

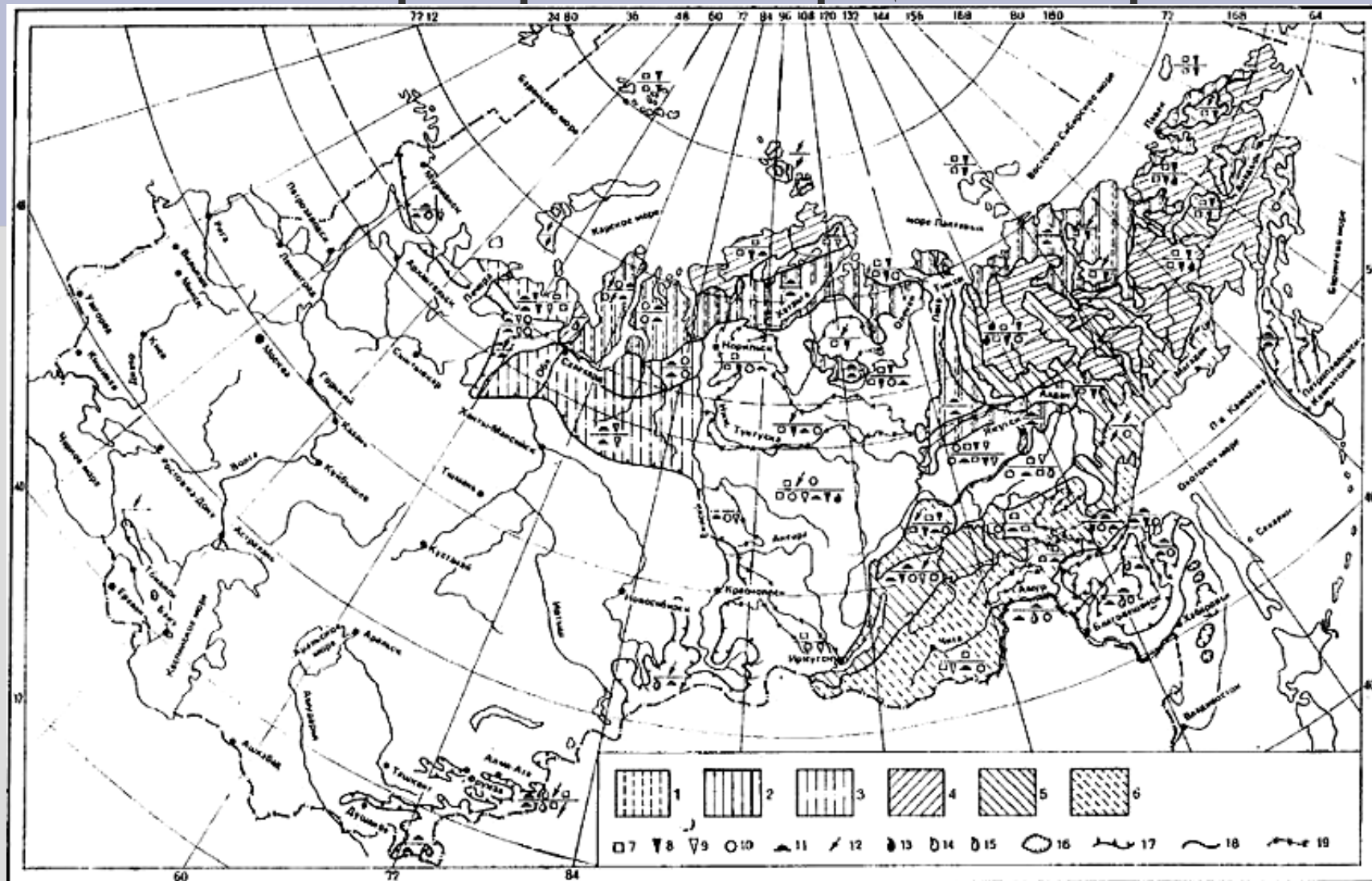
*составитель доцент кафедры ГИГЭ ИГНД ТПУ
Крамаренко В.В.*

МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ

КРИОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ

- Криогенными (мерзлотными) процессами называются экзогенные геологические процессы, которые обусловлены сезонным и многолетним промерзанием и оттаиванием увлажненных рыхлых горных пород, охлаждением мерзлых пород и замерзанием подземных вод.

Схематическая карта криогенных процессов и образований



Широкое развитие: 1 — морозобойного растрескивания; 2 — повторно-жильных льдов; 3 — термокарстовых форм; 4 — солифлюкций; 5, 6 — наледей: 5 — подземных вод; 6 — речных и подземных вод **Ограниченное развитие:** 7 — морозобойного растрескивания; 8 — повторно-жильных льдов; 9 — грунтовых жил и псевдоморфоз по жильным льдам; 10 — термокарстовых форм; 11 — многолетних бугров пучения; 12 — солифлюкций; 13—15 — наледей: 13 — подземных вод; 14 — речных вод; 15 — подземных и речных вод, 16 — ледников. (В том числе показаны образования на междуречьях, в знаменателе — в долинах. Последовательность знаков указывает на уменьшение роли процессов и образований). Границы: 17 — распространения многолетнемерзлых грунтов; 18 — широкого развития криогенных процессов и образований; 19 — ограниченного развития криогенных процессов и образований

По основным ведущим агентам природной среды, являющим-ся движущей силой процессов и формирующихся явлений, все экзогенные мерзлотно-геологические процессы в криолитозоне могут быть подразделены на четыре основные группы .

