенностей их формы. Зачастую на их поверхности находится не широкий край - наоборот, он в результате этого процесса переворачивается, появляется особая неустойчивая позиция, необычная для природных процессов.

## Выпучивание свай

В любой области, которой присуще промерзание, характерно морозное выпучивание (Рис. 1.2).

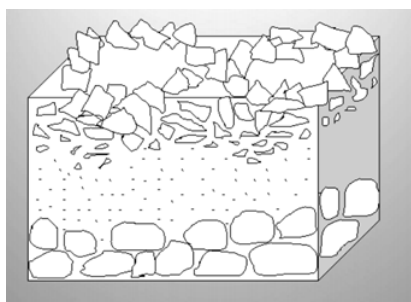


Рис. 1.2. Морозное выпучивание

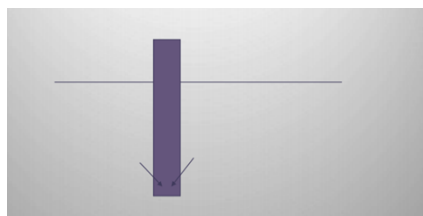


Рис. 1.3. Выпучивание свай

После установления свай в грунт (здания, опоры электропередач и так далее) при промерзании, находясь в этом массиве, поднимается поверхность вместе с промерзающим горизонтом. Нижняя часть свай еще находится в мерзлом грунте будучи заземленной, и протаивание происходит сверху.

Движение свай ввиду ее заземления происходит с запаздыванием относительно осадки протающего грунта. Также, иногда, когда свая поднимается, образуется полость, в которую попадает окружающий материал, в результате чего свая не может принять прежнее положение. Таким образом, каждый цикл оказывается, что свая поднимается на какую-то величину, происходит выпучивание свай (Рис. 1.3), что приводит к деформации старых домов, падению заборов и так далее.

Поэтому в инженерной практике существуют строительные нормы, которыми предусматривается определенная длина свай. Эта длина составляет 2 метра для

мерзлой породы, хотя в некоторых ситуациях и эти ограничения оказываются недостаточными – все зависит от следующих факторов:

- какой мощности слой пучения
- какова величина пучения
- каковы силы смерзания

Таким образом, для каждого конкретного случая необходимо производить расчеты глубины установки свай.

### Каменные потоки

Следующая форма имеет названия “*каменные потоки*”, “*каменные поля*”, “*каменные полосы*”. Часто, особенно на склонах, они носят название “*курумы*”, пришедшее с гор средней Азии, где развита данная форма. В России она чаще всего встречается в Южной Сибири и на Алтае. С этими курумами связаны определенные проблемы для инженерных сооружений, в особенности, для дорог. Существует опасность движения этой массы камней – крупных глыб, лежащих друг на друге. Возможных механизмов их движения несколько:

- ледники
- вода, падающая на каменный поток, концентрирующаяся и накапливающаяся на контактах
- промерзание на контактах, в результате которого поверхность поднимается вверх перпендикулярно склону, и, соответственно, движение будет субперпендикулярно склону, в направлении от склона
- оттаивание, в случае которого вектор силы тяжести направлен вниз не перпендикулярно склону, за счет чего движение этих обломков происходит вниз по склону.

### Каменные кольца

**Каменные кольца** также являются полностью природной формой, хотя трудно представить, что они не созданы в результате человеческой деятельности. Представленный на (Рис. 1.4) архипелаг Шпицберген после становления международной территорией стал природным заповедником, что запрещает какую-либо деятельность человека. Его поверхность не подвергалась никакому воздействию в ходе неприродных процессов.

## Морозобойное растрескивание. Жильные льды

### Ледяные жилы и полигональные формы

*Забойное растрескивание* – процесс, в то время как ледяные жилы и полигональные формы – явления, то есть результат этого процесса. Факторы рассматриваемого процесса включают:

- механические свойства пород,



Рис. 1.4. Каменные кольца, Шпицберген

- поверхностные воды,
- температурный режим зимой,
- историю и время.

Часто ортогональные решетки закладываются там, где есть линейные границы как на дороге или вдоль русла реки, а гексагональные – там, где материал на однородном субстрате, и как следствие – там можно наблюдать ортогональные гексагональные формы, различные многоугольники.

Такие сети, состоящие из полигональных трещин, широко встречаются в палеозоне. В качестве примера можно привести сетку на Марсе из таких же забойных трещин. Единственное отличие - на Марсе каждый полигон размером с футбольное поле.

Эти трещины – это результат хрупкого разрушения твердого тела вследствие возникновения растягивающих напряжений в этом теле. Растяжение, связанное с охлаждением – первая стадия образования этих трещин. При охлаждении все тела сжимаются, в том числе мерзлые породы. При этом коэффициент термического расширения и сжатия должен быть аддитивной величиной, то есть результатом сложения коэффициентов, составляющих этот материал. В грунтах, в особенности мерзлых грунтах, эти коэффициенты очень велики и сжатие очень сильное. Учитывая то, что охлаждение происходит с поверхности, то чем ближе к поверхности, тем больше растягивающее напряжение и возникновение трещин.

Длина трещины определяется разницей показателя растягивающего напряжения и прочности материала на разрыв. При кристаллизации вода обладает свойством расширяться, увеличиваться в объеме, при этом возникает воздействие на стенки, что мы не наблюдаем в геологических структурах, но очень часто наблюдаем в криолитозоне, а именно деформацию разных типов.

### Рост ледяных жил и образование валиков

У ледяных жил часто образуются валики на границах трещин за счет напряжения на стенках. Основная часть жил остается в породах в вечной мерзлоте, поэтому на следующую зиму возникает трещина. Когда происходит охлаждение, понижение

температуры, трещина возникает на прежнем месте образования. Это происходит потому, что прочность льда на разрыв меньше чем прочность грунтов на разрыв. Таким образом, трещинообразование на следующий сезон происходит по этой же самой жиле (Рис. 1.5).

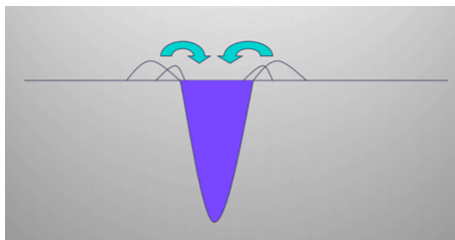


Рис. 1.5. Рост ледяных жил и образование валиков

Весной происходит снова попадание воды, замерзание, расширение, воздействие на стенки и, как следствие, увеличение валиков на границе трещин. Эти деформации часто видны на границах трещины.

*Повторно жильные льды* – это льды, пережившие многократное трещинообразование, попадание воды и ее замерзание. Вертикальная штриховка представляет собой элементарные жилки. По числу этих элементарных жилок можно посчитать, сколько лет льды формировались. Типичное время формирования таких льдов составляет сотни, иногда тысячи лет, необходимых для образования столь внушительного объема.

У жильных льдов также можно наблюдать “*плечики*” (shoulders) – выступы с двух сторон, по форме напоминающие плечики. Они свидетельствуют о том, что, скорее всего, имел место быть сингинез, то есть рост жил происходил при одновременном накоплении отложений вместе с этими плечиками – более чистыми участками скопления ледяных шнуров, сигнализирующими о генетическом накоплении. Это более льдистая часть вмещающих пород.

На фото запечатлены формы, находящиеся на Аляске (Рис. 1.6). На нем видно, что на границах растут ледяные жилы, а также присутствуют валики, которые образуются при деформации породы. В центре поверхность более низкая, чем валики, и валики приподняты над поверхностью. Такая поверхность носит название *лоу-центр полигон* (law center polygon).

В случае генетического или сингенетического промерзания у жил появляется различие. Сингенетические толщи и генетическое промерзание формируются после того, как сформировалась самая порода, отложения, но сингенетические толщи промерзают в процессе самого накопления, а генетические – уже после него.

При этом и в тех, и в других толщах могут присутствовать повторно жильные льды, однако они являются разными, что является одним из важнейших признаков эпигенетических и сингенетических отложений. На (Рис. 1.7) видно, что форма этих ледяных жил разнородная, неодинаковая. То есть поверхность пород была неизменной, и верхняя часть сформировалась в статическом положении поверхности.

Сингенетическое жило имеет довольно сложную форму. Когда положение поверхности изменялось, происходило накопление отложений, потом его остановка и





Рис. 1.6. Полигоны с низким центром

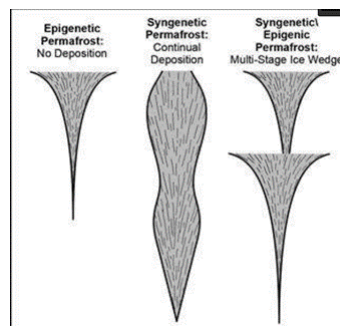


Рис. 1.7. Формы ледяных жил

так далее, то такие жилы служат индикаторами условий. Особенность формы сингенетического жила объясняется следующей цепочкой процессов. Изначально жила находилось на определенном уровне, и происходило формирование такого же жила, как и на (Рис. 1.7). Однако в результате накопления отложений в условиях его высокой скорости форма изменилась.

Если скорость нароста высокая, то жилы истончаются, и накопление не успевает пройти в полной мере. Как только поверхность останавливается и осадконакопление также приостанавливается или уменьшаются его объемы то появляются условия для длительного роста и, соответственно, увеличения размеров поперечных этой жилы.

## Лекция 2. Криогенные процессы. Морозобойное растрескивание и жильные льды

### Формирование ледяных жил в криолитозоне

На (Рис. 2.1) показаны изменения в размере (глубина и ширина) ледяных жил в зависимости от изменения среднегодовой температуры пород (чем ниже температура, тем глубина проникновения трещин больше, и увеличиваются их поперечные размеры). Они начинают появляться при высоких среднегодовых температурах (близких к нулю).

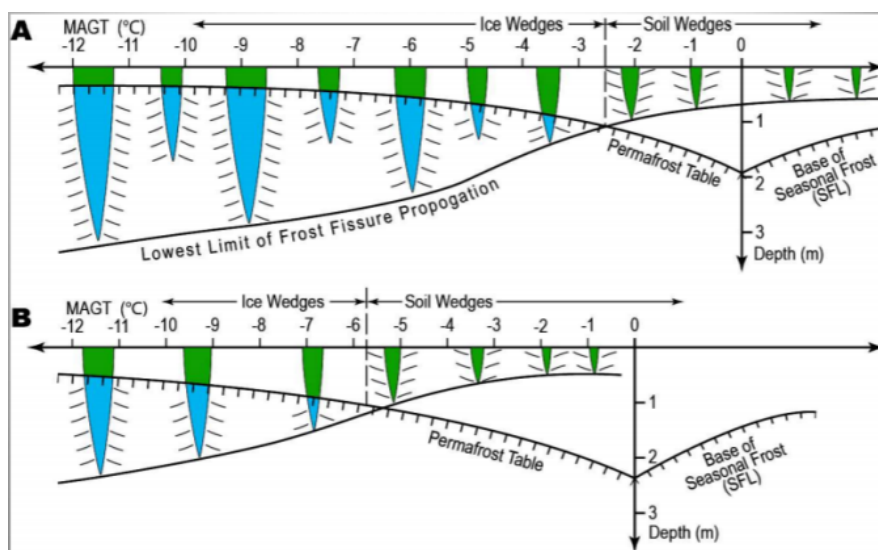


Рис. 2.1. Формирование ледяных жил в зависимости от температуры (изменение сезонного талого слоя зависит от состава породы, в данном случае вариант А – глиняные почвы, вариант В – песчаные; также от амплитуды по классификации Кудрявцева)

Примеры ледяных жил в разных породах показаны на (Рис. 2.2).

### Формирование ледяных жил

На (Рис. 2.4) трещины не возникают одновременно. Сначала (1) по поверхности бегут крупные трещины, затем (2) поперечные, пересекающие крупные трещины, часто под прямым углом, затем (3) возникает третья (более частая) генерация, четвертая, пятая и т.д. Так как одни трещины возникают раньше, другие позже, то они могут отличаться по строению. Рисунок, возникающий в результате трещинообразования, называется *теселация*.

На (Рис. 2.3) представлен пример – пятно торфа. Расстояние между трещинами в торфяном пятне меньше, чем в породе рядом, потому что коэффициент температурного расширения больше и меньше прочность на разрыв. На рисунках 2.5 – 2.7 представлены варианты ледяных жил (арктическое побережье).

**Механизм роста ледяных жил** (Рис. 2.8): возникла трещина, заполнилась льдом, затем происходит новый цикл трещинообразования, новый цикл кристаллизации, увеличение жилы в размерах (1). Если жила – это сначала клин (2), то

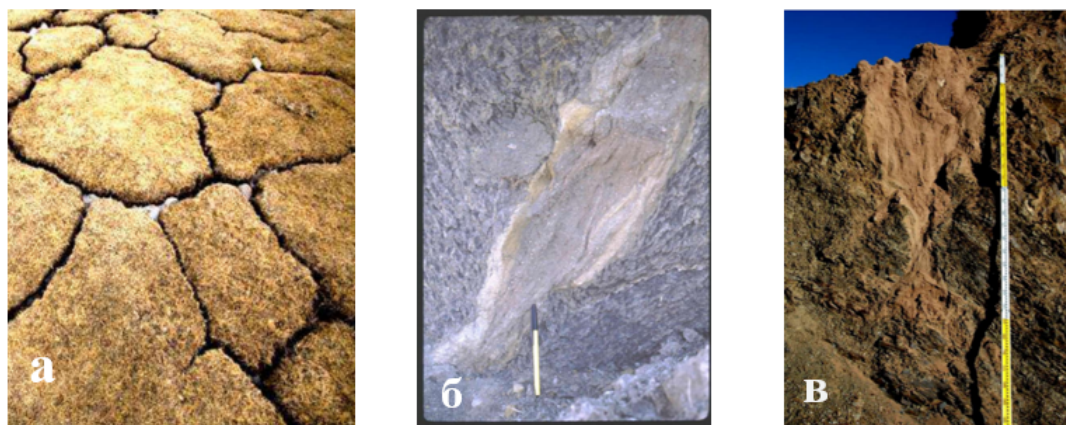


Рис. 2.2. а - жилы сезонно-мерзлого слоя (грунтовые клинья с сезонным (зимним) ледяным наполнением в Сибе), б - песчаные жилы (Детали Плейстоценового песчаного тесселлона к западу от Ларами, показывающие пересекающиеся песчаные пласты, заполняющие бывшие сужающиеся трещины), в - лёссовые жилы (Лесс тесселлон в коренной породе на высоте 4226 м в деревне Желтая Река, Сычуань Провинция, Китай. В верхней части имеется небольшой почвенный клин, заполненный более молодым лессом)



Рис. 2.3. Полигоны вокруг и над торфяным болотом в Тамуре, Западная Сибирь (1 – трещины в слагающих рядом породах, 2 – трещины на торфяном пятне)

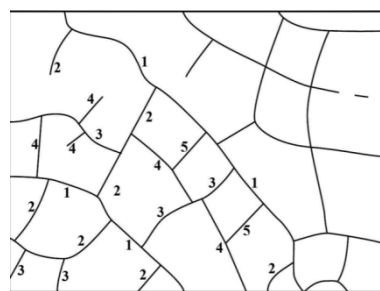


Рис. 2.4. Формирование ледяных жил (Типичное расположение ледяных клиньев первого, второго и более высокого порядка)

дальнейшее ее развитие напоминает «каплю» (3), так как плотность льда меньше единицы, а плотность грунтов вмещающих пород около двух, поэтому лед – это такой материал, который склонен испытывать «диафиризм», т.е. должен всплывать, так как он более легкий. И поскольку эти жилы существуют десятки тысяч лет, то за это время такой механизм деформирования ледяных жил должен происходить (Рис. 2.9).

Также практически всегда отсутствует минеральная составляющая (Рис. 2.10). Такие острова могут достаточно быстро разрушаться (в течение нескольких лет).

Область развития таких мощных повторно-жильных льдов (многометровой мощности) на (Рис. 2.11) обозначены черным цветом (Евразия и Северная Америка),



Рис. 2.5. Ледяная жила (левое фото – отдельная жила в сравнении с ножом, правое фото – жилы в сравнении с человеческим ростом)



Рис. 2.6. Повторножилые льды (в таких нет минеральной составляющей)

зеленым обозначена область распространения сплошной мерзлоты.

Здесь прослеживается интересная закономерность: в Евразии область на северо-востоке нашей страны у побережья в области сплошной мерзлоты, а в Северной Америке тоже похожие условия (северное побережье Аляски), но интересно, что на Аляске этот ледовый комплекс распространен и в области несплошной мерзлоты на южной части Аляски. Это странно, но если взглянуть на карту распространения последнего крупного оледенения (Рис. 2.12) (примерно 20-25 тысяч лет назад), то именно эта область, которая не покрывалась ледником. Потому что в то время в областях, не покрытых ледником, продолжалось континентальное осадконакопление, в основном в речных долинах.

На этих поймах рек росли жилы, происходило морозобойное растрескивание и было достаточно времени для образования мощного ледового комплекса.

Какова судьба этих комплексов? При таянии льда эти трещины заполняются минеральным материалом, потому что есть большое свободное пространство (глина, песок, камень и т.д.). Это *псевдоморфозы* (Рис. 2.13).



Рис. 2.7. «Ледяной клин» (массив льда, выходящий на поверхность (центральная Якутия))

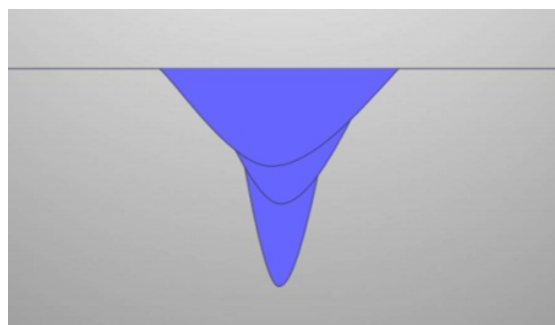


Рис. 2.8. Рост и развитие ледяных жил



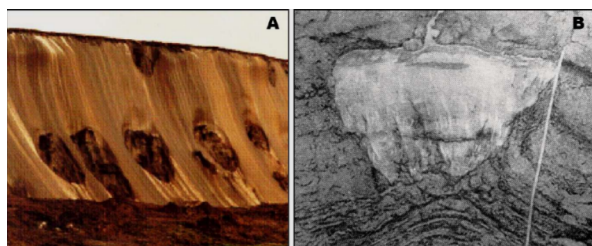


Рис. 2.9. «Всплывание» в повторно-жильных льдах (Ледо-клиновые сооружения с вертикальным течением. А. ледовый комплекс, обнаженный в 20-метровом обрыве на большом Ляховском острове. В. ледяной клин (высотой 0,8 м) на террасе реки Яны, показывающий деформацию подстилающих пластов)



Рис. 2.10. Мощные повторно-жильные льды (ледовый комплекс): Сибирь

## Пластовые льды

*Пластовые льды* – ледяные тела мощностью более 0,3-0,5 м с горизонтальными размерами, значительно превышающими вертикальные (Втюрин, 1975). *Пластовые льды (massive ice beds)* – ледяные тела мощностью более 1 м с массовой долей льда более 250% (Маскау, 1971). Пластовые льды отличаются от жильных льдов прежде всего тем, что это часто плат (протяженный или не очень). Пластовые льды достаточно широко распространены, но видимых поверхностных признаков образования нет, поэтому очень тяжело заметить.

### Основные концепции происхождения пластовых льдов

На (Рис. 2.15) представлена карта, на которой флажками указаны места, где представлены пластовые льды. Они широко встречаются (по всему побережью Югорского полуострова, весь Ямал). И далее, за пределами карты, на западе до Каниного

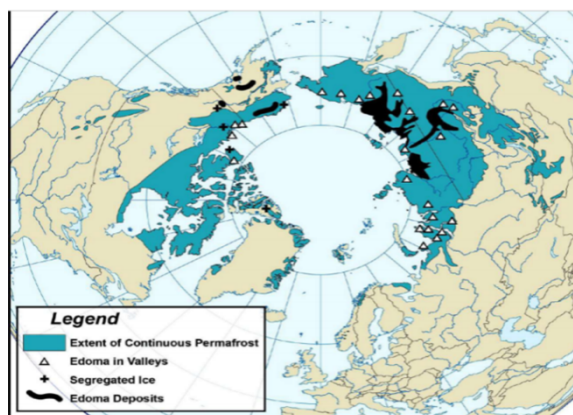


Рис. 2.11. Области развития повторно-жильных льдов (ЕДОМА – ледяной комплекс)

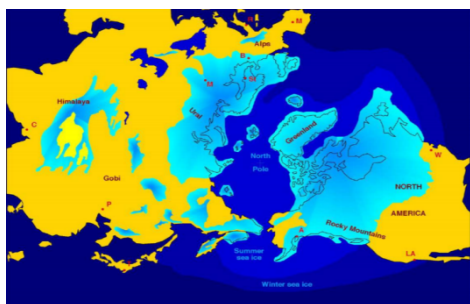


Рис. 2.12. Ледяной покров в плейстоцене (Оледенение Северного полушария во время последнего ледникового максимума. Создание от 3 до 4 км (от 1,9 до 2,5 м, что соответствует глобальному падению уровня моря примерно на 120 м (390 футов)



Рис. 2.13. Псевдоморфозы

носа, весь Таймыр.

На (Рис. 2.16) представлен один из вариантов разрезов пластовых льдов.

### Виды льда Строение, химический и изотопный состав пластовых льдов. Пузырчатый лёд. Строение льда

Ледниковый лед отличается тем, что в нем пузырьки дендритовой формы. А пузырьки в пластовых льдах совершенно обычные, похожие на пузырьки озерного льда (шарообразные, вытянутые) (Рис. 2.17).

Очень часто присутствует полосчатость (Рис. 2.18). Грунтовые прослойки они состоят из минеральных частиц (глинистых, песчаных, даже иногда бывают прослойки галечников) (Рис. 2.19).

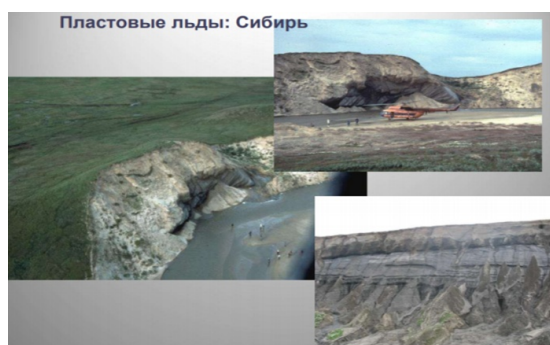


Рис. 2.14. Пластовые льды



Рис. 2.15. База данных «Пластовые льды» (Streletskaia et al., 2001)

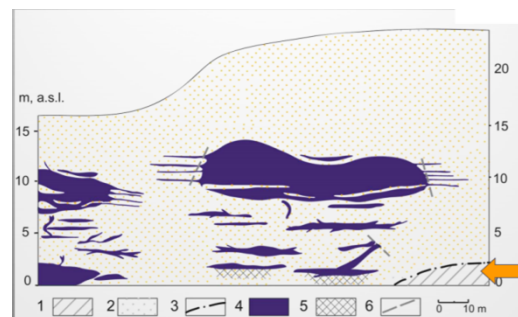


Рис. 2.16. Западное побережье Байдарацкой губы. Состав и строение отложений, вмещающих пластовые льды

### Химический состав пластовых льдов и водной вытяжки из вмещающих отложений

Если сравнить водные вытяжки из вмещающих отложений и пластового льда, (если они происходили из воды, которая содержится во вмещающих отложениях), то состав воды был бы близкий. Если в пластовом льду преобладают карбонаты и бикарбонаты, то во вмещающих отложениях – сульфаты (Рис. 2.20).

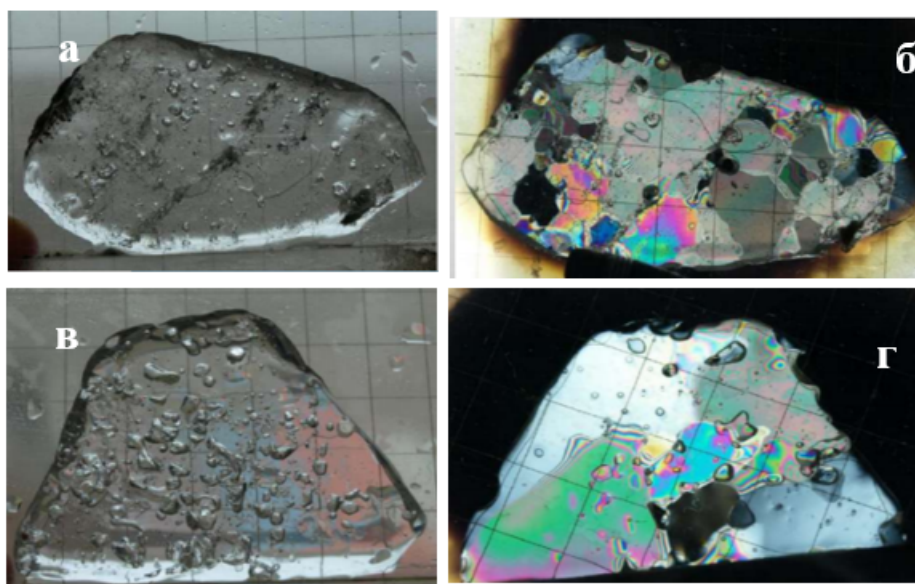


Рис. 2.17. Виды пластового льда (а и б – стекловидный лёд с редкими грунтовыми прослоями; в и г – пузырчатый лёд)



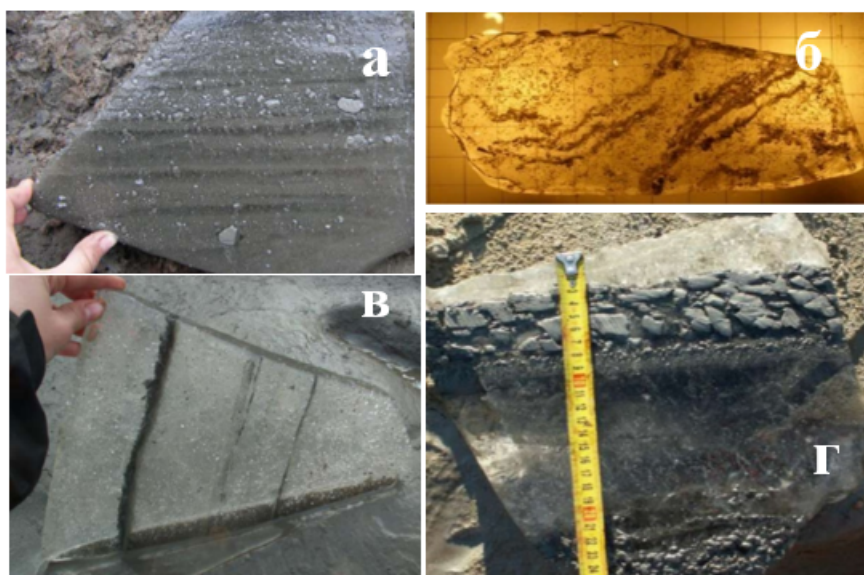


Рис. 2.18. Строение пластовых льдов (а – слоистый лед; б – слоистый деформированный лед (шаг сетки 1 см); в – пузырчатый лед; г – стекловидный лед с глинистыми прослоями)

### Захороненные льды

Чаще всего это ледниковый лед, хотя есть случаи, когда захороняются другие типы льда (например, морских). На (Рис. 2.21) представлена карта распространения ледниковых покровов для Северной Америки и показана область распространения захороненных льдов. Как правило, эти льды выглядят как пластовые льды, но по своему строению это типичный ледниковый лед. Захороненные льды встречаются часто, но немного реже пластовых льдов. Также иногда можно встретить захороненные снежники.

### Ледяные образования в пещерах

Зимой, когда на поверхности низкие температуры и холодный плотный воздух, он опускается в карстовые полости или пещеры, а летом воздух теплый, более низкой плотности, он не может проникать в эти полости или пещеры. Из-за того, что летом теплый воздух находится наверху, в пещерах летом нет вентиляции, соответ-

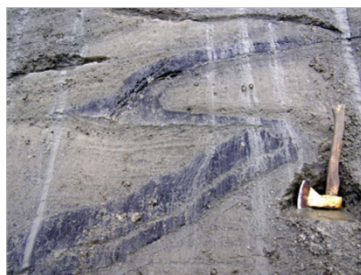


Рис. 2.19. Складки в пластовых льдах



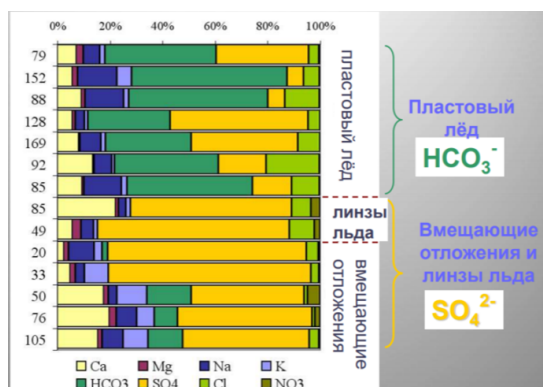


Рис. 2.20. Химический состав пластовых льдов и водной вытяжки из вмещающих отложений (2006)



Рис. 2.21. Захороненные льды (распределение захороненного ледникового льда и залежей ледяного застоя по отношению к ледовым окраинам и двум стадиям отступления бывшего Лаврентидного льда. Лист на севере Америки)

ственно там находится опасно, так как повышалась концентрация углекислого газа. Из-за того, что зимой проникает холодный воздух, в итоге понижается среднегодовая температура и поэтому мерзлота возникает там, где ее в принципе нет (например, Урал, пещеры Кавказа, Алып). Но часто эта мерзлота присутствует в виде ледяных образований, потому что в пещеру легко попадает вода (Рис. 2.22). Схематическое изображение появления ледяных образований представлено на (Рис. ??).

## Морозное выветривание

Из-за замерзания и оттаивания воды процессы выветривания происходят гораздо быстрее.

