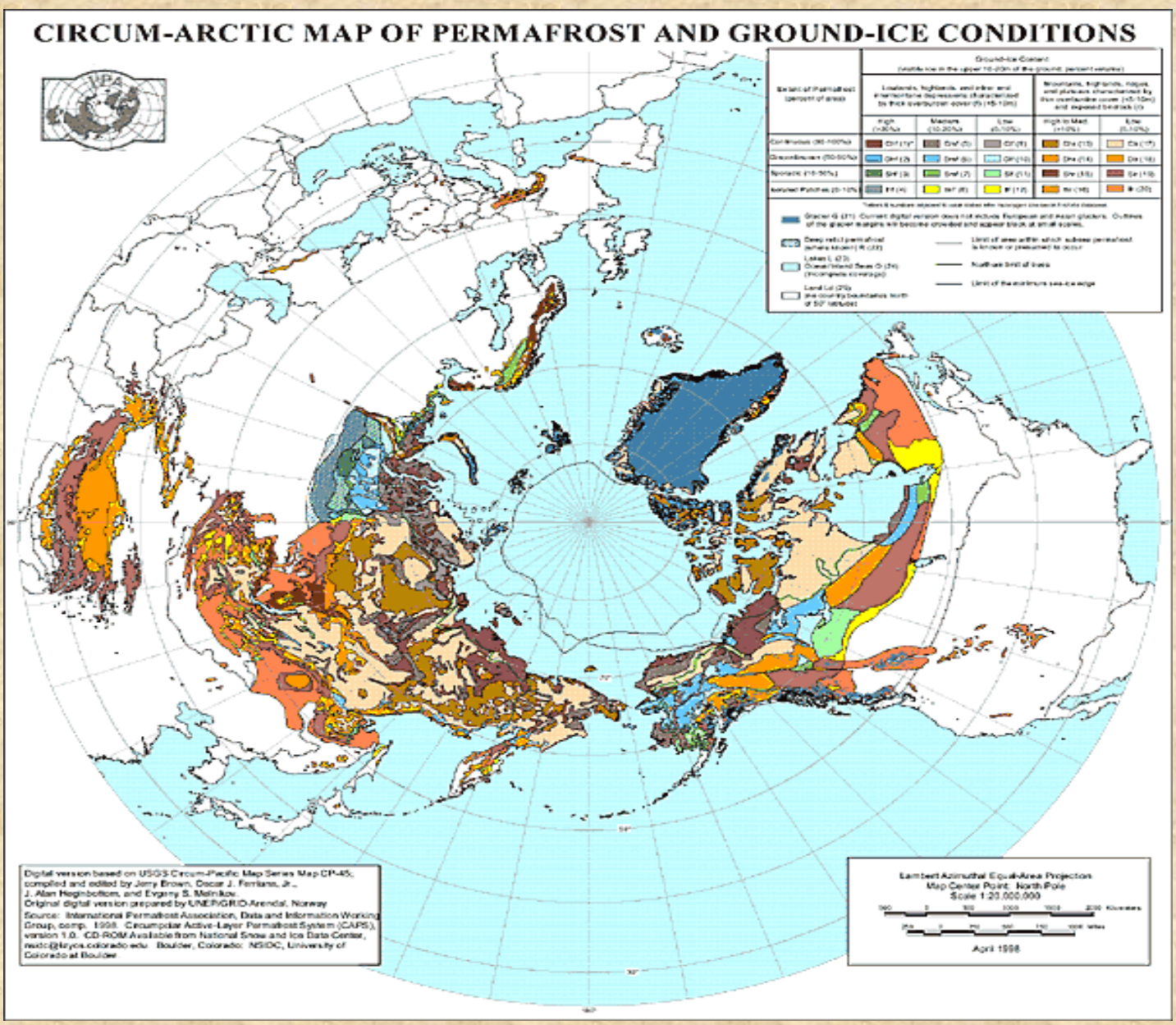
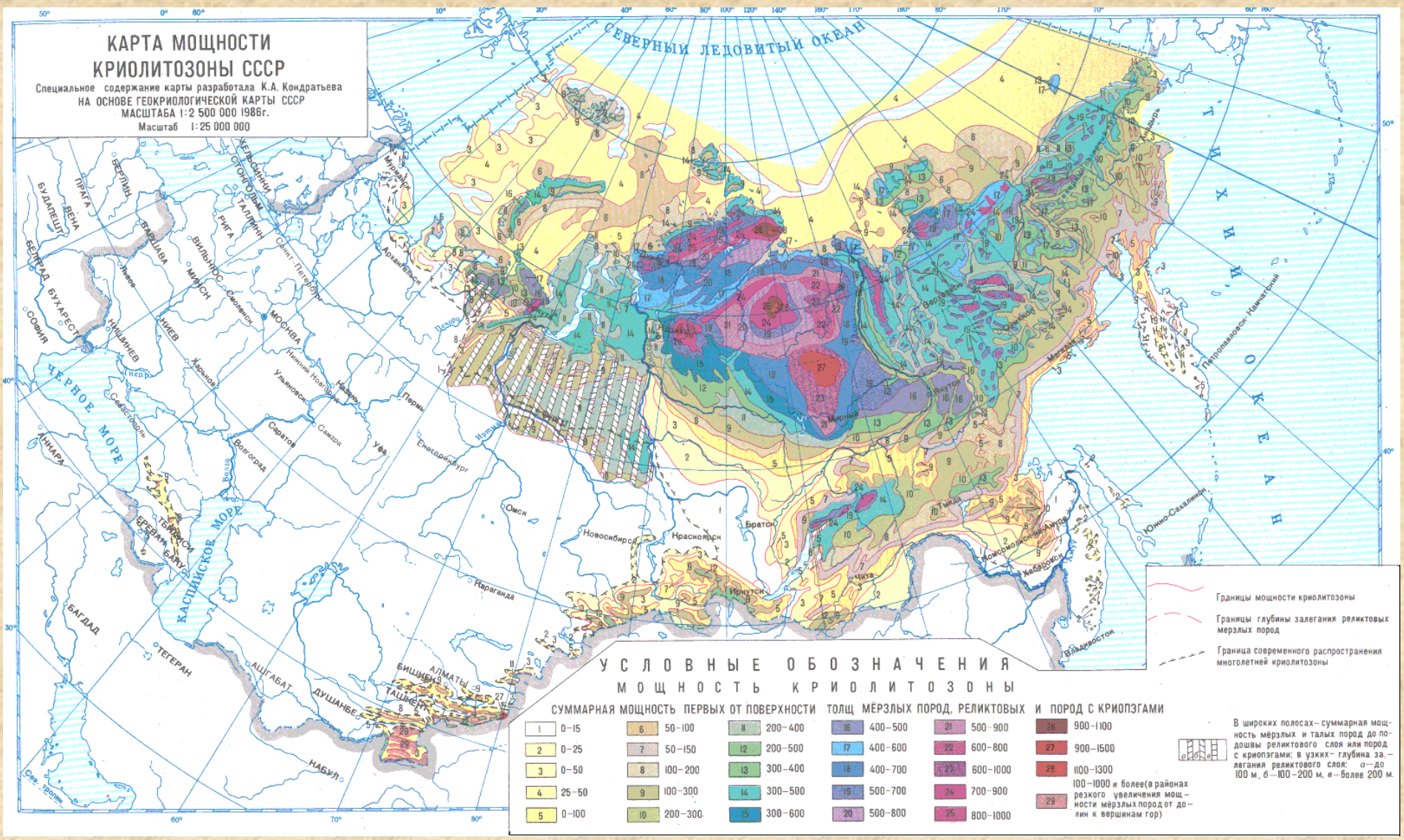
Геологические процессы в мерзлой зоне литосферы

Основные понятия и термины

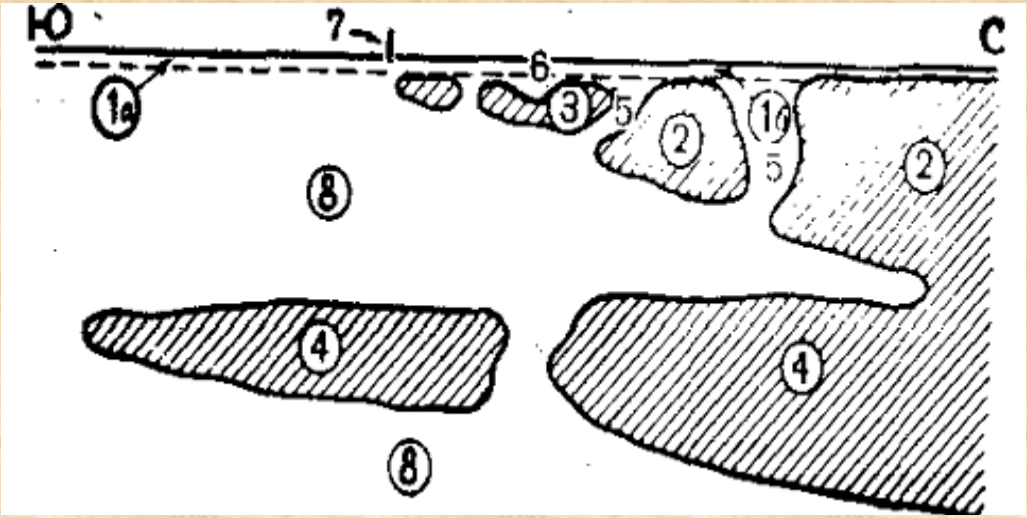
- Криолитозона – верхняя часть земной коры с отрицательными среднегодовыми температурами
- Мерзлые породы – находятся при отрицательных температурах и содержат в своем составе лед
- Морозные породы – находятся при отрицательных температурах и не содержат льда и воды («сухие»)
- Охлажденные породы не содержат льда, находятся при отрицательных температурах, содержат связанные или соленые воды (криопэги)