1) К первой группе относятся собственно криогенные (мерзлотно-геологические) процессы, развитие которых вызвано сезонными и многолетними колебаниями теплообмена на зем-ной поверхности и в подстилающих горных породах. Это:

- *морозобойное растрескивание и криогенное выветривание,*
- *морозное пучение пород и наледообразование,*
- *термокарст.*

- 2) Развитие **второй группы флювиальных, абразионных и воднобалансовых процессов** вызвано механическим и тепловым воздействием на мерзлые и оттаивающие породы водных масс, годовыми колебаниями теплообмена на поверхности пород и многолетними колебаниями водного баланса поверхности. Это
 - *термоабразия,*
 - *термоэрозия,*
 - *заболачивание,*
 - *развитие ледников и связанные с ними образования, такие как озы, камы, снежники и др.*

3) Третья группа объединяет гравитационные процессы, такие как

солифлюкция,

курумообразование,

десорпция,

оползание, обрушение, осыпание и др.

4) К четвертой группе относятся процессы эолового происхождения.

1 группа. Собственно криогенные (мерзлотно-геологические) процессы, развитие которых вызвано сезонными и многолетними колебаниями теплообмена на земной поверхности и в подстилающих горных породах.

Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	Основные формы проявления процессов
				В отложениях	В рельефе
1.1. Криогенное выветривание пород	Температурные деформации пород, расклинивающее действие тонких пленок воды в породах, диспергация и коагуляция минеральных частиц в дисперсных породах	Многочисленные циклы сезонного промерзания и оттаивания пород, изменения напряженного состояния пород под влиянием сезонных колебаний температуры	Изменение механического состава рыхлых отложений	Криогенная автоморфная кора выветривания, лессовидные покровные образования	Поверхности выравнивания, нагорные террасы
1.2. Морозобойное растрескивание и полигонально-жильные образования	Температурная деформация мерзлого массива дисперсных пород	Изменения напряженного состояния пород в массиве под влиянием сезонных колебаний температуры	Образование повторно-жильных льдов и грунтовых жил	Вертикальные трещины в сезонноталом слое пород, повторно-жильные льды, грунтовые жилы	Полигональный рельеф
1.3. Морозное пучение дисперсных пород	Увеличение объема пород при льдовыделении в них	Сезонное и многолетнее промерзание влажных и водонасыщенных дисперсных пород	Усадка пород, температурная деформация	Ледяные шпильки, линзовидные и пластовые залежи льда, криотурбации	Площади пучения, миграционные и инъекционные бугры пучения, каменные моря и многоугольники
1.4. Наледообразование	Сезонное замерзание поверхности и подземных вод	Перемерзание водотоков, путей транзита и очагов разгрузки подземных вод	Инъекционное внедрение подземных вод в замерзающие отложения, деформация мерзлых пород	Наледный аллювий	Наледи, наледные поляны
1.5. Термокарст	Тепловая осадка земной поверхности	Сезонное и многолетнее оттаивание сильнольдистых пород и подземных залежей льда	Размокание, растекание оттаивающих пород	Таберальные отложения	Термокарстовые просадки поверхности, бугристо-западинный рельеф, озера, котловины, байджерахи

Мерзлотоведение

ГИГЭ ИГНД ТПУ

Группа 2. Флювиальные, абразионные и воднобалансовые процессы вызванные механическим и тепловым воздействием на мерзлые и оттаивающие породы водных масс, годовыми колебаниями теплообмена на поверхности почвы и многолетними колебаниями водного баланса поверхности.

Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	
				В отложениях	В рельефе
2.1.Термоэрозия	Разрушение и вынос оттаивающих и мерзлых дисперсных пород водными потоками	Тепловое и механическое воздействие водного потока на мерзлые породы в его ложе	Солифлюкция, термоабразия, оползни	Овражный пролювий, аллювиально-пролювиальные отложения	Промоины, овраги, балки, конуса выноса
2.2.Термоабразия	Размывание, обрушение, сползание, стекание пород на береговых склонах и уступах, вынос их с пляжей	Тепловое и механическое воздействие волнений и течений водных масс на мерзлые и оттаивающие породы в береговой зоне	Солифлюкция, обвалы, сплывы-оползни	Прибрежно-морские и озерные отложения	Отсыпание бровки береговых склонов и уступов от акваторий, термоабразионные уступы, цирки, прибрежные отмели
2.3.Заболачивание	Слабый сток поверхностных вод, зарастание озер, переувлажнение поверхности	Увеличение осадков, термокарстовые просадки, сезонное и многолетнее промерзание отложений, рост торфяных залежей	Морозное пучение, термокарст	Торфяные залежи, сапропель, пластовые и инъекционные льды	Выпуклые торфяники, кочкарники, грядово-озерно-мочажинные образования
2.4.Ледники, снежники	Накопление, таяние, движение льда и снега, водноледяной сток	Преобладание снегонакопления над таянием Мерзлотоведение	Разрушение коренных пород, выпахивание ледниковых долин, озер	Водно-ледниковые и ледниковые отложения	Купола, вершинные, долинные, склоновые ледники, озы, Камы, эрратические валуны