**Морозное (криогенное) выветривание** В.Н. Коничев предложил коэффициент морозного выветривания ( $CW_1$ ), показывающий, в какой степени породы преобразованы процессом выветривания. Этот коэффициент рассчитывается так:

$$CW_1 = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{F_2}{F_1} \quad (2.1)$$

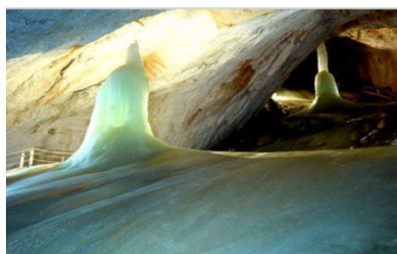


Рис. 2.22. Ледяные образования в пещерах (а – ледяные сталагмиты (вверху) и слоистый лед; б – полосатый лед, покрывающий стены пещеры Верфен, Австрия)

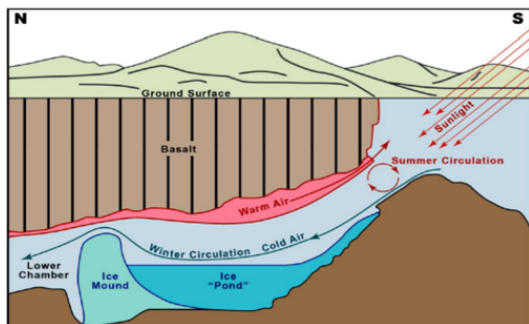


Рис. 2.23. Диаграмма, показывающая характер движения воздуха и накопления льда в ледяной пещере Канделария, штат Нью-Мексико

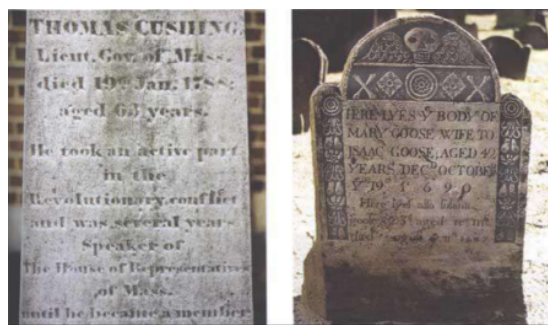


Рис. 2.24. Устойчивость разных пород к выветриванию (эти выветрившиеся надгробия - из захоронения в Бостоне, штат Массачусетс. Маркер слева, высеченный в мраморе, сильно выветрился, ослабляя надпись. Маркер справа, сделанный из сланца, гораздо более устойчив к эрозии)

где  $Q_1$  - содержание кварца ( %) во фракции от 0,05 до 0,01 мм;  $Q_2$  - содержание кварца ( %) во фракции от 0,1 до 0,05 мм;  $F_1$  - содержание полевого шпата ( %) во фракции от 0,05 до 0,01 мм  $F_2$  - содержание полевого шпата ( %) во фракции от 0,1 до 0,05 мм. На графике показана зависимость среднегодовой температуры пород и коэффициента морозного выветривания (Рис. 2.25). Чем ниже температуры, тем больше будет замерзание.

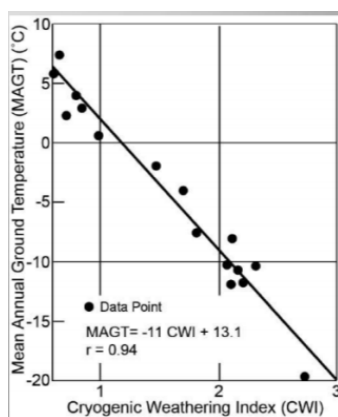


Рис. 2.25. Зависимость среднегодовой температуры пород и  $CW_1$

**Термокарст** Оттаивание мерзлых пород и деформация поверхностей и горных пород, которая при этом происходит. Он возникает при большой льдистости мерзлых толщ. Если мерзлые породы высокольдистые, если содержат подземные льды, в этом случае при оттаивании возникают большие деформации. Вот этот процесс оттаивания и развития значительных деформаций и называется *термокарст*. Для развития термокарста обязательно должна быть льдистая толща, также чтобы эта толща была близко к поверхности и само оттаивание.

## Лекция 3. Криогенные процессы и явления

### Склоновые процессы в криолитозоне

Развитие склоновых процессов в криолитозоне определяется составом их отложений, условиями промерзания, влажности. Теми факторами, которые определяют развитие всех других процессов в криолитозоне. Много разных процессов, часто сочетающихся на склонах, которые иногда бывает трудно выделить.

#### Криогенный крип

Прежде всего наблюдается криогенный крип (cryogenic creep). *Крип* в механике — это пластическая деформация. В данном случае криогенным крипом называется явление движения отложений на склоне, которое происходит в результате пучения.

Помимо криогенного крипа (движения по склону), наблюдается термогенный крип (thermal creep) и гидрогенный крип (hydro creep). Характерный пример термогенного крипа — какая-нибудь осыпь в Крыму.

Почему двигаются песчинки или частички минеральных отложений на склоне после того, как они пришли в некоторое равновесие? Они двигаются, но мы не видим и не ощущаем этого движения. Это движение происходит, в том числе, за счёт «термогенного крипа». За счёт изменения температуры происходит расширение/сжатие этих частиц и в результате такого циклического изменения объёма происходит это движение.

Точно так же можно выделить гидрогенный крип — это изменения объёма, увеличение и уменьшение в результате изменения влажности, содержания воды в отложениях. Может меняться объём, может происходить движение по склону отложений в результате этих явлений.

Выделяют две разновидности криогенного крипа:

- 1) Морозный крип (frost creep) — тот, который возникает в результате пучения, изменения объёма пород при промерзании.
- 2) Крип за счёт игольчатого льда (needle ice creep). Образуются эти иглы в начале промерзания, они могут приподнимать объекты, в том числе, обломки пород и это движение на склоне приводит к тому, что эти обломки начинают скатываться или как-то двигаться вниз.

#### Морозный крип



Рис. 3.1. Сезонотальный слой, находящийся в талом состоянии

Это сезонотальный слой. Находится в талом состоянии. Здесь толща мерзлоты на склоне. Затем этот слой сезонного оттаивания начинает промерзать. Он увеличивается в объёме. На (Рис. 3.2) условно показано, что его объём увеличился при замерзании. Как вы знаете, пучение, увеличение объёма за счёт перехода воды в лёд, за

счёт того, что вода двигается к фронту промерзания. Образование ледяных шпир приводит к увеличению объёма. Объём и мощность этого слоя увеличивается. Промерзание этого слоя происходит осенью.

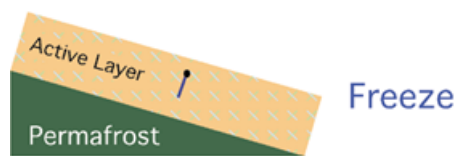


Рис. 3.2. Промёрзший слой сезонного оттаивания

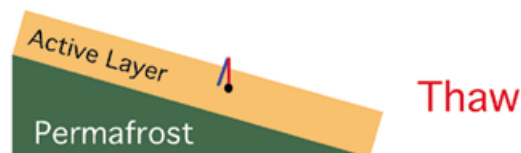


Рис. 3.3. Оттаявший слой сезонного оттаивания

А весной происходит его оттаивание, осадка этих отложений при оттаивании уменьшает объём. Эти ледяные включения оттаивают и общий объём породы уменьшается. Такие циклические движения приводят к тому, что появляется вектор движения по склону. Увеличение объёма при промерзании перпендикулярно склону, а когда происходит осадка – это происходит под воздействием силы тяжести. Вектор силы тяжести направлен вертикально, то есть при увеличении объёма вектор этого движения отложений перпендикулярен склону, а при осадке он направлен в сторону вектора силы тяжести, поэтому здесь возникает возможность для движения. Сложение этих векторов приводит к тому, что возникает вектор, направленный вдоль склона. Такие циклические движения и этот небольшой вектор (разность между поднятием перпендикулярно склону и опусканием вертикально под действием силы тяжести) приводят к тому, что весь слой начинает двигаться. Причём он может двигаться по-разному.

Экспериментально и в полевых условиях было показано, что скорости движения на разной глубине могут быть разные. Кажется, что скорости на поверхности должны быть больше, но здесь не всё так просто: особенность этого движения в том, что это не всегда так. Может быть максимальная скорость на поверхности, а может быть пробковое течение, когда движется весь слой (вся масса течёт вдоль, как макаронины, когда её выдавливают). Разнообразие вариантов зависит от свойств отложений, от возможности скольжения по склону и так далее.

Иногда такое движение называют *десорбцией*. В физике газов есть явления десорбции и абсорбции газовых молекул, поэтому мы остановимся на морозном крипе. Происходит увеличение объёма и движение от плоскости склона, а затем опускание по вертикали, по вектору силы тяжести. Соответственно, эта масса (крип) движется вниз по склону. Крип может быть криогенным (увеличение объёма при замерзании/оттаивании), термогенным и гидрогенным.

Проводились исследования, которые показывали скорости крипа за счёт игольчатого льда: от первых сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Самая большая величина – участки мерзлоты на севере Японии. Там почти полметра (45 см) в год происходит движение отложений на склоне за счёт этого явления.

Если говорить о морозном крипе, движении, возникающем за счёт пучения (сначала увеличение объёма, затем – осадка при оттаивании), то скорости примерно такие же. Здесь показаны сантиметры в год. Тоже от единиц сантиметров до 29, 38

см в год в Колорадо. Не очень большие скорости, но, тем не менее – 20-30 см в год – это заметное движение на склоне.

Местоположение	Условия	Годы	Характеристика	Морозный крип, см/год	Источник
Cape Thompson, Alaska, 70 °N	Высокоширотная мерзлота	—	Пятна-медальоны, высокопучинистые отложения	32,5	Everett, 1966
Signy Is., South Orkney Is., 62 °S	Приморская низменность, вечная мерзлота	1968	Каменные кольца, высокопучинистые отложения Поверхность Погруженные камни На камнях На краю	4 0,4 3,6 2	Chambers, 1967
Mesters Vig, Greenland, 72 °N	Высокоширотная мерзлота	1958–1964	Высокопучинистые отложения Влажный склон — на глубине 10 см На глубине 20 см Сухой склон — на глубине 10 см На глубине 20 см	0,0–1,0 1,5–5,8 0,5–0,7 0,8–1,4	Washburn, 1969
Inuvik, N. W. T. 68 °N	Залесенная равнина, вечная мерзлота	1976–1978	Высокопучинистые отложения с буграми пучения Ненарушенные условия (1977–1978) (Среднее из 38 наблюдений) Нарушенные условия (1977–1978) (Среднее из 9 наблюдений)	10,39 14,09	Mackay et al., 1979
Kananaskis, Alberta, 51 °N	Сухой горный климат, сезонное промерзание	1970–1971	Пучинистые отложения. Влажный склон, Дек. — Март Сухой склон, Дек. — Март	0,0–1,8 0,0–0,4	Harris, 1971
Colorado, Front Range, 39 °N	Влажный горный климат, сезонное промерзание	1965–1966	Высокопучинистые отложения, пятна-медальоны	25,0–29,5	Fahey, 1974
Colorado, Front Range, 39 °N	Влажный горный климат, сезонное промерзание	1976–1978	Высокопучинистые отложения, террасы и уступы с камнями и торфом	0,5–38,0	Benedict, 1970

Рис. 3.4. Исследование крипа

## Солифлюкция

Солифлюкцию впервые описали даже не в области криолитозоны. Первая публикация была в области Фолклендских островов. Затем её интенсивно изучали в Альпах. *Солифлюкция* – это вязкое течение. В отличие от сложного механизма крипов, где минеральные частицы двигаются по сложным траекториям, солифлюкция – это просто течение. В какой-то момент склоновые отложения оказываются способными к течению по какому-то основанию.



Рис. 3.5. Солифлюкция



Рис. 3.6. Солифлюкция в Альпах

Солифлюкция в общем виде – это не обязательно мёрзлые основания. Основание может быть и скальным. Когда её описывали на Фолклендах или в Альпах, рассматривали твёрдые основания, скальные породы как подложку для движения этих отложений. В основном, она возникает при сильном увлажнении. Такое возможно видеть даже в высоких горах в Крыму, когда тонкий слой осадочного чехла где-то



на крутых склонах сильно увлажняется, скажем, в результате сильных дождей (там тоже ливни бывают) и возникают вязкие потоки материала по этому склону. В общем – довольно распространённое явление, заключающееся в вязком течении породы по кровле водонепроницаемых пород. Это может быть скала. В случае с криолитозоной – это может быть мёрзлое основание (вечная мерзлота). В Альпах, например, это грязевые языки вязкого течения на поверхности склона.

Для того, чтобы отличить эти явления в криолитозоне от такого вязкого течения в области вне криолитозоны, решили назвать это явление не солифлюкцией, а *гелифлюкцией*. Гелифлюкция – это вязкое течение сильно увлажнённых отложений по кровле многолетних мёрзлых пород. Термин происходит от того же корня, что конжеляционный лёд, который встречается и в ледниках. Это не лёд водоёмов. В составе ледников это не преобладающая масса льда, но он может встречаться и в ледниках. Лёд, который образуется в результате метаморфизма снега – это ледниковый лёд. Лёд в ледниках называется *глетчерный*. *Конжеляционный лёд* – это лёд, который формируется из водной массы. И, собственно, гелифлюкцию надо было бы назвать желефлюкцией, но исторически так сложилось, что это гелифлюкция.

На склонах, где происходит гелифлюкция, идёт течение, разрушается растительность. Типичный пример гелифлюкции, когда в высоких горах Китая на склоне течёт почти жидкость (Рис. 3.7).

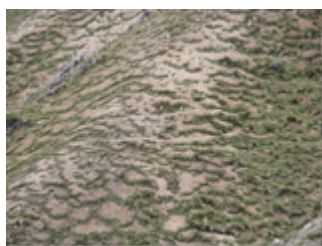


Рис. 3.7. Гелифлюкция

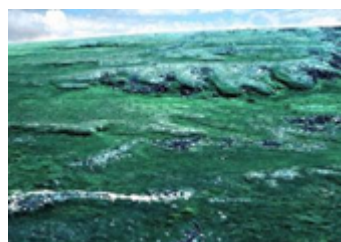


Рис. 3.8. Гелифлюкция



Рис. 3.9. Гелифлюкция (светлый цвет) по мёрзлым отложениям на высоте 4700 м над уровнем моря на северных склонах Куньлунь Шань (Kunlun Shan), Китай. © S. A. Harris

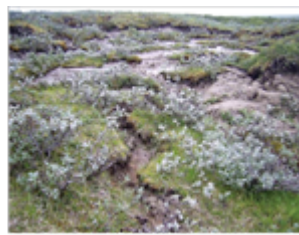


Рис. 3.10. Быстрая гелифлюкция в льдистых пылеватых отложениях, рассекающая тундровую растительность на полуострове Ямал. Она обычно развивается на склонах с углом 5-20 с активным слоем 0,4-1,0 м. © А. Губарьков.

Различают медленную и быструю солифлюкцию. Скорости не такие, как у криогенного крипа – это не первые десятки сантиметров. Те процессы, которые идут

быстрее, чем метр в год, принято считать *быстрой солифлюкцией*, если меньше метра в год – *медленной солифлюкцией*. На фотографии – быстрая солифлюкция. Видно, что здесь показан почти жидкий (водный) поток.

На (Рис. 3.10) неочевидный пример быстрой солифлюкции. На таком склоне очень трудно сказать, что это быстрая солифлюкция. Есть вязкие потоки: на склоне оттаивает и происходит вязкое течение, но при этом есть и блоки ненарушенной растительности сверху. Они разрываются, теряют форму, но сохраняются на поверхности. И это уже гораздо более медленное течение, чем в предыдущем случае. Развито на Ямале.

Солифлюкция может развиваться при минимальных углах наклона и очень большом увлажнении. В таких условиях образуется практически текучий материал, а для текучего материала практически никакие углы не нужны. Стечение начинается уже при первых градусах наклона. Это зависит от того, какой характер этот материал приобретает на склоне, то есть, насколько он может увлажняться. Например, на Ленинских горах довольно большой угол наклона, оползневые склоны, и развиваются оползни.

Солифлюкция – большая проблема для Ямала, где склоны меньше, чем  $3^\circ$ . Получается, что почти вся поверхность, вся территория способна к такому латеральному движению в сторону или движению по такому едва выраженному склону. В этих условиях осложнено строительство: просто невозможно дорожную насыпь отсыпать, так как будет наблюдаться движение на десятки сантиметров в год – это важный момент и проблема.

Поскольку это вязкое течение, то при движении естественная слоистость нарушается и иногда слои начинают наползать друг на друга, или один слой начинает течь поверх другого слоя.

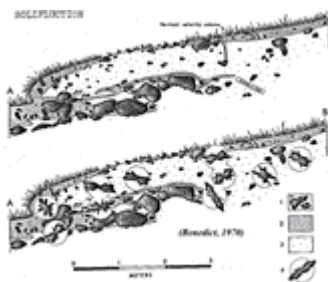


Рис. 3.11. Солифлюкция



Рис. 3.12. Солифлюкционные террасы на склоне (Solifluction Lobes).

Возникает своеобразная слоистость и образуются даже террасы. Они хорошо выражены на склонах от  $10^\circ$  и больше, хотя сам процесс может наблюдаться и при склонах очень небольшого угла наклона.

Часто склоны содержат крупные обломки, глыбы скальных пород. В ситуации, когда в составе слоя сезонного оттаивания на склоне существуют крупные обломки, то может возникнуть 2 случая:



Рис. 3.13. Большой камень примёрз к подстилающей вечной мерзлоте и препятствует течению поверхностного активного слоя. © S. A. Harris

- 1) Если крупный обломок оказывается приморожен к кровле многолетних мёрзлых пород какой-то своей частью, он не способен к движению. В этом случае он тормозит движение. То есть, масса стремится двигаться по склону, а большой обломок, который находится в составе кровли многолетних пород, препятствует этому движению. Такое явление называется «тормозящий валун» на склоне. Перед валуном возникает гряда, а сразу за валуном – углубление, депрессия. Довольно характерное явление.
- 2) Если крупный валун будет находиться в самом слое протаивания. То происходящее будет называться «пахущий валун». Иногда бывает, что его скорость движения превышает скорость движения более дисперсных отложений. В этом случае он нарушает поверхность, на пути его движения образуется холм как при движении плуга, и борозда может оставаться выше по склону.



Рис. 3.14. Пахущие валуны (ploughing blocks)



Рис. 3.15. Движущиеся камни

Эти случаи нужно различать с явлением, которое называется «движущиеся камни». Оно наблюдается, например, в долине смерти и в некоторых других местах, где плоская поверхность занята глинистыми отложениями – озёрными осадками, довольно высокодисперсными, на поверхности которых находятся валуны. Они явно двигаются, оставляя за собой следы.



По этому поводу было много всяких исследований и сомнений. Этим камням даже предавали религиозное значение, потому что это было совершенно необъяснимо. Это огромные камни, двигаются на большие расстояния, совершенно на плоских участках, где нет никаких склонов. Теория, которая долгое время считалась объяснением движения этих камней, считала, что ветер, который наблюдается на этой территории, способен двигать эти камни в увлажнённом глинистом осадке с малой несущей способностью. Долгое время это было единственным объяснением, которое давали этому явлению, но оно не очень удовлетворительное. Хотя, конечно, тут нужны расчёты, но в общем маловероятно, что эти камни могут так двигаться.

Совсем недавно была выдвинута ещё одна теория, связанная с геокриологией, которая гораздо лучше объясняет механизм движения этих камней. На самом деле – это ещё теория, хотя здесь нет никаких сомнений в том, что этот валун движется. За ним следят, есть фотографии в динамике – они в самом деле двигаются.

Предложили следующий механизм: сначала появляется очень тонкий слой воды (это не так часто, потому что это засушливая территория, но иногда появляется очень тонкий слой воды). Дальше этот тонкий слой воды начинает замерзать. В начальном периоде замерзания образуется совсем небольшой ледяной покров. Этот ледяной покров смораживается с этими камнями, образуется валун, который окружён длинной водяной пластиной, которая плавает на этом водном основании. И в этом случае ветер, возможно, и может сдвинуть этот валун. Потому что вместо того, чтобы его двигать в глинистых отложениях – он уже двигает его несколько приподнятым за счёт образования ледяного покрова. Это гипотеза, но она считается наиболее объясняющей движение этих объектов. Необходимо отличать движущиеся камни от пахущих и тормозящих валунов.

## Грязевой поток

На склоне происходит очень много разных процессов. Мы рассмотрели крип, солифлюкцию, теперь рассмотрим грязевый поток.

Грязевой поток тоже напоминает солифлюкцию, просто очень хорошо выражен и может распространяться далеко за пределы образования потока. Если склон достаточно протяжённый, то эта масса движется достаточно далеко по склону.



Рис. 3.16. Грязевый поток в Центральной Якутии в долине реки Алдан, где они встречаются на склонах от 15-30°. © А. Брушков

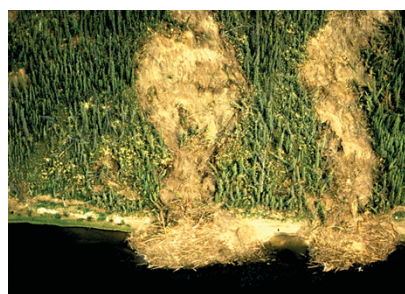


Рис. 3.17. Сплывы активного слоя (active layer detachment slides) вдоль озера Клуан, Юкон

Явление, которое называется «*сплывы активного слоя*». Разделяют слой сезонного промерзания и слой сезонного протаивания. Для обозначения слоя сезонного оттаивания используется название «*активный слой*». Это название употребляется не для обоих слоёв, а именно для слоя сезонного оттаивания за рубежом. В криолитозоне это название чаще всего относится именно к слою сезонного оттаивания. При оттаивании могут происходить сплывы материала. Можно видеть и оползни – некий объём, структура, сплошность и слоистость которого не нарушается. Происходит движение сразу крупного объёма.

Такие явления есть и в криолитозоне. Они называются *криогенными оползнями*, хотя мало отличаются от каких-то других оползней. У них поверхность скольжения – это кровля мёрзлых пород, и именно она часто бывает наиболее подходящей поверхностью, по которой может происходить скольжение.

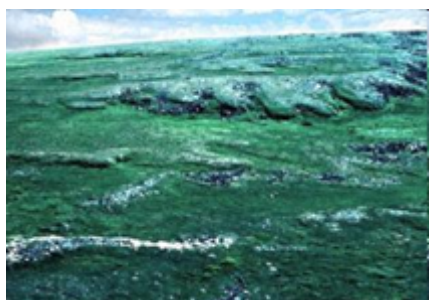


Рис. 3.18. Криогенный оползень



Рис. 3.19. Криогенный оползень

Плоскостей скольжения может быть не одна. Когда это тело начинает разваливаться, разбиваться на несколько плоскостей скольжения, то это нужно называть «*оплывина*», а не оползень, потому что там не одна плоскость скольжения, а несколько. Само тело уже не совсем разрушается, но в значительной степени нарушается. Это промежуточная форма между оползнем и вязким течением, которое наблюдается при солифлюкции. У оплывины наблюдается несколько плоскостей скольжения и структура частично нарушается, а частично сохраняется.

Оплывины в случае криолитозоны иногда имеют совершенно характерную форму на склоне. И поэтому они называются «*ретрогрессивные оплывины при оттаивании*». Суть процесса: если оползень (или оплывина) начинает двигаться и не обязательно связан с каким-то склоном и с процессами на склоне, то ретрогрессивные оплывины возникают в результате оттаивания крутых склонов. Здесь, как правило, находятся льдистые отложения. На реке Алдан – это повторно жильные льды. Здесь мощная толща льдов, которая оттаивает, материал обрушается, движется, очень много воды. При этом некоторые блоки сохраняют (не нарушают) своё строение. И всё это в общей массе движется вниз по склону иногда на большие расстояния.

Ретрогрессивным называется потому, что непосредственно обрыв склона всё время отступает, оттаивает и этот процесс сохраняется до тех пор, пока на склоне сохраняются льдистые отложения.

Аналогичное явление наблюдается и на реке Маккензи. Также высоко льдистые отложения и после того, как сформировался поток, он движется вниз. В основном



Рис. 3.20. Ретрогрессивные оплывины при оттаивании (retrogressive thaw flow slides) у реки Алдан в Центральной Якутии, Россия

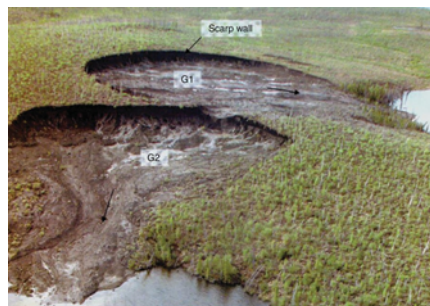


Рис. 3.21. Ретрогрессивные оплывины оттаивания вдоль долины реки Маккензи

нарушается структура, частично – нет. Такой поток сложного состава, иногда наблюдаются довольно масштабные явления.

## Каменные глетчеры

Каменные глетчеры (Rock Glaciers) – это крупные обломки, сцементированные льдом. Течение этого каменного глетчера происходит потому, что течёт лёд. Он движется так же, как ледник, только содержит в своём теле большое количество каменного материала. Образоваться он может по-разному: в результате оттаивания настоящего ледника или смешивания снежника с обломочными отложениями, которые падают со склона. Это довольно распространённая масса льда и обломков, даже более распространённая форма, чем сами ледники. Как правило, в области распространения ледников распространено большое количество каменных глетчеров.

## Наледи

Наледи ещё носят названия *айфеи* (от немецкого слова *aufeis*). Первые исследователи, которые описывали это явление, говорили на немецком, и в научной литературе до сих пор используется это название, хотя в России это явление не менее распространено и называется наледями.

Огромное количество льда, которое нарушает дома, дороги, подвалы, возникает зимой. Это имеет непосредственное отношение к проблемам инженерной геологии, к проблемам строительства, потому что мы вынуждены защищать инженерные сооружения от опасных явлений. Наледи относятся часто к таким явлениям, которые мы должны принимать во внимание, рассматривать и придумывать меры защиты этих инженерных сооружений.

Наледи иногда достигают значительных размеров, даже десятков километров в длину. Характерный случай, который позволит понять, как образуются наледи: на крышах домов часто образуются такие наледи: выпадает снег, идёт тепловыделение от зданий, от жилых помещений, какой-то слой жидкой воды оттаивает, а особенно на краях крыши вода замерзает. И ледяной барьер, который образуется на кромке, мешает стекать ей как положено, потому что там нет тепловыделения. Там температура окружающей среды и образуется ледяное тело, которое препятствует стоку

ледяной воды на крыше наружу и она начинает задерживаться и проникать в помещение. Это очень часто случается не только в частных, но даже и в многоквартирных домах.

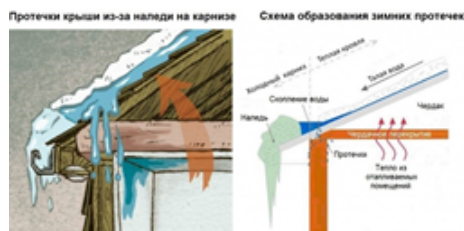


Рис. 3.22. Схема образования зимних протечек из-за наледи на карнизе

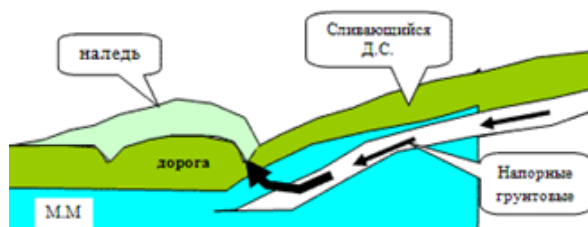


Рис. 3.23. Схема образования наледи на дорогах

Часто принимаемые меры оказываются недостаточно эффективными. И предотвратить образование наледи и проникновение воды достаточно сложно.

Принцип образования наледи довольно простой: поток воды, встречающий препятствие. Иногда этим препятствием может быть сама же вода, только перешедшая в твёрдую фазу. И, соответственно, изменение направления движения и образование ледяных форм, потому что вода может стекать наружу. Примерно так наледь образуется и в природных условиях: есть поток по склону. Чаще всего – это грунтовые воды, но не обязательно. Важно, что они попадают в условие, когда возникает преграда для его движения. Эти явления характерны для криолитозоны, потому что водоупором здесь являются мёрзлые породы – это почти абсолютный водоупор. Это коэффициент фильтрации ещё ниже, чем у любых глин и у скальных пород, то есть, они практически водонепроницаемы. Если начинается промерзание сверху (сезонно-талого слоя), то вода попадает в ловушку. И если это поток, особенно значительный, то он начинает искать выход. Выходя на поверхность, он начинает замерзать, может образовываться натёчная форма, которая и называется наледью.

Эта наледь может формироваться на поверхности в результате прорыва этого грунтового потока на поверхности образования. Они могут образовать и *внутригрунтовые наледы*. Внутри толщи отложений иногда возникают такие формы. Формировать их могут и подземные, и поверхностные воды. Очень часто и на реках возникают такие условия. Если река промерзает до дна (очень часто это происходит с мелкими реками в Сибири), а поток в реке сохраняется, то поток ищет выход, выходит и замерзает. В Сибири формируются ледяные тела очень больших размеров за счёт низких температур, морозов, зимы.

Наледи зачастую сосредотачиваются вдоль долины рек, могут быть многокилометровыми и часто не оттаивают и сохраняются даже в течение лета. Могут быть использованы как источник водоснабжения, но чаще – это препятствия для деятельности людей.

Если наледь оттаивает, то их местоположение и оценку можно провести по растительности, потому что лёд, проникая в лес на уровне деревьев, при вымораживании оставляет соляные выцветы, поэтому по такой белёсой плёнке (налёту) на стволах деревьев иногда можно судить о том, как далеко проникала наледь, о её мощности и





Рис. 3.24. Наледь в Сибири



Рис. 3.25. Наледь на дороге

масштабе процесса. Эти формы часто возникают и на склонах, потому что грунтовые воды, которые двигаются вдоль склона, выходя на поверхность где-то на склоне, в условиях низких температур замерзают и возникают причудливые формы, которые можно наблюдать в выемках железных или автомобильных дорог. В любых горных районах, даже на Кавказе, зимой можно видеть ледяных образования на склонах, которые тоже представляют собой наледь небольшого размера. Часто это бывает препятствием для дорожного движения.

Одной из основных инженерно-геологических проблем при строительстве Транссибирской железнодорожной магистрали, ещё в начале XX века, были наледи. Это сотни наледей, пересекающие полотно железной дороги. Приходилось искать способы борьбы. Михаил Иванович Сумгин был в числе тех, кто занимался решением проблем на Транссибирской магистрали. Полотно дороги практически всегда пересекает водный поток (любой овраг, долину), если оно пересекает долину, то железнодорожная насыпь – это искусственная дамба, промороженная зимой. А поток сохраняется и встречая препятствие в виде такой железнодорожной насыпи, на насыпи начинают возникать наледи, потому что поток воды двигается и объёмы воды иногда могут быть значительными. Здесь не помогают даже водопропуски, так как они очень быстро забиваются из-за больших объёмов воды, которая замерзает, образует натёчные формы, увеличивается объём тела, который в итоге оказывается на полотне железной дороги. Решением может быть создание искусственной дамбы при этом желательно не просто перекрыть долину, а сделать пояс (вал) вдоль склона, потому что поток может изменить своё направление. В криолитозоне можно также сделать траншею. Так 100 лет назад боролись с наледями и до сих пор это остаётся одним из эффективных способов защиты инженерных сооружений от наледей. Примеры того, как может выглядеть воздействие наледей на инженерные сооружения показаны на (Рис. 3.26).