Криолитозона Северного полушария

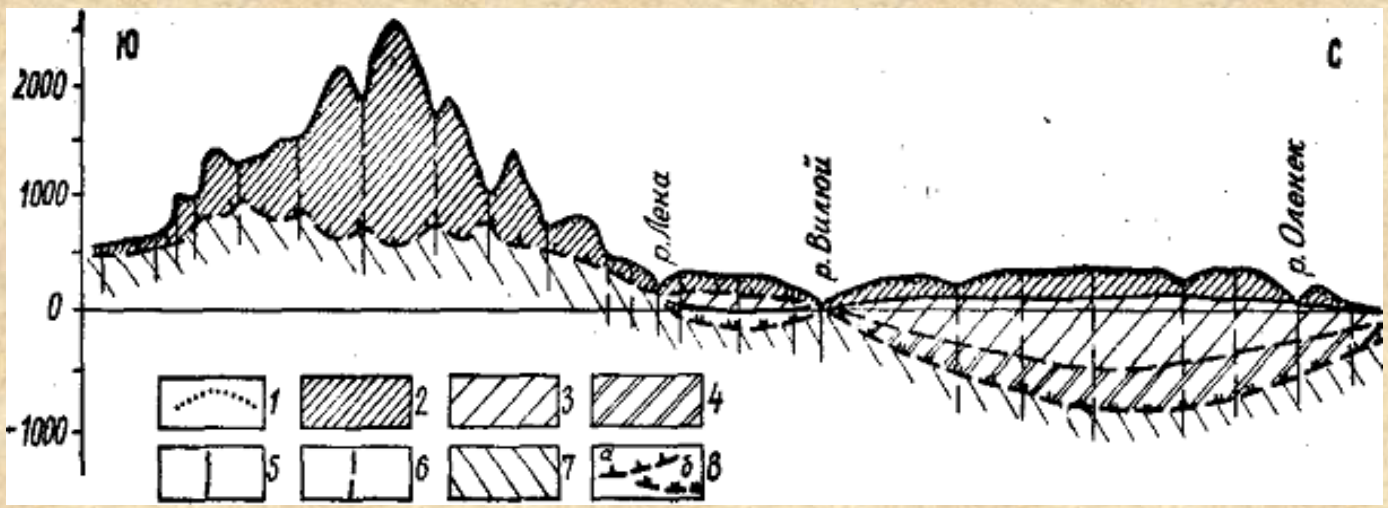


Криолитозона России



Западная Сибирь

Схема вертикального разреза мерзлых толщ при движении с юга на север: 1 —слой сезонного промерзания (а) и оттаивания (б); *2* — современные сливающиеся мерзлые толщи; *3* — современные несливающиеся мерзлые толщи; *4* — древние сливающиеся и несливающиеся мерзлые толщи; 5 — сквозные талики; *6* — несквозные или «ложные» талики; *7* — современная южная граница мерзлых пород; *8* — талые и немерзлые породы.

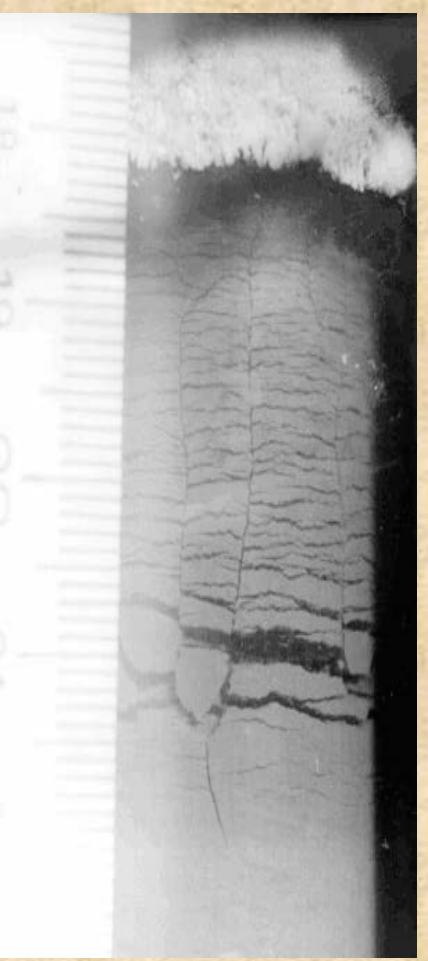


Средняя Сибирь

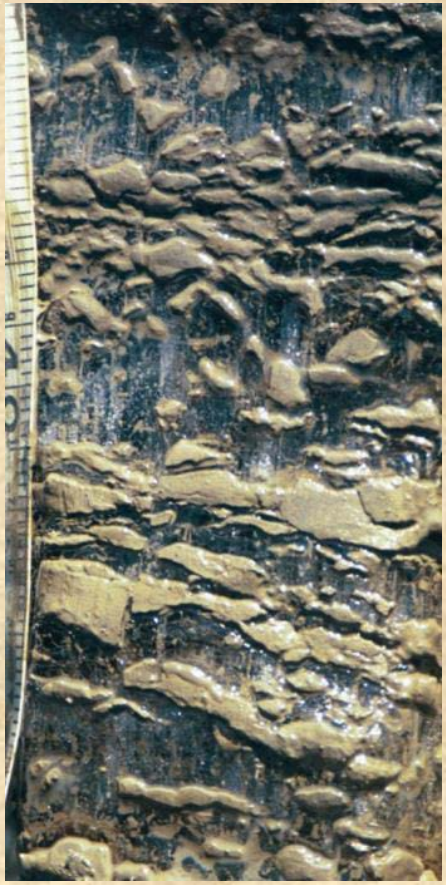
Схематический меридиональный разрез криолитозоны: *1* — слой СТС; *2*—современные и древние сливающиеся ММТ; *3*—толщи пород с криопэгами и льдом; *4*—то же, без льда; 5—сквозные талики по тектоническим нарушениям и под крупными водотоками и озерами; *6*—несквозные талики; 7 — талые породы; *8* — нулевая геоизотерма подошвы ММТ (а) и пород с криопэгами (б)

Типы подземных льдов

- Конституционные
- Повторно-жильные
- Инъекционные
- Погребенные
- Пещерные



Конституционный лед – лед-цемент в порах породы и видимые глазом ледяные шлиры



Ледяные шлиры в суглинке

Повторно-жильные льды формируются по морозобойным трещинам

Сингенетические ледяные жилы

Эпигенетические ледяные жилы

Инъекционные льды формируются при внедрении в толщу пород подземных вод под действием гидростатического или гидродинамического напора

Ледяное ядро инъекционного бугра пучения

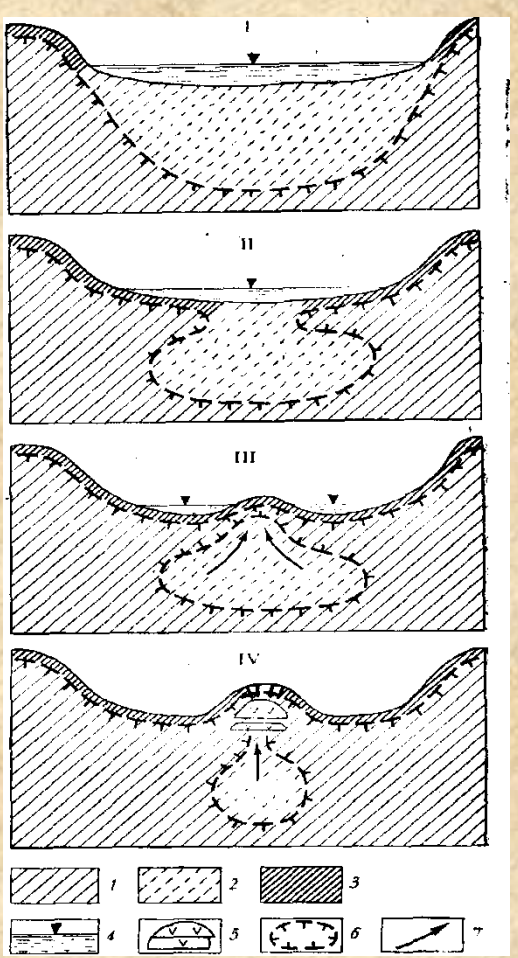


Схема образования булгунняхов: I — несквозной талик под озером; II — промерзание несквозного талика при уменьшении размеров озера; III—образование замкнутого промерзающего внутримерзлотного талика и начальный этап роста булгунняха; IV—зрелая стадия роста булгунняха: 1—ММП; *2—талая* водонасыщенная порода; *3*— СТС; *4* — уровень воды в озере; 5 — инъекционный лед; *6* — граница ММП; 7—направление движения вод под действием гидростатического криогенного давления

Погребенные
льды – это поверхностные льды любого генезиса, перекрытые слоем осадков и не отттаивающие летом

