

The background image shows a massive, multi-tiered iceberg floating in dark, choppy water. The sky above is a deep, reddish-orange color, suggesting either a sunset or a sunrise. The ice itself is a pale blue-grey, with intricate, layered textures and sharp, broken edges.

Геокриология

Учебники:

1. Общее мерзлотоведение (В.А.Кудрявцев, Б.Н.Достовалов)
2. Общая геокриология (Э.Д.Ершов)
3. Geocryology (S.Harris, A.Brouchkov, G.Cheng)

Сайт

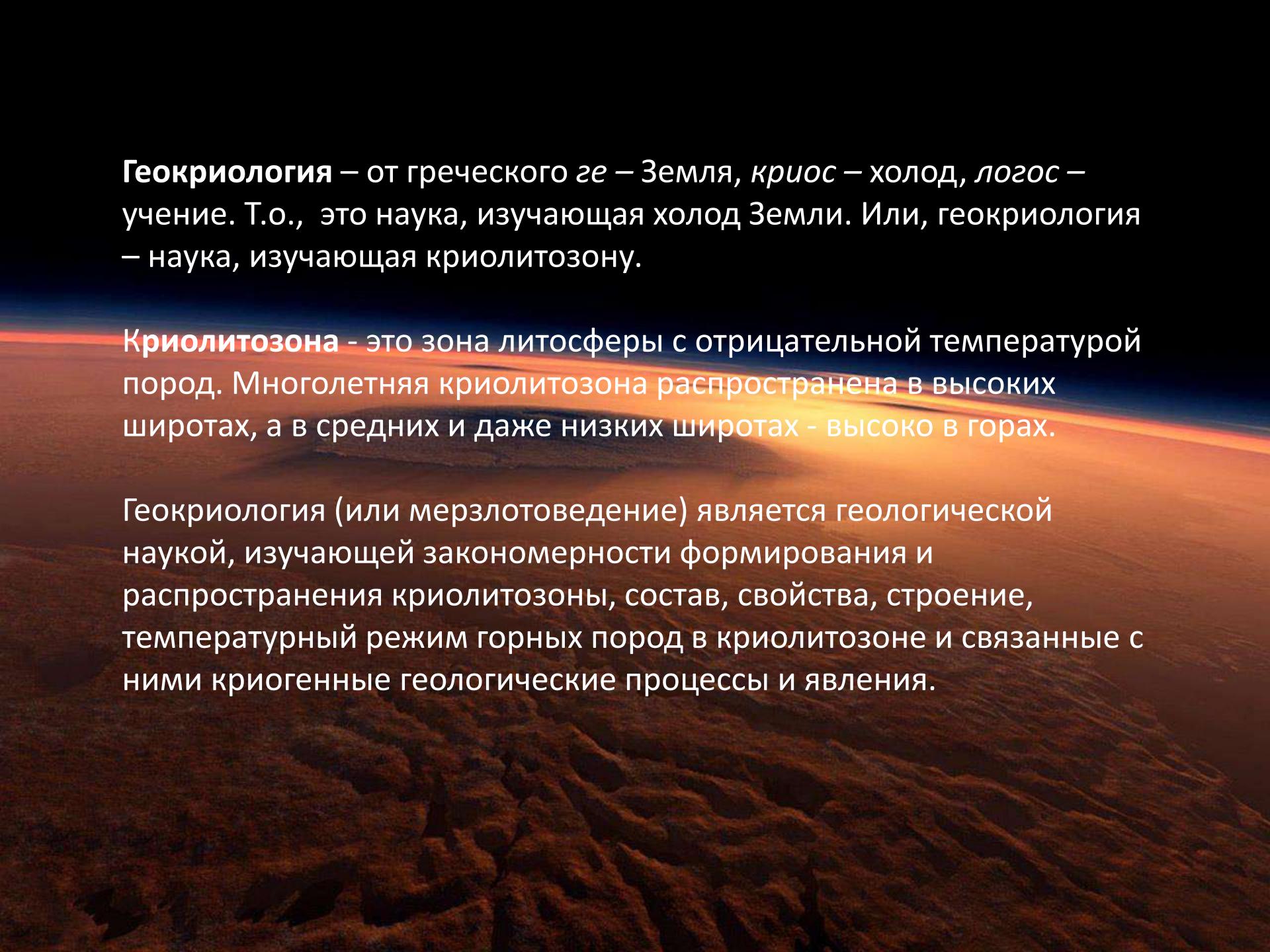
www.geocryology.com

E-mail

geocryology@mail.ru

A large, textured iceberg is shown floating in dark blue water. The sky above is a deep, dark purple. The text "Тепловой баланс Земли" is overlaid in white.