Механизм проникновения наледи в дома довольно прост. Поскольку это криолитозона, то в нижней части – водоупор, территория вокруг – тоже сезонно талый слой, который замерзает зимой. И если там где-то существует поток грунтовых вод, то именно под этим тёплым зданием (за счёт наличия печки и людей), у нас нет промерзания. То есть, это такой искусственный (организованный человеком) канал. Для того, чтобы направить этот поток, которому некуда деваться в условиях такого промерзания: снизу мерзлота, сверху – промерзающий сезонно талый слой, деваться некуда – он находит единственное место, куда ему направиться – это непосредственно



Рис. 3.26. Наледь в доме

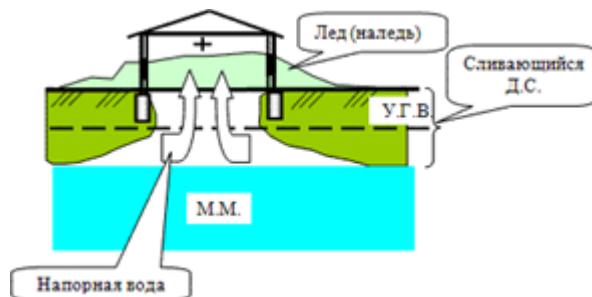


Рис. 3.27. Механизм образования наледи

это здание. А дальше замерзает, потому что проникают в здание очень большие массы воды, которые начинают выливаться наружу, там замерзают и образуется такое явление, которое заставляет людей покидать эти здания, так как на месте жилого помещения оказывается ледяной дом.

### Криотурбация.

*Криотурбация* – явление во многом загадочное. Необходимо смотреть почвенные разрезы не только для криолитозоны, но и для условий средней полосы, хотя это характерно именно для криолитозоны. Иногда можно увидеть странное и с точки зрения геолога необъяснимое явление: в почвенных слоях минеральной или органо-минеральной почвы (часто – смешанного состава) наблюдаются деформации. Причём эти деформации называются *изоклиальной складчатостью*. Откуда могут появляться такие формы в почвенных горизонтах? Там ведь нет таких тектонических процессов, условий грандиозного сжатия, которые мы обычно подразумеваем, когда рассматриваем условия возникновения изоклиальной складчатости в каких-то геологических структурах, но странным образом оказывается, что эти явления, по-видимому, подобны. То есть, то, что происходит в почвенных горизонтах, часто имеет аналог в этих геологических структурах, когда возникают условия для такой складчатости. То есть, это, по видимому, условия сжатия, условия больших деформаций, сложного напряжённого состояния, которое в нашем случае в криолитозоне в почвенном горизонте, мы знаем только один вариант – это промерзание и пучение (увеличение объёма при пучении, напряжение и деформация, которые действуют в промерзающих толщах, связанные с изменением объёма льда и движением влаги, соответственно).

Это не всегда наблюдается и увидеть его можно не при каждом почвенном разрезе. Но в общем, довольно часто. Они довольно впечатляющие, потому что сложно представить, как нужно сжать почвенный горизонт, чтобы возникли такие структуры. Сейчас мнение об этих образованиях однозначное. Это, конечно, связано с промерзанием и пучением, в первую очередь. Но пока в лаборатории нет хороших экспериментальных исследований, которые показали, как именно образуются эти криотурбации.

Пока ещё в значительной степени вопрос открытый, поэтому это одно из тех научных направлений, которые можно ещё исследовать. Непонятно, как могут образовываться такие большие деформации. Действительно, это значительное сжатие, хотя

трудно предположить, что здесь были какие-то огромные напряжения. Тем не менее – явление связано с промерзанием. Там где нет пучения и осадки при оттаивании, то такого рода образования не встретить. Это наблюдается именно в тех районах, где наблюдается промерзание, хотя не обязательно в области криолитозоны. Это может быть и в области сезонного промерзания тоже, но в криолитозоне чаще. Это говорит о том, что условия для создания вот таких полей напряжения и деформации, которые приводят к образованию криотурбации, возникают в случае, когда у нас существует кровля мёрзлых пород, препятствующее каким-либо деформациям и являющаяся каким-либо водупором, и промерзающий слой сверху, который, по-видимому, приводит к этим деформациям.



Рис. 3.28. Криотурбация

## Засоление

Засоление – один из парадоксов криолитозоны: с одной стороны – огромное количество воды, с другой – огромная проблема с питьевыми ресурсами. С одной стороны – есть большое количество влаги, с другой – соли, которые, как известно, встречаются в засушливых районах. То есть, криолитозона представляет собой довольно противоречивое образование с точки зрения привычных понятий о влажности или о солях. Потому что вообразить себе территории такой значительной степени увлажнения с таким большим количеством воды и при этом оказывается, что у нас есть засоленные участки и засоленные породы, в общем трудно. Тем не менее мы поговорим об этом парадоксе – мёрзлых засоленных породах, которые часто встречаются в криолитозоне.



Рис. 3.29. Засоление в Центральной Якутии



Рис. 3.30. Засоленные мёрзлые породы

Пример: на берегах озера выцветы солей. На этих территориях выцветы солей можно встретить прямо на поверхности. Также они часто встречаются и на грунтовых дорогах. Засоление очень сильно изменяет свойства пород. Небольшое засоление – сразу падает несущая способность. Здесь наблюдается явление движение воды к поверхности, что не характерно для средней полосы, ведь в средней полосе вода (выпадающие осадки) питают подземные воды, то есть, в зоне аэрации наблюдается вертикальное движение воды вниз, а в криолитозоне преобладает движение воды вверх.

Любая вода (даже атмосферные осадки) всегда содержит определённое количество солей. Всегда важен баланс испарения и осадков, потому что если у нас на территории наблюдается преобладание испарения, то в итоге у нас природные воды будут засоляться. Так же, как они будут засоляться при фильтрации. Мы знаем гидрохимическую зональность, когда с увеличением глубины у нас, как правило, увеличивается концентрация солей. Это связано это с путями фильтрации: чем длиннее фильтрация, тем больше вероятность, что вода приобретёт какие-то дополнительные соли. Точно также при преобладании испарения будет происходить постепенное обогащение солями природных вод. В криолитозоне вряд ли можно предположить длинные пути фильтрации и накопления солей за счёт вымывания их отложений. Потому что здесь не просматривается. У нас такой огромный водоупор существует с поверхности. А мы говорим о поверхностных явлениях. Значит дело в том, что здесь преобладает испарение над осадками. Достаточно атмосферных осадков или солей, которые содержатся в атмосферных осадках для того, чтобы это постепенное, если продолжается это преобладание достаточно продолжительное время, соответственно, верхняя часть литосферы будет обогащена солями. Это наблюдается в пустынях. Типичный пример – солончаки пустыни, засоленные почвы – это результат того, что там значительное испарение, преобладающее над поступлением воды туда. Следовательно, можно предположить, что районы криолитозоны являются областями преобладающего испарения над осадками. И на свете очень много территорий преобладающего испарения над осадками:



Рис. 3.31. Засоленные мёрзлые породы в Тибете



Рис. 3.32. Засоленные мёрзлые породы: распространение

- Большая часть Якутии
- Западная часть Канады до скалистых гор – долина реки Маккензи



- Восточная Гренландия
- Тибетское плато, которое представляет собой криолитозону хотя там не очень мощная мерзлота (до 50 м), но она довольно широко распространена

Оказалось, что все эти области засолены. Все эти области имеют достаточно большую концентрацию солей в поверхностных отложениях. И это представляет собой проблему. Но это не единственный путь засоления.

На карте засоленных мёрзлых пород области континентального засоления в Якутии и в западной Канаде (показаны жёлтым), синие области – засоление, которое не связано с испарением. Это *морское засоление*. Если морских осадков много – Юрские глины. В Юрских глинах нет засоления, а в морских мёрзлых осадках засоление присутствует в большом количестве.

## Лекция 4. Химические процессы криолитозоны

### Химические реакции и процессы в промерзающих и протаивающих породах

Реакций, происходящих в горных породах, очень много. Отличия, которые имеет криолитозона, имеют важное значение для ряда областей: геохимии, инженерной геологии и для использования человеком этих территорий.

Первая, очень важная особенность: при понижении температуры происходит очень значительное понижение скорости химических реакций. Она накладывает отпечаток на территорию, потому что там всё оказывается замедленным. Но есть особенности, которые не встречаются в других районах или, по крайней мере, они выражены в меньшей степени. Во-первых, происходит кристаллизация воды, образование льда. Соответственно, химические вещества (в т. ч. и соли), которые находятся в этой жидкости, претерпевают преобразования: некоторые выпадают в осадок, могут происходить химические реакции из-за изменения концентрации. Первая особенность – это выпадение и кристаллизация некоторых солей при замерзании. Замерзание морской воды – это процесс кинетический, довольно сложно прогнозируемый, потому что зависит от скорости. Даже кристаллизация первой соли, которая обычно выпадает. Даже температура водной соли мирабилита (водного сульфата натрия) здесь иногда сложно экспериментально устанавливается.

Соли, которые выпадают в осадок, могут при дальнейшем оттаивании этой толщи вовсе не растворяться, а оставаться где-то в горных породах. Типичный пример – наледи. Большие объёмы льда, касаясь растительности и стволов деревьев, маркируют их солевыми выпцветами и являются показателем объёмов этой наледи. Кроме того кристаллизация солей может приводить даже к разрушению некоторых минералов и своеобразному выветриванию, которое образуется при замерзании. Также это может привести к массе других последствий из-за формирования солёной воды и рассолов.

Для обычной гидрохимии требуется значительный путь фильтрации, для того, чтобы подземные воды приобрели высокую минерализацию. В криолитозоне более интересный вариант: с одной стороны возникают условия для очень быстрой минерализации воды, прямо в поверхностных горизонтах при замерзании, а с другой стороны наоборот – та часть объёма воды, которая перешла в лёд, становится опреснённой.

Характерный процесс для этих толщ мёрзлых, промерзающих, оттаивающих пород – это изменение водородного показателя  $H$ . Дело не простое, но важное. Рассмотрим основные факторы, которые определяют реакцию поверхностных и подземных вод. Первое – это выпадение атмосферных осадков. Они попадают на поверхность, дальше фильтруются или инфильтруются, попадают в подземные поверхностные воды и так далее. По тем солям, которые находятся в составе обычных дождевых капель, должна преобладать слегка щелочная реакция, потому что гидрокарбонат натрия преобладает в атмосферных осадках (не всегда, но часто). И в то же время, под воздействием индустриального развития, выделения окислов серы и образования серной кислоты в итоге, происходит закисление атмосферных осадков. Но диапазон довольно широкий: от слегка кислых до слегка щелочных. Это первый фактор.

По составу солей должна быть слабощелочная реакция, но в результате влияния загрязнений есть некоторые отличия. Слабощелочная реакция происходит в результате обычного гидролиза слабой кислоты и сильного основания, так же, как происходит при растворении всех карбонатов.

Так же влияет углекислый газ. Он очень хорошо растворяется в воде. Кока-кола и другие газировки тому подтверждение. Количество газа, иногда превышает объем бутылки (это зависит от температуры), и если её слегка нагреть, то всё это выливается наружу. Это важный фактор, причём при понижении температуры растворимость углекислого газа увеличивается, а это значит, что в холодных водах углекислого газа может быть больше. В связи с этим кока-колу не рекомендуется часто пить потому, что она может иметь кислую реакцию за счёт растворения большого количества углекислоты, несмотря на наличие стабилизаторов.

Из-за роста концентрации углекислого газа в атмосфере, его больше растворяется в океанических водах, смещается значение, и идёт некоторое подкисление океана, особенно в поверхностных водах, в поверхностных горизонтах. И это имеет значение.

Во многих природных водах, особенно в поверхностных и подземных, часто бывает, что этого углекислого газа гораздо больше, чем того газа, который бы находился в равновесии с атмосферой. Это важный вопрос, потому что он отвечает на критику противников глобального потепления, которые говорят: «Да знаете, у нас очень прекрасно растворяется углекислый газ, он растворится в океане, растворится в природных водах, и бояться ничего не надо, потому что растворимость очень высокая».

В природных водах углекислого газа уже содержится довольно много, часто во много раз больше, чем равновесная концентрация с атмосферой. Это важный момент и одна из причин того, что у нас воды оказываются кислыми, особенно в криолитозоне. Обратим внимание на такой фактор, как угольная кислота. В холодные сезоны увеличивается концентрация углекислого газа и падает содержание кислорода. Эти явления происходят с наступлением зимы.

Поскольку все химические реакции замедлены, то в почве криолитозоны, по сравнению с лесной зоной, органики не так уж и много.



Рис. 4.1. Почва криолитозоны



Рис. 4.2. Природные зоны арктических пустынь и тундры

Количество углерода в почве криолитозоны меньше (иногда – значительно меньше), но из-за того, что скорости разложения органики сильно падают, то её остаётся

очень много. Так же, как и в мёрзлых толщах – это не потому, что в тундрах изначально органики много, при том что биомасса не очень растёт при низких температурах, а потому, что она плохо разлагается при этих температурах.

Эти почвы за счёт высокой воднённости лишены кислорода. В результате возникают глеевые почвы: сизые, синие почвы с малым содержанием кислорода, с высокой концентрацией растворимого закисного двухвалентного железа, которое при контакте с воздухом легко переходит в трёхвалентное железо окисное, выпадает в осадок. Воды с таких горизонтов, как только они попадают на поверхность, образуют рыжие потоки гидроокисей железа, которые выпадают в осадок.

Из-за того, что изначально органического вещества не так уж много, но оно там плохо разлагается, то в этих почвах наблюдается значительное количество не разложившейся органики, в том числе фульвокислот и гуминовых кислот – очень важный компонент органического вещества. Фульвокислоты очень хорошо растворимые и соединяются с металлами и обеспечивают миграцию многих химических элементов в почвах. А гуминовые кислоты наоборот – связываясь с металлами оказываются нерастворимыми и играют роль геохимического барьера.

На значительной территории арктических пустынь и тундры много воды, поэтому отсутствие кислорода, высокое содержание гумуса, органических кислот, повышение способности растворять углекислый газ, приводит к тому, что тундровые почвы в криолитозоне часто имеют заметно кислую реакцию (может быть даже  $pH$  4-5). Длительное использование подкисленной воды из поверхностных источников ведёт к различным заболеваниям у людей, которые там живут, несмотря на то, что вода чистая, ультрапресная и практически не содержит солей, но по водородному показателю оказывается непригодной. Какое-то время можно использовать, но не долго.

В литературе данных территорий встречаются разные названия этих мест:

- Болото – избыточно увлажненный с застойным водным режимом участок земли, на котором происходит накопление органического вещества в виде неразложившихся остатков растительности
- Марь – заболоченный редкостойный лиственный лес, прерывающийся участками безлесных кочковатых болот и ерников
- Мочажина – влажное, заболоченное, топкое место между кочками на болоте, низменном лугу
- Топь – переувлажнённый участок болота с разжиженной торфяной – переувлажнённый участок болота с разжиженной торфяной залежью, высоким уровнем воды – переувлажнённый участок болота с разжиженной торфяной залежью, высоким уровнем воды и рыхлой непрочной дерниной
- Трясина – зыбкое болотистое место
- Няша – (северное) зыбкое болотистое илистое или глинистое место

## Железомарганцевые конкреции

Последнее десятилетие о железомарганцевых конкрециях говорят очень много. Это связано в том, что у нас кончаются запасы многих металлов на континентальных территориях, а железомарганцевые конкреции, которые содержат целый ряд металлов, в том числе редких, очень широко распространены на дне мирового океана и представляют собой потенциальную базу мирового сырья для будущих поколений. Скорее всего будущее поколение будет жить в эпоху эксплуатации этих железомарганцевых конкреций.



Рис. 4.3. Железомарганцевые конкреции



Рис. 4.4. Распределение железомарганцевых конкреций в мировом океане

На (Рис. 4.3) показана территория распространения конкреций. Территории распространения железомарганцевых конкреций тяготеют к экваториальной области океанов, хотя впервые их обнаружили в Северном Ледовитом океане. Существует теория, что это связано с процессом криолитогенеза, химическими процессами в бедной кислородом воде, которая поступала с холодных областей. Вероятно, что в северной части Тихого и Атлантического океанов в холодные эпохи были огромные площади морского льда (это сейчас там нет льдов, а тогда температура была на 6-8° ниже). Соответственно, там могли быть бескислородные условия. Там, действительно, железо могло быть растворимым (двухвалентным), но течения, которые могли приносить бескислородные воды с растворённым двухвалентным железом, попадая в экваториальную область и уже соприкасаясь с атмосферой и воздухом, когда появлялась возможность окисления этих форм железа – они выпадали в осадок. Это одна из наиболее адекватных теорий, объясняющая происхождение железомарганцевых конкреций, как источник минерального сырья в будущем.

## Процессы и явления, связанные с деятельностью ледников

Мерзлота и ледники тесно связаны. Мы освежим самые основные знания, касающиеся ледников, а затем сделаем совершенно очевидную связь с вечной мерзлотой. На (Рис. 4.5) показана типичная картина ледника.

Особенности этих образований заключаются в том, что они с одной стороны кажутся стационарным явлением, распространённым на определённой территории, а с другой – как река, которая постоянно движется, неся на себе материал. В ледниках всегда выделяется два характерных участка: зона накопления (аккумуляции) и зона разрушения (абляции).

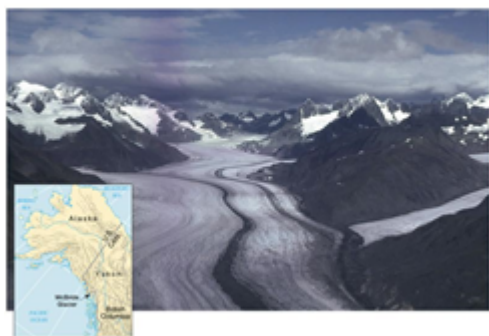


Рис. 4.5. Типичная картина ледника

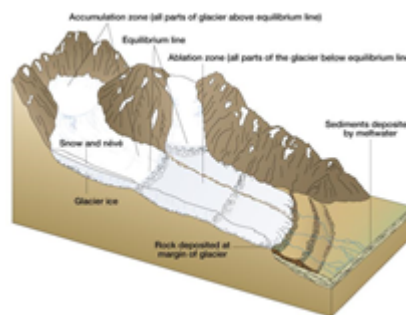


Рис. 4.6. Строение ледника

Если отнести область площади питания к площади области абляции (расхода) – получим ледниковые коэффициент:

$$K_{\text{л}} = F_{\text{п}} / F_{\text{а}}$$

Каждый ледник характеризуется значением ледникового коэффициента. Мы сейчас переходим на цифровую экономику и будем говорить о некоторых численных величинах, которые используются в гляциологии и в геокриологии.

### Ледники и ледниковый рельеф

Ледник – это слежавшийся, уплотнённый снег. При условии, что существует давление, перекристаллизация (превращение) снега в голубой глетчерный лёд занимает около 50 лет. При этом само вещество претерпевает некоторые превращения: сначала это снег, затем – фирн (плотный, слежавшийся, частично перекристаллизованный снег плотностью 0,4-0,8 г/см<sup>3</sup>). Затем возникает белый фирновый лёд (содержит большое количество воздушных включений, что обуславливает белый цвет). При дальнейшей перекристаллизации воздушные включения белого льда частично исчезают, частично увеличиваются в размерах, оставаясь дендритовыми формами. В результате белый лёд переформатируется в голубой глетчерный лёд (ледники, состоящие из такого льда – необычайно красивое зрелище).

Ледник – это масса фирна и льда, образовавшаяся путем длительного накопления и преобразования твердых атмосферных осадков и обладающая собственным движением. Множество ледников, объединенных общими связями с окружающей средой и внутренними взаимосвязями и свойствами, образуют оледенение, или *ледниковую систему*. Понятие «*ледниковая система*» выделяется потому, что развитие ледников в ледниковых системах протекают по сходным путям.

Граница между поверхностью, покрытой снегом, и поверхностью, где снега нет называется сезонной снеговой линией. В горах всегда есть линия, отделяющая вершины, покрытые снегом и нижнюю часть, не покрытую снегом. Она меняется в зависимости от климата и сезона.

Среднее положение снеговой линии называется *климатической снеговой линией*. Часть тропосферы, расположенную выше климатической снеговой линии, в пределах



которой снеговой баланс положительный и происходит накопление твердых атмосферных осадков, называют хионосферой – такая оболочка земли, в которой могут существовать снег, снежники и ледники (лёд в твёрдой фазе).

### Типы ледников

Ледники разделяются на покровные и горные. Покровные ледники существуют на равнинных территориях:

- Ледниковые щиты
- Ледниковые купола
- Выводные ледники

Горные ледники существуют в горах:

- Ледники вершин
- Ледники склонов
- Долинные ледники

### Процессы льдообразования

В ледниках, помимо преобразования снега, идут разные процессы. Способов образования ледникового льда три. Это важно, так как в криолитозоне наблюдаются эти же процессы:

- 1) *Рекристаллизация* – кристаллическая структура начинает перекристаллизовываться, то есть, кристаллы одних размеров и форм превращаются в кристаллы других размеров и формы. Это связано с энергетическими процессами, такими как преобразование кристаллической решётки. Рекристаллизация происходит в твёрдой фазе без какого-либо участия жидкой фазы.
- 2) *Режеляция* – это «слипание» разных ледяных кристаллов настолько, что их становится трудно отделить (выделить) друг от друга. Процесс преобразования снежинок в фирн и глетчерный лёд.
- 3) *Конжеляция* – образования льда из водной фазы. Это то, что происходит в породах и поверхностных водоёмах – образование конжеляционного льда (образование твёрдой фазы из жидкой). Все эти процессы происходят и достаточно распространены в ледниках, потому что там тоже существует вода в жидкой фазе (в трещинах, под ледниками, на поверхности, когда ледник подтаивает, а затем замерзает).

### Зоны льдообразования

Гляциологи выделяют 6 зон льдообразования. С точки зрения существования температурного режима, наличия и отсутствия жидкой воды или той фазы из которой происходит льдообразование, выделяются эти зоны:

- 1) Снежная зона, где льдообразования происходит только в виде рекристаллизации. Это обычно происходит в очень низких температурах. Нижняя граница зоны соответствует средней годовой температуре около  $-25^{\circ}\text{C}$ . Таяние и водоотдача отсутствуют. Толщина фирна 50-150 м.
- 2) Снежно-фирновая (рекристаллизационно-режеляционная) зона. Слабое таяние лишь в теплый период года, водоотдача практически отсутствует. Льдообразование идет в основном путем рекристаллизации. Толщина фирна 20-100 м.
- 3) Холодная фирновая (холодная инфильтрационно-рекристаллизационная) зона. Таяние и водоотдача из годового слоя снега умеренные. В нижних слоях вода вновь замерзает. Льдообразование происходит на  $2/3$  путем замерзания нифильтрационной воды и на  $1/3$  путем рекристаллизации. Температура ледника ниже  $0^{\circ}\text{C}$ .
- 4) Теплая фирновая (теплая) зона. Таяние и водоотдача значительные, формируется интенсивный сток. Льдообразование идет в равной степени путем инфильтрационного замерзания и рекристаллизации. Толщина фирна 20-40 м. Температура ледника около  $0^{\circ}\text{C}$ .
- 5) Фирново-ледяная (инфильтрационная) зона. Таяние и водоотдача значительны. Льдообразование в основном инфильтрационное. Толщина фирна не более 5-10 м. Зона характерна для горных ледников в условиях континентального климата.
- 6) Зона ледяного питания (инфильтрационно-конжеляционная). Таяние и водоотдача интенсивные. Льдообразование идет путем инфильтрации и конжеляции, т.е. замерзания талой воды на поверхности льда и формирования «наложенного» льда. Фирна в этой зоне нет.

## Морены

Морены – это часто мёрзлые отложения, мёрзлые породы. Они даже при образовании часто бывают мерзлыми и лежат на теле ледника, или по бокам, или внутри. Сами эти ледниковые отложения часто оказываются мёрзлыми, а иногда и многолетне мёрзлыми.

Типы морен:

- 1) Влекомые
  - a) Поверхностные
  - b) Внутренние
  - c) Природные
- 2) Отложенные
  - a) Береговые – по бокам и сторонам ледника
  - b) Конечные – на фронте, где заканчивается ледник.

## Питание и абляция в леднике

### Питание:

- 1) Осадки
- 2) Метелевый, лавинный перенос
- 3) Сублимация, конжеляция

### Абляция (разрушение льда в ледниках):

- 1) Таяние
- 2) Испарение. Процесс перехода воды из твёрдой в газообразную форму может быть достаточно активным
- 3) Механическая абляция

## Виды абляции по месту расположения

- 1) **Подледниковая.** Происходит на границе ледника с ложем и вызывается поступлением тепла из грунта, трением льда о ложе и жидкой водой, проникающей под лёд
- 2) **Внутриледниковая** абляция (таяние) происходит внутри ледника и объясняется трением отдельных слоёв ледника, циркуляцией воды и воздуха в полостях и трещинах ледника
- 3) **Поверхностная.** Представляет собой убыль снега, фирна и льда на поверхности ледника, обусловленная метеорологическими факторами. Основной составляющей поверхностной абляции является таяние

## Открытый и закрытый ледник

Часть ледника, обозначенная на рисунке  $R + h$  – открытый ледник. В открытых ледниках на перегибах возникают трещины. В них очень легко попасть. Глубина таких трещин может составлять несколько метров, а иногда – несколько десятков метров. Из таких трещин люди не возвращаются.

Ледник, обозначенный на (Рис. ??)  $R$  – закрытый ледник. Из-за того, что здесь возникают процессы сжатия – он достаточно безопасный для передвижения, поэтому при выборе пути движения по леднику важно выделить эти зоны (части) ледника.

В гляциологии очень много слов пришло из немецкого и французского языков, поскольку впервые это было описано в Альпах. *Бергшрунд* – огромная трещина, часто – зияющая, которая находится в начале ледника, непосредственно в месте примыкания ледника к склону. В месте, показанном на рисунке стрелками, возникает движение ледника, поэтому в зоне, примыкающей к склону, возникают трещины. Это очень опасное место в которое легко попасть, потому что часто оно занесено снегом и его не видно. Поэтому стоит помнить о том, что он существует всегда.

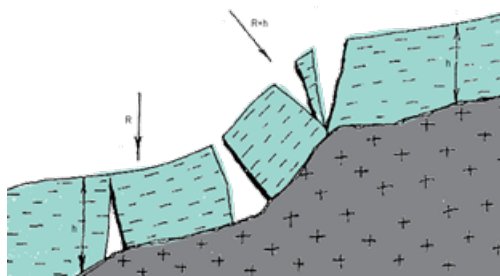


Рис. 4.7. Открытый и закрытый ледник



Рис. 4.8. Бергшрунд



Рис. 4.9. Открытый ледник



Рис. 4.10. Закрытый ледник

На (Рис. 4.9) открытый ледник с большим количеством трещин. Он практически непроходим. Очень часто приходится обходить такие части ледника или даже весь ледник целиком, потому что невозможно движение по таким трещинам.

На закрытых ледниках движение может осуществляться достаточно легко. Кальгаспоры ещё называют «молящимися монахами», потому что они представляются ледяными столбами, образующимися в результате радиационного воздействия (происходит таяние ледника с поверхности). Оно очень не равномерное. Даже когда снежный покров начинает таять – образовывается неровная поверхность с впадинами, вершинами на поверхности снежного покрова – это зачаточная форма кальгаспор. На леднике такие выступы могут достигать высоты в несколько метров. Двигаться по ним сложно, но впечатление производят мистическое.

### Различие тёплых и холодных ледников

Ложе тёплого ледника представляет собой не мёрзлые породы. То есть, на ложе ледника температура выше  $0^{\circ}\text{C}$ . На ложе холодного ледника температура ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , то есть, ложе находится в мёрзлом состоянии.

Тёплые и холодные ледники кардинально различаются по своему действию (эффекту). В тёплом леднике часто на ложе потоки воды, которые выносят моренный материал из-под ледника, в результате чего образуются гигантские реки, переносящие значительный материал, в том числе эродирующая поверхность (ложе). Тёплый ледник – это ледник, который интенсивно разрушает своё основание и интенсивно преобразует окружающее пространство и окружающие территории.



Рис. 4.11. Кальгаспоры

Холодный ледник из-за того, что он просто смерзается с холодным ложем (с многолетними мёрзлыми породами – с мерзлотой), не имеет даже сезоноталого слоя. Это просто переход льда в мёрзлые породы. То здесь наоборот отсутствует всякая эрозия и передвижения, в то числе – подледниковые потоки воды.

### Работа ледника. Механическая аналогия

Механическая работа ледника может быть иллюстрирована шуточной картинкой. В зоне питания человек, который разрушает с помощью какого-то инструмента породу – здесь, в основном, происходит выветривание. А дальше в зоне таяния и в зоне движения осуществляется транспортировка этого материала, как в шахте. То есть, в зоне питания добывается материал, а дальше происходит его движение по вектору самого движения ледника.



Рис. 4.12. Механическая аналогия работы ледника

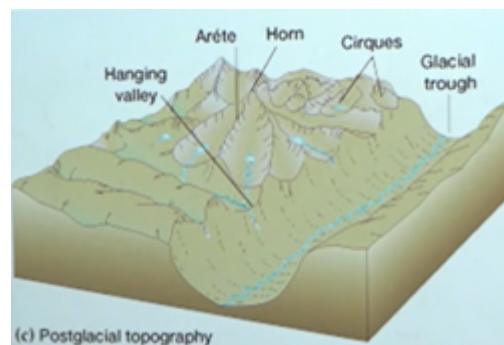


Рис. 4.13. Результаты работы ледника

- Horn – пики
- Arete – гребни
- Cirques – образуются в результате ледникового воздействия
- Glacial trough – ледниковые долины



- Hanging valley – подвешенные долины. Не встречаются в неледниковых областях, в то время как для ледниковых областей – это достаточно характерное явление

Бараньи лбы – результат эрозии, когда ледник натывается на достаточно прочные породы. Довольно распространены в Скандинавии, Северной Америке. Вся экзотика Центрального парка Нью-Йорка заключается в нагромождении бараньих лбов (непересечённая местность бараньими лбами, порушенная растительностью).



Рис. 4.14. Бараньи лбы

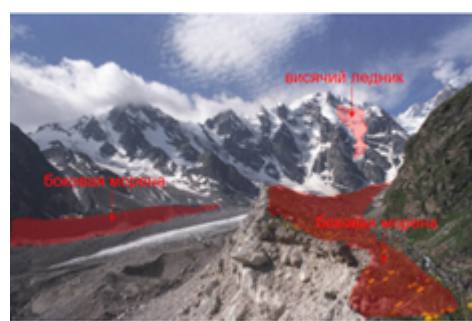


Рис. 4.15. Формы горного рельефа

Очень часто возникают показанные на рисунке полосы (ледниковая штриховка). Производит достаточно сильное впечатление: огромная скала в десятки или сотни метров (скальный выступ), отполированная часто идеально горизонтальными полосами. Складывается впечатление, что на поверхность пород действовали гигантские силы. Очень типичный пример – Скандинавия, Кольский полуостров, Северная Америка.



Рис. 4.16. Ледниковая штриховка

Друмлины – вытянутые холмы. Возникают, когда ледник тает и сбрасывает с себя морену. Бывают часто в виде вытянутых холмов. Иногда – в виде конусообразных камов или наоборот полос. Озы и камы встречаются в средней полосе. На Русской равнине таких образований достаточно, даже в Московской области.