Погребенные глетчерные льды с обломками пород

Пещерные льды образуются из водяных паров на стенах подземных полостей

Кунгурская ледяная пещера

Подземные воды криолитозоны

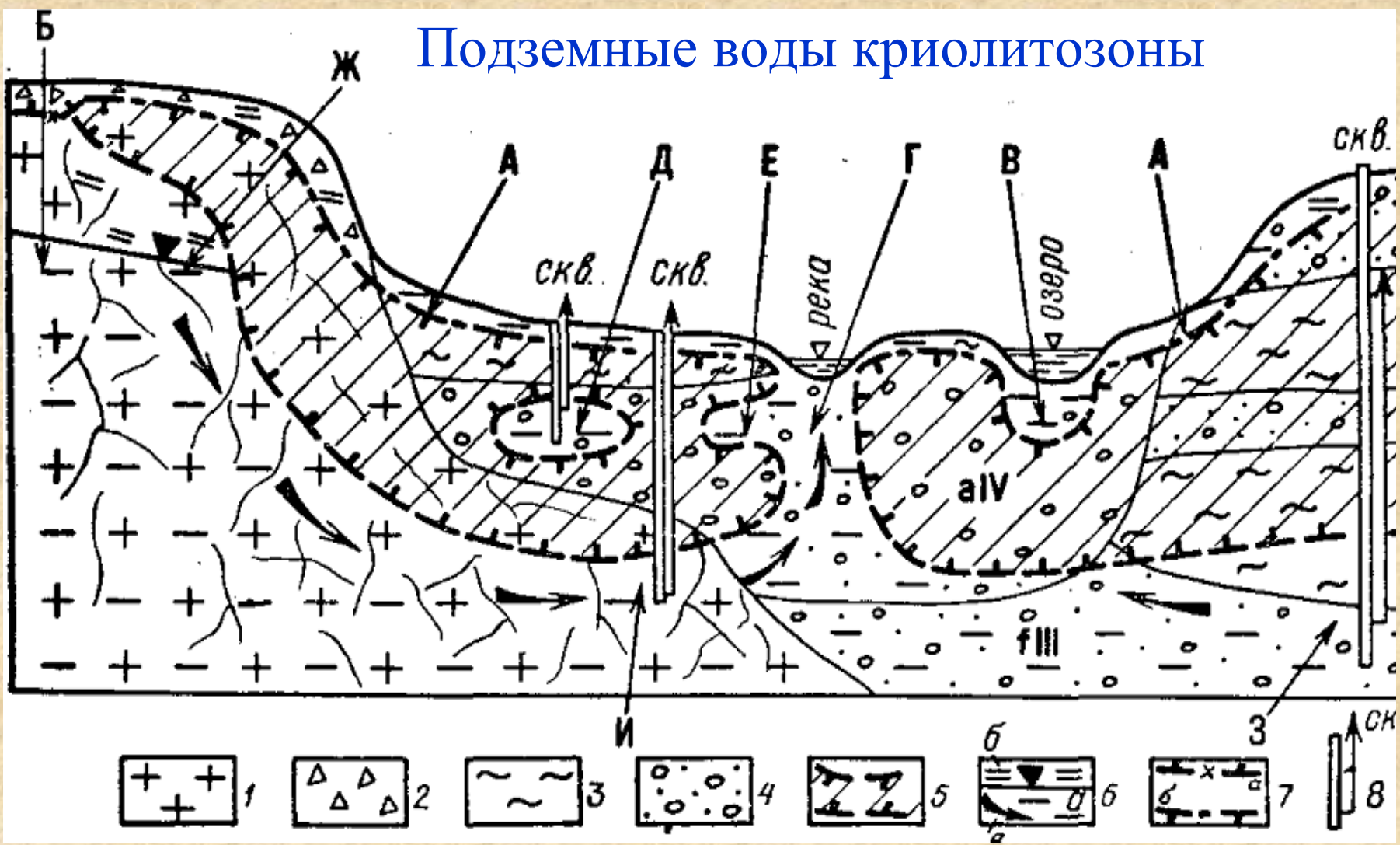
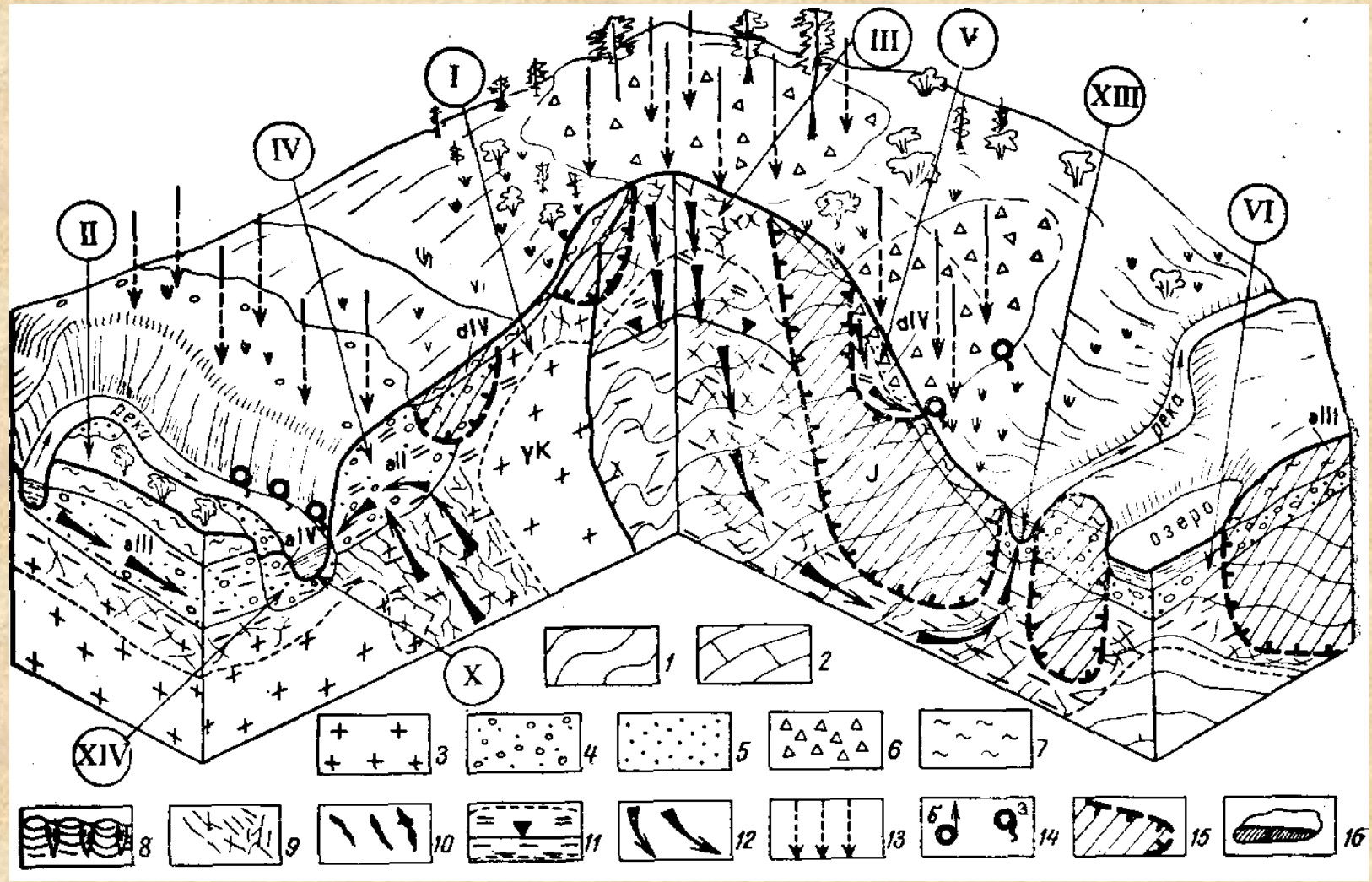
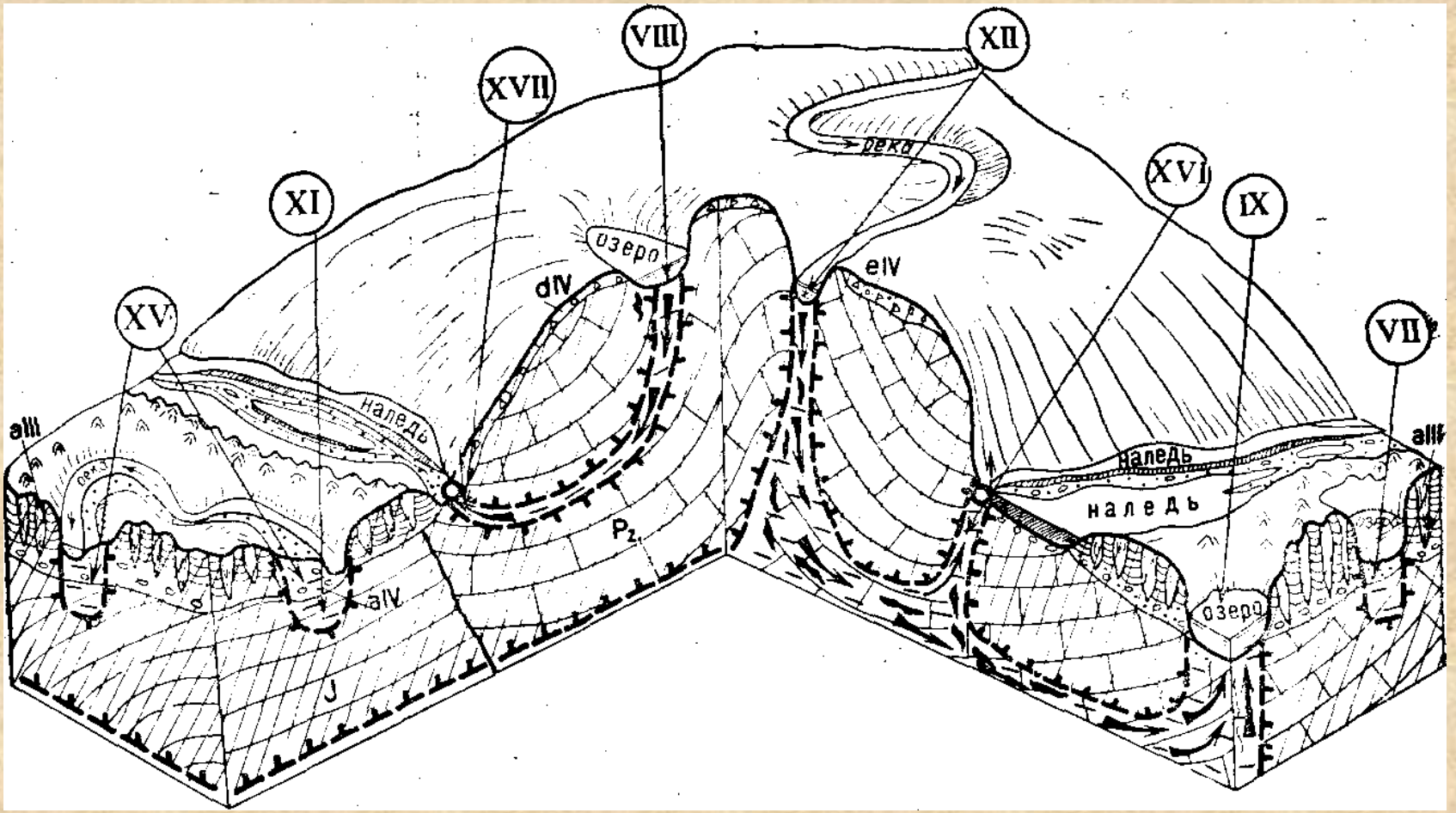


Схема различных категорий подземных вод по отношению к. ММП: А — надмерзлотные воды СТС; Б — воды сквозного дождевально-радиационного талика; В — надмерзлотные воды подозерного несквозного талика; Г — воды сквозного подруслового талика; Д — внутримерзлотные воды; Е — межмерзлотные воды; Ж — подмерзлотные воды неконтактирующие безнапорные; З — подмерзлотные воды неконтактирующие напорные; И — подмерзлотные воды контактирующие напорные; К — надмерзлотные воды несквозного дождевально-радиационного талика; / — изверженные трещиноватые породы; *2* — щебень и дресва; *3* — суглинки пылеватые; *4* — песок и галечник; *5* — многолетнемерзлые породы и их граница; *6* — обводненность пород постоянная ***(а),*** периодическая (б) и направление движения подземных вод **(в);** *7* — подошва СТС (б) и СМС (а); *8* — скважина, стрелкой показан уровень появления и установления вод

Талики



Радиационно-тепловые талики: I — радиационный безводный сквозной (1Р-Б'), II — тепловой грунтово-фильтрационный сквозной (IT-P), III — дождевально-радиационный ин-фильтрационный сквозной (1Д-И'), IV — дождевально-радиационный напорно-фильтрационный сквозной (1Д-Н'), V — дождевально-радиационный грунтово-фильтрационный несквозной (1Д-Г2). Гидрогенные талики: VI — подозерный застойный сквозной (И0-31), XIII — подрусловой напорно-фильтрационный сквозной (ПВ-Н1)