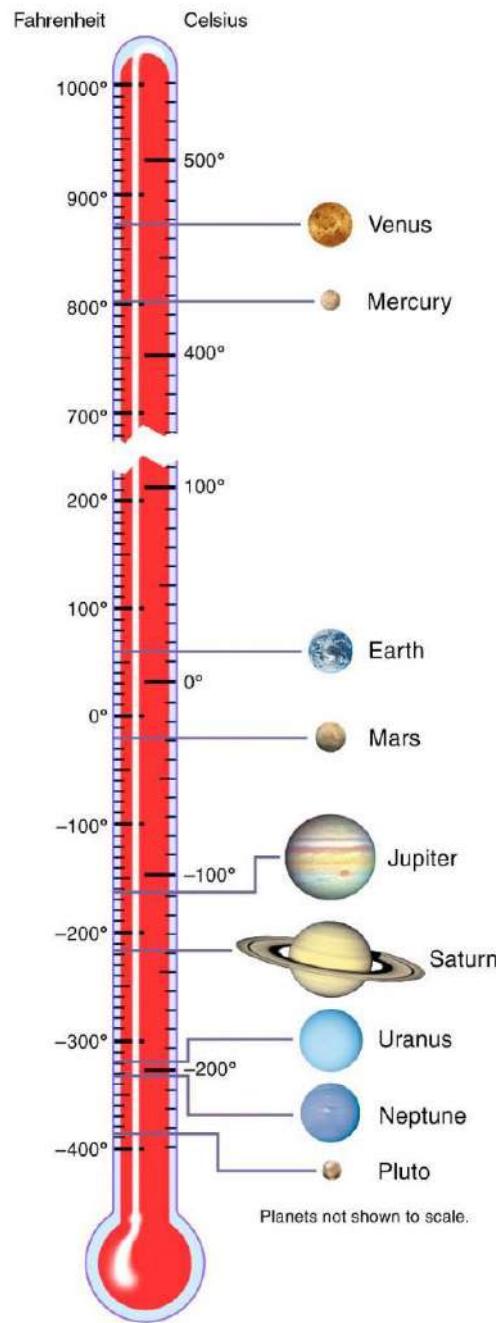
Тепловой баланс Земли



Геокриология – от греческого *ге* – Земля, *криос* – холод, *логос* – учение. Т.о., это наука, изучающая холод Земли. Или, геокриология – наука, изучающая криолитозону.

Криолитозона - это зона литосферы с отрицательной температурой пород. Многолетняя криолитозона распространена в высоких широтах, а в средних и даже низких широтах - высоко в горах.

Геокриология (или мерзлотоведение) является геологической наукой, изучающей закономерности формирования и распространения криолитозоны, состав, свойства, строение, температурный режим горных пород в криолитозоне и связанные с ними криогенные геологические процессы и явления.

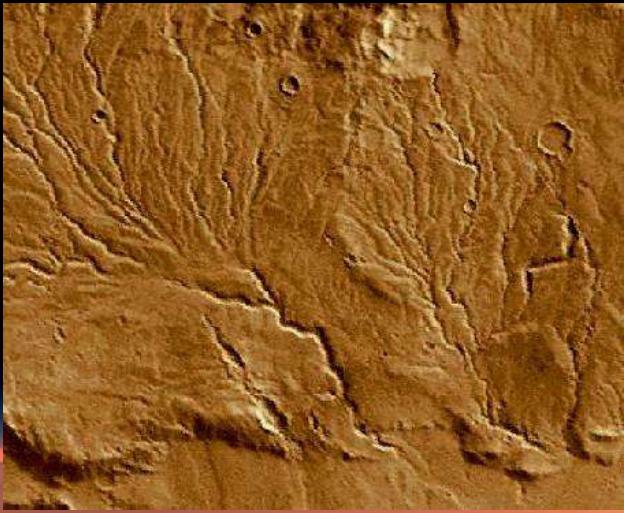


Геокриология – раздел планетарной криологии, или криологии планет.