### Шельфовый ледник. Айсберг

Если ледник разгружается в море или океан, то образуются айсберги. Помимо интересной формы и того, что 9/10 айсберга находится под водой – это на сегодня главная инженерно-геологическая проблема при освоении Северного Ледовитого океана. Потому что добыча полезных ископаемых, в частности, нефти и газа, связана

с устройством буровых платформ и скважины, которая на 2 км, а иногда и больше должна оставаться на месте. А в этом океане довольно обычны дрейфующие айсберги. Как нам защитить морские буровые платформы, в том числе промысловые, от воздействия айсбергов? К сожалению, эта задача до сих пор не решена. И на сегодня – это одно из самых важных препятствий для эксплуатации нефтяных и газовых месторождений в Арктике. Потому что если такая гора надвинется на платформу, то она её разрушит. И никаких платформ, способных противостоять воздействию движущегося под влиянием течения или ветров айсберга, к сожалению, нет. И сооружения созданные человеком не способны сопротивляться этим образованиям.

У нас уже есть в Северном, Баренцевом море буровые платформы – в этих районах уже добывается нефть, но с айсбергами пока не научились справляться, в отличие от штормов на Каспии. Очень часто поступает предложение взорвать айсберг, но это не очень хороший выход, несмотря на его простоту, дешевизну и эффективность, так как оказывает очень большое воздействие на животный мир моря.

На данный момент преобладающим методом борьбы является айсменеджмент, который заключается в попытках отбуксировать айсберг. Но это крайне сложная, рискованная, технически и инженерно тяжёлая задача, потому что айсберг (иногда достаточно большой) нужно как-то зацепить и оттащить. Но это не идеальный, очень дорогой, очень сложный и опасный способ, так как иногда бывает невозможно предотвратить – приходится останавливать бурение и убирать платформу. Но другого пути пока нет. Эксплуатация минеральных ресурсов в Арктике связана именно с таким ледовым воздействием. Там ещё есть стамухи, когда происходит орошение льдов, то это что-то типа айсбергов, потому что льдины собираются течениями и ветрами в большие массы и оседают на мелководье. Проблема в том, что достигая мелководья они способны воздействовать на морские осадки, оставляя глубокие борозды. При этом, если посмотреть на фотографии дна шельфа арктических морей, то там везде всё дно исполосовано гигантскими сделами айсбергов. Это многометровые траншеи, покрывающие практически всё дно. В этих условиях прокладка интернет-кабеля, нефте- и газопроводов сопряжена с гигантскими сложностями, потому что эти айсберги и стамухи повреждают не только платформу, а ещё способны повредить сооружения и линии связи, газопроводы на дне, даже если они установлены на значительной глубине.

Важное следствие ледников – это озёра, которые остаются после них. Например,



Рис. 4.17. Конечная морена (terminal moraine)



Рис. 4.18. Боковые и конечные морены

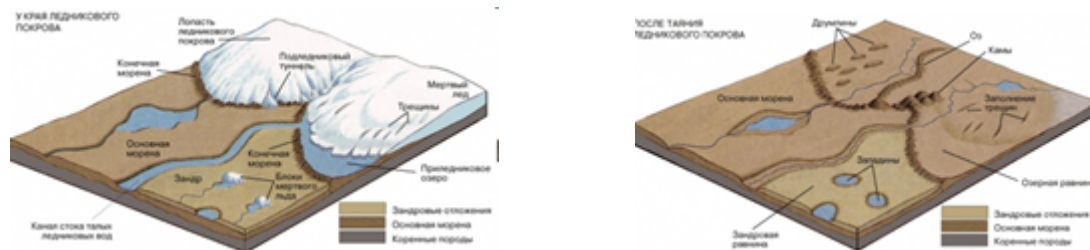


Рис. 4.19. Образования в результате работы ледника



Рис. 4.20. Типичные друмлины длиной в десятки метров в Висконсине

система Великих озёр – это ледниковые озёра. Есть 2 варианта образования озёр, связанных с ледниками:

- 1) Плувиальные озёра (Pluvial Lakes). Образуются, когда на равнине существуют такие ледники, то у нас довольно часто бывает более влажный климат. То есть, это в результате того, что у нас более влажный климат, большое количество осадков выпадает и у нас образуются большие территории, покрытые водой.
- 2) Проглициальные озёра (Proglacial Lakes). Здесь конечные морены играют роль дамб. Эта дамба образуется на пути речных вод тех рек, которые текут в направлении ледников (на север, например, Северная Двина). Можно было ожидать, что когда существовали ледники, то ледник служил дамбой для течения этой реки. У нас счастливо оказалось так, что это озеро исчезло, видимо, дренировалось. А в США, большие реки, которые встречали ледники, довольно низко спускавшиеся, образовали систему Великих Озёр, которые существуют до сих пор.

## Фьорды

Фьорды – ещё одни совершенно особенные ледниковые формы (долины). Они образовались в результате двух факторов. С одной стороны – прорезания рельефа ледниками, а с другой, после того, как ледники исчезли, произошла изостазия – поднятие территории, как реакция на вес ледника, затем – поднятие. И в результате – дальнейший врез этих долин и образование гигантских форм необыкновенной красоты. Норвежские фьорды и фьорды запада США (фьорды Скалистых Гор) выглядят приблизительно одинаково – это огромные долины с глубокими заливами, в которых встречаются ледники, снежники. Часто с гор, высотой несколько сот метров, падают весной водопады. У нас есть небольшие фьорды в районе Кольского полуострова.



Рис. 4.21. Фьорды

## Каменные глетчеры

Каменные глетчеры очень непростая вещь, в том числе в инженерно-геологическом плане, потому что, во-первых, он течёт с такими же скоростями, как ледник (это могут быть метры в год). Во вторых его не сразу различишь. Если про ледник сразу видно по моренам, по телу ледника, что здесь нужно проявлять осторожность и внимательно смотреть, то при виде каменного глетчера он не кажется таким очевидным. Даже в России только недавно нашли огромное количество каменных глетчеров, которых раньше не было на картах и о существовании которых не имели представления, именно из-за того, что они маскируются.

*Каменный глетчер* – это такое тело, которое состоит одновременно из льда и из обломков горных пород. Пропорции (соотношение обломков и льда) может быть разное. Очень часто лёд этот скрыт, потому что ему легче с поверхности растать, поэтому он где-то часто скрывается в теле. Именно поэтому его трудно иногда обнаружить и при этом он оказывается достаточно подвижным (динамичным) телом, поскольку лёд, находящийся внутри, способен к течению. Часто – это остатки ледников.

### Типы каменных глетчеров:

- 1) Каменные глетчеры с ледяным ядром. Образуется в результате разрушение ледника или ледника, на который попало слишком много моренного материала. То есть, он просто преобразовался, оказался покрытым ледником. Внутренняя часть – часть ледника – ледяное ядро, а остальной материал попал уже потом
- 2) Каменный глетчер, сцементированный льдом. Лёд, который оказался внутри этих каменных обломков – это лёд, который образовался в основном в результате попадания и замерзания воды в теле ледника. Это часть криолитозоны – это специфичные многолетние мёрзлые породы и тела в криолитозоне, потому что этот материал находится в многолетнем мёрзлом состоянии, просто из-за того, что там достаточно много путей для движения воды, то вода может туда попадать, накапливаться, замерзать и образовать такого типа каменный глетчер





Рис. 4.22. Каменный глетчер

Тема каменных глетчеров сегодня ещё открыта. Каменные глетчеры Кавказа, Алтая и стран Восточной Сибири ещё нуждаются в дополнительных исследованиях.

### Различия явлений и процессов

Явления – это то, что мы видим. Часто – это наблюдаемые формы рельефа. Примеры явлений:

- 1) Повторно-жильные льды
- 2) Курумы
- 3) Бугры пучения
- 4) Алас
- 5) Булгуннях
- 6) Солюфлюкционные террасы

К образованию явлений приводят процессы:

- 1) Морозобойное растрескивание
- 2) Выпучивание и десерпция (крип)
- 3) Пучение
- 4) Термокарст
- 5) Пучение
- 6) Солифлюкция

Например, такое явление, как курум, который мы видим сегодня, может не находиться в активном состоянии. Как, например, каменные поля в Германии, на которых уже давно прекратились все процессы. Там нет движения, но выглядят они как настоящие курумы. Их нужно различать, потому что мы должны представлять, что является активным, динамичным и опасным с точки зрения инженерной геологии, а что является просто каким-то интересным природным феноменом, и не больше.



## Лекция 5. Природная динамика

### Природная динамика

Природный комплекс (ПК) – это совокупность взаимосвязанных потоками веществ и энергии частей литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы.

Виды природных комплексов:

- Зональные ПК
- Азональные ПК
- Интразональные ПК

Зональные ПК на суше формируются под приоритетным влиянием климата, обусловлены соотношением тепла и влаги. К таким ПК относятся природные зоны (природный комплекс больших размеров с близкими условиями температур и увлажнения, определяющими в общем однородные почвы, растительность и животный мир). На равнинах природные зоны простираются в широтном направлении, закономерно сменяя друг друга от экватора к полюсам (Рис. 5.1). Соответственно, с изменением этих характеристик природных зон меняются и геокриологические характеристики (среднегодовая температура, глубина слоя сезонного протаивания или промерзания) (Рис. 5.2).



Рис. 5.1. Природные зоны

*Климатическая секториальность* видоизменяет широтную геокриологическую зональность. Ее проявление связано с циркуляцией воздуха, которая в свою очередь определяется тремя причинами:

- 1) преобладанием в верхней тропосфере почти для всей планеты западных ветров;
- 2) неоднородностью в распределении на поверхности Земли океанов и континентов;
- 3) существованием высоких горных хребтов, являющихся преградой на пути воздушных потоков.

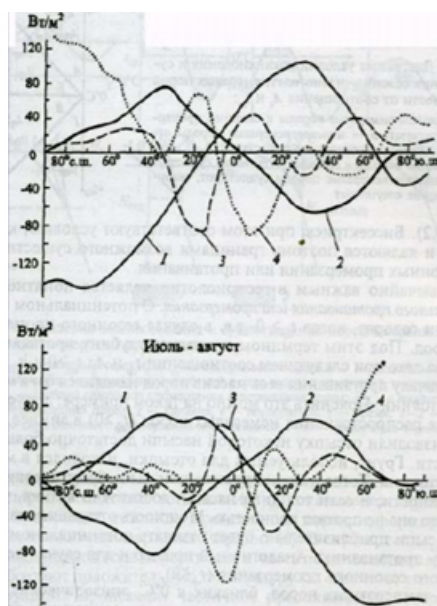


Рис. 5.2. Средние широтные величины составляющих теплового баланса (1 — радиационный баланс; 2 — изменения теплосодержания (накопление или потеря тепла за рассматриваемый период) гидросферы; 3 — фазовые преобразования воды; 4 — перераспределение тепла горизонтальными движениями в атмосфере и океанах)

Азональные ПК обусловлены наличием океанов и материков, а среди материков — гор и равнин. Среди азональных ПК есть очень большие по площади (Восточно-Европейская равнина, Тибет, Эфиопское нагорье, Аппалачи, Ла-Платская низменность и другие) и совсем небольшие — озеро, овраг, склон холма, речная долина и другие (Рис. 5.3).

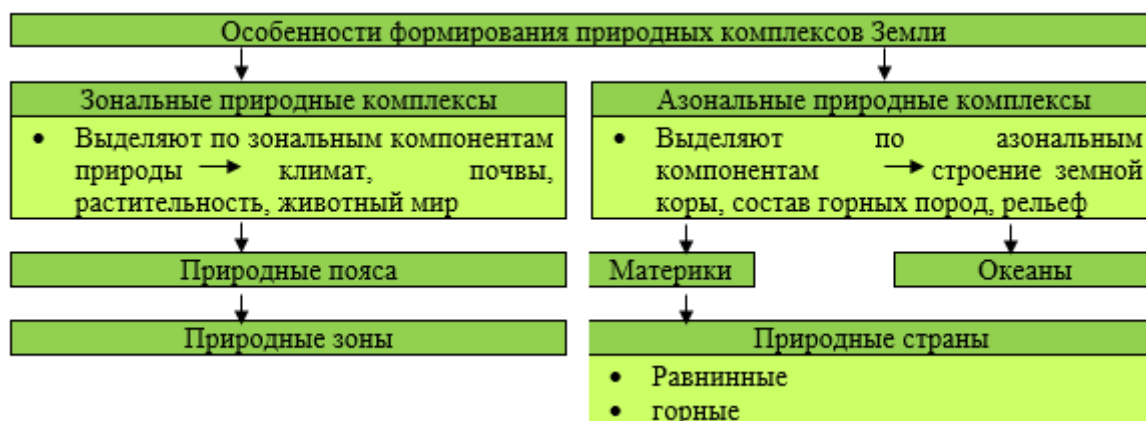


Рис. 5.3. Особенности формирования ПК Земли

Интразональные комплексы встречаются и в зональных, и в азональных ПК, но при этом часто локальные, то есть не преобладающие по площади (например, болото или солончаки).

Каждому ПК соответствуют свои криологические характеристики (среднегодовая температура, глубина протаивания, мощность многолетней мерзлой толщи и так далее). Эти характеристики обязательно будут связаны с характеристиками этого определенного комплекса.

*Высотная поясность* – это закономерное изменение природных комплексов и составляющих их компонентов с увеличением высоты места над уровнем моря (Рис. 5.4).



Рис. 5.4. Высотная поясность

Температурный градиент атмосферы может изменяться в широких пределах. В среднем он равен  $0,6/100$  м. Но в тропической пустыне вблизи поверхности земли он может достигать  $20/100$  м.

Часто наблюдается явление *инверсии температуры*. При данном явлении температура с высотой увеличивается и температурный градиент становится отрицательным, т.е. может быть равен, например  $-0,6/100$  м. Если температура воздуха одинакова на всех высотах, то температурный градиент равен нулю (характерно, например, для Восточной Сибири, Кордильер, Анд, Северной Америки).

По причине образования инверсии делятся на радиационные и адвективные (инверсии оседания). Приземные инверсии возникают чаще всего над поверхностью почвы (снежного или ледяного покрова), выхожденной ночным излучением, и в таких случаях называются радиационными инверсиями. Различают еще снежные, или весенние, инверсии в приземном слое. Инверсии в свободной атмосфере – чаще всего инверсии осадения, связанные с нисходящими движениями воздушных слоев. При этом может играть роль и излучение с поверхности слоя облаков или мглы. К инверсиям осадения относится в основном и пассатная инверсия. Кроме того, инверсия температуры может быть связана с адвекцией теплого воздуха на холодную подстилающую поверхность (адвективная инверсия), с фронтальной поверхностью (фронтальная инверсия), с турбулентностью (турбулентная инверсия), с орографией (орографическая инверсия).

Температурные инверсии определяются во многих горных системах континентальных областей обратное расположение вертикальных почвенных зон. Так, в Во-

сточной Сибири у подножия и в нижних частях склонов некоторых гор располагаются инверсионных тундры, далее идут горные таежные леса и выше снова горные тундры.

### Естественная динамика мерзлых толщ

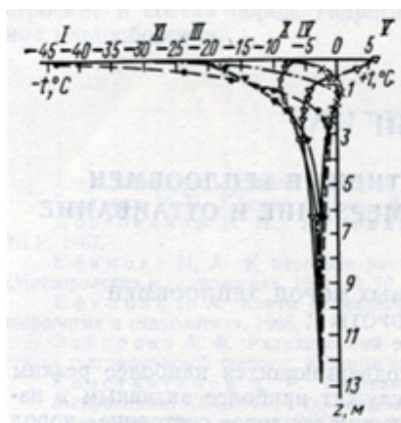


Рис. 5.5. Кривые изменения температур пород в зависимости от глубины в различные моменты времени

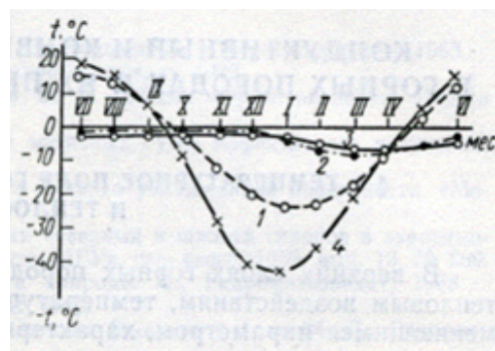


Рис. 5.6. Кривые изменения температур пород в зависимости от времени на глубинах: 1 – 0,4м; 2 – 2м; 3 – 2,4м; 4 – воздуха

Распространение криолитозоны на территории России обусловлено:

- 1) Историей развития верхних горизонтов земной коры в неоген-четвертичное время, в течение которого сформировалась современная геологическая и климатическая обстановка
- 2) Условиями теплообмена на поверхности и в толще горных пород. Об уровне современного теплообмена, позволяет судить среднегодовая температура пород

Влияние граничных условий на формирование мощности мерзлых толщ (Рис. 5.7) (изменение мощности сезонного оттаивания (точка  $\xi$ ) в зависимости от температуры, то есть приближаясь к нулю, мощность сезонного оттаивания увеличивается. Так же это точка и максимального промерзания. Потенциальная кривая (кривая 2) показывает, с какой бы мощности был слой оттаивания на этой территории, если бы здесь существовала мерзлота и наоборот.)

Есть 10ти или 12-летние солнечные циклы. Все это отражается на температурах поверхности, возникают разные периоды колебаний (есть 12-, 40-, 80-, 300-летние циклы колебаний). Эти циклы колебаний они сказываются на распределение температуры по глубине (Рис. 5.8).

На (Рис. 5.9) представлены криолитозоны, которые расклассифицированы на многолетнюю и сезонную криолитозоны.

Причины для оледенения:

- Астрономические причины
- Изменения солнечной радиации

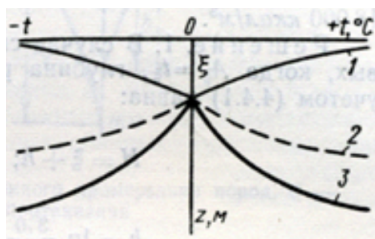


Рис. 5.7. Широтная зональность: 1 – глубина сезонного промерзания и оттаивания пород; 2 – глубина потенциального сезонного промерзания; 3 – глубина распространения годовых колебаний температур



Рис. 5.8. Затухание амплитуд с глубиной в зависимости от Тм.н.: 1 – 10 лет; 2 – 40 лет; 3 – 300 лет; 3а – смещение фаз – максимумов и минимумов – в глубину за четверть периода

Область (по наличию и отсутствию мерзлых пород)	Зона по ландшафтно-климатической зональности теплообмена на поверхности	Подзона			Тип сезонного оттаивания многолетнемерзлых и сезонного промерзания талых пород (по устойчивости процесса)
		по особенностям распространения многолетне-мерзлых, талых и немерзлых пород	по площади, занимаемой многолетне-мерзлыми породами в пределах зоны, %	по среднегодовой температуре по-род, °С	
Многолетняя криолитозона (многолетне-мерзлые горные породы)	Северная геоэкологическая	Сплошная (северная часть зоны)	Более 95	Ниже -10 -5... -10 -3...-5	Арктический и полярный Устойчивый Длительноустойчивый
		Преимущественно сплошная (южная часть зоны)	90—95	-0,5... -3	Переходный, полупереходный и длительноустойчивый
	Южная геоэкологическая	Прерывистая Массивно-островная Островная и редкоостровная	75—90 25—75 Менее 25	+0,5... -2 +1...-1 +2... -0,5	Переходный и полупереходный
Сезонная криолитозона (сезонномерзлые горные породы и почвы)	Северная сезонномерзлая	Сплошная талых и немерзлых пород	Доли процента	+0,5... +2	То же
	Центральная сезонно-мерзлая	То же	—	+2... +5 +5... +10 +10... +15	Длительноустойчивый Устойчивый Южный
	Южная сезонно- и кратковременномерзлая	Сплошная немерзлых пород		Выше +15	Субтропический

Рис. 5.9. Распространение многолетне- и сезонномерзлых (талых и немерзлых) пород на территории России



- Атмосферные изменения
- Тектонические причины

### Астрономические причины

Известно, что орбита Земли слегка эллиптическая и она меняется. Ее степень вытянутости меняется от почти круговой до вытянутой и период в течение которого происходят эти изменения примерно 100 тысяч лет. Соответственно, чем ближе Земля к Солнцу, тем больше солнечной радиации, на планете становится теплее, и наоборот, чем дальше Земля, тем холоднее (Рис. 5.10).

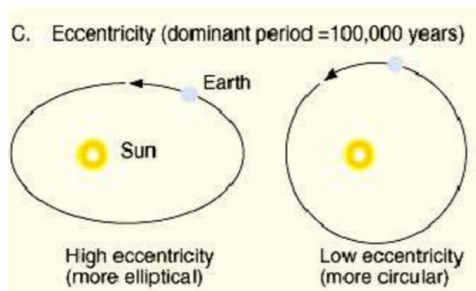


Рис. 5.10. Варианты земной орбиты

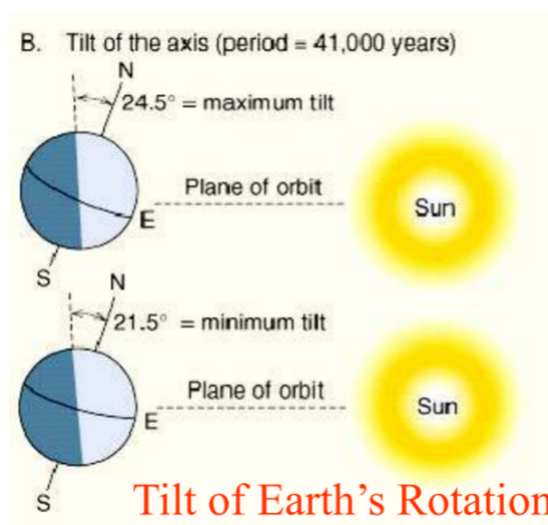


Рис. 5.11. Наклон оси вращения Земли

Также известно, Земля имеет ось вращения и эта ось наклонена примерно на 23 (меняется от 21 до 24) (Рис. 5.11).

Изначально Земля была расплавлена и раскалена из-за сильного вулканизма и частого столкновения с другими телами. Но, в конце концов, из-за накопления воды в атмосфере, внешний слой планеты охлаждался и превращался в Земную кору. Немного позднее, в результате столкновения по касательной с небесным телом размерности Марса и массой около 10 % земной, образовалась Луна. В результате большая часть ударившегося объекта и часть вещества земной мантии были выброшены на околоземную орбиту. Из этих обломков образовалась прото-Луна и начала обращаться по орбите с радиусом около 60 000 км.

Земля в результате космического удара получила резкий прирост скорости вращения (один оборот за 5 часов) и заметный наклон оси вращения. Дегазация и вулканическая активность создали первую атмосферу на Земле. Конденсация водяного пара, а также лед из сталкивающихся с Землей комет, образовали океаны.

### Прецессия оси

Наблюдать прецессию (Рис. 5.12) достаточно просто. Нужно запустить волчок и подождать, пока он начнёт замедляться. Первоначально ось вращения волчка верти-

кальна. Затем его верхняя точка постепенно опускается и движется по расходящейся спирали. Это и есть прецессия оси волчка.

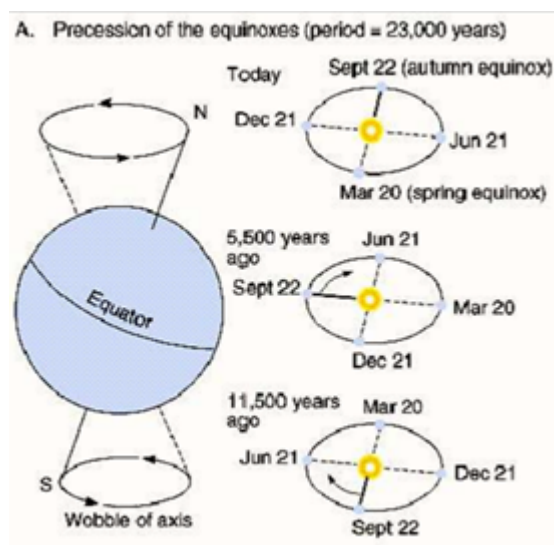


Рис. 5.12. Прецессия оси

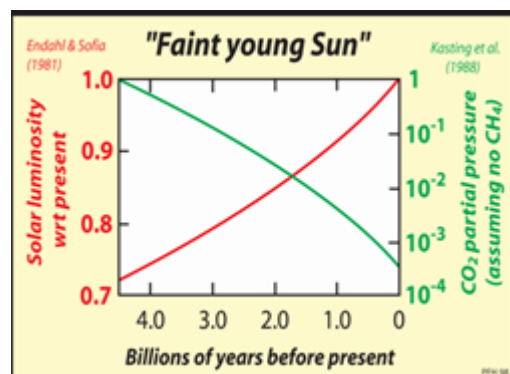


Рис. 5.13. «Парадокс молодого Солнца»

### «Парадокс молодого Солнца»

Светимость Солнца (Рис. 5.13) постепенно увеличивается. В начале образования Земли она оставляла только 70 % от сегодняшнего радиационного потока, сегодня – 100 %. Светимость Солнца будет продолжать увеличиваться пока оно не взорвется. Парадокс заключается в том, что радиационный поток все время увеличивается, а фактические данные говорят о том, что в течение геологической истории температура падала. Самое логичное объяснение данного явления в том, что падала концентрация углекислого газа в атмосфере за счет развития биосферы, так как фотосинтезирующие растения постоянно совершенствовались (научились превращать углекислый газ в кислород).

### Палеотемпературы: докембрий

#### Период «ледяного шара (снежка)»

Самый холодный период в истории Земли (примерно 900-700 млн лет назад). Падение температур составляло до -100°C.

### Отсутствие выветривания

При выветривании происходит реакции замещения (одни соли (силикаты) замещаются на карбонаты или другие силикаты). Соприкасаясь с воздухом, силикатные горные породы подвергаются химическому выветриванию, которое удаляет диоксид углерода из атмосферы. В общем виде эти реакции выглядят так:



Пример подобной реакции — выветривание волластонита:

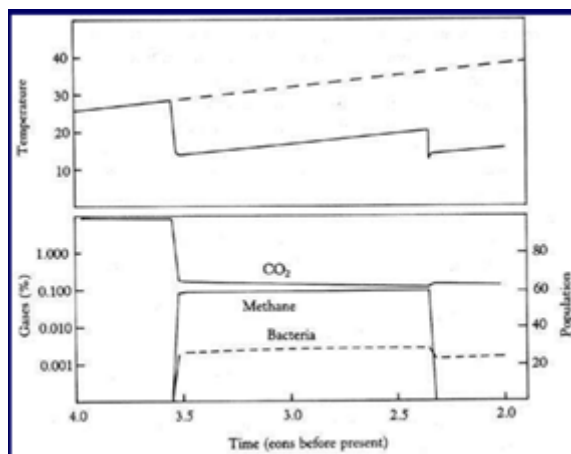


Рис. 5.14. Изменение температуры в докембрии (Сплошная кривая – изменения температуры в докембрии. В какой-то момент температура резко упала из-за появления фотосинтезирующих бактерий (цианобактерий). Парниковый эффект уменьшился. Следующее падение температуры, скорее всего, связано с появлением метанотрофов (примерно 2,2-2,3 млрд лет назад). Пунктирная линия означает, как должна была увеличиваться температура в связи с увеличением солнечной радиации)

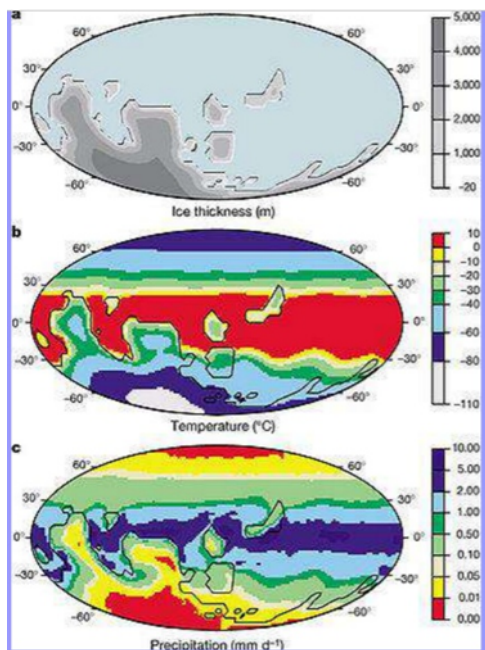
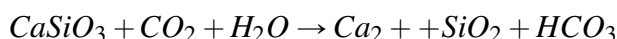


Рис. 5.15. Период «ледяного шара» в истории Земли



Освобожденные катионы кальция реагируют с растворенным бикарбонатом в океане, образуя карбонат кальция как химически осажденную горную породу. Это переводит углекислый газ из воздуха в литосферу, и в стабильном состоянии на геоло-

гических масштабах времени компенсирует выделение углекислого газа вулканами.

Попадание части углекислого газа в карбонаты и его отложения в морях (Рис. 5.16). В дальнейшем карбонаты в связке с углекислым газом образуют карбонатные толщи. Это, кстати, является одной из причин похолодания, так как в толщах углекислый газ, изъятый из атмосферы, что приводит к уменьшению парникового эффекта, следовательно понижение температуры. Затем карбонаты разлагаются и происходит диффузия через земную кору в атмосферу (Рис. 5.17). Скорее всего из-за повышения концентрации углекислого газа в атмосфере после его выделения из земной коры и произошло таяние ледников.

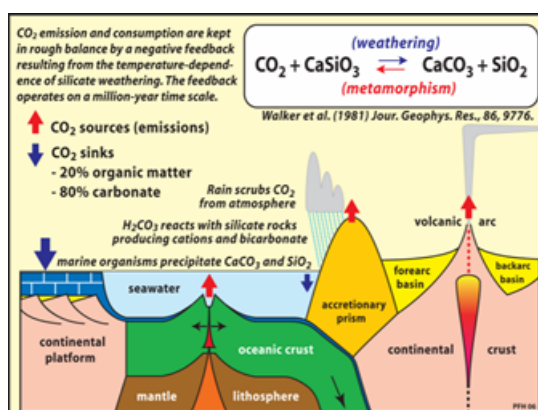


Рис. 5.16. Попадание углекислого газа в земную кору

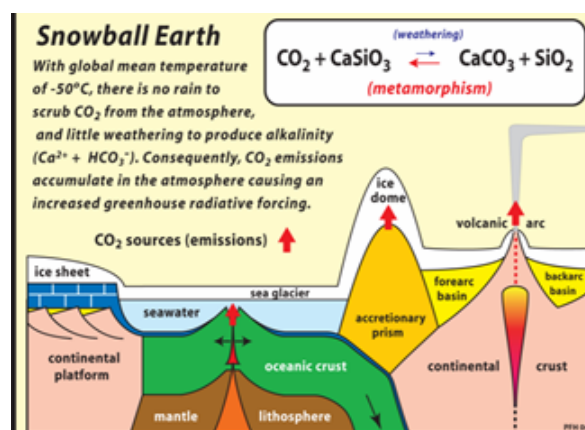


Рис. 5.17. Выход углекислого газа в атмосферу

На континентах таяние ледников обнажит большое количество ледниковых отложений, которые начнут эродировать и выветриваться. Попавшие в результате этого в океан осадки, богатые такими биогенами, как фосфор, вкупе с обилием  $CO_2$ , вызовут взрывной рост популяций цианобактерий. Это приведёт к относительно быстрой реоксигенации атмосферы, которая может быть связана с возникновением эдиакарской биоты и последующим «Кембрийским взрывом» — большая концентрация кислорода позволила развиваться многоклеточным формам. Эта петля положительной обратной связи растопила лёд в геологически короткое время, возможно, меньшее, чем 1000 лет; накопление в атмосфере кислорода и падение содержания  $CO_2$  продолжалось несколько последующих тысячелетий.