3 группа. Гравитационные процессы

Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	
				В отложениях	В рельефе
3.1. Курумбообразование	Скопление и перемещение грубообломочного материала по склону крутизной меньше угла естественного откоса обломков	Криогенное и термогенное выпучивание обломков, криодессерпция	Суффозия, пластично-вязкое течение гольцового льда	Гольцовый делювий	Курумы-потоки, курумы-поля, курумовые террасы
3.2. Солифлюкция	Пластично-вязкое и вязкое течение, сплывание оттаивающих пород на склонах	Разрушение структурных связей в дисперсных породах и уменьшение их прочности при оттаивании	Захоронение почвенно-дернового слоя, снежников	Солифлюкционные отложения	Солифлюкционные потоки, покровы, террасы
3.3. Оползни, обвалы, осыпи	Скольжение и обрушение объема талых пород по подстилающей поверхности мерзлых отложений на склоне	Криогенное выветривание, обводнение и уменьшение прочности оттаивающих пород на склоне	Суффозия	Оползневые отложения	Блоковые, глыбовые, земляные обвально-осыпные тела, конуса, воронки
3.4. Лавины, сели	Скопление и перемещение снежных масс, перемещение грязевых и снеговодокаменных масс вниз по склону	Нарушение равновесия в снежном покрове, резкое увеличение поверхностного стока на склонах	Сублимационный диафторез, криогенное выветривание	Несортированные отложения конусов выноса, крупноглыбовые и валунные отложения днищ долин и логов	Конуса выноса, лавины, лотки

Мерзлотоведение
ГИГЭ ИГНД ТПУ

4 группа. Эоловые процессы, обусловленные деятельностью ветра

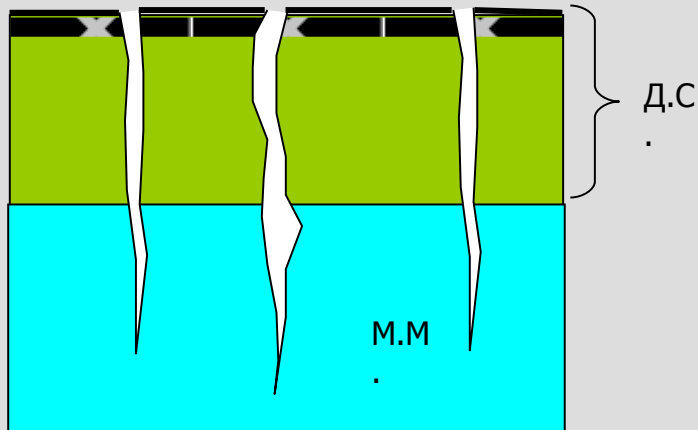
Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	
				В отложениях	В рельефе
4.1. Ветровая эрозия и аккумуляция	Выдувание, перенос и отложение частиц оттаявших и морозных пород ветром	Движение приземного слоя атмосферы, слабая закрепляющая роль растительного покрова	Термогенное выветривание	Эоловые отложения	Котловины, дюны, барханы, тукуланы

I ГРУППА

Криогенное выветривание

- *Криогенное выветривание* — это наиболее распространенный процесс в криолитозоне, а также в зоне устойчивого сезонного промерзания пород. Механизм этого процесса связан с фазовыми превращениями воды в породе при многократном повторении процесса промерзания—протаивания.

Морозобойное растрескивание



При промерзании грунта происходит его объемное уменьшение, сопровождающие часто образование клинообразных щелей.

Глубины этих щелей – трещин достигают нескольких м.

В трещины проникает вода, которая затем превращается в лёд.

Такие морозобойные трещины приводят к изменению глубины промерзания. Могут нанести ущерб дорожному полотну, зданиям, инженерным сетям.

- Условиями морозобойного растрескивания пород являются:
 - 1) монолитность горных пород в мерзлом состоянии в пределах расстояния не менее нескольких полигональных блоков;
 - 2) определенные температурные градиенты, достаточные для трещинообразования;
 - 3) определенные физические свойства монолитных горных пород (сопротивление на разрыв, модуль упругости, коэффициент объемного расширения - сжатия), которые в сочетании с первыми двумя характеристиками способствуют возможности образования морозобойных трещин.



Sorted and Non-sorted Circles

- <http://www.ucsc.edu/currents/02-03/art/patterns.03-01-20.240.jpg>



- www.uregina.ca/~sauchyn/geog323



Полигонально-жильные структуры

- Полигонально-жильные структуры образуются на основе морозобойного растрескивания и имеют огромное распространение в области ММП и в районах глубокого сезонного промерзания. Они развиты преимущественно в современных и плейстоценовых отложениях.
- В основе образования жильных структур лежит морозобойное растрескивание, находящееся в определенной зависимости от температурного режима верхних горизонтов пород, т. е. от A_0 и от ξx (или ξ_{cp}), от $\xi_{от}$ и $\xi_{пр}$, состава и свойств отложений и других факторов.