Гидрогенные талики: VII — подозерный застойный несквозной (IIO-32), VIII — подозерный инфильтрационный несквозной (110-И2), IX — подозерный напорно-фильтрационный сквозной (IIO-Н"), X — подрусловой грунтово-фильтрационный сквозной (ИВ-Г1), XI — подрусловой грунтово-фильтрационный несквозной (ПВ-Г2), XII — подрусловой инфильтрационный сквозной (ПВ-И1'), XIV — пойменный грунтово-фильтрационный сквозной (ПП-Р), XV — пойменный грунтово-фильтрационный несквозной (ПП-Г2). Гидрогеогенные талики: XVI — гидрогеогенный субаэральныи напорно-фильтрационный сквозной (IIIC-Н'), XVII — гидрогеогенный субаэральныи напорно-фильтрационный несквозной (IIIC-Н2). *1*— терригенные породы, *2* — карбонатные породы, *3* — изверженные породы, *4* — галечники, 5 — пески, *6* — щебнистые отложения, *7* — супеси и суглинки, *8* — супеси и суглинки с сингенетическими повторно-жильными льдами, *9* — зоны повышенной трещиноватости, в том числе и по разломам, *10* — карстовые пустоты, *11* — высокая обводненность пород периодическая *(а)* и постоянная *(б)* и границы обводненных зон, *12* — направление движения подземных вод, *13* .— инфильтрация атмосферных осадков, *14* — источники нисходящие (а) и восходящие (б), *15* — ММП и их граница, *16* — наледь

Систематизация экзогенных геологических процессов в криолитозоне

Группы процессов	Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	
					в отложениях	в рельефе
1. Собственно криогенные (мерзлотно-геологические), обусловленные годовыми и многолетними колебаниями теплообмена на земной поверхности	1.1 Криогенное выветривание пород	Температурные деформации пород, расклинивающее действие тонких пленок воды в породах, диспергация и коагуляция минеральных частиц в дисперсных породах	Многократные циклы сезонного промерзания и оттаивания пород, изменения напряженного состояния пород под влиянием сезонных колебаний температуры	Изменение механического состава рыхлых отложений	Криогенная автоморфная кора выветривания, лёссовидные 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 шлиры, линзовидные и пластовые залежи льда, криотурбации	Площади пучения, миграционные и инъекционные бугры пучения, каменные моря и многоугольники
	1.4. Наледеобразование	Сезонное замерзание поверхностных 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
2. Флювиальные, абразионные и водобалансовые, обусловленные тепловым и механическим взаимодействием водных масс на оттаивающие и мерзлые породы, годовыми колебаниями теплообмена поверхности, колебаниями водного баланса поверхности	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	Отсупание 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	Разрушение коренных пород, выпахивание ледниковых долин, озер	Водно-ледниковые и ледниковые отложения	Купола, вершинные, долинные, склоновые ледники, озы, камы, эрратические валуны

Группы процессов	Виды процессов	Механизм процессов	Причины развития процессов	Сопутствующие процессы	Основные формы проявления процессов	
					в отложениях	в рельефе
3. Гравитационные, обусловленные гравитацией, поверхностным и внутригрунтовым стоком вод, годовыми колебаниями теплообмена поверхности	3.1. Курумообразование	Скопление и перемещение грубообломочного материала по склону крутизной меньше угла естественного откоса обломков	Криогенное и термогенное выпучивание обломков, криодесерпция	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
4. Эоловые, обусловленные деятельностью ветра	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

Криогенные процессы и формы рельефа

- Морозобойное растрескивание и формирование полигонально-жильных структур
- Криогенная пульсация сезонно-талого слоя
- Морозное пучение
- Термокарст
- Наледи
- Солифлюкция
- Курумы

Морозобойное растрескивание

- **Морозобойное растрескивание** - процесс механического раздробления горных пород вследствие их растрескивания под влиянием термического сжатия при охлаждении и расклинивания трещин замерзающей в них водой. Результат процесса – формирование полигонально-жильных структур и полигонального рельефа

Открытые морозобойные трещины. Якутия.

Полигональное растрескивание грунтов. Побережье Карского моря.

Повторно-жильные льды

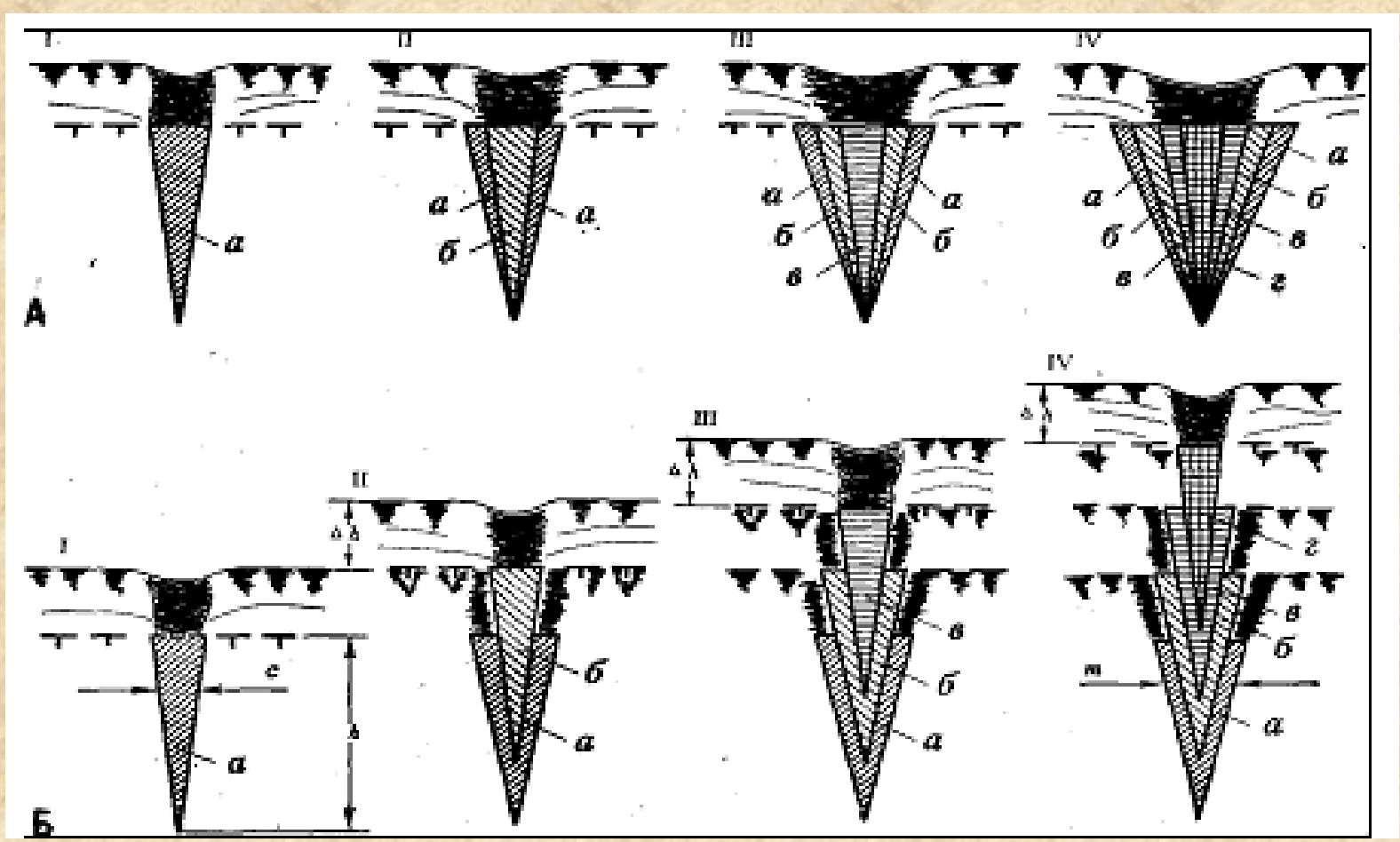
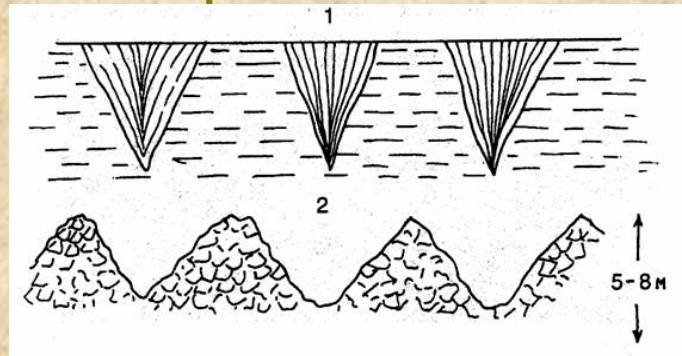


Схема эпигенетического (А) и сингенетического (Б) роста повторно-жильных льдов (по Б. А. Достовалову): I—IV—последовательные стадии роста жил; *а, б, в, г*— ежегодно образующиеся элементарные ледяные жилки; Δh — мощность слоя накапливающегося за год осадка при сингенезе

Байджерахи формируются при вытаивании повторно-жильных льдов



Образование байджерахов: 1 — повторно-жильные льды, 2 — вытаивание льдов и образование байджерахов в виде земляных конусовидных холмиков

Криогенная пульсация сезонно-талого слоя

- Криогенная пульсация сезонно-талого слоя - процессы сезонного пучения и осадки пород СТС, а также выпучивания каменного материала внутри полигонов.

Результат процесса – сортировка материала и формирование мелко-полигональных форм рельефа.

Выпучивание каменного материала

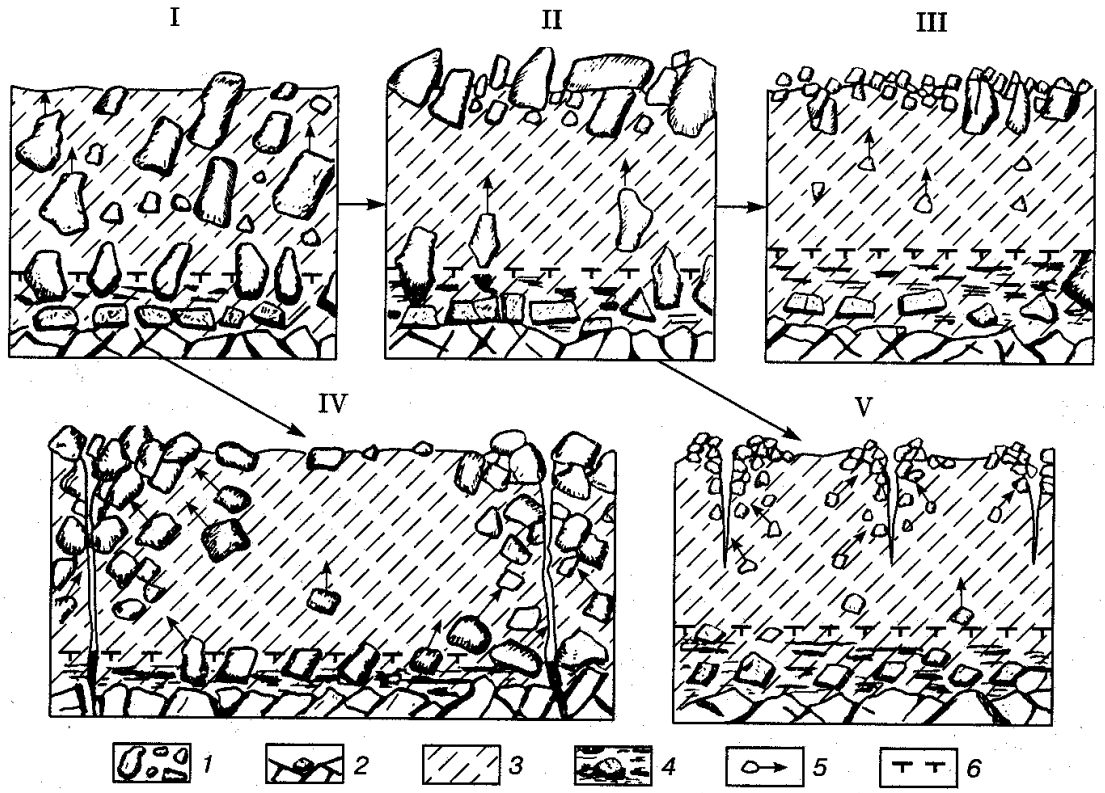


Схема выпучивания глыб и щебня в элювиальных образованиях.