## Палеотемпературы: фанерозой

Изменений температуры в фанерозое (Рис. 5.18). 3 периода похолодания. Ледниковые отложения, широко распространенные на континентах Земли на границе ордовика-силурийского периодов, на границе каменноугольного и пермского периодов. На рисунке показан предположительный ход температуры в это время. И мезозойское похолодание. Плейстоценовое похолодание.

Причины, почему при возникновении суперконтинента (Гондвана, Пангея), на нем будет преимущественно холодно: выветривание, теплые воздушные потоки с океана до центра континента почти не доходят, мало растительности (чем меньше раститель-

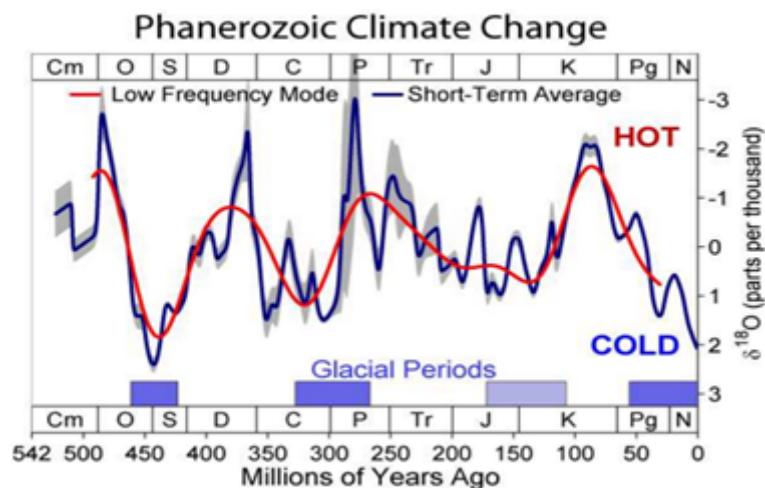


Рис. 5.18. Изменение температуры в фанерозое

ности, тем выше коэффициент Альбе́до (коэффициент отражательной способности), чем он выше, тем холоднее пространство).

### Палеотемпературы: кайнозой

Суперконтинентов не наблюдается. Очень маленькая концентрация углекислого газа. Она все время падала из-за очень высокой эффективности фотосинтеза, распространения растительности и так далее, но в конце началось похолодание.

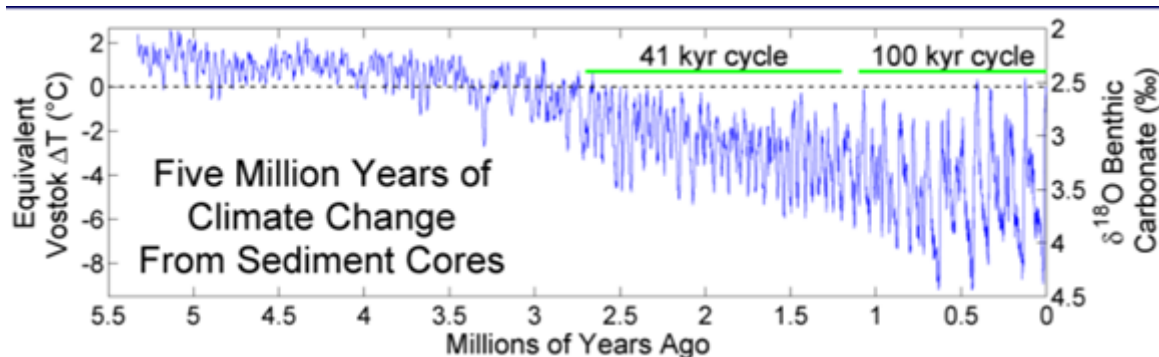


Рис. 5.19. Изменение температуры в кайнозое



## Лекция 6. Динамика мерзлотных условий

### Динамика мерзлотных условий

В историческом плане в фанерозое наблюдалось несколько периодов похолодания. Затем в мезозое (Mezosoic), хотя здесь не закончилось ледниками. И уже близки к нам период Paleocene. Говорили о причинах их возникновения. При том что содержание углекислого газа в атмосфере, все время снижалось и наступление холодного периода в Paleocene связано с уменьшением парникового эффекта и понижения температуры поверхности земли. Но то что касается ледниковых периодов, которые существовали в период фанерозое, их происхождение не совсем ясно. Возможно, здесь большую сыграло роль существования супер континентов – Гондваны ( в Ordovician и Silurian периоде) и Пангея (в пермском периоде).

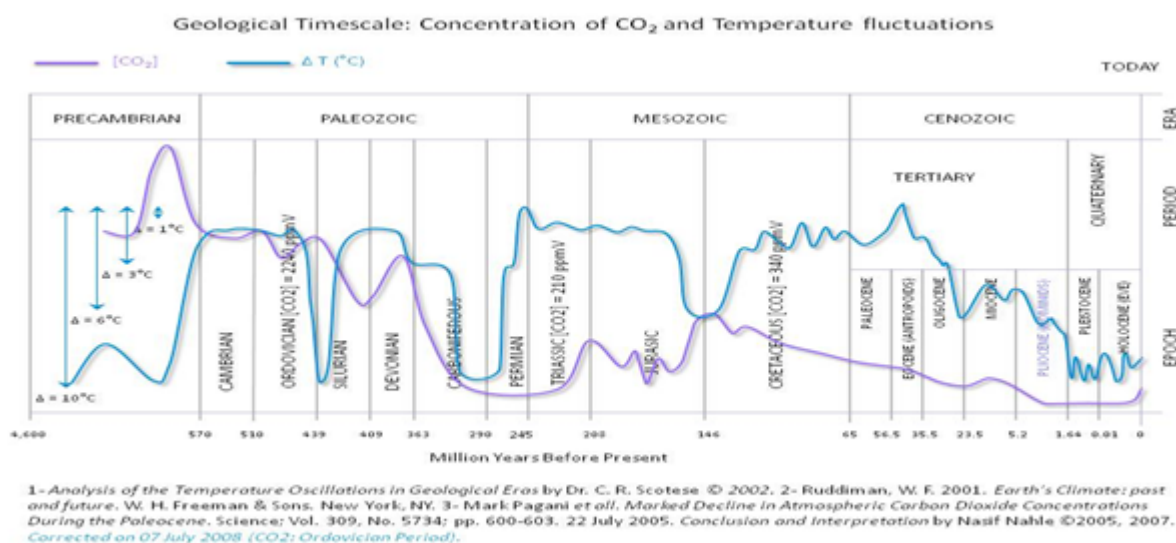


Рис. 6.1. Сравнение содержания углекислого газа в атмосфере в геологической истории за 4600 миллионов лет до настоящего времени

- Гондвана – древний суперконтинент в южном полушарии, включавший в себя Африку, Южную Америку, Антарктиду, Австралию, Новую Зеландию, а также Аравию, Мадагаскар и Индостан. Образовалась в конце докембрия (750-530 млн л.н) в результате раскола суперконтинента Родиния. Северные материки в девоне соединились в северный суперматерик – Лавразию. В конце палеозоя оба материка сблизились и образовали суперконтинент – Пангею. Пангея просуществовала весь пермский период и нижний трианс.
- Пангея (др.-греч. «всеземля», от др.-греч. «весь», «целый», «каждый» + «Земля») – суперконтинент, существовавший в конце палеозоя и начале мезозоя и объединявший практически всю сушу Земли 335–175 млн лет назад – Гондвану, Лаврентию, Балтию и Сибирь. Название предложил Альфред Вегенер (нем. Alfred Lothar Wegener). В последствие на Mezosoic и в наше время – в Niocene, Paleocene

– таких больших материков на земле больше не возникало, за исключением Евразии.

В последствие на Mesozoic и в наше время – в Niocene, Paleocene – таких больших материков на земле больше не возникало, за исключением Евразии.

### Что происходило в последние 5 млн лет

Понижение температуры. 3,5 млн. лет назад, примерно современные условия температурные на поверхности, происходило понижение температуры, вызывавшееся циклами Миланковича, возможно, что были и другие причины температурных колебаний и соответственно эпоха оледенения, которая наблюдалась в плейстоцене.

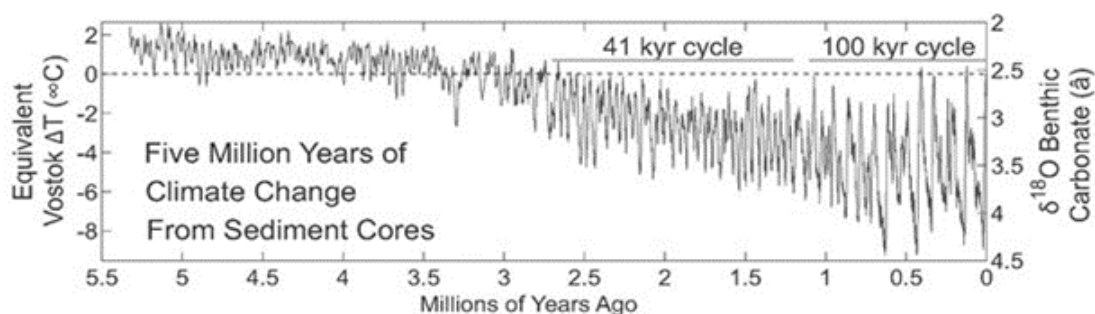


Рис. 6.2. Палеотемпературы : Кайнозой

Их было несколько. Данные скважины по глубоким кернам Антарктическим показывает, что изменение температуры, периоды похолодания, последний ледниковый максимум (собственно самая низкая температура была сравнительно недавно), и изменение содержания углекислого газа и метана в ледяных кернах, которые примерно совпадают. В последний период похолодания видно, что он совпадает и с минимум содержанием углекислого газа в атмосфере в этот момент. На (Рис. 6.3) мы можем судить как происходили изменения концентрации углекислого газа в течение последних 160 тыс лет.

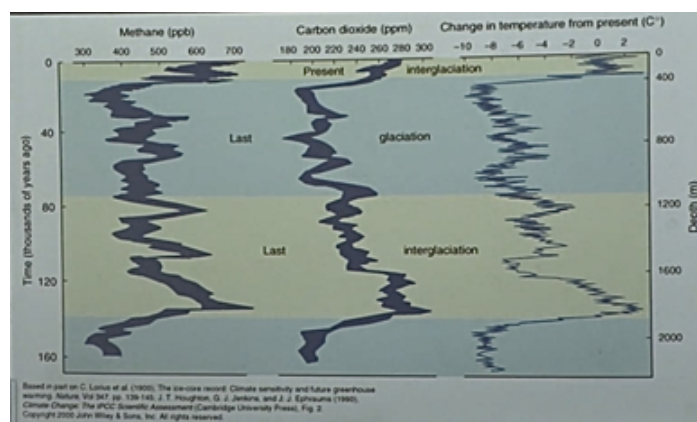


Рис. 6.3. Изменения концентрации углекислого газа в течение последних 160 тыс лет.

## Динамика мерзлых толщ

Те колебания температуры, которые происходили за последние полмиллиона лет, на различных территориях Евразии, Америки, возникали оледенения. Те межледниковые периоды, которые выделяются в Западной и Восточной Сибири, это большая часть территории нашей страны, наиболее известные – это последние межледниковые Казанцевское и Каргинское, и фазы оледенения на этой территории – это Сартанская и Зырянская. Сартанское оледенение, считающееся наиболее холодным периодом времени, при этом оно занимало наибольшую площадь территории Евразии, Европы и Азиатской части и эти фазы соответствуют температурным стадиям, которые выделяются на территории Аляски.

Соответственно изменению температур на поверхности, учитывая климатические изменения и фазы оледенения, возникали и протаивали мерзлые толщи. Многократно мерзлые толщи возникали большой мощности и были периоды, когда они исчезали совсем. Для каких-то территорий, возможно, сохранялась часть вечной мерзлоты, учитывая достаточно низкие температуры плейстоцен.

На (Рис. 6.4) показаны границы распространения криолитозоны, т.е. мерзлых пород, в различные периоды позднего кайнозоя. Граница распространения мерзлых толщ опускалась достаточно далеко к Югу. Положение границ мерзлых толщ показано примыкающая к Каспийскому морю, Югу Казахстана, практически вся территория подвергалась криогенному образованию и возникновению больших областей развития многолетних мерзлых толщ. Практически вся Россия, не считая Крыма и самый Юг. На большей части территорий происходило их формирование. Соответ-

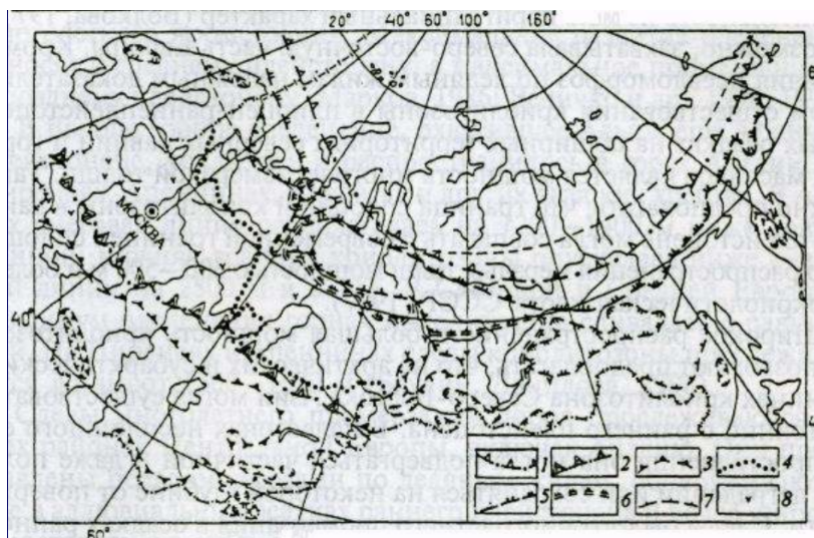


Рис. 6.4. Схема возможного распространения криолитозоны к концу различных периодов позднего кайнозоя (по К.А. Кондратьевой). 1 — поздний плиоцен; 2 — средний плейстоцен; 3 — поздний плейстоцен; 4 — ранний голоцен 5 — климатический оптимум голоцена; 6 — поздний голоцен (реликтовая мерзлота на глубине 70—200 м от поверхности); 7 — современное распространение криолитозоны; 8 — распространение псевдоморфоз по повторно-жильным льдам за пределами современной криолитозоны

ственно наблюдалась динамика.

Границы распространения ледников максимального оледенения для Евразии: ледниковый щит занимал гораздо больше территорий в Западной части, чем в Восточной. В Восточной части значительные области оставались лишённые ледникового покрова. Соответственно здесь возникала мерзлота.

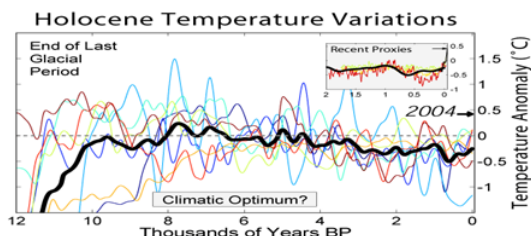


Рис. 6.5. Повышение температуры в голоцене

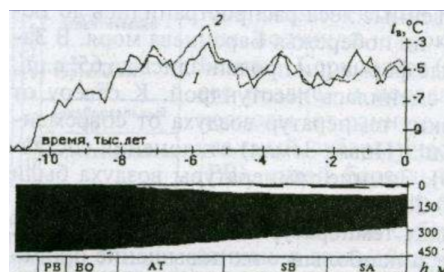


Рис. 6.6. Мерзлые толщи

В голоцене сначала произошло повышение температуры, примерно на уровне современных отметок, затем некоторые колебания, максимум которых пришелся от 4 до 8 тысяч лет. Температура повышалась не очень значительно, примерно полградуса, но это потепление оставило заметный след на территории нашей страны, в частности в Якутии и не только.

Мерзлые толщи, которые возникли и существовали на территории свободных от ледников в конце плейстоцена, поскольку происходило повышение температуры, соответственно мощность этих многолетних мерзлых толщ в конце (в позднем плейстоцене) была максимальна. Затем из-за того, что происходило потепление, эта мощность уменьшалась (причем снизу) и частично происходило протаивание мерзлых толщ на поверхности. В некоторых районах оттаивание происходило (и впоследствии опять возникало), в некоторых нет. После наблюдалось некоторое образование мерзлых толщ, часть является современной, их возраст менее 4 тыс. лет.

## Влияние изменений климата и поверхности на температурный режим горных пород

### Изменения

Изменение в животном мире: в конце плейстоцены – холодный и суровый период закончился, но, на этот период пришлось вымирание мамонтов. Напротив, олени прекрасно себя чувствовали во весь период голоцен. Интересно, что фазам оледенения соответствовало изменение человеческих культур. Смена среднего палеолита, и верхнего, граница примерно совпадала с началом больших холодов в конце плейстоцены. Изменение человеческих культур : искусство в человеческой цивилизации возникло в довольно холодную эпоху, около 30-40 тыс. лет. Хотя для высоких достижений человека необходимы теплые и благоприятные климатические условия.

### Криология планет

Холод широко распространен во Вселенной – это скорее естественное состояние тел, которое находится в космическом пространстве. Более естественное, чем горячее



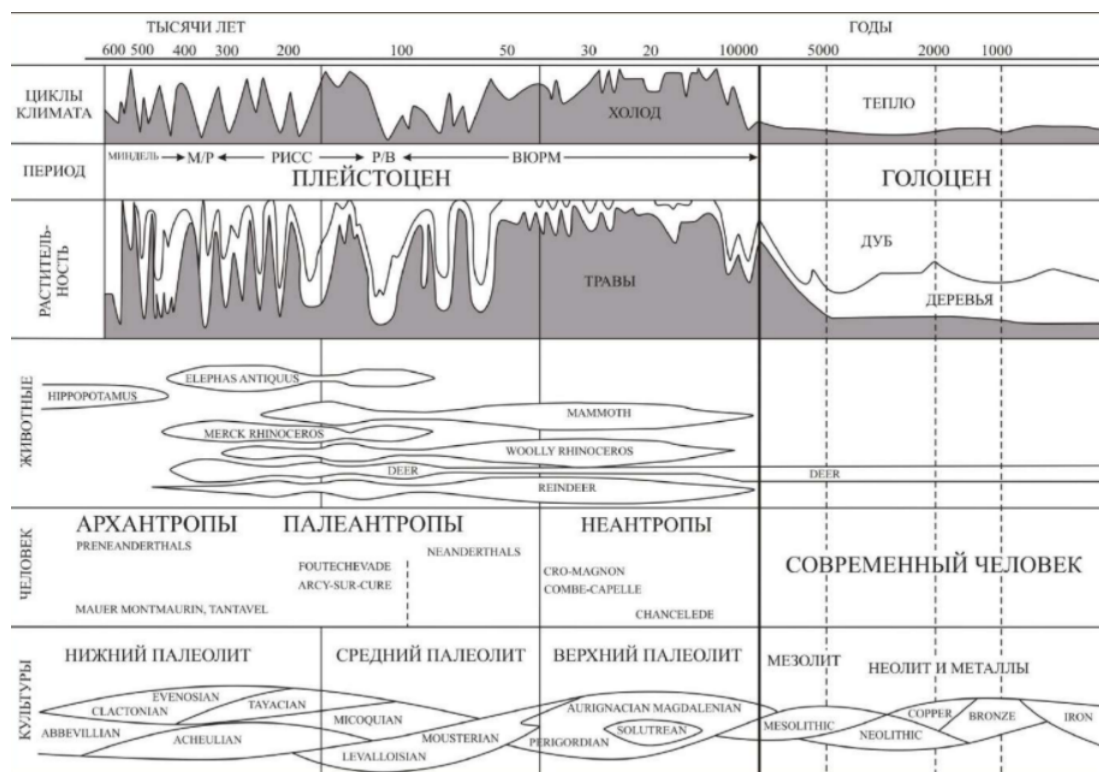


Рис. 45. Временная (годы, сверху) шкала изменений сверху вниз: температуры, растительности, развития животного мира и человеческих культур (Leroi-Gourhan, 1989)

Рис. 6.7. Синхронность климатических изменений, изменение растительности, поверхности, и даже изменение человеческих культур за последние полмиллиона лет

состояние, которое характерно для звезд. Планеты и малые тела больше находятся при низких температурах, ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . В солнечной системе такие тела преобладают.

В Антарктиде существует целая группа подледниковых озер, наиболее крупное озеро – Восток. Считается, что такие условия могут повторяться на других планетах Солнечной Системы. Достаточно толстая масса льда, мощность ледникового щита Антарктиды превышает 4 км, но этот ледник теплый.

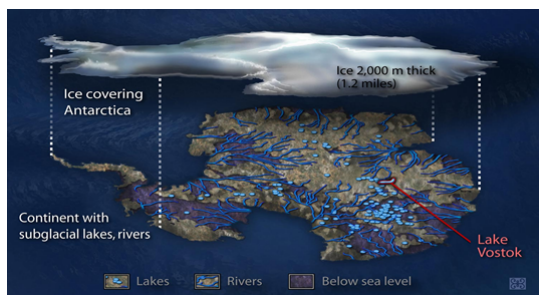


Рис. 6.8. Существование подледникового озера в Антарктиде

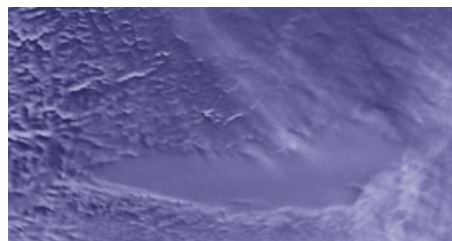


Рис. 6.9. Ложе Антарктического ледника

На ложе Антарктического ледника существуют условия для жидкой воды, и там во впадинах возникают озера. Считается, что нет путей связей через подземные воды



с мировым океаном, возможно, что оно изолировано от внешней среды, и видимо давно, со времени существования ледникового щита Антарктиды, которое оценивается, вероятно, десятками миллионов лет. Поэтому исследования этого бассейна представляют интерес с точки зрения форм жизни, которые сохранились с той поры. Эти условия на поверхности – достаточно низкие температуры, они могут моделировать ту ситуацию, которая возникает на некоторых телах Солнечной Системы.

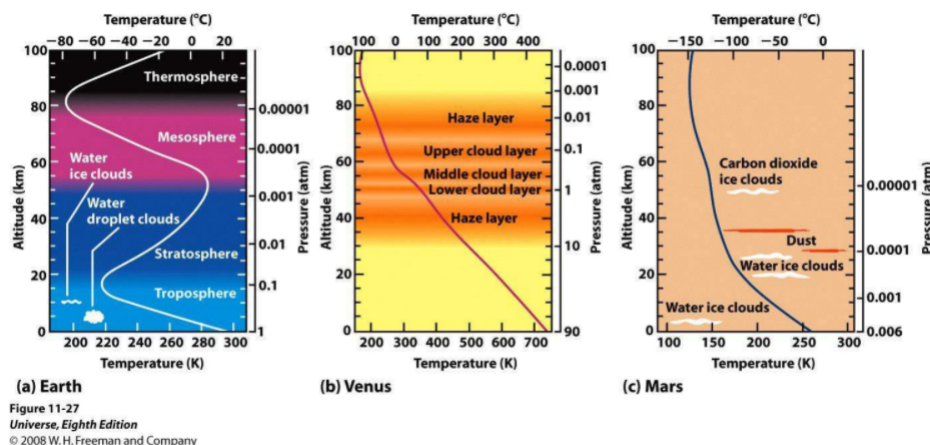


Рис. 6.10. Сравнение температур

Если рассматривать планету Венеру, из-за того что она обладает плотной газовой оболочкой, давление на поверхности достигает примерно 90 атмосфер, т.е. почти в 100 раз больше чем на земле. Атмосфера эта состоит из углекислого газа, соответственно значительный парниковый эффект, который приводит к тому, что здесь достаточно высокие температуры.

На Марсе разреженная атмосфера, так же в основном состоящая из углекислого газа, но давление этой атмосферы совсем небольшое, составляет тысячные доли того давления, которое есть на земле. Соответственно такая тонкая неплотная атмосфера не создает парникового эффекта, не смотря на то, что Марс достаточно близко к Земле, температура поверхности Марса низки. Таким образом, на Марсе условия для формирования каликтозона, значительно более благоприятны. Там возникают мерзлые породы, многолетние мерзлые толщи и все процессы которые с ними связаны. При том что расстояние от Солнца не очень отличается от расстояния, на котором находится Земля. В данном случае это не играет важной роли.

На полюсах существуют полярные шапки, которые состоят, поскольку температуры очень низкие, углекислый газ, содержащийся в атмосфере, он способен существовать в твердой фазе, хотя там и твёрдый лед, помимо твердой углекислой кислоты. Кроме того наблюдаются явления в кратерах – ледяные озера, видимо основная часть воды на поверхности Марса исчезла, но в какой то части сохраняется, и есть все основания думать что все запасы твердой воды льда находятся в криолитозоне Марса. И при попадании в кратерах часть поверхностной литосферы разрушается, и вода может оказаться на поверхности в разной форме, в том числе в виде таких ледяных озер (Рис. 6.14).

Выбросы вещества – ударные образования, имеют характерные черты грязевых брызг, которые возникают в результате плавления части подземных льдов и выброса этих потоков на окружающие территории. В том числе возникает эрозия поверхности в результате выброса жидкой воды.

На (Рис. 6.16) представлены Саратовские овраги, эрозионной формы, которые развиваются на берегах Волги, эти образования широко встречаются на поверхности Марсе. Сейчас там не наблюдается содержание жидкой воды, но в прошлом это было обычным явлением – эрозионные формы на поверхности. Так же были овраги, имеющие глубокий врез, например, зафиксирован врез стен, достигавший 6 км.

Очень сложный вопрос – существовали ли ледники? Поскольку существовала вода, судя по эрозионным формам, температуры достаточно низкие, соответственно можно предположить, что ледники существовали, но мнения расходятся, хотя исключать существование ледников в прошлом на Марсе нельзя.

Полярные шапки существуют, из-за полярного положения, за счет высокого значения альбедо, коэффициент отражения на этих полярных шапках, температуры их достаточно низкие.

Сама поверхность Марса представлена с одной стороны песчано-полеватым, при этом на поверхности наблюдаются достаточно крупные обломки. Возможно, что такое распределение частиц возникло в результате повышения, понижения и замерзания воды в трещинах, приводящее к такому разрушению материала и образованию таких форм на поверхности.

#### Возможные категории воды на Марсе:

- Существование в водных потоках
- Подземные резервуары
- Какое то количество льда в полярных шапках
- В верхних горизонтах литосферы Марса, вечной мерзлоте
- Подземный лед – значительная часть поверхности

Строение больших планет Солнечной Системы свидетельствует о том, что значительная часть планет состоит из газов. Причем, водород в строении Юпитера играет

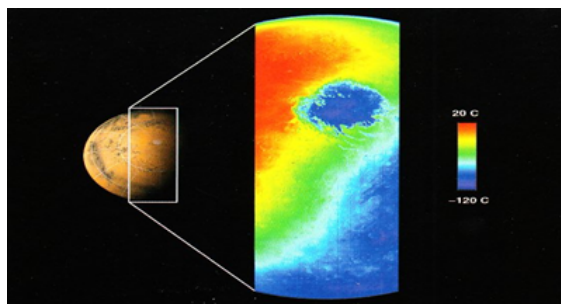


Рис. 6.11. Температура Марса



Рис. 6.12. Марс

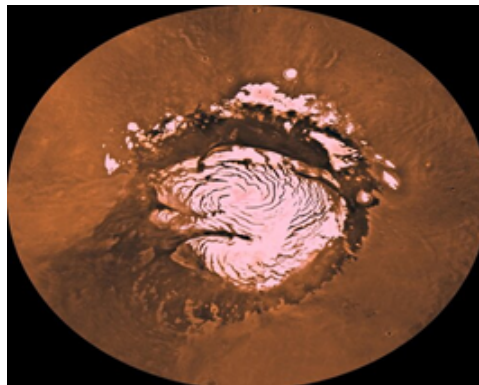


Рис. 6.13. Кратеры

важную роль – в верхней части строение планеты есть газообразная фаза, ниже присутствует жидкий водород, и даже твердой. Значительная часть планеты состоит из твердого водорода. Температуры растут в глубину.

Примерно такое же строение Сатурна, состоящее из газа жидкого водорода и вероятно твердого ниже. На дальних планетах из-за того, что водород сравнительно легкий газ, и ему было трудно оказаться на периферии Солнечной Системы из-за этого, но возможно какое-то количество присутствует в строении Урана и Нептуна. Считается, что какую-то роль играет участие металла и горные породы. Но для нас наиболее интересны спутники этих планет.

Они интересны тем, что здесь действительно развита калийтоzona, в том числе состоящая из льда, и некоторые процессы похожи на те, которые возникают на Земле.

Альbedo некоторых спутников увеличивается, причем диаметр этих планет сравним с Землей, при том, что они имеют довольно низкую температуру.

**Спутник Ио** небольшой, с температурой примерно  $-143^{\circ}\text{C}$ . Вода здесь обязана существовать в твердой форме, хотя на Ио проявляется вулканическая активность и частично вода может плавиться.

На Спутнике Юпитера – Ио, есть несколько действующих вулканов. Его поверхность ледяная, на которой наблюдаются образования в виде трещин.

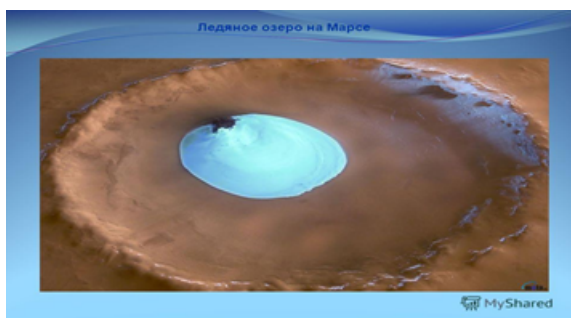


Рис. 6.14. Ледяные озера на Марсе

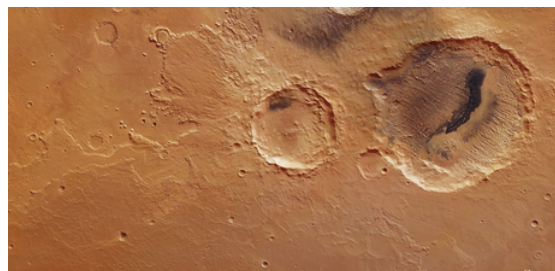


Рис. 6.15. Эрозия поверхности в результате выброса жидкой воды



Рис. 6.16. Саратовские овраги



Рис. 6.17. Внутреннее строение Юпитера

**Ядро:** металлическая оболочка, силикатная, а внешняя оболочка – водяная. Не совсем ясно, какая доля водной оболочки жидкая; внешняя – лед, под внешней – подвижный лед, находящийся в высокой температуре. Взаимодействуя с большими планетами с очень большим тяготением, гравитация вызывает приливные внешние и внутренние, которые приводят к разогреву, поскольку вещество расширяется, сжимается, возникает трение, в результате этих движений выделяется большое количество тепла.