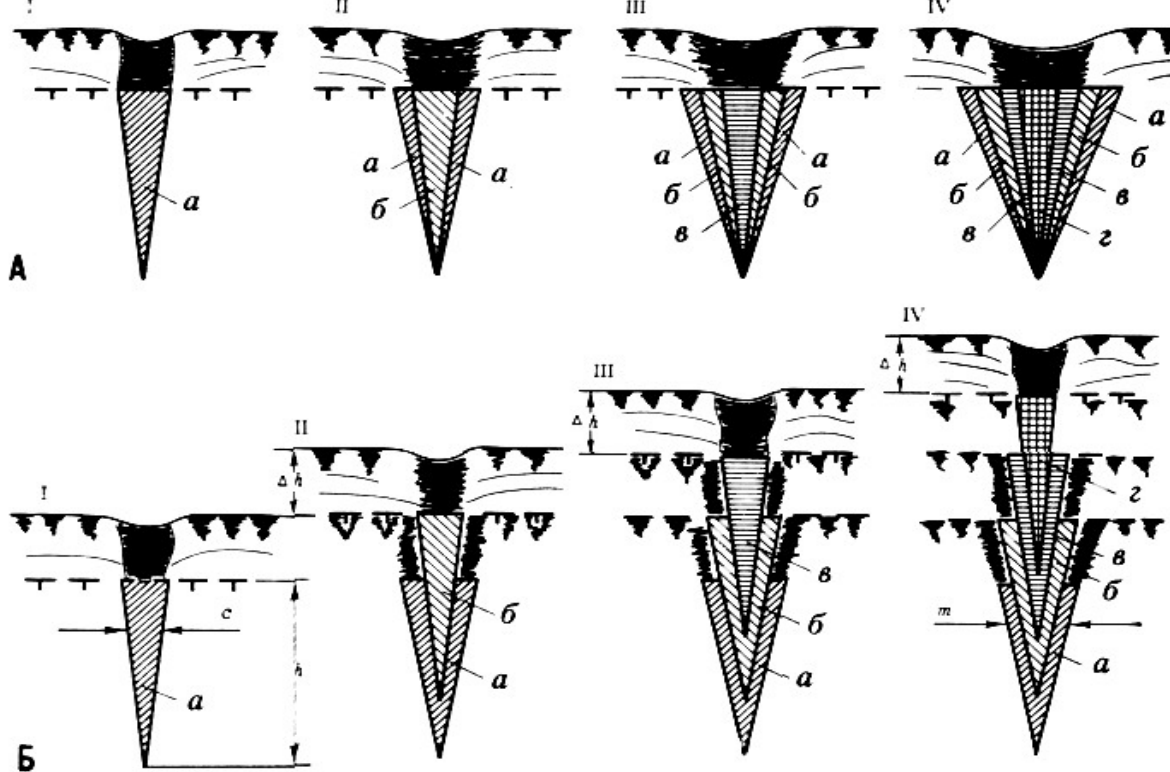


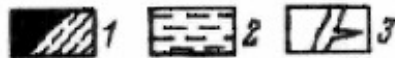
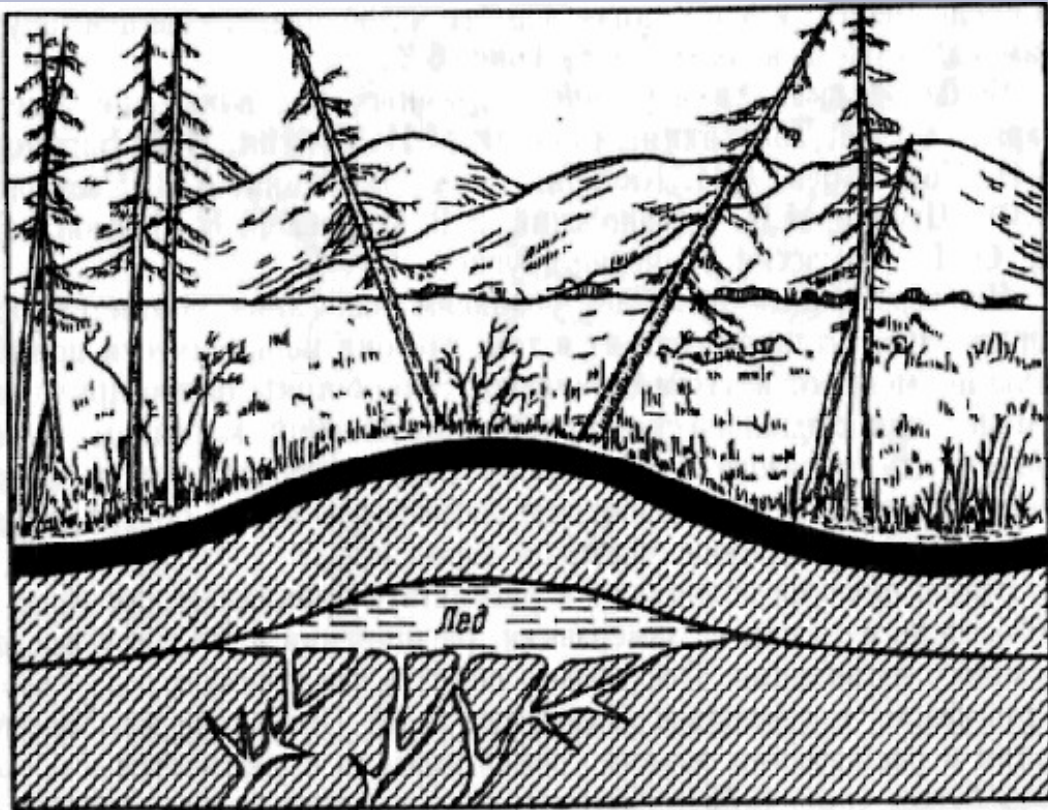
Рис. 38. Схема эпигенетического (А) и сингенетического (Б) роста повторно-жилльных льдов (по Б. А. Достовалову): I—IV — последовательные стадии роста жил; а, б, в, г — ежегодно образующиеся элементарные ледяные жилки; Δh — мощность слоя накапливающегося за год осадка при сингенезе

- Схематический рост ледяных жил в случае эпигенеза и сингенеза
- В случае эпигенетического роста жилы элементарные жилки льда, все время расклинивая породу, увеличивают в ней напряжения сжатия.
- В случае сингенеза, как видно из рисунка, Б, каждая последовательно вклинивающаяся элементарная жилка не доходит до конца предыдущей на величину Δh , равную накоплению осадков за год.
- Получается простая зависимость ширины (поперечной мощности) растущей жилы от средней глубины растрескивания мерзлой породы (h) и от годового накопления осадков:
- $\Delta h / m = hc / \Delta h$.