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 многолетнемерзлых пород. I — начальное распределение обломочного материала в элювии, II — выпучивание камней и концентрация их на поверхности, III — дробление обломочного материала в приповерхностном слое за счет выветривания, IV — выпучивание каменного материала при наличии морозобойных трещин и образование сортированных полигонов, V — выпучивание и дробление каменного материала при наличии неглубоких диагенетических и морозобойных трещин и образование структурных форм.

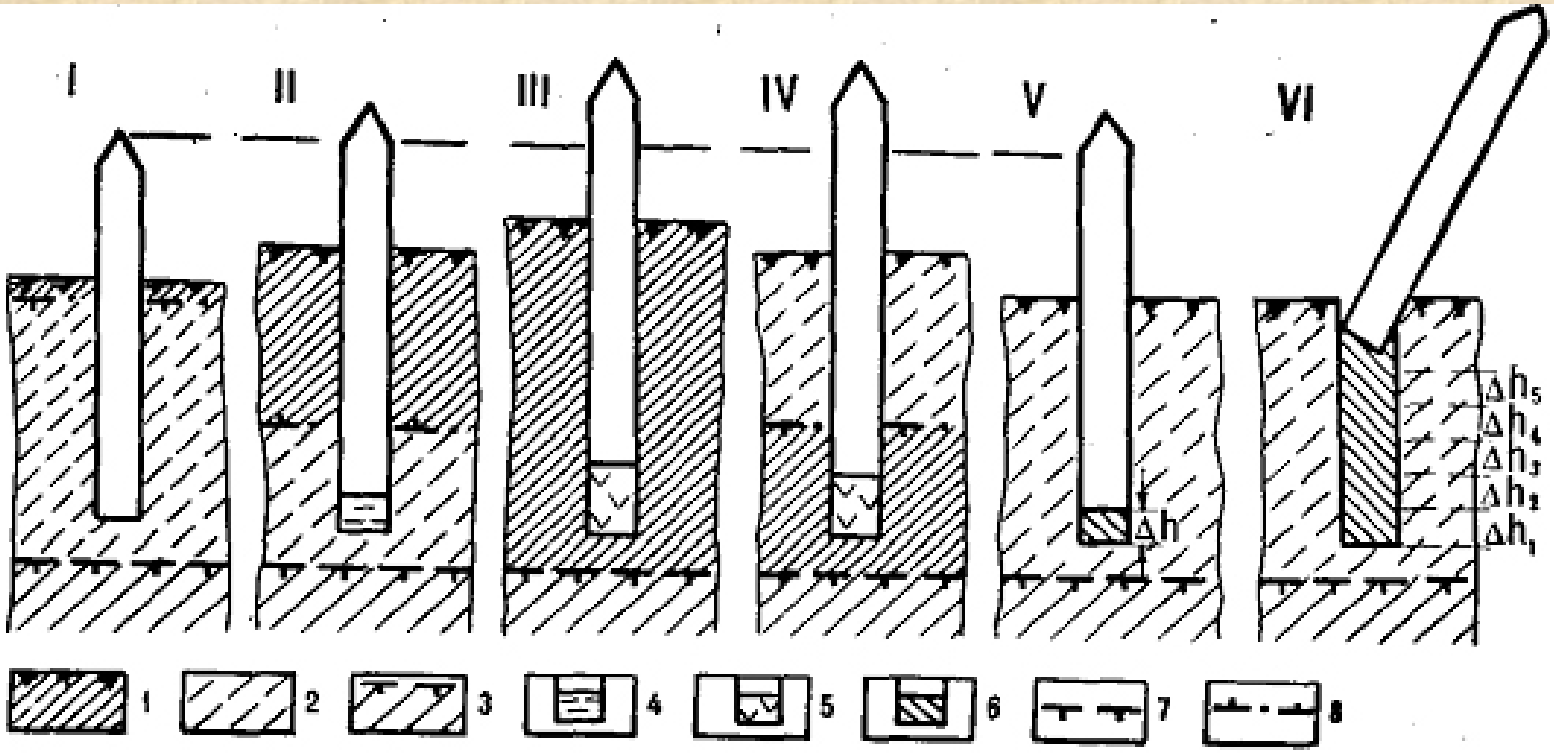


Схема выпучивания (вымораживания) столба из сезонноталого слоя, сложенного влажными дисперсными отложениями: *1* — промерзшая часть СТС; *2*—талая часть СТС; *3*—ММП; *4*— вода или разжиженный грунт в полости; *5* — лед или сильнольдистый грунт в полости; *6* — талый грунт, заполняющий полость; *7* — граница ММП; *8* — граница промерзших пород СТС. I—VI — стадии выпучивания столба в годовом цикле

Сортированные каменные полигоны.Памир

Формирование глинистых пятен-медальонов

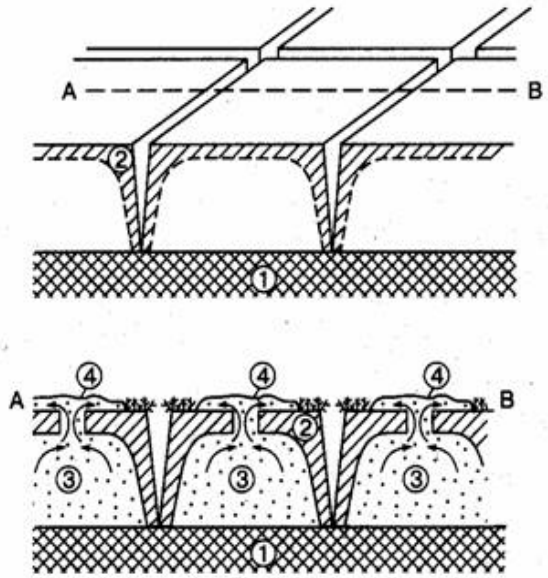


Схема образования глинистых пятен (внизу разрез по линии АВ).

1 — многолетнемерзлая толща, 2 — замерзшая часть грунта, образующая оболочку закрытой системы, 3 — талый, влажный тиксотропный грунт, 4 — выдавливаемая через разрыв на поверхность часть грунта, образующая глинистое пятно.

Пятна-медальоны на водораздельной поверхности. Анабар.

Морозное пучение

- Морозное пучение - увеличение объёма тонкодисперсных пород вследствие кристаллизации в них воды (образующей ледяные прослойки, линзы и т. д.). Результат процесса – формирование бугров пучения

Миграционные бугры пучения

Причина – миграция влаги из талых пород к фронту промерзания и формирование ледяных шлиров. Миграционные бугры пучения чаще всего возникают на торфяниках

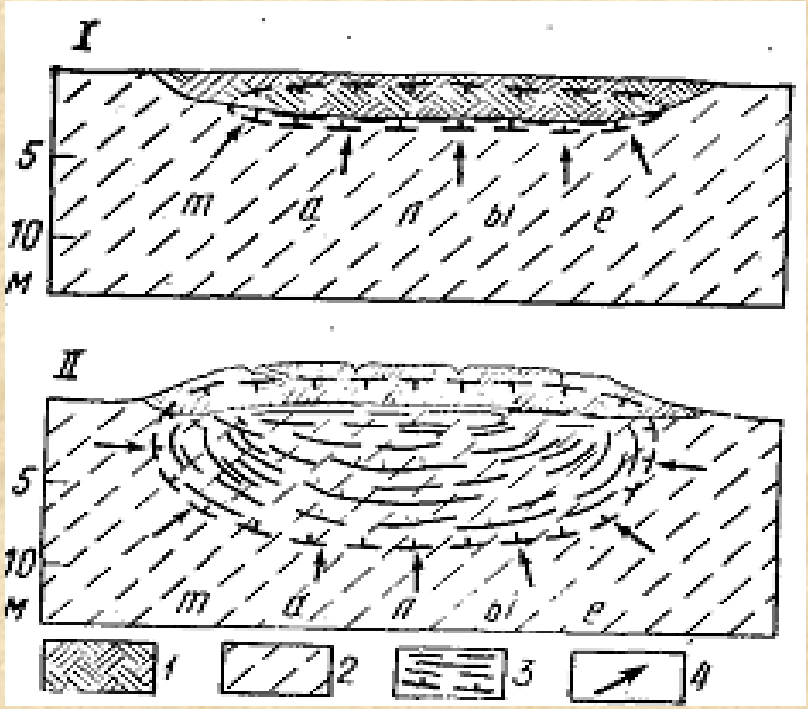


Схема образования многолетнего миграционного бугра пучения под торфяником, начальная (I) и зрелая (II) стадии: *1*—торф; *2*— пылеватый суглинок; *3* — шлиры сегрегационного льда и граница ММП; *4*— направление миграционной влаги

Инъекционные бугры пучения (булгунняхи)

Образуются в процессе промерзания несквозных таликов (подозерных и др.) в результате создания криогенного напора, выжимающего воду вверх, где она замерзает. Процесс происходит много лет, пока не израсходуется вся вода в системе. Размеры инъекционных бугров пучения – высота – до 30-60 м, диаметр – до 200 м