Если там действительно есть вода, то можно предположить существование жизни, есть свет и есть все возможности для возникновения жизни.

### Спутник Ганимед

Похожая структурой поверхности – борозды, кратеры, свидетельствующие о динамичности поверхности, значительно состоящей из льда. По строению поверхности крупных спутников Юпитера можно говорить о их возрасте. Ио наиболее молодая, Европа на которой активны процессы движения поверхности и в меньшей степени Ганимед и Калисто, хотя там тоже наблюдаются эти явления.

### Спутники Сатурна

**Энцелад.** Ледяная поверхность, с теплом, которое создается в результате приливных движениях при взаимодействия с планетой. На поверхности наблюдаются такие явления – прорывы газа, нагрева льда, возможно превращение его в воду, и таких явлений вулканизма. Еще более далекие планеты, на которых тоже есть спутники, например у Урана и Нептуна, поскольку это лед и другие газы помимо водяного газа (метан, углекислота) формируют поверхность и процессы.

table 15-1 The Galilean Satellites Compared with the Moon, Mercury, and Mars							
	Average distance from Jupiter (km)	Orbital period (days)	Diameter (km)	Mass		Average density (kg/m <sup>3</sup> )	Albedo
				(kg)	(Moon = 1)		
Io	421,600	1.769	3642	$8.932 \times 10^{22}$	1.22	3529	0.63
Europa	670,900	3.551	3120	$4.791 \times 10^{22}$	0.65	3018	0.64
Ganymede	1,070,000	7.155	5268	$1.482 \times 10^{23}$	2.02	1936	0.43
Callisto	1,883,000	16.689	4800	$1.077 \times 10^{23}$	1.47	1851	0.17
Moon	—	—	3476	$7.349 \times 10^{22}$	1.00	3344	0.11
Mercury	—	—	4880	$3.302 \times 10^{23}$	4.49	5430	0.12
Mars	—	—	6794	$6.417 \times 10^{23}$	8.73	3934	0.15

Рис. 6.18. Сравнение спутников с Луной, Меркурием и Марсом





Рис. 6.19. Крупнейшие спутники Юпитера

**Тритон** – спутник Нептуна 270 диаметр, плотность небольшая, на поверхности примерно 30 °К, ледяная поверхность, состоящая из льда метанового, озотного, льда твердого, с кратерами и другими процессами, о котором мало известно.

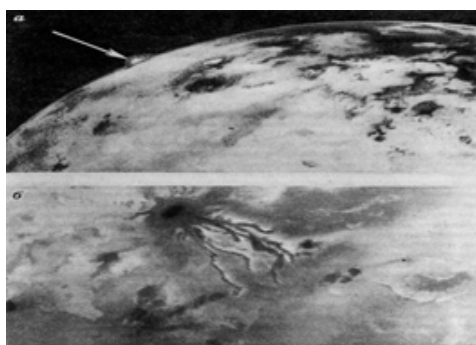


Рис. 6.20. Спутник Ио. а) стрелкой указаны места газовой-пепловых выбросов из вулкана; б) вулканический кратер и лавовые потоки.

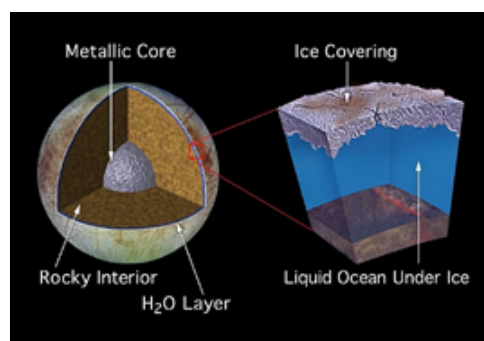


Рис. 6.21. Спутник Европа



Рис. 6.22. Спутники Сатурна





Рис. 6.23. Большие спутники

### Плутон и спутник Харон

Небольшая плотность планет, ледянная поверхность, состоящая из твердого озона, метана и углекислого газа. Но многие процессы, которые мы наблюдаем на Земле – растрескивание, пучение, осадки, и т.д. эти формы могут и должны быть на других планетах.

**Астероиды и кометы** – малые тела, но в значительной степени они тоже состоят из такого же креакенного материала, различаются по размерам. Самый распространенный тип – углеродный астероиды, их много в поясе, но их менее заметно, так как они темные, из-за высокого содержания углерода, они имеют низкое альбедо. Силикатного состава астероиды и железоникелевые. Кометы тоже тела которые состоят из замершего газа и какого то количества твердого вещества. Считается, что существует ледяное ядро в комете и при движении наблюдается газовой-пылевой хвост. Важной особенностью этих тел считается количество, они креакенны и состоят из льдов, но мало еще известно об процессах формирования и изменений динамики на этих телах.

Планеты, которые находятся не в Солнечной Системе, подтвердили из существование только в 90-ых годах, судя по внешним данным – значительная доля находится при низких температурах, соответственно там могут возникать процессы, характерные для крелитозона Земли.



Рис. 6.24. Строение комет

## Подземные воды в криолитозоне

Подземные воды являются предметом исследования, значительная часть территории страны находится в многолетней криолитозоне, соответственно вопрос связанный с поисками, оценкой запасов подземных вод, их использования является чрезвычайно важным.

**Криолитозона** – это часть земной коры, в которой породы имеют отрицательную температуру вне зависимости от наличия и фазового состояния воды в ней. Криолитозона включает в себя мерзлые, морозные и охлажденные породы.

К охлажденным принадлежат породы, имеющие температуру ниже 0°C и насыщенные минерализованными водами. Эти соленые воды с отрицательной температурой называются *криогалинными водами* (Романовский, 1966), или криопэгами («криос» – холод; «пэги» – холодные воды). Термин «пэги» был предложен О.К. Ланге в 1933г. Позже он использовался очень мало, но в 1969 г. Н.И. Толстихиным был введен термин «криопэки», который и получил широкое признание. В настоящее время оба термина используются как синонимы.

Несмотря на то, что криолитозона обладает отрицательной температурой, там могут существовать подземные воды, находящиеся при отрицательной температуре, которая называется криопэга, с высокой минерализации.

**Романовский выделял две зоны:**

- **Северная** геокриологическая зона с севера ограничивается пределами шельфа, а с юга – границей смыкания ММП плецстоценового и вернеголоценового возраста.
- **Южная** геокриологическая охватывает ММП верхнеголоценового и реликтовые толщи прейстоценового возраста. Здесь выделяются площади распространения (подзоны):
  - Островных и прерывистых верхнеголоценовых
  - Реликтовых плейстоценовых
  - Двухслойных мерзлых толщ.

## Образование и существование мерзлоты мощности

Мерзлота в горно-складчатых областях занимает в основном горную часть, достаточно сложно построенная. Платформенная область может формировать тоже достаточно сложную область криолитозону – с выделением нескольких горизонтов, островов мерзлоты, подозерных таликов и другого типа.

### Мерзлые толщи как криогенные водоупоры, типизация подземных вод в криолитозоне

Мерзлые горные породы благодаря цементирующему действию подземного льда являются криогенными водоупорами. Поэтому с гидрогеологических позиций распространение многолетнемерзлых пород определяет развитие криогенных водоупоров.

Криогенные водоупоры в подавляющем большинстве представляют собой абсолютные водоупоры, не пропускающие через себя гравитационную воду даже при

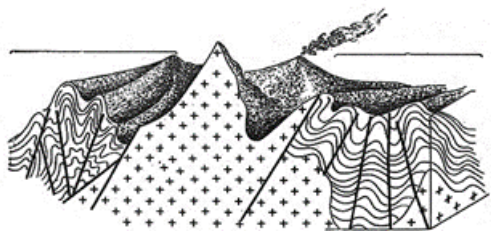


Рис. 6.25. Мерзлота в горно-складчатых областях

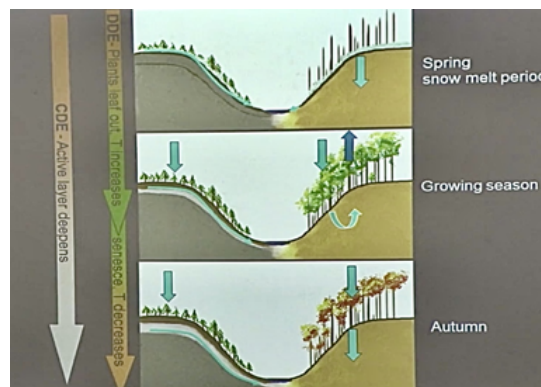


Рис. 6.26. Условия Аляски, область где наблюдается строение – мерзлота на северных склонах и отсутствие мерзлоты на южных

очень значительных давлениях. Происходит это потому, что пресные воды, проникающие в мерзлые породы, замерзают, переходят в лед, который заполняет в них поры и трещины, исключая всякую возможность фильтрации.

Различие в путях движения подземных вод – на южном инфильтрация, а на северном движение по кровле маломощных грунтовых вод, которые образуются в летнее время.

Крупный прогресс в мерзлотно-гидрогеологических исследованиях был связан с изысканием и строительством Забайкальской и Амурской железных дорог. Полученные при этом обширные материалы о подземных водах и мерзлотных толщах, о явлениях наледей и гидролакколитов, о приемах борьбы с ними дали значительный толчок в развитии гидрогеологии криолитозоны. Обобщением полученных сведений явилась книга сибирского геолога А.В. Львова «Поиски и испытания водоисточников водоснабжения на западной части Амурской железной дороги в условия «вечной» мерзлоты почвы» (1916), где были поставлены важные вопросы как о причинах формирования мерзлых толщ, так и об условиях распространения и образования «пробелов» в мерзлоте, т.е. таликов, особенно водоносных.

В проблеме изучения наледей большое значение имеют работы В.Г. Петрова, проведенные в 20-х годах на Амуро-Якутской магистрали. Здесь в промышленных масштабах им была организована борьба с этим опасным для дорог явлением. И наиболее эффективными оказались «мерзлотные пояса», идея которых была высказана М.И. Сумгиным. Мерзлотные пояса представляют собой перемычки из искусственно замороженного грунта, создаваемые на пути потока грунтовых вод и приводящие к их выходу на поверхность и замерзанию в виде наледей на расстоянии, безопасном для искусственного сооружения.

Было Установлено, что подземные воды имеются в пределах практически всей области глубокого промерзания земной коры, как в горно-складчатых областях, так и в артезианских бассейнах.

Работами Н.И. Толстихина, П.Ф. Швецова, А.И. Калабина, В.М. Пономарева и других доказанно широкое распространение пресных вод глубокого подмерзлотного сто-

ка и практически были решены вопросы водоснабжения во многих районах с суровыми мерзлыми толщами (Якутска, Норильска, Магаданской области и др.)

Установлено, что подземные воды в разных гидрогеологических структурах, в различной степени промороженных, обладают весьма различными условиями формирования, питания и стока. Следствием этого является большое разнообразие состава и минерализации этих вод, меняющейся от первых десятков миллиграмм на литр до 200 г/л и более.

Были получены данные о широком распространении криопэггов. Они были встречены на Арктическом побережье, а также в артезианских бассейнах платформ.

Одним из основных результатов многолетнего промерзания пород является изменение характера залегания и гидродинамического режима подземных вод: безнапорные воды становятся напорными, а в напорных водах часто увеличивается пластовое давление, т.е. возникает дополнительный, так называемый *криогенный напор*. Причина его появления – увеличение объема при переходе воды в лед в пластах и трещиноватых водоносных зонах.

Противоположный процесс – оттаивание ММП при определенных условиях – сопровождается снижением напора подземных вод или переходом напорных вод в грунтовые.

Многолетнее промерзание и протаивание пород часто сопровождается изменениями скоростей и даже направлений движения подземных вод, их химического и газового составов.

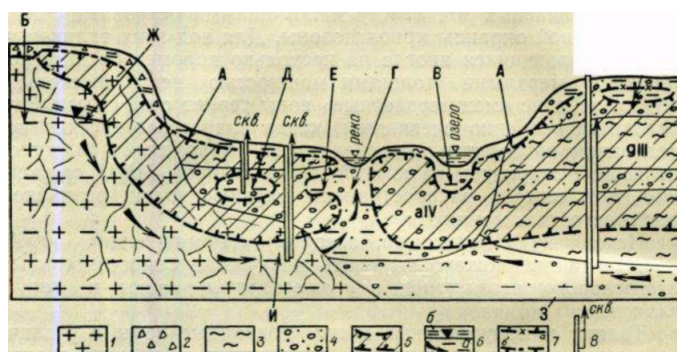


Рис. 6.27. Схема залегания различных по отношению к ММП

Схема залегания различных по отношению к ММП подземных вод:

А – намерзлотные воды сезонно-талого слоя Б – воды сквозного дождевально-радиационного талика В – надмерзлотные воды подоцерного несквозного талика Г – воды сквозного подруслового талика Е – межмерзлотные воды Ж – водмерзлотные воды неконтактирующие безнапорные З – подмерзлотные воды неконтактирующие безнапорные И – подмерзлотные воды контактирующие напорные К – надмерзлотные воды несквозного дождевально-радиационного талика 1 – изверженные трещиноватые породы 2 – щебень и дресва 3 – суглинки 4 – пески, галечники 5 – многолетнемерзлые породы и их граница 6 – обводненность пород состояния (А), периодическая (Б) 7 – направление движения подземных вод 8 – подошва сезонно-талого слоя (Б)

и сезонно-мерзлого слоя (А) 9 – скважины, стрелкой показана глубина появления и установившийся уровень подземных вод.

Над мерзлотные воды сезонно талого слоя существуют сезонно, обычно только в течение летне-осеннего периода, и промерзают зимой. Это поровые и трещинные воды, залегающие с поверхности в различных типах четвертичных отложений. Они могут рассматриваться как «мерзлотная» разновидность верховодки, распространенной вне криолитозоны и в пределах субэразальных таликовых зон. Воды СТС обладают рядом специфических, присущих только им особенностей.

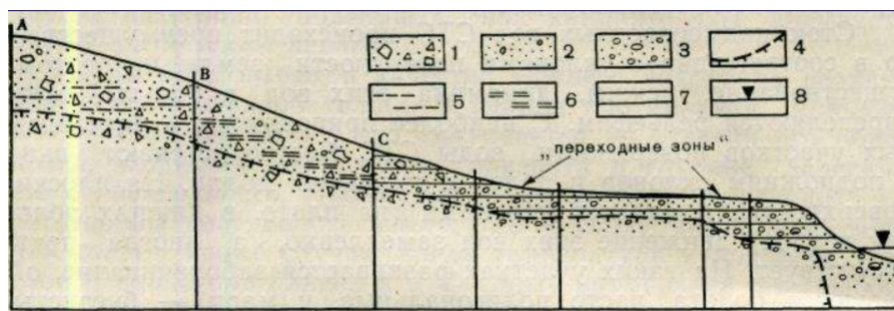


Рис. 6.28. Схематический мерзлотно-гидрогеологический разрез отложений СТС от водораздела до талькега долины. 1 – дресва и щебень, заполнитель песок; 2 – пески с галькой; 3 – галечник с песчаным заполнителем; 4 – граница ММП; 5 – зона периодически появляющегося обводнения (А); 6 – зона периодически исчезающего обводнения (В); 7 – зона постоянного обводнения (С); 8 – уровень воды в реке

### Классификация таликов – типы

Три типа (*радиационно-тепловой, гидрогенный и гляциогенный*) выделены по условиям на поверхности Земли, определяющие термодинамический уровень теплообмена выше  $0^{\circ}\text{C}$  или выше температуры замерзания гравитационных капельножидких вод. Три других типа (*гидрогеогенный, хемогенный, вулканогенный*) существуют за счет процессов, происходящих в толще горных пород. Именно эти процессы, а не поверхностные условия определяют существование положительной температуры или криогалинных вод на подошве СТС. Седьмой тип *техногенных* таликов объединяет талики, созданные искусственным путем.



## Лекция 7. Подземные воды криолитозоны. Методы исследования геокриологии Талики

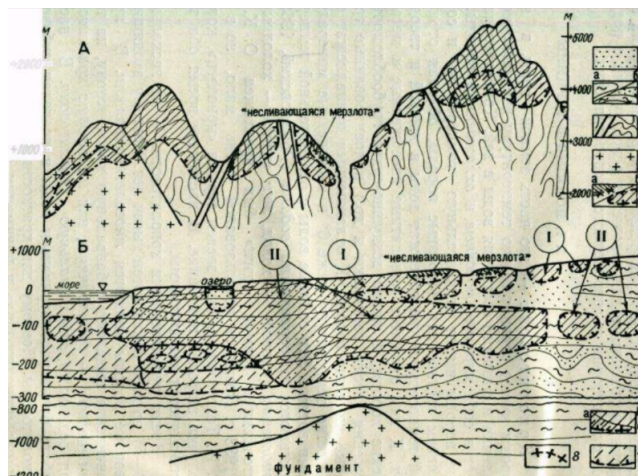


Рис. 7.1. Рис. 1 Строение радиационно-тепловых таликов: I – радиационный безводный сквозной (IP –Б1) II – тепловой грунтово-фильтрационный сквозной (1Т-Г1) III – дождевально-радиационный инфильтрационный сквозной (1Д-И1) IV – дождевально-радиационный напорно-фильтрационный сквозной (1Д-Н1) V – дождевально-радиационный грунтово-фильтрационный несквозной (1Д-Г2) VI – подоцерный застойный сквозной (ПО-31)

### Гидрогенные талики:

Эти талики часто бывают связаны между собой движением подземных вод. Среди гидрогенных таликов часто бывает связь между подоцерными таликами и таликами, возникающих в руслах водотоков или рек.

### Классификация таликов

#### По типам

- **Гляциогенные талики.** Существуют под ледниками «теплого» типа, у которых температура породных слоев льда  $0^{\circ}\text{C}$ . Породы, слагающие ложе таких ледников, частично или целиком находятся в талом состоянии. Обычно они обводнены за счет талых вод, образующихся при донном таянии ледника или поступающих вниз по трещинам и промоинам в его теле. Воды могут иметь как нисходящее движение, так и стекать в виде подледных и грунтовых потоков. Гляциогенные талики предполагаются по ряду признаков под многими ледниками в пределах криолитозоны, например под долинными ледниками Тянь-Шаня (Горбунов, 1967). В геологическом прошлом они имели место под ледниковыми щитами, покрывавшими север Европы, Америки и некоторые районы Сибири (горы Путорана)
- **Хемогенные талики.** Образуются в результате выделения тепла при окислительных реакциях в толщах горных пород. Известные талики, приуроченные к

геологическим телам с повышенным содержанием сульфидов металлов, а также к участкам возгорания углей, как в естественном залегании, так и в отвалах.

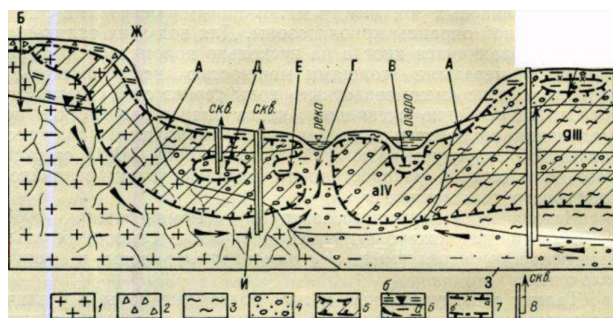
### По классам

- **Класс 1. Безводные талики**, в которых гравитационные подземные воды отсутствуют в течение круглого года на всю их мощность (от поверхности земли до подошвы окружающих ММП). Безводные талики могут быть сложены как водопроницаемыми дренированными породами, так и практически водонепроницаемыми (массивно-кристаллическими) или слабопроницаемыми (глинистыми) породами.
- **Класс 2. Талики с застойными водами (застойные)**. В них подземные, обычно грунтовые, воды находятся в водопроницаемых пластах, линзах, трещиноватых зонах и ограничены с боков и снизу водоупорами. Под влиянием разной плотности в них может происходить только конвекционное перемещение воды.
- **Класс 3. Грунтово-фильтрационные талики**. В них существует поток грунтовых вод,двигающийся по уклону в соответствии с рельефом местности. Такие талики сложены в верхней части водопроницаемыми отложениями, подстилаемыми слабопроницаемыми породами или криогенными водоупорами.
- **Класс 4. Инфильтрационные ( или инфлюационные) талики**. Подземные воды в них имеют нисходящее движение, часто близкое к вертикальному. Происходит оно по разрывным тектоническим нарушениям, закарстованным зонам в карбонатных породах и по водопроницаемым пластам пликативных структур. Такие талики называют часто водопоглощающими, и по ним происходит питание подземных вод глубокого стока (подмерзлотных и межмерзлотных). С.М. Фотиевым (1978) инфильтрационные и инфлюационные талики выделены в самостоятельные категории.
- **Класс 5. Напорно-фильтрационные талики**. Подземные воды в них обладают напорами и имеют восходящее движение по тектоническим трещиноватым и закарстованным зонам и водопроницаемым пластами складчатых структур. Такие талики являются водовыводящими, так по ним осуществляется разгрузка подземных вод глубокого подмерзлотного и межмерзлотного стока.

### Общая классификация таликов

- **По источникам тепла**, обуславливающим их существование, И.Я. Барановым выделялись *эндотермические* и *экзотермические*, а И.А. Некрасовым и С.Е. Суходольским – *эндогенные*, *экзогенные* и *полигенные* (экзогенно-эндогенные) талики, которые подразделялись, в свою очередь, на дробные категории. Например, И.А. Некрасов выделяли среди эндогенных таликов *вулканические* и *тектонические*, а среди экзогенных – *инсоляционные*, *инфильтрационные* и *кондуктивно-инфильтрационные*.
- **По способам теплопередачи**: *кондуктивные*, *конвективные*, *конвективно - кондуктивные*, *кондуктивно-конвективные*. В «кондуктивных» таликах имеются движущиеся воды.

- # Типы подземных вод в клиолитозоне, их особенности динамики



**Надмерзлотные воды несквозных таликов** – это грунтовые поровые воды четвертичных отложений или трещинные воды коры выветривания скальных и полускальных пород. Летом они обычно имеют свободный уровень воды, а осенью и зимой при сезонном промерзании пород таликов в ряде случаев приобретают временный криогенный напор (полупромерзающие воды).

Сквозные талики включают грунтовые поровые и трещинные воды, а также воды, имеющие нисходящий и восходящий характер движения. Последние связывают, с одной стороны, поверхностные воды, воды СТС и грунтовые воды таликов, а с другой – воды глубокого подмерзлотного и межмерзлотного стока. Это воды различного теплового и гидравлического режимов.

**Подмерзлотные воды** – воды, первого от подошвы мерзлой толщи водоносного горизонта, комплекса или трещиноватой зоны. Эти воды разделяют на *подмерзлотные, контактирующие* и *неконтактирующие* (т.е. находящиеся в определенном взаимодействии) с мерзлой толщей, и *глубинные, неконтактирующие*, влияние которых на мерзлые толщи из-за большой глубины их залегания не проявляются.

В категорию подмерзлотных вод входят воды, весьма различные по генезису, характеру водовмещающих пород, режиму, химическому и газовому составу, интенсивности водообмена и другим признакам. Характер этих вод существенно определяется типом гидрогеологической структуры, а также степенью ее промороженности.

**Межмерзлотные воды** — воды в слоях, линзах, «тоннелях» и телах иной формы, ограниченных сверху, снизу, а иногда и с боков ММП. Они имеют гидравлическую связь с другими категориями вод криолитозоны.

**Внутримерзлотные воды** — воды, заключенные в слоях и линзах, ограниченных ММП со всех сторон. Они не имеют водообмена с другими категориями под криолитозоны.

*Межмерзлотные и внутримерзлотные воды имеют сходный генезис и условия формирования и образуются как формы скопившихся подземных вод внутри толщ ММП на одних и тех же или близких стадиях криогенного преобразования гидрогеологических структур.*

По происхождению, степени минерализации и температуре они разделяются на две группы:

- В первую группу входят криопэги и рассолы. Они образуются в разных условиях и создают с вмещающими их мерзлотными породами термодинамически устойчивые системы. Линзы и слои криогалинных вод возникают, при промерзании пород, содержащих соленые и соленые воды, и благодаря миграции вниз криогалинных вод, образовавшихся в подошве СТС на побережьях северных морей, в аридных районах или в городах и поселках.
- Во вторую группу входят межмерзлотные и внутримерзлотные пластово-поровые и трещино-пластовые воды, имеющие положительную температуру и, как правило, слабоминерализованные.

## Криогенная метаморфизация подводных вод

Замерзание природных вод сопровождается *криогенной метаморфизацией* их химического состава. В процессе кристаллизации воды часть солей выпадает в осадок и включается в лед в виде твердых примесей, другая — входит в его состав в истинно растворенной форме, третья — отжимается растущими кристаллами льда в нижележащие слои, где происходит *криогенное концентрирование* природного раствора. Степень криогенного концентрирования растет с возрастанием объема воды, подвергшейся промерзанию и ее исходной минерализации, а так же с увеличением содержания в ней легкорастворимых компонентов (хлоридов натрия, магния и кальция). Подземные конжеляционные льды всегда имеют меньшую минерализацию, чем исходные подземные воды. В процессе таяния подземных льдов при оттаивании мерзлых пород только часть солей, выпавших при промерзании в осадок, переходит в раствор. Следствием этих процессов является криогенное опреснение подземных вод в водопроницаемых породах, подвергшихся промерзанию и последующему протаянию.

## Эвтектические температуры водно-солевых систем

При замерзании систем из воды и соли образуются криогидраты — продукты, состоящие из кристаллов воды и кристаллов соли, химически не связанные между собой. В таких системах *эвтектическая точка* называется *криогидратной точкой*.

Из всех растворов, расположенных по составу левее криогидратной точки, содержащих соль в меньшей концентрации, при охлаждении выделяется сначала лед и

только при достижении криогидратной температуры кристаллизуются оба компонента.

Если же концентрация соли в растворе больше, чем концентрация ее в криогидрате, то при охлаждении раствора сначала выделяются кристаллы соли и только при достижении криогидратной температуры кристаллизуются оба компонента.

### Эвтектические температуры водно-солевых систем

Система	Температура кристаллизации [61- 67], °C	Концентрация, % (по массе) безводной соли в растворе	Состав твёрдой фазы
$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-1,8...-1,9	-	Лёд + $\text{CaCO}_3$
$\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-2,3	-	Лёд + $\text{NaHCO}_3$
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-2,1	-	Лёд + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-10,0	-	Лёд + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
$\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-1,55...-2,9	-	Лёд + $\text{K}_2\text{SO}_4$
$\text{MgSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-4,8	-	Лёд + $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-3,5...-8,2	3,86	Лёд + $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
$\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-15...-17	-	Лёд + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$	-11,1	19,5	Лёд + $\text{KCl}$
$\text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$	-34,2...-36,8	-	Лёд + $\text{KCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$
$\text{KBr} + \text{H}_2\text{O}$	-13	-	Лёд + $\text{KBr}$
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$	-21,1...-22,9	22,4	Лёд + $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{NaBr} + \text{H}_2\text{O}$	-24	-	Лёд + $\text{NaBr}$
$\text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-35,5	-	Лёд + $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
$\text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-33,6...-36	21,6	Лёд + $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
$\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-54...-55	29,9...30,22	Лёд + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Рис. 7.3. Эвтектические температуры водно-солевых систем

Кристаллизация солей возникает при высоких температурах. В отличие от двухкомпонентных растворов (растворитель и соль) в морской воде эвтектические точки сдвигаются преимущественно в сторону низких температур вследствие присутствия в ней одновременно многих ионов, т.е. при замерзании растворов сложного состава изменяются точки эвтектики легкорастворимых солей.

Таким образом, в многокомпонентной системе, какой является морская вода, жидкая фаза – соли в виде раствора – сохраняется до более низких температур (а в многокомпонентной концентрированной системе рассола еще до более низких температур), чем в двухкомпонентной системе. Осаждение солей происходит не при фиксированном значении температуры, а в некотором диапазоне температур.

*Морская вода* – это природный водный раствор различных солей, среди которых



основная масса представлена ионами натрия, магния, калия, кальция, хлора, серы, а также взвешенными твердыми частицами и растворенными газами. Морская вода – это очень сложная химическая субстанция, которая содержит в себе почти всю таблицу Менделеева. При замерзании морской воды, судя по таблице в осадок должен выпадать карбонат, но выпадает мирабилит. В составе воды сульфатов в 30 раз больше, чем карбоната. Некоторое количество карбонатов есть и выпадает в осадок, но по количественному отношению, их значительно меньше, чем сульфатов. А в природных подземных водах наблюдается то, что они более насыщены углекислотой.

Рассолы характеризуются сложным химическим составом. Выпадение в осадок соли из сложного раствора нарушает ионное равновесие в рассоле. По этой причине кристаллизация отдельной соли происходит неравномерно, с разной скоростью, и на некоторых этапах часть кристаллогидрата может переходить обратно в рассол.

Чем больше  $CO_2$  содержится в подземных водах, тем большее количество карбонатов они могут растворить. Поэтому максимальной растворяющей способностью обладают маломинерализованные подземные воды гумидной зоны, содержащие много биогенной  $CO_2$ . Удаление углекислого газа из системы сдвигает химическое равновесие и вызывает выпадение  $CaCO_3$ . При вымораживании маломинерализованных подземных вод гидрокарбонатно-натриевого типа с минимальным содержанием кальция, особенно в закрытой межмерзлотной системе, отложение солей часто завершается стадией садки  $Na_2CO_3$ . При этом формируются щелочные (содовые) воды, повышенной минерализации.

Временная жесткость обусловлена присутствием в воде гидрокарбонатов кальция и магния ( $Ca(HCO_3)_2$ ;  $Mg(HCO_3)_2$ ). Постоянная жесткость воды обусловлена присутствием в воде сульфатов, хлоридов  $Ca$  и  $Mg$  ( $CaSO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ). По величине общей жесткости различают воду мягкую (до 2 мг-экв/л), средней жесткости (2-10 мг-экв/л) и жесткую (более 10 мг-экв/л).

Повышенная жесткость воды способствует образованию накипи в котлах, отопительных приборах и посуде, что снижает интенсивность теплообмена, приводит к перерасходу топлива и перегреву. Потребление жесткой или мягкой воды обычно не является опасным для здоровья, хотя есть данные о том, что высокая жесткость способствует образованию мочевых камней, а низкая – увеличивает риск сердечно-сосудистых заболеваний.