Морозное пучение

- Процесс сезонного оттаивания — промерзания мерзлого грунта отличается от сезонного промерзания обычных, немерзлых грунтов прежде всего тем, что слой сезонного оттаивания (при сливающейся вечной мерзлоте) подстилается нефилтующей вечномерзлой толщей, что способствует повышению влажности деятельного (активного) слоя.
- Величина пучения деятельного слоя в районах распространения вечномерзлых грунтов или в зоне глубокого сезонного промерзания достигает 10—30 см, а касательные силы пучения, развивающиеся при сезонном промерзании грунтов и воздействующие на фундаменты сооружений, доходят до 0,3 МПа

- Летом верхний слой многолетней мерзлоты оттаивает. Лежащая ниже мерзлота мешает талой воде просачиваться вниз; вода, если не находит стока в реку или озеро, остается на месте до осени, когда снова замерзает. Весной оттаивание шло сверху вниз, как результат выравнивания температур уже прогретого воздуха и еще холодного грунта; осенью изменение температур также быстрее происходит в воздухе и промерзание идет тоже сверху вниз.
- В результате талая вода оказывается между водонепроницаемым слоем постоянной мерзлоты снизу и постепенно нарастающим сверху вниз слоем новой, сезонной мерзлоты. Лед занимает больший объем, чем вода. Вода, оказавшись между двумя слоями льда под огромным давлением, находит наиболее слабое место в сезонномерзлом слое и прорывает его. Если она изливается на поверхность, образуется ледяное поле — *наледь*.
- Если же на поверхности плотный мохово-травяной покров или слой торфа, вода может не прорвать его, а только приподнять, растекшись под ним.



1 — надмерзлотные слои; 2 — лед; 3 — трещины в подмерзлотных слоях

- Замерзнув вода образует ледяное ядро бугра; постепенно нарастая, такой бугор может достигнуть **высоты 70 м при диаметре до 200 м (рис.)**.
- Такие формы рельефа называются гидролакколитами; в России для их обозначения употребляют также якутское слово булгуннях, в Канаде и на Аляске — эскимосское пинго*.

- Jennifer Vinck
- Geology 495
- University of Regina, 2006



Pingo in the Canadian Arctic

source:

http://www.mbari.org/news/news_releases/2003/paull_images/pingo1_350.jpg

Мерзло





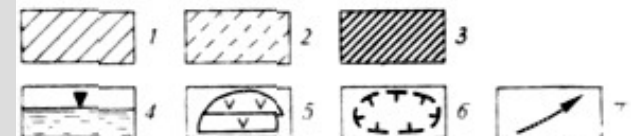
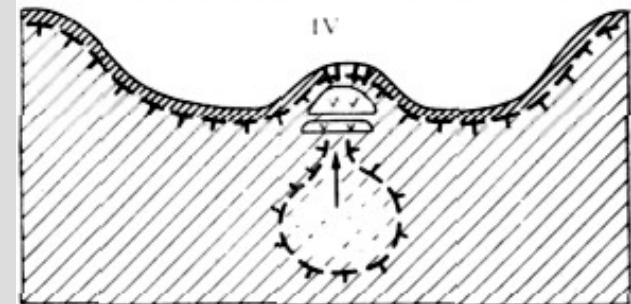
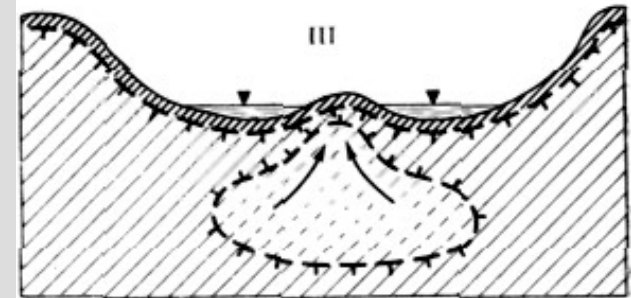
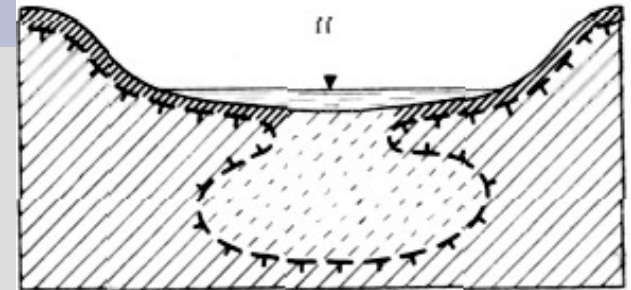
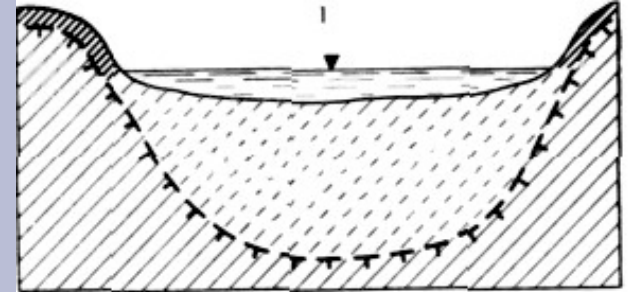
Source: <http://www.thecanadianencyclopedia.com/index.cfm?PgNm=TCE&Params=A1SEC826257>

Мерзотоведение
ГИГЭ ИГНД ТПУ

Схема образования булгунняхов:

- 1 — несквозной талик под озером;
- II — промерзание несквозного талика при уменьшении размеров озера;
- III — образование замкнутого промерзающего внутримерзлотного талика и начальный этап роста булгунняхов;
- IV — зрелая стадия роста булгунняхов:

- 1 — ММП;
- 2 — талая водонасыщенная порода;
- 3 — СТС;
- 4 — уровень воды в озере;
- 5 — инъекционный лед;
- 6 — граница ММП,
- 7 — направление движения вод под действием гидростатического криогенного давления





Многолетнемерзлый слой



Сезонномерзлый слой



Межмерзлотная вода



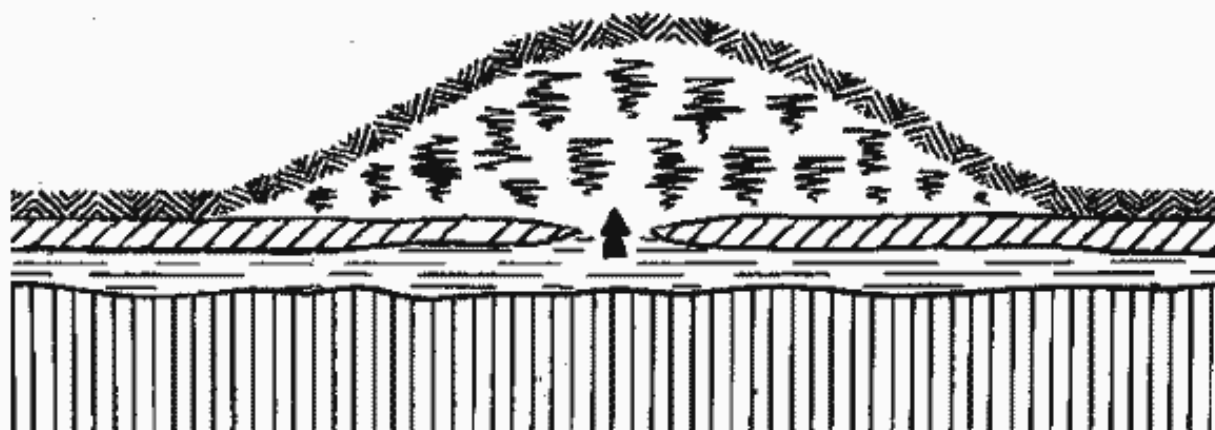
Прорыв сезонномерзлого слоя



Вода, прорвавшая сезонномерзлый слой и создающая при замерзании ядро гидролакколита



Мохово-травяной или торфяной покров



- Если бугры пучения образовались в пределах торфянистой тундры, то их обычно называют *торфяными буграми*; торф — хороший теплоизолятор, мерзлота под ним сохраняется долго и нередко в тех местах, которые считаются свободными от многолетней мерзлоты, например на Кольском полуострове.
- Высота торфяных бугров может достигать 3—7 м, в плане они обычно округлы, располагаются иногда поодиночке, но чаще группами.



- Фотографии предоставлены
- **Алексеем Шиканковым**
- группа 2А22 (2007 г.)







Мерзотоведение
ГИГЭ ИГНД ТПУ



- Бугры пучения, одно из проявлений термокарста. Коричневые пятна - торф, перемешанный с водой.

Схема выпучивания глыб и щебня

- Сходным образом происходит выпучивание (вымораживание) камней в СТС и СМС.

Дополнительным эффектом при этом является образование камнями линз сегрегационного льда, как бы выталкивающих их наверх.

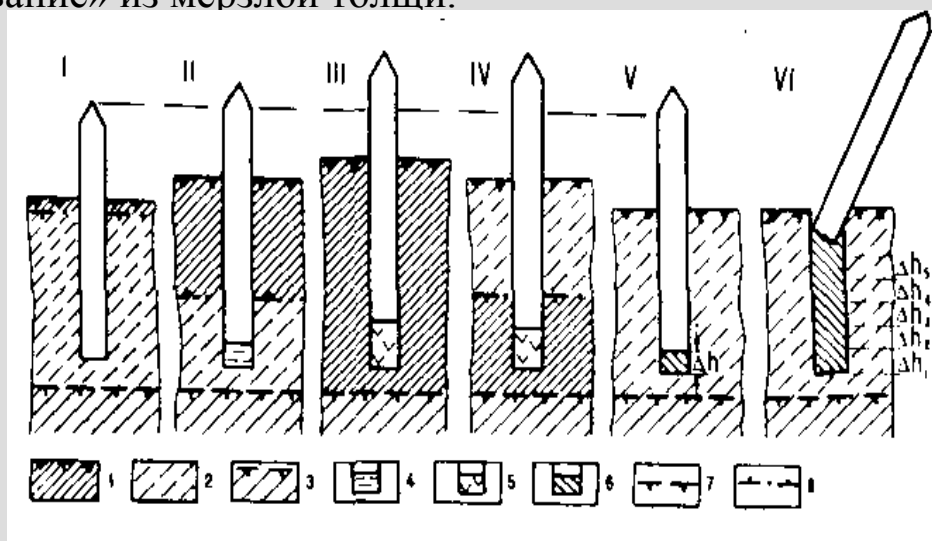
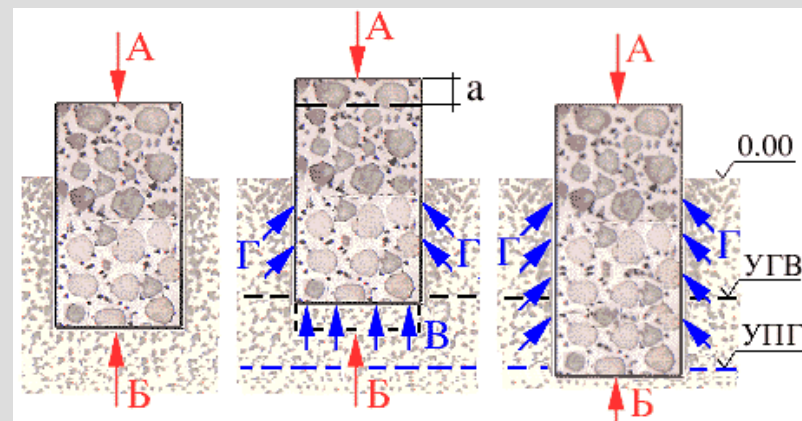
- Связано это с тем, что за счет большей теплопроводности камней и малых потерь тепла на фазовые превращения воды нулевые температуры под камнями формируются быстрее, чем в окружающих грунтах, и под ними создаются участки с интенсивным льдовыделением.