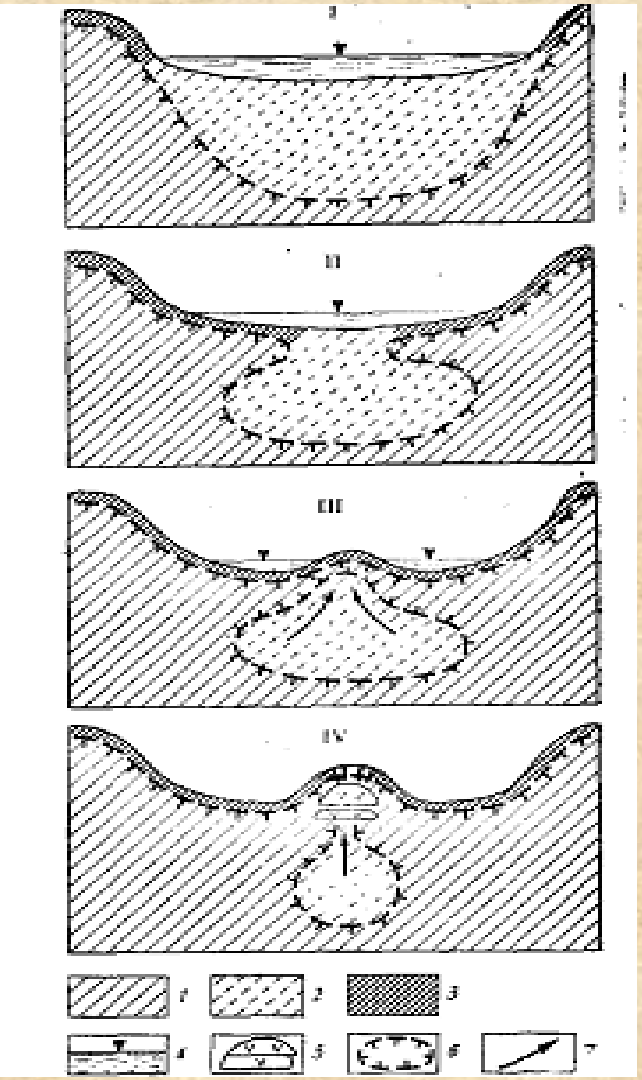


Схема образования булгунняхов: I — несквозной талик под озером; II — промерзание несквозного талика при уменьшении размеров озера; III—образование замкнутого промерзающего внутримерзлотного талика и начальный этап роста булгунняха; IV—зрелая стадия роста булгунняха: /—ММП; *2—талая* водонасыщенная порода; *3*— СТС; *4* — уровень воды в озере; 5 — инъекционный лед; *6* — граница ММП; 7—направление движения вод под действием гидростатического криогенного давления

Инъекционные бугры пучения (булгунняхи)

This pingo is located in the Blackstone Valley west of the Demspter Highway (photo: Catherine Kennedy)

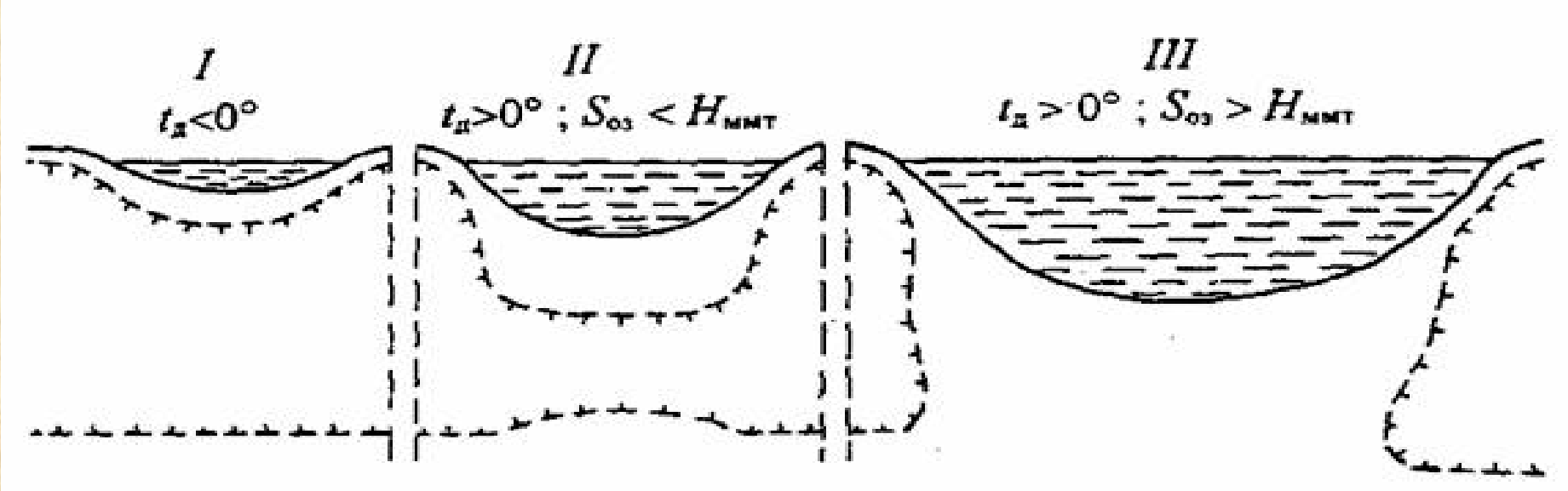
Гидролакколиты

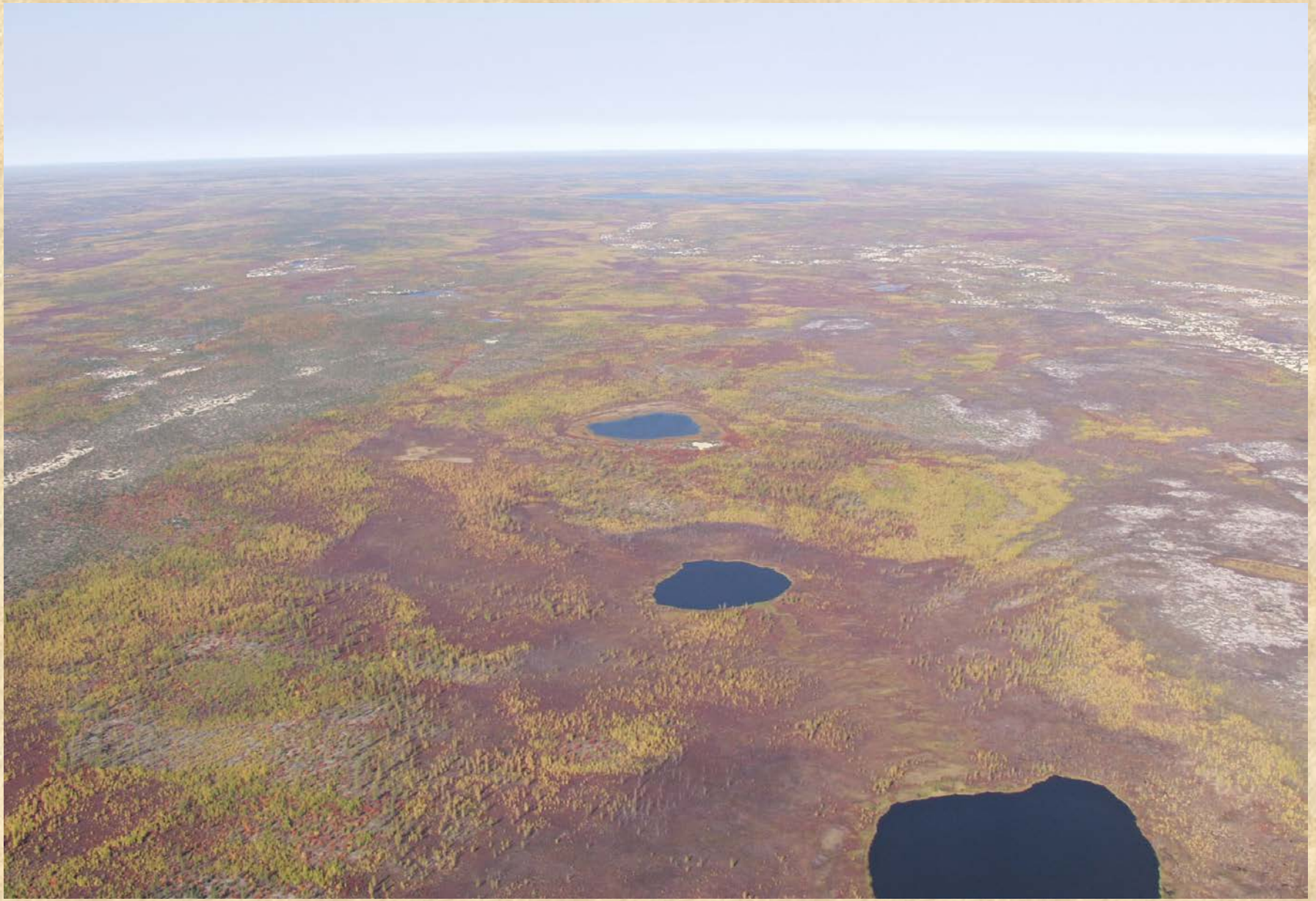
Формируются в результате внедрения в породы СТС напорных над- и подмерзлотных вод в местах их разгрузки

Термокарст

Термокарст – процесс протаивания подземных льдов или сильнольдистых грунтов, сопровождающийся их усадкой и образованием отрицательных форм рельефа. Причины – увеличение глубины сезонного оттаивания в связи с колебаниями климата, а также с техногенным воздействием.

Стадии развития термокарста





Термокарстовые озера Лено-Анабарского междуречья

Термокарстовые озера приморских равнин Европейского Севера. Архангельская область

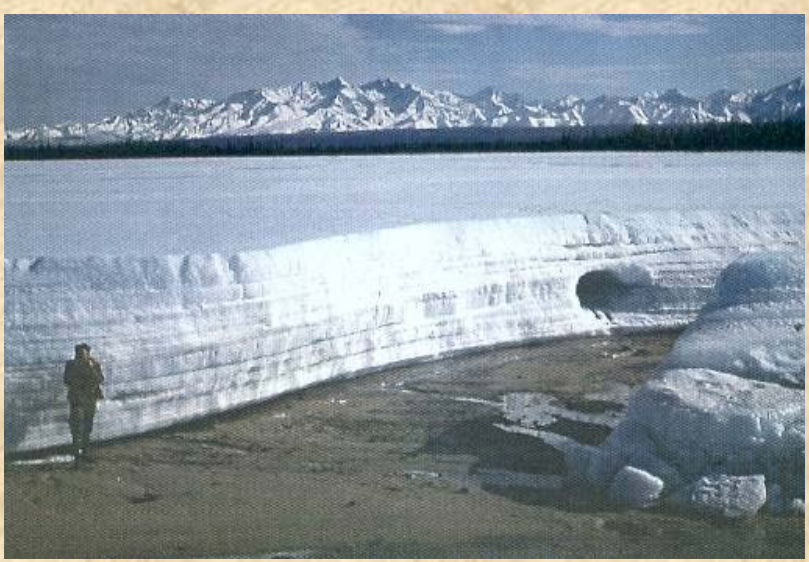
Развитие термокарста по полигонам. Архангельская область.