Жесткость природных вод изменяется в широких пределах и в течение года; она максимальна в конце зимы, минимальна – в период паводка (например, жесткость волжской воды в марте – 4,3 мг-экв/л, в мае – 0,5 мг-экв/л). В подземных водах жесткость обычно выше (до 80-100 мгкв/л) и меньше изменяется в течение года. Увеличивается жесткость из-за замерзания и испарения воды, уменьшается в сезон дождей, а также в период таяния снега и льда.

## Моделирование процесса промерзания

Тепловое взаимодействие подземных вод и многолетнемерзлых горных пород очень сложно и недостаточно изучено. Это взаимодействие начинается с момента проникновения атмосферных осадков и поверхностных вод в горные породы. Поток конвективного тепла, обусловленный их движением, совпадает по направлению к кондуктивным теплопоток за теплый период года в слое годовых теплооборотов. При

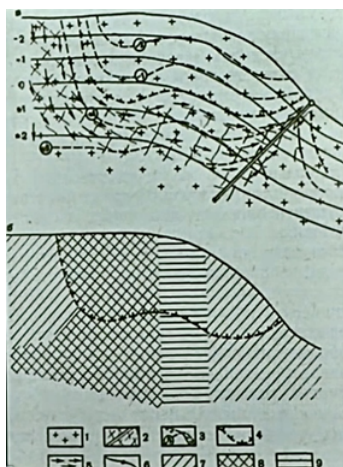


Рис. 7.4. Моделирование процесса промерзания

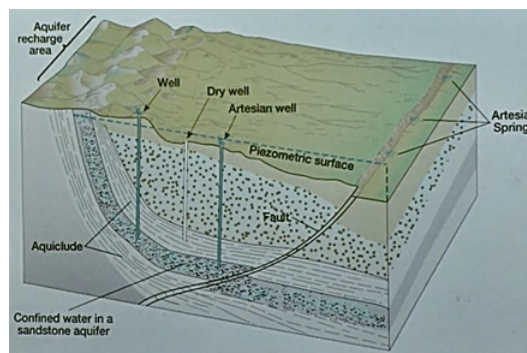


Рис. 7.5. Артезианская система

этом в связи с сезонным промерзанием инфильтрация атмосферных осадков имеет место только летом, а в зимнее время отсутствует.

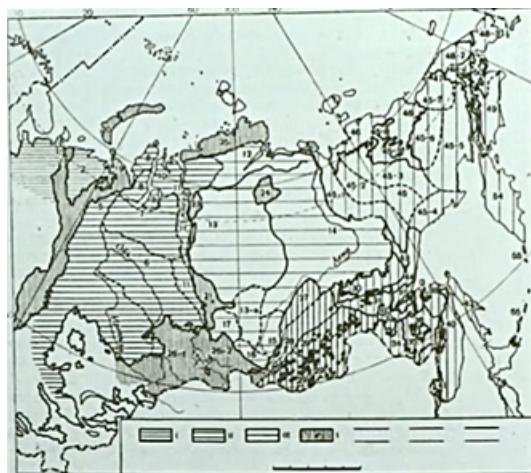


Рис. 7.6. Карта-схема гидрогеологических структур артезианских бассейнов и гидрогеологических складчатых областей (по Н.И. Толстихину) I – Артезианские бассейны Восточно-Европейского севера. II – Западно-Сибирский сложный артезианский бассейн. III – Восточно- Сибирский сложный артезианский бассейн. IV – Гидрогеологические складчатые области и артезианские бассейны. V – Восточно-Сибирская сложная гидрогеологическая складчатая область. VI – Гидрогеологические складчатые области и артезианские бассейны Южной Якутии и Южной части Дальнего Востока

Построена эта территория довольно сложно, выделяется различные типы структур – артезианские бассейны и гидрогеологические массивы.

**Гидрогеологические горноскладчатые области** представляют собой горные сооружения, различные по возрасту, рельефу, характеру неотектонических движе-

ний, состоящие из сложного сочетания *гидрогеологических массивов*, относящихся к хребтам, и *межгорных артезианских бассейнов замкнутого типа*, занимающих межгорные тектонические впадины и краевые прогибы. Например, Восточно-Сибирская сложная гидрогеологическая складчатая область.

### Артезианская система

*Артезианские бассейны открытого типа* в геоструктурном отношении представляют собой области платформ и характеризуются двухэтажным строением (Рис. 7.5).

*Нижний этаж* сложен кристаллическими и метаморфическими дислоцированными породами и представляет собой фундамент. *Верхний этаж* представлен преимущественно осадочными породами различного состава, генезиса и возраста. Для него характерно спокойное малонарушенное залегание пород и наличие платформенного типа геологических структур. Верхний этаж называют чехлом.

Для артезианских бассейнов характерно преимущественное развитие вод слоистых осадочных отложений и вулканогенных образований, в основном межпластовых и в меньшей степени грунтовых. Примером могут служить артезианские бассейны Западной и Центральной Сибири.

Артезианские бассейны называют открытого типа, потому что они имеют связь с поверхностными водами. Мерзлота хоть и может существовать, но существуют сквозные талики, которые обеспечивают гидравлическую связь между поверхностными и подземными водами.

Подземные воды *артезианских бассейнов открытого типа* отличаются следующими основными особенностями:

- Относительно равномерным распределением вод по пластам водопроявляющих пород.
- Зависимостью в распределении вод по пласту, их химического состава и характера движения от генезиса, состава сложения, свойств и особенностей залегания пород.
- Направлением стока от периферии бассейна к его центральным, наиболее погруженным частям.
- Большими ресурсами напорных подземных вод, а также значительными ресурсами грунтовых вод.
- Отчетливо выраженной гидродинамической и гидрохимической зональностью.

### Многолетнемерзлые породы

В области развития *многолетнемерзлых пород* на эти основные черты накладываются определенные особенности.

- 1) Значительная часть грунтовых вод в результате многолетнего промерзания переходит в лед, и ресурсы их значительно сокращаются. При этом сокращение ресурсов грунтовых вод с юга на север связано с уменьшением количества и размеров таликовых зон, как сквозных, так и несквозных.

- 2) Площади таликовых зон в области питания межпластовых напорных вод больше на юге, меньше на севере. В крупных сложно построенных бассейнах, например Восточно-Сибирском, область питания может быть только в южной части бассейна. На севере она проморожена. Разгрузка вод в пределах северной части бассейна также практически отсутствует, во всяком случае в пределах материка.
- 3) Динамика развития мерзлых толщ определяет возникновение межмерзлотных артезианских водоносных слоев, например в пределах Западной Сибири. В других случаях эта динамика мерзлотных условий приводит к изменению напора артезианских вод различных горизонтов.

Наличие *аномально низких пьезометрических уровней* давно привлекло к себе внимание исследователей, но долго не находило удовлетворительного объяснения. Только в 1963 г. А.Н. Косолапов, рассмотрев условия развития мерзлых толщ Якутского артезианского бассейна во времени и пространстве, дал достаточно обоснованное объяснение.

Промерзание водоносных артезианских слоев в областях питания ухудшало условия водообмена и приводило к возникновению аномально высоких пластовых давлений воды.

В дальнейшем потепление и деградация мерзлых толщ приводили к снятию криогенного напора в области питания, а как следствие этого, и во всем водоносном комплексе.

Значение в распределении мощностей мерзлых толщ имеет *характер тектонического строения* территории и неотектонические движения. В структурах второго или более высокого порядка, представляющих собой опускания (синклинали), мощность мерзлых толщ, как правило, выше чем в структурах поднятий (антиклиналях) или на территории развития разрывных дислокаций как со смещениями, так и без них.

Это обусловлено:

- 1) Преимущественно нисходящим движением вод во впадинах или их застойным режимом, а также меньшей плотностью потока геотермического тепла в таких структурах.
- 2) Более интенсивным водообменом и преимущественно восходящим движением вод в поднятиях и на участках развития значительных по размерам разрывных тектонических дислокаций, особенно омоложенных новейшими движениями.

Примером указанному может служить Якутский артезианский бассейн, где значительные мощности мерзлых толщ до 500-700 м приурочены к центральным частям впадин Линдинской, Лунхинской, а пониженные мощности (до 150-200 м) – к поднятиям Якутскому, Мунскому и Усть-Вилуйскому надвигу.

## Гидрогеологические массивы

**Гидрогеологические массивы** представляют собой выступы кристаллического фундамента, частично прикрытые четвертичным покровом или вовсе обнаженные.

Наиболее крупными гидрогеологическими массивами, представляющими самостоятельные гидрогеологические структуры первого порядка, являются кристаллические щиты Балтийский, Анабарский, Алданский.

Для гидрогеологических массивов характерно развитие трещинных, трещинно-жильных, а также пластово-трещинных вод слоисто-кристаллических, метаморфических, магматических и осадочных пород.

## Гидрогеологические адмассивы

**Гидрогеологические адмассивы (ГАМ)** являются как одноэтажными, так и двухэтажными сооружениями, сложенными древними осадочными и вулканическими породами, сильно метаморфизованными и дислоцированными. Основными типами вод в них являются *трещинные* и *трещинно-жильные* воды.

Благодаря наличию первичной слоистости пород в ГАМ, сохраняются и пластовые подземные воды. ГАМ образуют, как правило, положительные формы рельефа и имеют центробежный характер стока. Однако в структурах ГАМ, приуроченных к депрессиям рельефа, возможен и центростремительный сток.

## Адартезианские бассейны

Между АБ и ГМ существует непрерывный ряд переходных структур, среди которых выделяют адартезианские бассейны и гидрогеологические адмассивы.

**Адартезианские бассейны (АдАБ)** – это двухэтажные сооружения, осадочный чехол которых представляет синклинальную структуру, разбитую системой тектонических разрывных нарушений. В АдАБ наряду с пластовыми типами движений подземных вод существует трещинно-жильный. АдАБ выражены обычно в рельефе отрицательными формами, и им присущ преимущественно центростремительный сток. Однако в гипсометрически приподнятых адартезианских бассейнах центростремительный характер стока может нарушаться и даже меняться иногда на центробежный.

Преобразование артезианских и адартезианских бассейнов многолетним промерзанием: Платформенные структуры с осадочным чехлом.

А – артезианский (адартезианский) бассейн сплошного промерзания, открытый. Полностью территория занята многолетними мерзлыми породами, но сохраняются сплошные талики (подозерные, подрусловые талики) поэтому он открыт для подземных вод. Как питание, так и разгрузка может осуществляться по этим сквозным таликам.

Б – артезианский бассейн сплошного промерзания, закрытый. Граница мерзлоты, подошва многолетних мерзлых пород двигается дальше. Сквозные талики превращаются в - несквозные. Теряется связь между поверхностными и подземными водами. Гидрохимически и динамически они разделены. Так соответственно меняется динамика подземных вод, химический состав.

В – криоартезианский бассейн. Дальше граница промерзания опускается, и возникают условия для формирования подмерзлотных вод, граница мерзлоты отрывается от границы нулевой изотермы. Возникает горизонт высоко минерализованных вод – криопэги.



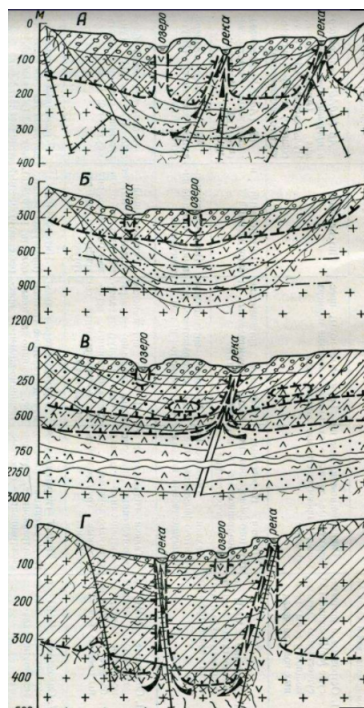


Рис. 7.7. Преобразование гидрогеологических структур при промерзании

Г – криогенный постартезианский бассейн трещинных вод. Далее замерзают криопэги, температуры опускаются, опускается граница мерзлоты ниже. Остаются разрывные разрушения, по которым все равно питание и разгрузка может осуществляться. Но это трещинные воды, а не пластовые.

### Гидрогеологические массивы

В области развития многолетнемерзлых пород отмечаются следующие особенности подземных вод **гидрогеологических массивов**:

- 1) **Уменьшение ресурсов** грунтовых вод в связи с их промораживанием. При наличии практически сплошной зоны мощных многолетнемерзлых пород, как например, в пределах Анабарского кристаллического массива, зона грунтовых вод полностью проморожена.
- 2) В зоне несплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью от нескольких десятков до 100-200 м ниже мерзлой зоны часто отмечается **повышенная трещиноватость пород**. Возникновение ее связано с расширением первоначальной системы трещин в результате процессов промерзания – протаивания при колебаниях нижней поверхности мерзлой толщи.
- 3) Возникновение **таликовых зон на плоских водораздельных поверхностях** определяется в значительной степени отепляющим влиянием инфильтрации атмосферных осадков и подчиняется той же зональности, что и в пределах платформенных областей.

- 4) Присутствие **таликовых зон и выходов подземных вод** по крупным тектоническим разломам, омоложенным в четвертичное время, даже при наличии мощных мерзлых толщ с низкими температурами.

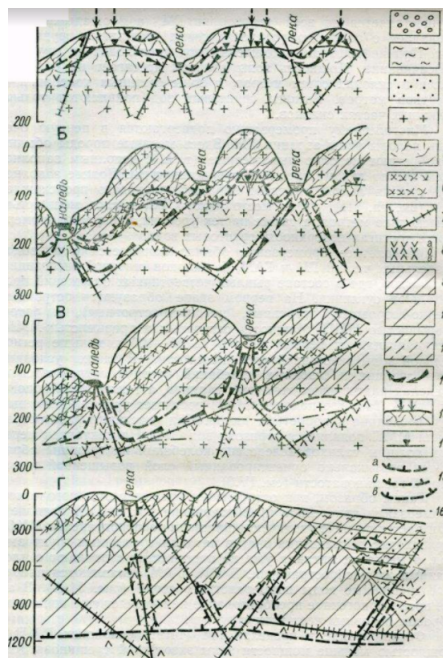


Рис. 7.8. Преобразование гидрогеологических массивов многолетним промерзанием

Криогидрогеологические массивы:

- А – прерывистого промерзания
- Б – сплошного неглубокого промерзания
- В – сплошного глубокого промерзания
- Г – сплошного свехглубокого промерзания.

Небольшая площадь распространения мерзлых пород, возникают условия прерывистого промерзания. Свободно осуществляется питание и разгрузка подземных вод. Поверхность проморожена не полностью, это зона выветривания. Далее эти острова мерзлоты соединяются, возникают условия сплошного неглубокого промерзания. Сохраняются талики (под руслами рек и под озерами).

В зоне свехглубокого промерзания, проморожены талики, подрусловые талики, может оставаться только подземное движение, в некоторых исключительных условиях, по разрывным зонам. Развитие мерзлых толщ в пределах межгорных **артезианских бассейнов замкнутого типа** подчиняется как широтной, так и высотной зональности. Все это приводит к формированию сложных и разнообразных мерзлотных и гидрогеологических условий в их пределах.

Примером формирования таких сложных условий являются межгорные впадины Байкальского типа. В их пределах известны мерзлые толщи до нескольких сотен

метров мощности. При этом они имеют сложное строение, что предопределяет, в частности, наличие межмерзлотных напоров вод, реликтовых деградирующих мерзлых толщ, залегающих на глубине в нескольких десятках метров от поверхности, выше которых имеются воды, надмерзлотные в несквозных таликах.

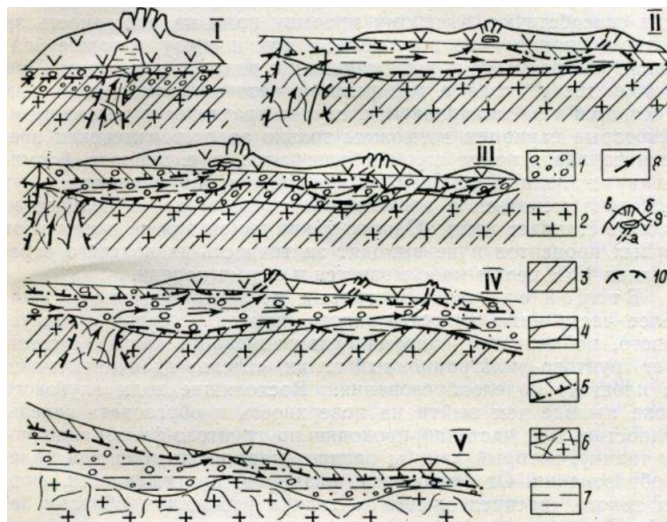


Рис. 7.9. Схема соотношения наледей и напорно-фильтрационных и грунтово-фильтрационных таликов

Схема соотношения наледей и напорно-фильтрационных и грунтово-фильтрационных таликов:

- 1) Гравийно-галечный аллювий
- 2) Скальные породы
- 3) ММП
- 4) Слой сезонного оттаивания
- 5) Слой сезонного промерзания и его граница
- 6) Трещиноватость пород
- 7) Обводненность пород
- 8) Направление движения подземных вод
- 9) Наледь
  - а) каналы в теле наледей, по которым выходит вода
  - б) линзы воды
  - в) трещины в наледных буграх
- 10) Граница ММП

## Методы исследований геокриологии

Геокриологическая съемка – основа геокриологического изучения.

### Цель геокриологической съемки

Геокриологическая съемка представляет собой комплекс полевых, лабораторных и камеральных работ, имеющих целью:

- 1) Изучение закономерностей формирования сезонно и многолетнемерзлых горных пород и мерзлотных (криогенных) процессов в зависимости от природных условий, их исторических и техногенных изменений.
- 2) Составление геокриологических карт.
- 3) Выполнение геокриологического прогноза.
- 4) Разработку мероприятий по управлению тепловым режимом горных пород и мерзлотными процессами.
- 5) Составление рекомендаций по строительству и эксплуатации инженерных сооружений и охране природной среды.

### Задачи геокриологической съемки – изучение:

- 1) Особенности теплообмена на поверхности Земли.
- 2) Закономерностей формирования температурного режима мерзлых пород.
- 3) Закономерностей распространения и условий залегания толщ мерзлых горных пород.
- 4) Особенности формирования таликов. Криогенного строения (криогенной структуры и текстуры) мерзлых пород.
- 5) Особенности состава и свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих пород.
- 6) Закономерностей распространения и развития криогенных процессов и явлений.
- 7) Особенности взаимодействия мерзлых пород и подземных вод.
- 8) Инженерно-геокриологических условий территорий и опыта строительства.
- 9) Истории развития мерзлых толщ.

## Этапы проведения геокриологической съемки.

### Ландшафтно-ключевой метод

Мерзлотная съемка реализуется с помощью ландшафтно-ключевого метода. Сущность этого метода заключается в том, что:

- На первом этапе проводится ландшафтное (геолого-географическое) районирование территории по условиям, определяющим формирование определенных типов сезонно- и многолетнемерзлых пород: геоморфологии и гидрологии, геологическому строению, почвам и растительности.

- На втором этапе на основе карты районирования выбираются ключевые участки, являющиеся представительными для микрорайонов, на которых в полевой период проводятся исследования и изучаются частные, общие и региональные закономерности. Идентичность и различия выделенных микрорайонов устанавливаются маршрутными исследованиями. Ключевые участки должны включать как типичные, широко распространенные микрорайоны, так и аномальные, локально распространенные, а также быть доступны и охватывать все типы ландшафтов.
- На третьем этапе составляются геокриологические карты путем распространения полученных геокриологических характеристик на идентичные типы местности.

### **Временные этапы проведения геокриологической съемки**

Производство геокриологической съемки любого масштаба разделяется на три последовательных временных этапа:

- подготовительный
- полевой
- камеральный

Основными задачами полевого периода являются изучение зависимостей геокриологических характеристик от составляющих природой среды, общих и региональных закономерностей формирования геокриологических условий. Изучение проводят на ключевых участках и дополняют маршрутные исследования при помощи космо- и аэрофотоматериалов, геокриологических, геологических, геоморфологических, геоботанических, микроклиматических, геофизических и других методов.

По установленным при съемке взаимосвязям между характеристиками природной среды и геокриологическим и характеристикам на основе классификаций сезонно- и многолетнемерзлых пород составляют серии геокриологических карт в масштабе съемки. На геокриологической карте может быть показана одна (например, среднегодовые температуры пород) или несколько (например среднегодовые температуры пород, мощность мерзлой толщи, талики) геокриологических характеристик.

### **Маршрутные исследования при геокриологических исследованиях**

Задачами маршрутных исследований являются:

- 1) Выделение геокриологических, геоморфологических, геоботанических границ.
- 2) Определение глубин сезонного оттаивания и промерзания.
- 3) Изучение криогенных явлений.
- 4) Изучение поверхностных вод, выходов подземных вод и наледей.
- 5) Исследование криогенного строения мерзлых пород в обнажениях и горных выработках.



6) Изучение территорий для оценки опыта строительства и других видов освоения.

**Основными задачами, решаемыми с помощью горно-буровых работ, являются:**

- 1) Изучение характеристик мерзлых толщ (состава, температур, мощности, характера залегания, криогенного строения и др.), отбор проб для лабораторных анализов.
- 2) Проведение режимных термометрических и гидрогеологических наблюдений, геофизического каротажа.

**Бурение скважин** целесообразно вести с продувкой забоя воздухом, что обеспечивает меньшее нарушение температурного режима горных пород, сохранность керна мерзлых пород, определение мощности мерзлой толщи, глубины вскрытия водоносного горизонта.

**По глубине геокриологические скважины делятся на две группы:**

- 1) Картировочные, проходящие слой годовых колебаний температуры (10-25 м).
- 2) Опорные геотермические скважины, проходящие всю толщу мерзлых пород.

При съемке картировочные скважины располагаются в не менее чем в трех точках в пределах каждого типа ландшафта (микрорайона). Опорные скважины располагаются с учетом геологического строения территории, определяющим изменения мощности мерзлых толщ. Опорные скважины используются также для изучения взаимодействия мерзлых толщ и подземных вод.

**Методы определения мощности многолетнемерзлых пород:**

- 1) Горно-буровые работы
- 2) Геофизические исследования
- 3) Математическое моделирование.

**Классификация методов изучения мерзлотных грунтов**

- Методы изучения состава мерзлых грунтов.
- Методы изучения строения мерзлых грунтов.
- Методы изучения свойств мерзлых грунтов.
- Методы изучения температурного режима, сезонного промерзания-оттаивания.
- Методы изучения геокриологических (мерзлотно-геологических) процессов и явлений.

**Методы изучения состава мерзлых грунтов**

К составу (физическому) мерзлых грунтов относятся:

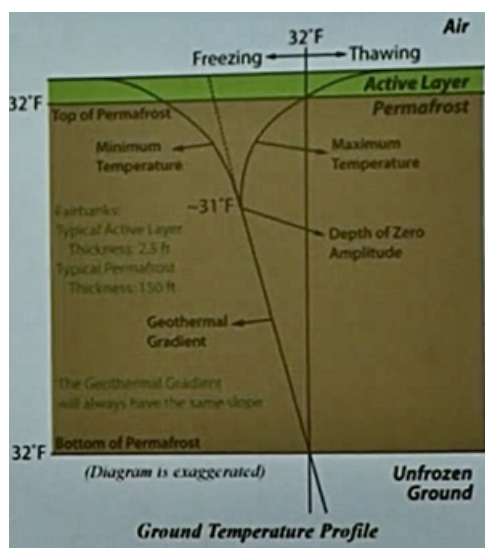


Рис. 7.10. Температурный профиль почвы

- Плотность
- Влажность
- Льдистость
- Содержание незамерзшей воды

#### Методы определения плотности мерзлого грунта:

- 1) Метод режущего кольца
- 2) Метод обмена образцов правильной формы
- 3) Метод взвешивания образцов в нейтральной жидкости
- 4) Метод лунки
- 5) Метод Ведерникова (вытеснение нейтральной жидкости)
- 6) Радиоизотопный
- 7) Расчетный

Полевые методы – 1-2-4-7. Лабораторные методы – 3-5-6-7.

#### Метод режущего кольца

#### Метод взвешивания образцов в нейтральной жидкости

$$\rho = \frac{m_{\text{в}} \rho_{\text{ж}}}{m_{\text{в}} - m_{\text{ж}}}$$

$m_{\text{в}}$  – масса образца в воздухе,  $m_{\text{ж}}$  – масса образца в воде,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости.



Рис. 7.11. Установка алмазной пилы фирмы Makita и гидравлический пресс Torin для подготовки образцов мерзлого грунта

### Расчетный метод определения плотности МГ (Пчелинцев, Вотяков)

$$p = 2,33 \frac{(1 + Wc)}{(psWc + pi)}$$

### Методы определения влажности мерзлого грунта

Экспериментальные:

- Точечный метод ( для массивной криогенной текстуры и минеральных прослоек)
- Метод бороздки ( для слоистой и сетчатой КТ)
- Метод средней пробы ( для сильноледиистых грунтов)

Значения коэффициента  $k_w$  (СНиП 2.02.04-88)

Грунты	Число пластичности грунтов $I_p$ , доли единицы	Коэффициент $k_w$ при температуре грунта $t$ , °C								
		-0,3	-0,5	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
Пески и супеси	$I_p \leq 0,02$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Супеси	$0,02 < I_p \leq 0,07$	0,6	0,50	0,40	0,35	0,33	0,3	0,28	0,26	0,25
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	0,7	0,65	0,60	0,50	0,48	0,45	0,43	0,41	0,40
Суглинки	$0,13 < I_p \leq 0,17$	*	0,75	0,65	0,55	0,53	0,50	0,48	0,46	0,45
Глины	$I_p > 0,17$	*	0,95	0,90	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,55

Примечание. В таблице знак «\*» означает, что вся вода в порах грунта незамерзшая.

Рис. 7.12. Значение коэффициента  $K_w$  (СНиП 2.02.04-88)

### Методы определения льдистости мерзлого грунта:

#### 1) Метод Мазурова

Метод разработан для определения основных физических характеристик мерзлых грунтов, использовать для определения плотности и влажности талых грунтов, обладающих связностью и медленно размокающих, например, для различных суглинистых грунтов.

#### 2) Расчетный – измерение суммарной толщины включений на единицу разреза.

## Методы определения содержания незамерзшей воды мерзлого грунта

- Калориметрический метод – основан на измерении теплового эффекта, возникающего при оттаивании мерзлого грунта.
- Контактный метод – основан на диаметрическом равновесии между льдом, нз и паром. Расчет (СНИП 2.02.04-88)

$$K_w \cdot W_p = W_{нз}$$

## Методы изучения строения мерзлых грунтов. К строению мерзлых грунтов относятся:

Криогенная структура и криогенная текстура

- Массивная
- Сетчатая
- Слоистая

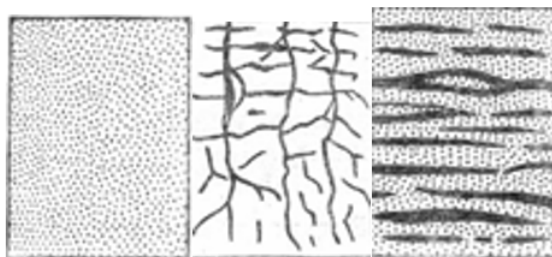


Рис. 7.13. Криогенная текстура (массивная, сетчатая, слоистая)

## Методы изучения свойств мерзлых грунтов

Теплофизические свойства мерзлых грунтов необходимы для описания процессов теплообмена, происходящих в мерзлых и оттаивающих грунтах.

К основным теплофизическим характеристикам горных пород при кондуктивном теплообмене относят:

- 1) Теплопроводность ( -коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)) - направленный процесс распределения теплоты, приводящий к выравниванию температуры среды,

$$\lambda = \frac{q}{gradT}$$

где  $q$  - удельный тепловой поток, равный  $q = Q/S$ ;  $Q$  - количество теплоты;  $dS$  - площадь;  $\Delta t$ -время;  $gradT$  - градиент температуры.

- 2) Температуропроводность - величина, характеризующая скорость выравнивания температуры в веществе.
- 3) Теплоемкость (С, Дж/К) - количество теплоты, необходимое для повышения температуры породы на один градус при неизменных давлении и объеме,

$$C = \left( \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)$$

Для единичной массы показатель носит название удельной массовой теплоемкости и описывается отношением

$$Cm = \frac{C}{M}$$

### Определение температуропроводности

**Метод цилиндрического щупа.** Метод основан на решении задачи о распространении тепла от бесконечного тонкого и длинного источника постоянной мощности, внедренного в однородную изотропную среду.

**Метод стационарного теплового режима.**

$$\lambda = q \cdot h(t_1 - t_2)$$

$$a = \lambda C_p$$

- 1) Образец грунта
- 2) Теплометр
- 3) Датчики температуры
- 4) Верхняя термостатированная плита
- 5) Нижняя термостатированная плита
- 6) Обойма из органического стекла
- 7) Переключатель
- 8) Сосуд Дьюара
- 9) Спай сравнения
- 10) Потенциометр
- 11) Прижимное устройство
- 12) Теплоизоляционный кожух
- 13) Поролон



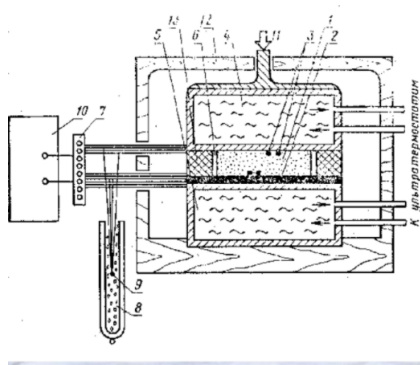


Рис. 7.14. Метод стационарного теплового режима

### Механические свойства мерзлых грунтов

- 1) Основные механические свойства мерзлых грунтов
- 2) Модуль деформации
- 3) Эквивалентное сцепление
- 4) Прочность на сжатие (условно-мгновенная и длительная)
- 5) Коэффициент сжимаемости мерзлого грунта
- 6) Прочность на разрыв
- 7) Сопротивление сдвигу, сцепление, угол внутреннего трения
- 8) Сопротивление срезу (с бетоном, сталью)
- 9) Коэффициент оттаивания и сжимаемости при оттаивании
- 10) Деформация лучения, определение касательных и нормальных сил пучения

В механике грунтов под реологическими понимают процессы деформирования скелета грунта, протекающие во времени. Развитие во времени объемных деформаций в намёрзлых водонасыщенных грунтах в значительной мере определяется процессом отжатия или всасывания воды при всасывании воды при изменении объема их пор. Развитие таких деформаций грунтов, определяемых только длительностью фильтрации воды, не относят к категории реологических. К чисто реологическим следует относить только протекающие во времени деформации самого скелета. В глинистых грунтах реологические процессы обусловлены вязкими связями между частицами скелета грунта. В мерзлых – течением льда.