- 1 — глыбы и щебень; 2 — разборная скала с трещинами, заполненными льдом; 3 — супесчано-суглинистый материал; 4 — ледяные включения в многолетнемерзлых породах; 5 — направление движения обломочного материала при выпучивании; 6 — граница ММП;
- а — выпучивание и концентрация камней на поверхности,
- б — выпучивание и дробление каменного материала при наличии неглубоких диагенетических и морозобойных трещин и образование структурных форм

- Если столб заглублен в мерзлую толщу, его выпучиванию дополнительно **противодействуют силы смерзания с многолетнемерзлой породой.**

- Если эти силы и вес столба превышают силы пучения, то столб сохраняет устойчивость, не выпучивается.
- В противном случае происходит его «выдергивание» из мерзлой толщи.



ТИГЭ ИГНД ТПУ



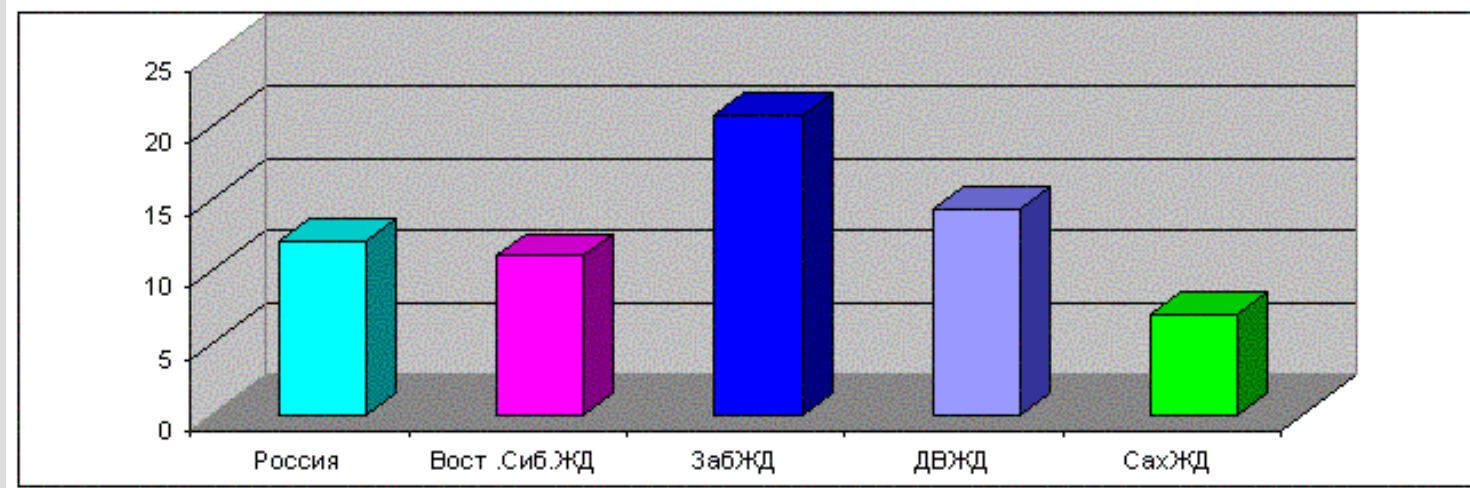
- Совместное действие процессов выпучивания камней, морозобойного и диагенетического растрескивания приводит к образованию так называемых структурных форм: «сортированных» полигонов, «каменных венков», пятен-медальонов с валиками из щебня и др.