Техногенная активизация термокарста в горнодобывающих районах. Якутия, Айхал

Наледи

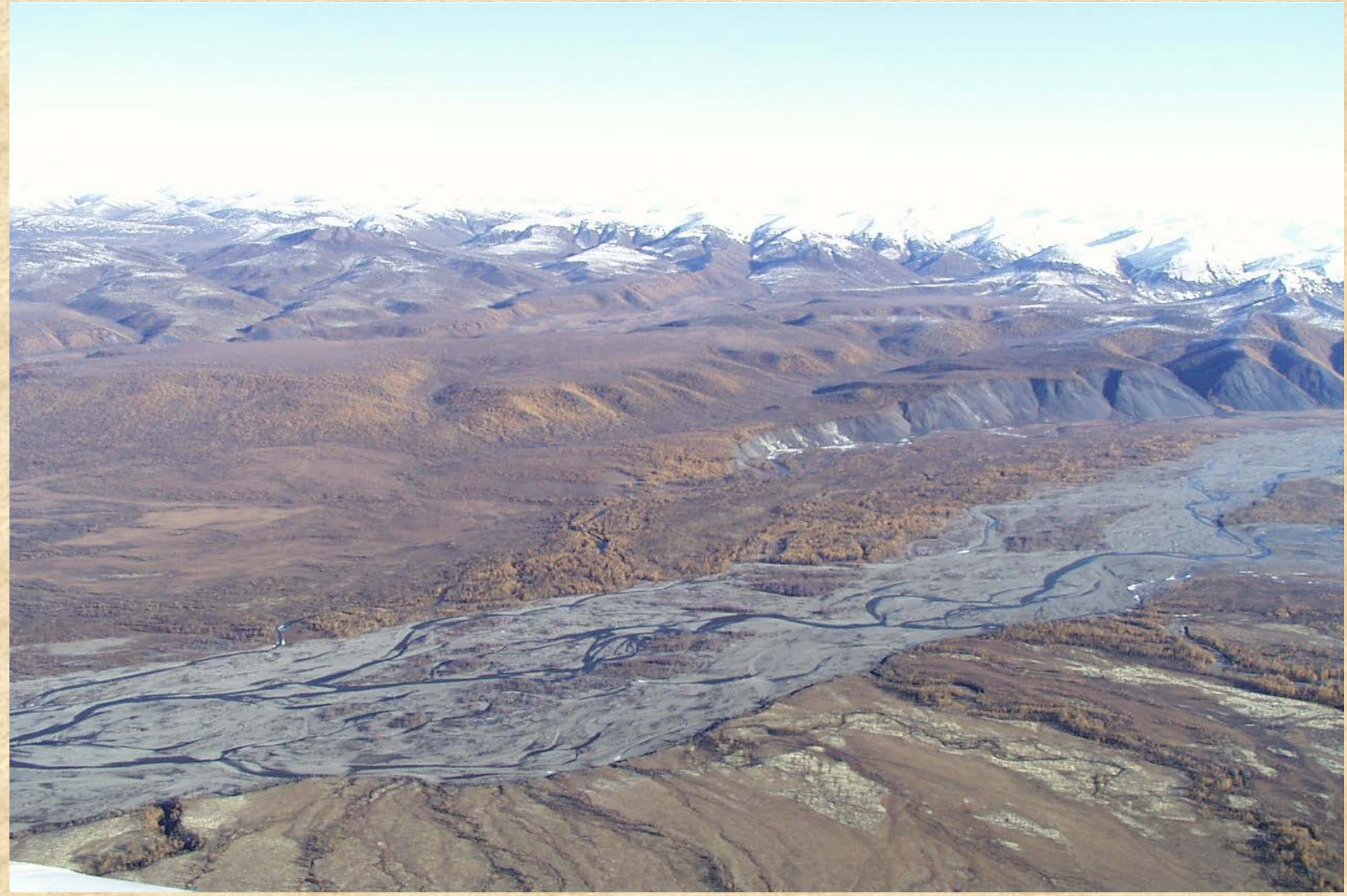
Наледи – это ледяные тела плоско-выпуклой формы, образующиеся в результате излияния на поверхность подземных или поверхностных вод и их послойного замерзания зимой.

Причина – сужение живого сечения потоков, создание гидродинамического или гидростатического напора при промерзании русел рек и водоносных горизонтов



Горизонтальная слоистость наледного льда

Наледные поляны



Наледный аллювий

Наледный бугор, служащий местом разгрузки грунтово-фильтрационного талика и наращивания наледи (Геокриол. опасности, 2000)

Техногенная наледь – следствие протаивания мерзлых пород под зданиями и разгрузки напорных вод внутрь строений (Геокриол. опасности, 2000)

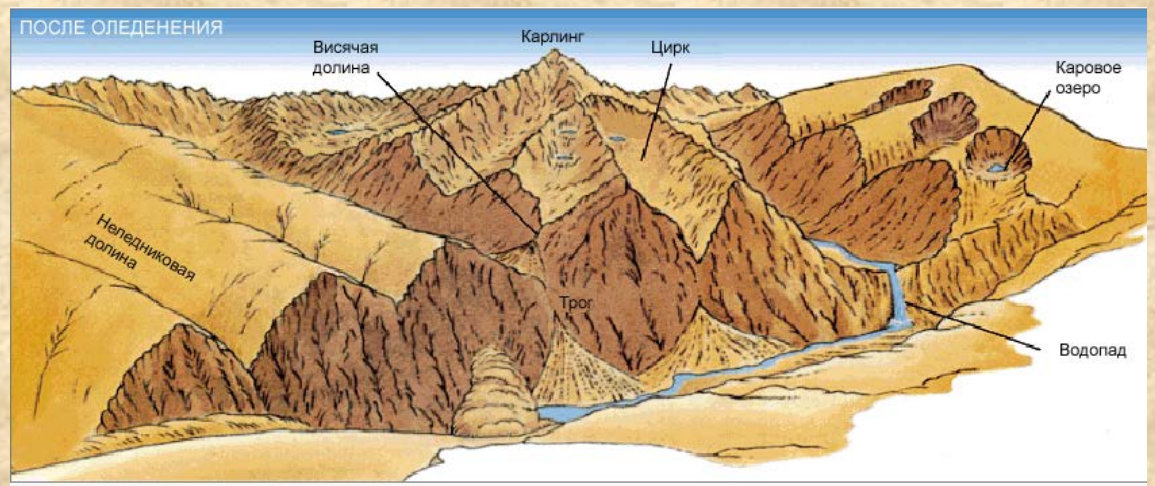
Геологическая деятельность наледей

Белые налеты солей на деревьях, показывающие былую мощность наледи

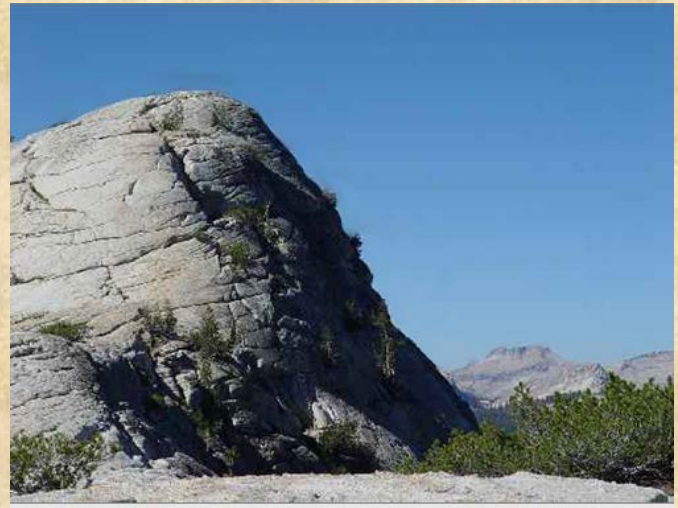
Обширные наледные поляны в долине реки

Ледники, снежники

Заросшая троговая долина, Восточные Саяны



Элементы ледникового рельефа



Гигантский бараний лоб

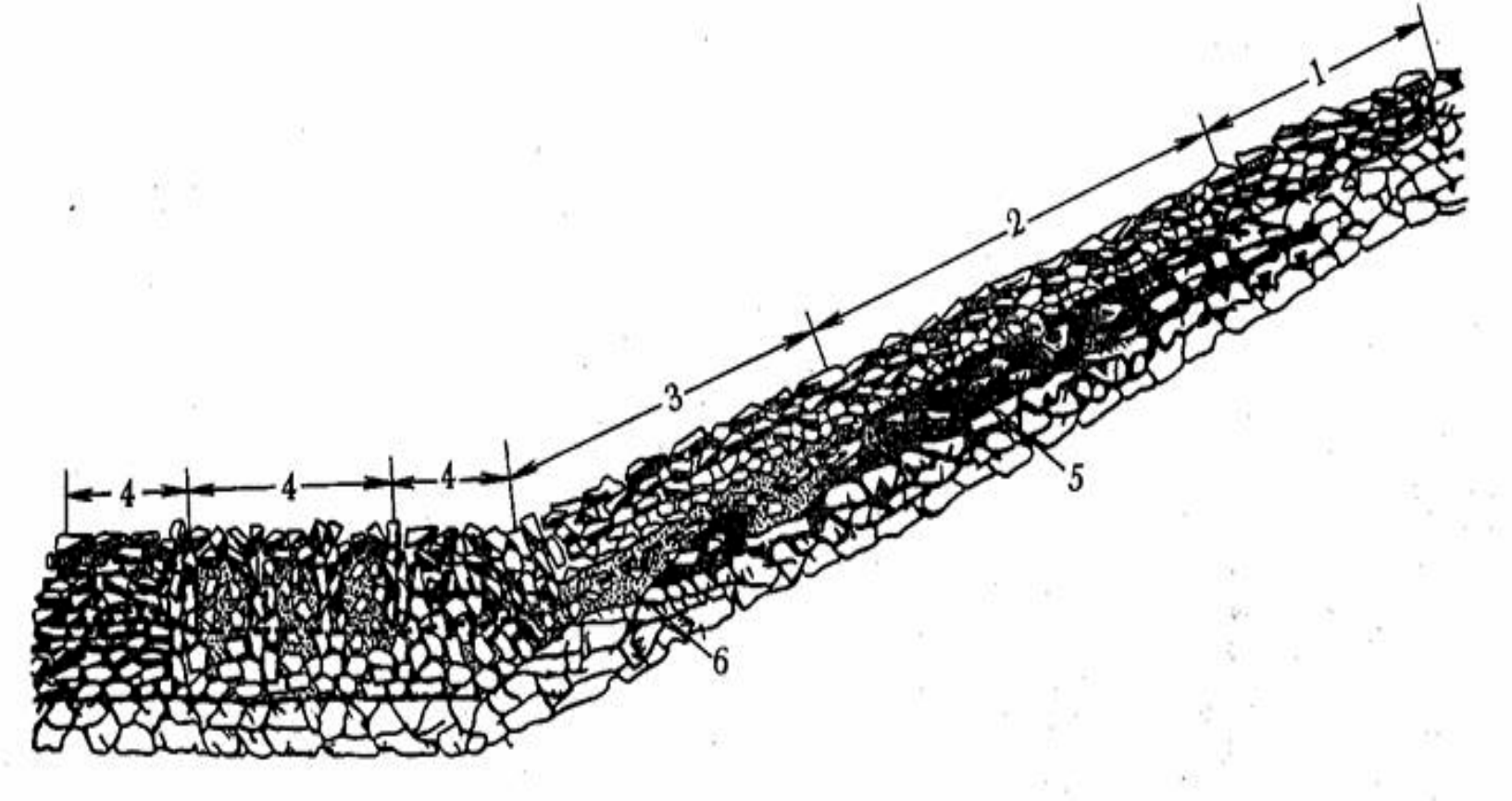
Курумы

Курумы – плащеобразные тела, состоящие из каменного материала, медленно движущиеся вниз по склону (каменные реки).