Явления, определяющие реологические свойства грунтов: ползучесть грунта, релаксация и длительная прочность. Под ползучестью понимают деформируемость грунта во времени при постоянной нагрузке. Релаксацией называют процесс расслабления (уменьшения) напряжений в грунтах при заданной неизменной информации. Длительная прочность – прочность грунтов при длительном действии на них нагрузки.

## Лекция 8. Методы исследования геокриологии

### Развитие структурных грунтов

#### Реологические деформации

Мерзлые грунты обладают очень большим своеобразием в отношении механических свойств. При нагружении в них развиваются **реологические процессы** - процессы деформирования, которые протекают во времени и связаны в основном с остаточными деформациями, т.е. с теми деформациями, которые остаются после снятия нагрузки.

**Процессы, которые включают в себя реологические процессы:**



Рис. 8.1. Ползучесть, пластичность, вязкость

- **Ползучесть.** Под ползучестью понимают деформируемость грунта во времени при постоянной нагрузке.
- **Пластичность** – способность материала принимать новую форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, и сохранять ее после снятия нагрузки. Модель – ползун:
- **Вязкость** – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Пример – Ньютоновская жидкость, модель – **поршень с жидкостью**.
- **Упругость** – свойство тела деформироваться под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму и размеры после ее снятия.
- Поведение грунтов под нагрузкой имеет сложный характер, в общем виде упруго-пластично-вязкий.
- **Релаксацией** называют процесс расслабления (уменьшения) напряжений в грунтах при заданной неизменной деформации за счет ползучести.
- **Длительная прочность** – прочность при длительном действии на мерзлые грунты.

#### Ползучесть и разрушение

На (Рис. 8.2) представлены кривые ползучести. Кривая имеет несколько участков. Начальный участок - затухающей деформации. Затем участок - течение с постоянной скоростью. И третий участок - прогрессирующего течения. Это характерно для всех грунтов. При некоторых нагрузках может выделяться только одна стадия, при других две стадии - участок течения с затухающей скоростью и участок течения с постоянной скоростью. Если нагрузки возрастают, то появляются участки с третьей стадией - прогрессирующего течения. Заканчивается эта стадия - **разрушением**.

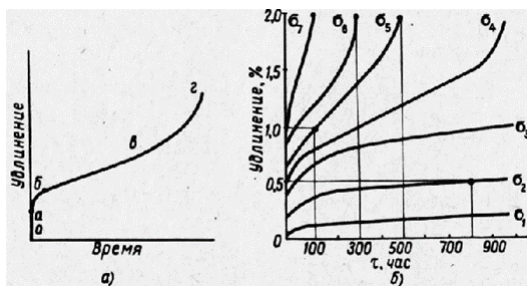


Рис. 8.2. Кривые ползучести

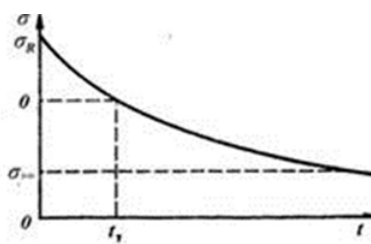


Рис. 8.3. Кривая длительной прочности

Особенность мерзлых пород, особенно высоких, засоленных пород, заключается в том, что третья стадия не выделяется, трудно определить момент разрушения.

### Кривая длительной прочности

Если прикладывается большая нагрузка – разрушение происходит, достаточно быстро, если в течении нескольких секунд – мгновенная прочность. Если нагрузка уменьшается, то образцы разрушаются длительное время.

### Механические свойства

Сложность строительства на вечной мерзлоте заключается в том, что приходится задавать очень низкие значения прочности.

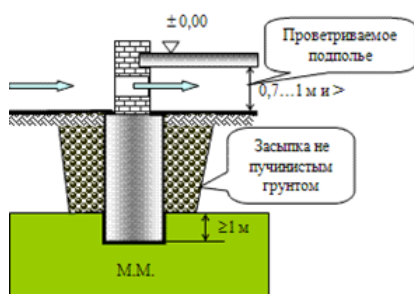


Рис. 8.4. Схема устройства фундаментов на вечномёрзлых грунтах по первому принципу строительства

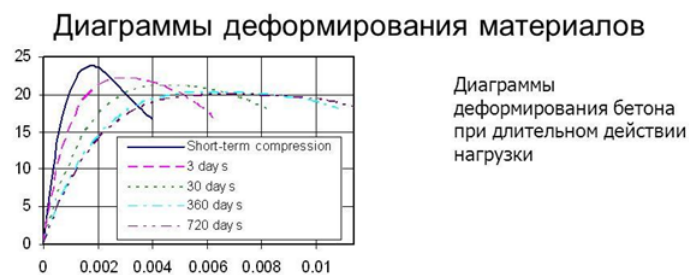


Рис. 8.5. Диаграмма деформирования материалов

### Длительное деформирование

## Методы определения механических свойств мерзлотных грунтов

Полевые методы:

- Метод испытания горячим штампом
- Метод исследования несущей способности сваи
- Метод сферического шара
- Метод определения деформации пучения

#### **Лабораторные методы:**

- Метод одноосного сжатия
- Метод шарикового штампа
- Метод сопротивления срезу по поверхности смерзания
- Метод компрессионного сжатия
- Метод глубины сезонного промерзания-оттаивания
- Метод непосредственных наблюдений
- Температурных наблюдений
- Геофизические методы (микроВЭЗ) в сочетании с бурением
- Расчетный метод (СНиП 2.02.04-88)

#### **Применение геофизических методов при геокриологической съемке**

**Геофизические методы** используются для изучения температурных полей, состояния (мерзлое, талое), состава, строения, залегания различных генетических типов пород в разрезе и в плане.

Приводится термометрический, электрический, акустический и ядерный каротаж **скважин**, **электропрофилирование** и вертикальное электрическое **зондирование**, методы переменного тока, инфракрасная и радиолокационная аэросъемка, и другие методы.

#### **Методы прогноза изменения геокриологических условий при освоении криолитозоны**

Под геокриологическим прогнозом, по В.А.Кудрявцеву, понимается научное предсказание развития геокриологических условий в будущем в связи с естественным ходом развития природы или в связи с хозяйственным использованием территории.

Различают два вида прогноза:

- 1) Эволюционный (или естественно-исторический)
- 2) Техногенный

## **Методы мелиорации мерзлых пород как оснований сооружений**

Под мелиорацией (улучшением) понимается изменение теплового режима, состава, строения и свойств мерзлых грунтов в направлении, необходимом для решения практической задачи.

При этом используются тепловая, водно-тепловая, механическая, физико-химическая и химическая мелиорации.

Тепловая мелиорация заключается в искусственном изменении температуры грунтов с использованием различных источников тепла или охлаждающих устройств. Теплопередачи, а в грунтах осуществляется кондуктивным способом.

При водно-тепловой мелиорации используется тепло, переносимое конвективным и кондуктивным путем при нагнетании и фильтрации воды.

Механические способы мелиорации включают замену грунта, его уплотнение, обезвоживание и другие.

Физико-химические и химические приемы мелиорации заключаются либо в использовании тепла при экзотермических или эндотермических химических реакциях, либо путем введения в грунт химических реагентов или использования электроосмоса.

## **Методы мелиорации мерзлых пород как оснований сооружений**

Под мелиорацией (улучшением) пониманием изменение теплового режима, состава, строения и свойств мерзлых грунтов в направлении, необходимом для решения практической задачи.

При этом используются тепловая, водно-тепловая, механическая, физика-химическая и химическая мелиорация.

Тепловая мелиорация заключается в искусственном изменении температуры грунтов с использованием различных источников тепла или охлаждающих устройств. Теплопередача в грунтах осуществляется кондуктивным способом.

При водно-тепловой мелиорации используется тепло, переносимое конвективным и кондуктивным путем при нагнетании и фильтрации воды.

Механические способы мелиорации включают замену грунта, его уплотнение, обезвоживание и другие.

Физико-химические и химические приемы мелиорации заключаются либо в использовании тепла при экзотермических или эндотермических химических реакциях, либо путем введения в грунт химических реагентов или использования электроосмоса.

## **Принципы строительства инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах и способы обеспечения устойчивости оснований фундаментов**

Первый принцип – сохранение многолетнемерзлых грунтов в основании в течение периода эксплуатации (пассивный метод).

Второй принцип основан на допущении оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания (активный метод).



Независимо от принципа использования грунтов в качестве оснований (1 или 2 принцип) при возведении сооружений расчет оснований и фундаментов производят по двум предельным состояниям:

- 1) По несущей способности (первая группа предельных состояний)
- 2) По деформациям (вторая группа предельных состояний).

Кроме того, проверяют фундаменты на устойчивость против морозного пучения.

### Строительство дорог

Проектирование по 1 принципу ведут на участках с низкотемпературными многолетнемерзлыми льдистыми грунтами, когда оттаивание может привести к недопустимым деформациям и разрушению дорожной одежды. Сохранение мерзлых грунтов в основании обеспечивается конструкцией дорог и мероприятиями по тепловой стабилизации.

Проектирование по 2 принципу – с частичным оттаиванием мерзлых пород – ведут для насыпи из глинистых и песчаных грунтов с влажностью менее предела текучести и с незначительными осадками при протаивании. В криолитозоне железные и автомобильные дороги строятся в основном на насыпях.

### Строительство трубопроводов

Конструктивные особенности и температурный режим трубопроводов зависят от характера перекачиваемого продукта. Так, нефтепроводы могут эксплуатироваться только при положительной температуре, причем минимальные температуры нефтепровода составляют плюс 5-10°, так как при более низкой температуре нефть густеет и происходит выделение парафина. Газопроводы могут иметь как положительную, так и отрицательную температуру.

Трубопроводы разделяются на подземные, наземные (в насыпи или без обваловки) и надземные. Наибольшее тепловое влияние на мерзлые грунты оказывают подземные трубопроводы, залегающие ниже глубины сезонного оттаивания.

## Глобальное изменение климата и его последствия

Повышение температуры связано с ростом концентрации парниковых газов.

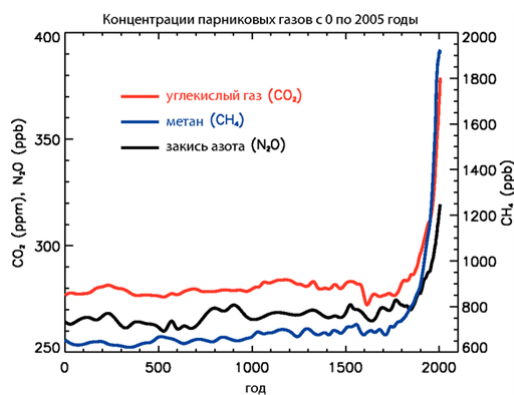


Рис. 8.6. Рост концентрации парниковых газов с 0-го по 2005-й год

## Разрушение берегов

Эрозия побережья Арктики происходит намного быстрее, чем полагали ученые. Рост температур привел к таянию больших масс льда, как на суше, так и в океане. Из-за того, что поверхность воды в высоких широтах частично освободилась ото льда, в полярных регионах участились шторма, и увеличилась их интенсивность. Эти процессы, в свою очередь, привели к усиленной эрозии берегов. Именно шторма вносят основной вклад в разрушение береговой линии.

**Сценарий А** (потепление на  $3^{\circ} + 1,5^{\circ}$  сохранением к середине 21 века линейного тренда средней летней температуры, наблюдавшегося в 20 веке) – прогнозируемое в 2005-2015 гг. затухание процессов сменится резкой активизацией с экстремумом в 2040-2050 гг. со средними темпами разрушения морских берегов восточной Арктики – 16м, максимальным – до 30 м/год.

**Сценарий Б** (двукратного уменьшения линейного тренда колебаний средней летней температуры к середине 21 века) – прогнозируются умеренные вариации средней скорости эрозии с двумя экстремумами в 2020-2025 и 2040-2045 гг. Средние и максимальные темпы разрушения берегов будут сопоставимы с наблюдавшимися во второй половине 20 века при условии сохранения современного уровня техногенной нагрузки на арктические территории во время экстремумов. Прогнозируемые скорости эрозии льдистых берегов высотой 1-30 м на ключевых участках побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского по сценариям А и Б.

## Мониторинг криолитозоны и моделирование тепловых процессов

**Мониторинг** – система постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в окружающей среде и обществе, результаты которого служат для обоснования управленческих решений по обеспечению безопасности людей и объектов экономики.

**Экологический мониторинг** (мониторинг окружающей среды) – комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды (Израэль, 1979). В рамках системы наблюдения происходит оценка, контроль объекта, управление состоянием объекта в зависимости от воздействия определенных факторов.

Термин заимствован из английского языка, где он означает постоянную проверку, слежение за объектом, находящимся в изменении или развитии, и включает в себя комментарии, обсуждение этих изменений.

**Фактически определяются** параметры, или переменные, или характеристики природной среды, за которыми устанавливается наблюдение. Поэтому говорят о комплексном мониторинге, включающем в себе сразу много, или несколько параметров. Если отслеживается определенная группа параметров, выделяется специальный, или частный мониторинг.

**Геологический мониторинг** – это система изучения, прогноза и контроля геокриологической среды, оценки изменения мерзлотных, инженерно-геологических и гидрогеологических условий северных регионов под влиянием природных факторов

и хозяйственной деятельности человека (Мельников и др. 1993) Если он включает природно-технические системы, его называют также инженерно-геокриологическим мониторингом, или геотехническим мониторингом (ГТМ) в криолитозоне.

Таким образом, разделяется **фоновый мониторинг**, который проводится в ненарушенных условиях до начала освоения территории или после освоения, но в ненарушенных условиях, и **геотехнический (ГТМ) мониторинг** на нарушенной территории в комплексе с наблюдениями за зданиями и инженерными сооружениями.

Выделяются системы геокриологического мониторинга разного уровня:

- Глобального (межгосударственного)
- Национального
- Регионального
- Локального (муниципальный)

Наблюдаемыми параметрами в системах мониторинга вечной мерзлоты являются:

- Температуры почв и горных пород на различной глубине
- Глубина сезонного оттаивания (промерзания)
- Влажность (льдистость) сезонно-талого (сезонно-мерзлого) слоя
- Характер микрорельефа и растительности на поверхности почвы или горных пород
- Уровни подземных вод
- Характеристики мерзлотных явлений и процессов

Кроме того, для района (полигона, площадки) мониторинга необходимы:

- Характеристики свойств мерзлых пород (теплофизические, физико-химические, механические)
- Их криогенное строение
- Строение толщи мерзлых пород и ее мощность
- Тепловой поток снизу
- Параметры изменяющегося техногенного воздействия на вечную мерзлоту (например, характеристики сезонно-действующих охлаждающих устройств, зданий и инженерных сооружений, степень повреждения поверхности, изменение гидрологических характеристик и другие).
- Параметры для мониторинга WMO's GCOS-GTN-P
  - Слой сезонного протаивания Circumpolar Active Layer Monitoribg Network (CALM)
  - Тепловой режим горных пород Thermal state of permafrost (TSP)

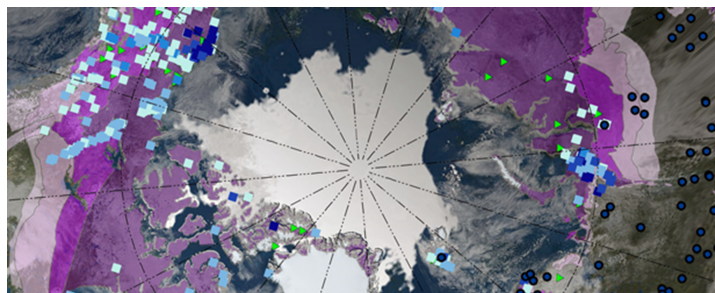


Рис. 8.7. Точки мониторинга Северного полушария

## Геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации сооружений на многолетнемерзлых грунтах

Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах – комплекс работ, основанный на натурных наблюдениях за состоянием грунтов основания (температурный режим), гидрогеологическим режимом, перемещением конструкций фундаментов вновь возводимого, реконструируемого и эксплуатируемого сооружения. В районах распространения многолетнемерзлых грунтов мониторинг необходимо проводить для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций. Мониторинг осуществляется в соответствии с проектом, который разрабатывается в процессе проектирования.

Обобщением собранных данных, собранных международными программами, национальными, отдельными проектами, являются обзорные карты, в которые показывают распространение мерзлоты, ее основные характеристики, мощность для больших территорий.



Рис. 8.8. Среднегодовая температура, ее изменения

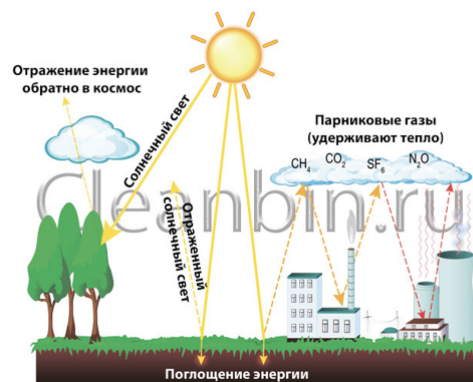


Рис. 8.9. Эмиссия парниковых газов

Цифровые карты созданы на основе современных геоинформационных технологий, они позволяют менять эти условия, идет тренд повышения температуры, соответственно с ее помощью можно пересчитать как могут изменяться температуры в конце столетия. Очень важно как будет меняться при оттаивании, повышении температур – льдистость.

Огромные территории России заняты мощными подземными льдами. Любые изменения теплового режима приведут к серьезным изменениям поверхности.

Изменения, которые будут происходить зависят от льдистости, от того на сколько мощные льды находятся под землей.

### **Эмиссия парниковых газов**

Парниковые газы поглощают тепло, вызывая повышение температуры на Земле подобно одеялу, или точнее, парнику, который позволяет солнечной энергии войти внутрь, но препятствует ее выходу обратно. Парниковый эффект является благоприятным явлением природы, сохраняющим тепло на Земле и делающим ее обитаемой. Парниковые газы поглощают тепло, которое иначе рассеялось бы в космическом пространстве, и вызывают глобальное потепление климата. Однако последствия резкого потепления климата имеют негативный характер.

При составлении глобальных прогнозов необходимо учитывать, что, помимо техногенного, существуют и природные, значительно более мощные источники парниковых газов - эндогенные флюиды: водород, метан, азот. Геологами показана их решающая роль в планетарном балансе. Главными каналами дегазации Земли, через которые растворенные во внешнем ядре газы выходят на дневную и морскую поверхность, являются рифовые зоны - грандиозные расколы, сливающиеся в единую мировую систему.

С этой точки зрения, представляют интерес фактические данные по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу газовой промышленностью, в первую очередь, по эмиссии парниковых газов в сравнении с глобальными потоками парниковых газов техногенной и естественной природы.

Мерзлота содержит очень много метана (много органического материала, много похоже метаногенны способны генерировать при низких температурах, в прошлом могли быть газовые гидраты) мерзлота слабопроницаема для газов. В результате оттаивания возникают заболоченные территории, которые раздуты метаногенном, т.е. парниковый газ может производиться в огромном количестве. Образовываются метановые бомбы. Проблема в том, что мы не можем точно оценить запасы метана и величину эмиссии, которая происходит при повышении температуры, оттаивании мерзлоты. Сейчас существуют некоторые оценки процесса, но они далеки еще от точности.

### **Арктический шельф**

Площадь арктических льдов уменьшает, огромная акватория освобождается. Проблема заключается в том, что сам шельф охлажден, в каких то случаях это охлажденные породы, в каких то мерзлота. Сегодня мы не знаем точно, где находится мерзлота, где находится охлажденные породы, тем более их размеры могут изменяться. Освоение шельфа предполагается установку сооружений.

### **Устойчивость сооружений в криолитозоне**

Базовый комплекс работ при инженерно-геологических изысканиях в области распространения многолетнемерзлых грунтов

- ГОСТ 25100-2011 – Грунты. Классификация



- СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлотных грунтах (СНиП 2.02.04-88)
- СП 11-105-97. Инженерно- геологические изыскания для строительства. Часть 4.

### **Правила производства работ в районах распространения многолетне-мерзлых грунтов**

- 1) Предпроектные стадии: Информационное сопровождение инженерных изысканий (инженерно-геологически, инженерно-экологических) и проектирование на основе составления альбомов тематические карты.
  - а) 1 этап – опережающий отчет по фондовым материалам.
  - б) 2 этап – заключительный отчет с учетом результатов полевых изысканий.
- 2) Проект и РД: Выполнение комплекса полевых инженерно-геологических (инженерно-геокриологических) изысканий: Инженерно геокриологическая съемка, бурение, полевые лабораторные исследования, специальные геофизические работы, картирование
- 3) Лабораторные исследования физико-механических свойств мерзлых грунтов В зависимости от стадии изысканий Характеристика физических
- 4) Пространственно-временной прогноз инженерно-геокриологических условий и теплотехнические расчеты В зависимости от стадии изысканий

При инженерно-геологических изысканиях в районах распространения многолетне-мерзлых грунтов (ММГ) следует устанавливать и дополнительно к отражать в техническом отчете:

- Характер распространения, особенности формирования, условия залегания, мощность ММГ, криогенную текстуру ММГ с указанием количественных характеристик (толщины шпиров и расстояния между ними)
- Разновидности грунтов по льдистости, засоленности и типу засоления, пучинистости
- Наличие подземного льда и его генетические типы, условия залегания, морфометрические характеристики залежей
- Нормативное значение среднегодовой температуры ММГ
- Глубину сезонного оттаивания и промерзания грунтов, ее динамику в годовом цикле; нормативную глубину сезонного оттаивания и промерзания
- Нормативные и расчетные характеристики физических, теплофизических, химических (включая значения засоленности, коррозионной агрессивности), деформационных и прочностных свойств многолетнемерзлых и оттаивающих грунтов (сезономерзлых и сезонноталых)

- Наличие, границы распространения, условия формирования и интенсивность развития криогенных процессов в образований (пучинистость грунтов в слое сезонного промерзания/оттаивания, морозное пучение грунтов, термоэрозия, термоабразия, солифлюкция, термокарст, наледообразование, курумообразование, морозобойное растрескивание); количественную характеристику степени пораженности территории этими процессами и образованиями
- Состав, состояние, криогенное строение и свойства грунтов сезонноталого и сезонномёрзлого слоев
- Распространение, характер проявления и генезис таликов, охлажденных грунтов и таликовых зон
- Качественный/количественный прогноз изменения геокриологических условий во времени и пространстве, в естественных условиях и в процессе освоения, устойчивости состояния ММГ и допустимых техногенных воздействий на них процессе строительства и эксплуатации проектируемых объектов
- Рекомендации по выбору принципов использования ММГ и таликов в качестве оснований фундаментов
- Рекомендации для принятия решений по инженерной защите от опасных криогенных процессов
- Оценку влияния проектируемых сооружений на условия формирования и развития опасных криогенных процессов

### Лабораторные испытания мерзлых грунтов. Отображение результатов испытаний на карте

**Хозяйственная деятельность в криолитозоне.** Дома строятся на бетонных сваях, забитых в многолетнемерзлые породы, ниже деятельного слоя (Рис. 8.10)

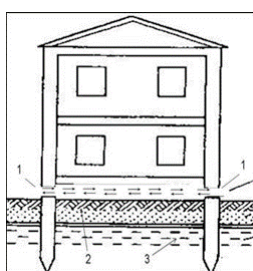


Рис. 8.10. Строительство в криолитозоне. Глубина заложения фундаментов. 1 – отверстия для циркуляции воздуха 2 – слой сезонного протаивания 3 – многолетнемерзлые породы

Фундаменты	Минимальная глубина, заложения фундаментов, м
Фундаменты всех типов, кроме свайных	$d^{та} + 1$
Свайные фундаменты зданий и сооружений	$d^{та} + 2$
Сваи опор мостов	$d^{та} + 4$
Фундаменты зданий и сооружений, возводимых на подсыпках	Не формируется

Рис. 8.11. Фундаменты

**Методы мерзлотного прогноза (эволюционный, или естественно-исторический, и техногенный):**

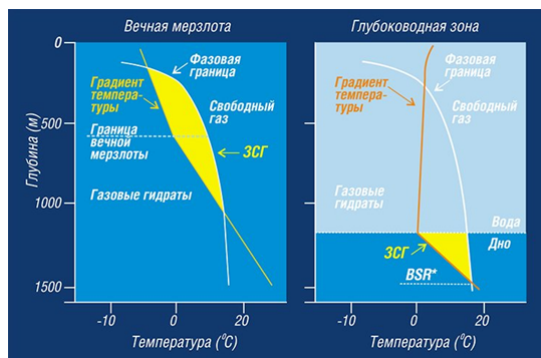


Рис. 8.12. Расчет величин, осадки при оттаивании по результатам прогноза формирования чаши оттаивания под сооружением по данным испытания

- Моделирование
- Метод аналогий
- Классификация
- Экстраполяция и интерполяция
- Экспертные оценки

Для геокриологического прогноза необходима следующая информация:

- Модель грунтовой толщ.
- Модель естественного температурного поля в грунтовой толщ на момент начала расчета (данные термометрии)
- Теплофизические характеристики грунтов (коэффициент теплопроводности в мерзлом и талом состоянии, температура начала замерзания (оттаивания), объемная теплоемкость в мерзлом и талом состоянии, объемная теплота фазовых переходов)
- Конструктивные особенности проектируемых сооружений, подсыпок, влияющие на теплообмен между грунтовой толщей и атмосферой (сооружениями) – принцип строительства, материал и характеристики отсыпки, и тип фундамента, конструкция вентилируемого подполья (при наличии), конструкция полов, температурный режим помещений.
- Климатические данные ( в том числе модель изменения климата на прогнозный период)

### Основные современные проблемы

- Пучение грунта в области развития многолетнемерзлых пород – это бедствие, наносящее урон хозяйству России. Деформированные насыпи железных и автомобильных дорог, газо- и нефтепроводы, аэродромы, кабельные линии связи, водо- и теплопроводы и многие другие сооружения испытывают на себе пучение грунта.

- Протаивание и термокарст, изменение несущей способности грунтов при повышении температуры приводит к нарушению устойчивости сооружений
- Основные проблемы линейных сооружений связаны с пучением, протаиванием, всплывание трубопроводов и термоэрозией (термообразией), склоновыми процессами
- Проблемы возникают с горными выработками и шахтами, в угленосных районах, в Воркуте, например, где подземные сооружения – это источники тепла, а температура многолетнемерзлых пород около  $0^{\circ}$ , а так же буровыми скважинами
- Происходящее изменение климата и природной среды под влиянием техногенной деятельности человека вследствие естественных причин

## Газ и газовые гидраты

Газовые гидраты – кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа.

Больше ста молекул газа входят в одну молекулярную ячейку кристаллической решётки льда. В одну ячейку могут входить больше ста кубических сантиметров газа. Поскольку это лед, то эти газовые гидраты не отличаются, но на самом деле это огромные хранилища газов, прежде всего метана. Для создания гидратов требуется определенное давление.

## Эффект самоконсервации гидратов газов

Гидрат должен разложиться, но оказывается, что он сохраняется неопределенно долго. Сколько – неизвестно. Газовые молекулы вошли в кристаллическую решетку под давлением, дальше давление снимаем и они должны выйти из решетки и газовый гидрат должен разложиться и распасться, но по какой-то причине они остаются. Сложно объяснить эффект самоконсервации, но он действительно есть. Эта загадка имеет очень важные последствия, так как мы не знаем, сколько в мерзлоте газов.

## Ямальский кратер

Ямальская воронка (Рис. 8.13), обнаруженная осенью 2013 года к югу от Бованенковского месторождения, является природным феноменом. К такому выводу пришли российские ученые после обследования необычного природного образования. Для изучения воронки были организованы рекогносцировочные исследования. Ямальская воронка в диаметре не превышала 30 метров в верхней части и 25 метров в основном стволе. На начало исследований она представляла собой кратер, глубина которого намного больше диаметра, с почти вертикальными стенками. Кратер окружен "бруствером" то есть является результатом выброса из недр на поверхность. Следов деятельности человека в окрестностях кратера найдено не было, соответственно, этот феномен чисто природного происхождения. Отсутствие повышенного радиационного фона и следов воздействия высокой температуры не позволяет предположить влияние внеземных объектов, типа метеорита, а также взрыва газа.



Рис. 8.13. Ямальский кратер

### Живое вещество в криолитозоне

В биосфере совершается постоянный круговорот активных элементов, биогенная миграция. Различают биогенную миграцию первого рода, которая совершается микроорганизмами, второго рода – многоклеточными организмами. Миграция первого рода превышает миграцию второго рода. Человечество осуществляет миграцию третьего рода.

Процесс разложения органических остатков очень медленный, когда происходит микробная ферментация, образуются самые разные соединения в мерзлоте. Это очень важно, и слабо изучено. Бактерии, которые были найдены в вечной мерзлоте, не всегда благоприятны для человека. Должно происходить достаточно быстро распад генетического материала, но находят очень древние плейстоценовые живые микроорганизмы. Если мы узнаем, какие механизмы препятствуют разрушению, каким образом сохраняются ДНК, то эти механизмы мы сможем использовать в своих целях: для остановки мутации, хранения генов, предотвращения их повреждения, которые вызывают старение, болезни).

### Криология планет

Мерзлота в космосе. Последние данные говорят о необычных процессах криогенных, которые возникают уже не на Земле, но очень похожих.

Формы очень похожи на те формы, которые нашли на Марсе. Это говорит о том, что закономерно существование каменных глетчеров. Это говорит о том, что там есть лед.

### Приливы на Земле

Вдоль оси Луна – Земля возникают «приливные» силы. Чем участок Земли ближе к Луне, тем сильнее он к ней притягивается. Разная степень притяжения в разных точках вызывает деформацию земного шара, в результате возникают морские приливы и отливы. Как результат, гравитация Луны влияет на земную кору, атмосферу и гидросферу Земли и даже на её геомагнитное поле. Земля с Луной образуют единую



систему масс, центр которой расположен на расстоянии 4750 км от центра Земли. Оказалось, что на дальних планетах, эти приливы гораздо выражены.

Очень низкая температура поверхности, внутри за счет приливных движений нагревается, вода превращается в пар и под давлением пробивает ледяную корку, образуя гейзеры. Титан – лед в большом количестве на поверхности, явления вулканизма, которые являются следствием сильного тяготения планет, внутренних приливов, вызывающих нагрев недр и плавление воды и извержения. Тритон - огромная ледяная поверхность, замороженная с жидким азотом и водой, при этом возможен вулканизм, гейзеры. На поверхности такие выбросы свидетельствуют об активной водно-ледяной тектонике, связанной с разогревом планет, приливами и плавлением льда и выбросов. Таких ледяных гейзеров на Земле нет. Космические холодные температуры, поверхность ледяная, но она прорывается жидкими гейзерами.

Геокриология – молодая наука, быстро развивающаяся и требующая пристального внимания. Мерзлота в России занимает примерно 65 % территории и при этом наблюдается повышение температур- глобальное потепление. Происходят значительные изменения, и будет еще больше изменений, которые требуют внимания.



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
Л Е К Ц И И   У Ч Е Н Ы Х   М Г У