Мерзотоведение
ГИГЭ ИГНД ТПУ



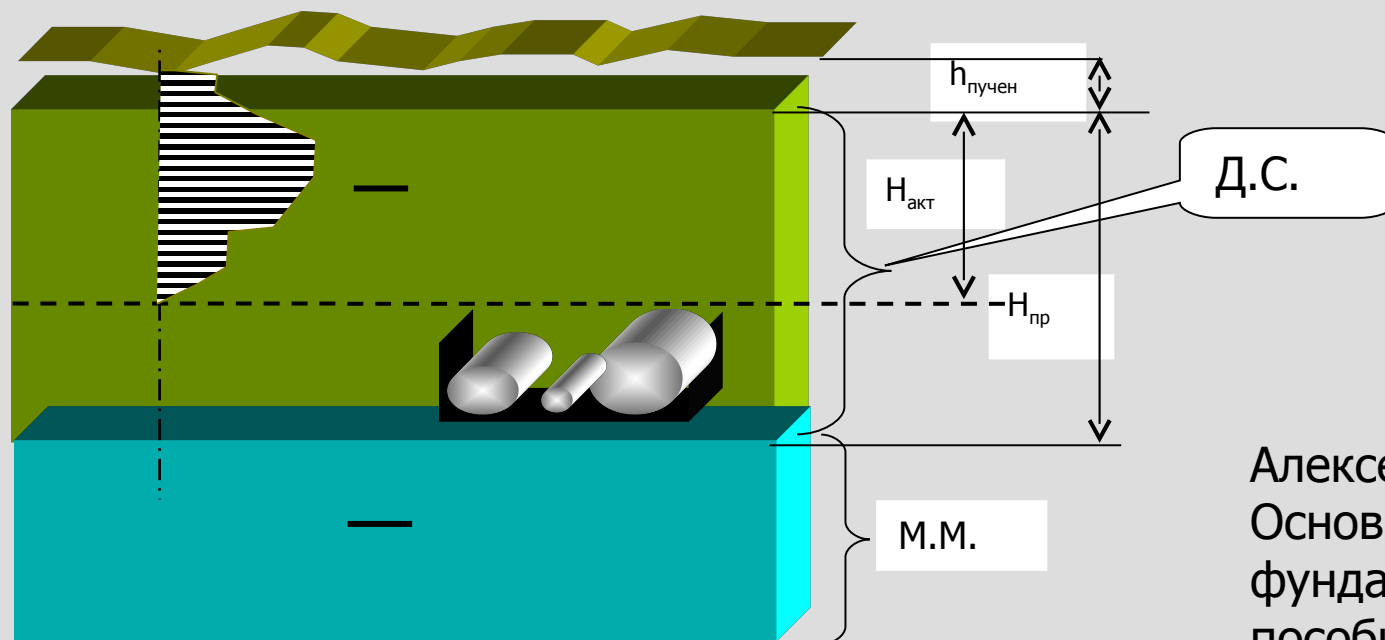
- Каменные кольца на Шпицбергене
- По В.Г. Бондарчуку

- **Пучение грунтов при промерзании**, это очень важная проблема с разрешением которой, строители очень часто встречаются не только в районах М.М. грунта, но и в районах глубокого сезонного промерзания.
- Впервые с этим вопросом строители встретились при строительстве ж/д на севере России. По статистическим данным Департамента путей и сооружений МПС РФ, в течение последних 30 лет протяженность деформирующихся и дефектных мест земляного полотна на сети железных дорог России остается на уровне 10–14% (рис.).



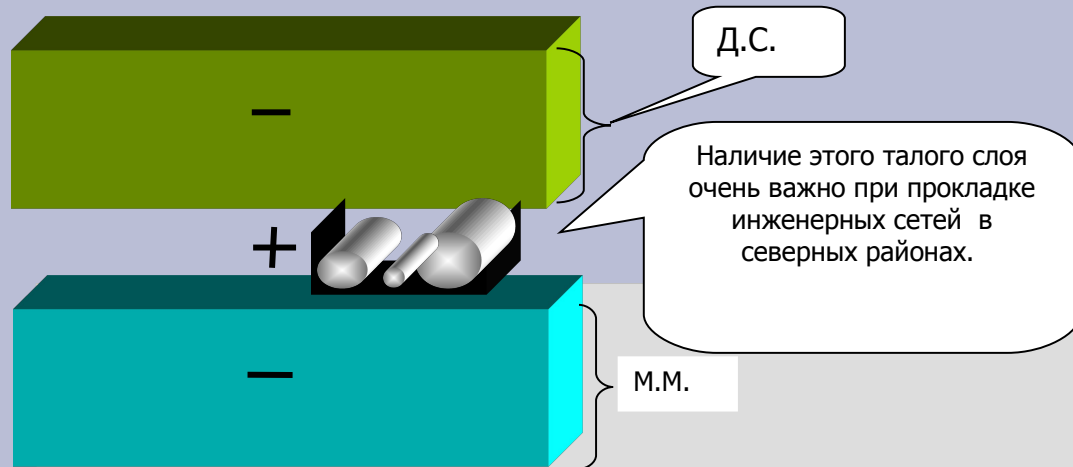
- Деформации земляного полотна железных дорог России от сил морозного пучения (% к общей длине дороги): 1 – в целом по МПС РФ; 2 – Восточно-Сибирская ж/д; 3 – Забайкальская ж/д; 4 – Дальневосточная ж/д; 5 – Сахалинская ж/д

- При сливающемся деятельном слое, пучение глинистых грунтов, вследствие миграции влаги, приводит к обезвоживанию нижележащего слоя:
- $H_{\text{акт}} \approx 2/3 H_{\text{пр}}$.
- Это имеет большое значение, поскольку позволяет размещать инженерные сети в обезвоженном – не пучинистом слое, без опасения их деформаций.



Мерзлотоведение
ГИГЭ ИГНД ТПУ

Алексеев С. И.
Основания и
фундаменты: учебное
пособие для студентов
вузов



Алексеев С. И.
Основания и
фундаменты:
учебное пособие
для студентов вузов

Промерзание деятельного слоя может происходить не на всю глубину, в этом случае говорят о несливающейся мерзлоте.

Наличие этого талого слоя очень важно при прокладке инженерных сетей в северных районах.

В процессе промерзания и оттаивания происходит деформация грунта, которая достигает 20-30% и более. От чего это происходит? Ведь вода при замерзании увеличивается всего на $\approx 9\%$. Объясняется это миграцией в глинистых грунтах не только свободной, но и связанной воды, замерзающей при более низких температурах. Это явление приводит к пучению грунтов.

Источники:

- Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Недра, 1990, 2002г. – 450с.
- Алексеев С. И. Основания и фундаменты: учебное пособие для студентов вузов / С. И. Алексеев. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. – 111 с.
- Материалы ОАО «Томскгеомониторинг»
- http://www.mbari.org/news/news_releases/2003/paull_images/pingo