Источник материала – морозное выветривание скальных пород, выпучивание камней на поверхность.

Причины движения - накопление дисперсного материала или гольцового льда в основании курумов и скольжение по ним в период сезонного оттаивания, сильных дождей и т. д.

Строение курума



1 – зона криогенного выветривания и питания; 2 – глыбы с гольцовым льдом; 3 – обломки с дисперсным заполнителем; 4 – зона выпора;
5 – лед; 6 – дисперсный заполнитель (по А.И.Тюрину, 1979)

Курумы, формирующиеся при выветривании долеритов. Северо-западная Якутия

Солифлюкция

Солифлюкция – вязко-пластическое течение переувлажненных тонкодисперсных грунтов на склонах, развивающееся в период их сезонного оттаивания.

Условия:

1) Наличие склона крутизной 3-15°;
2) Высокая влажность и пылеватый состав грунтов;
3) Наличие мерзлотного или литологического водоупора

Типы солифлюкции

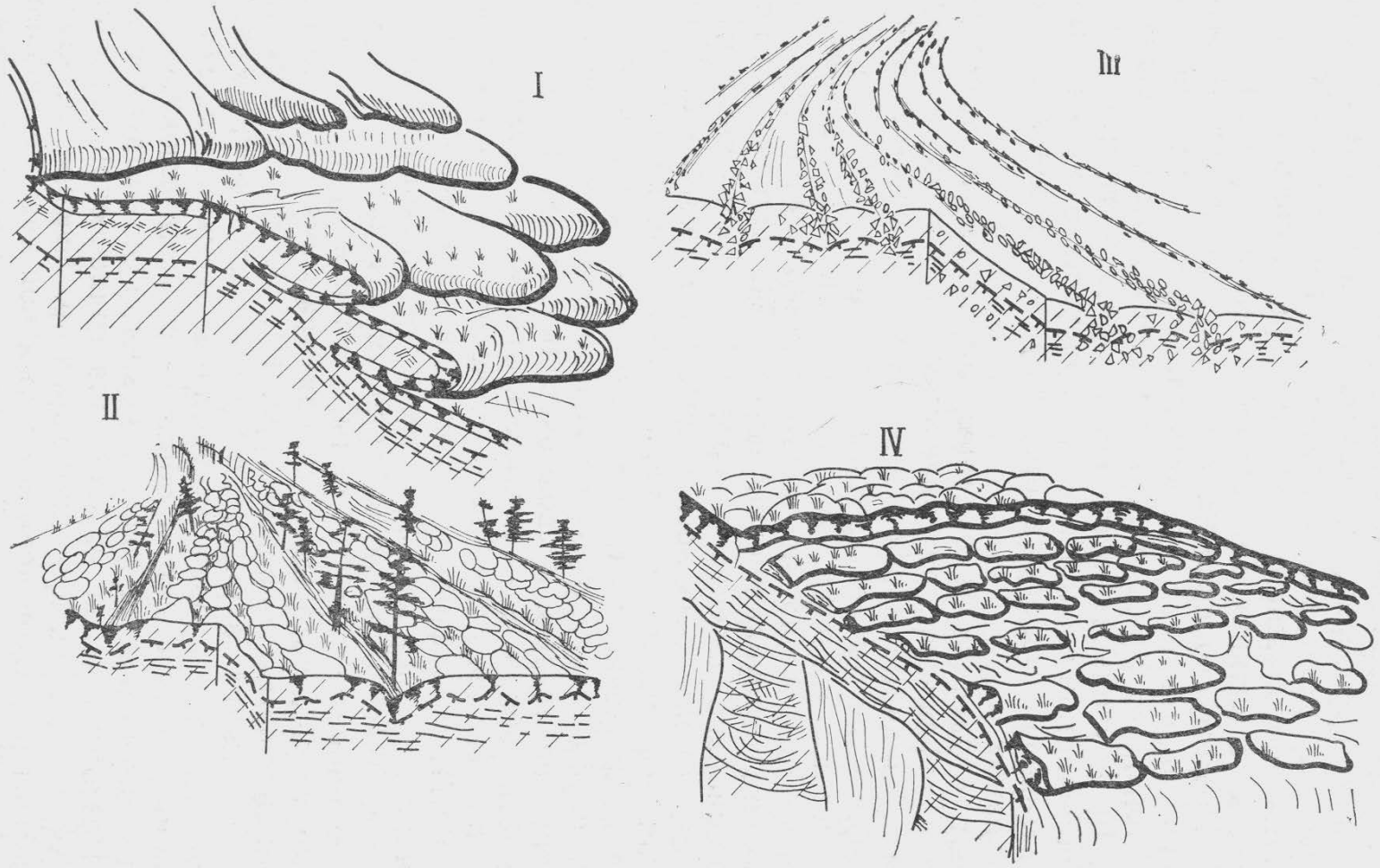


Рис. III.11. Типы солифлюкционных форм:

I — медленная аморфная солифлюкция; II — делли с сосредоточенным по понижениям поверхностным стоком и медленным течением пород по полосам и пятнам-медальонам: III — структурная солифлюкция с морозной сортировкой каменного материала; IV — быстрая солифлюкция (оползни-оплывы на термоденудационном склоне)

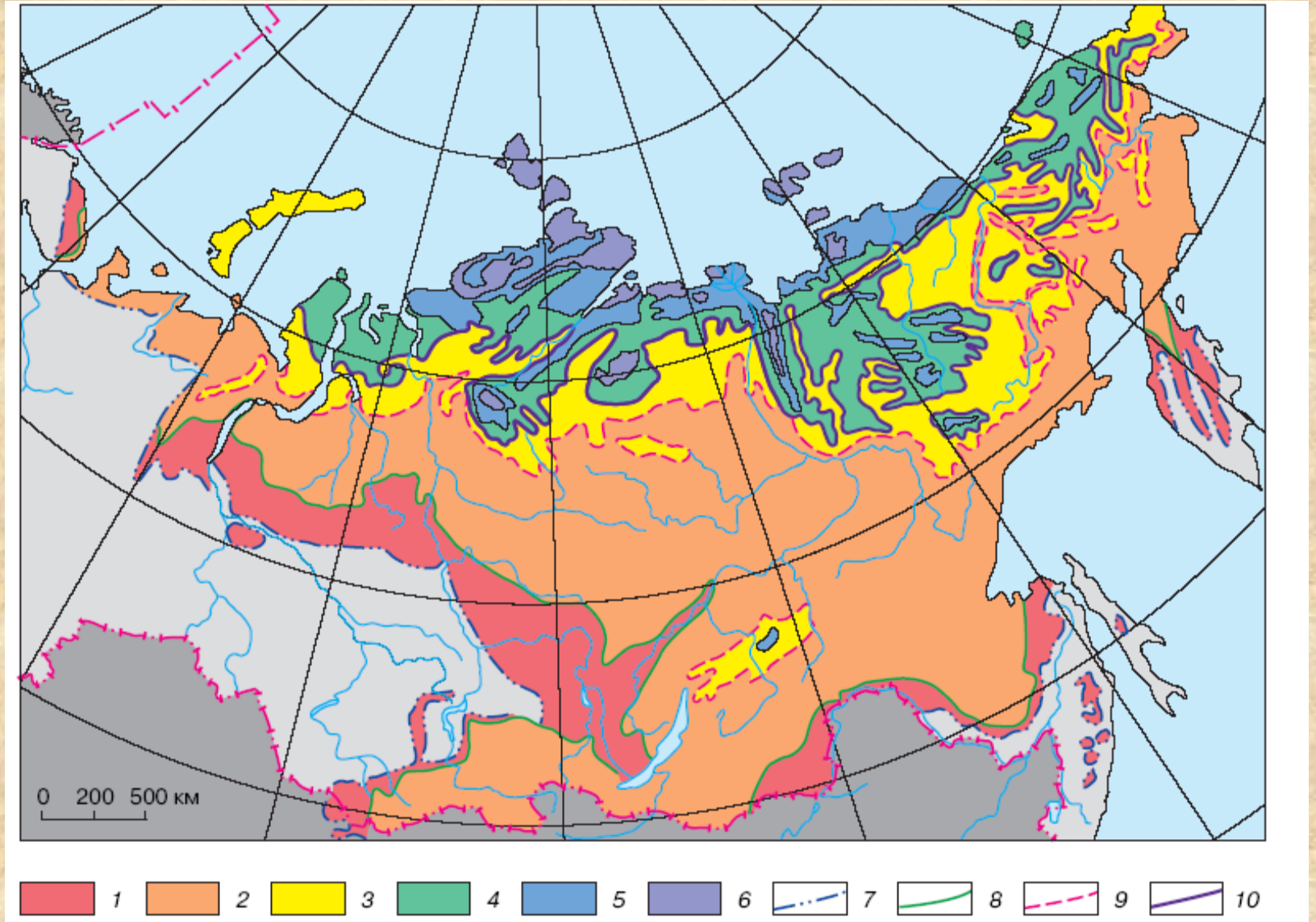
Солифлюкционные языки и террасы на пологом склоне. Канада

Структурная солифлюкция (делли) на склонах речных террас. Северо-западная Якутия

Значение мерзлых пород

- Строительство на мерзлых грунтах
- Освоение месторождений полезных ископаемых
- Геокриологический прогноз

Кимберлитовая трубка «Айхал», Якутия. Борта карьера сложены мерзлыми породами.



Прогнозная геокриологическая карта России на 110-й год от начала возможного глобального потепления климата (по сценарию ИГКЭ): 1 – область протаявших ММП; 2 – область распространения ММП несливающегося типа с глубиной залегания кровли от 5 до 20 м; 3 – область островного (50-90%) распространения ММП, t~0,5-2°; 4-6 – область сплошного распространения ММП: 4 - t~ -1..-5°; 5 - t~ -5..-6°; 6 - t~ -6..-8°; границы: 7 – современная южная граница распространения ММП; 8 – ММП несливающегося типа; 9 – островного распространения ММП; 10 – сплошного распространения ММП