Праздник «большого взрыва» закончился

Температура реликтового фона
Вселенной 2.7 Кельвина





Что значит холодно? В воде человек начинает мерзнуть при температуре ниже около плюс 25 градусов Цельсия. +27°C — комфортная температура. Человек — тропическое существо, которое в течение тысячелетий привыкало к тому, чтобы жить при температуре +27°C, не пользуясь при этом одеждой.

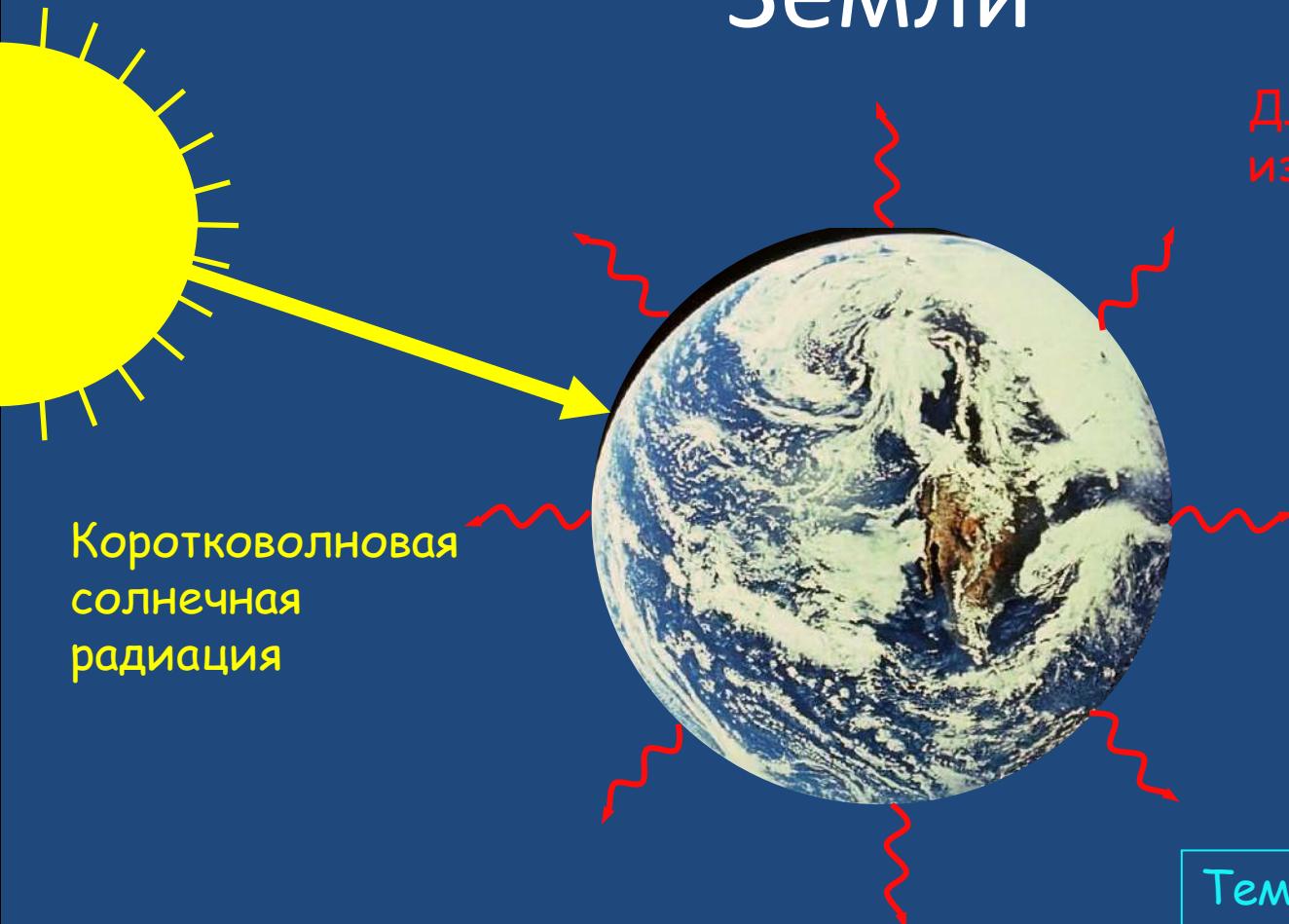
Фазовый переход вода-лед происходит при 0 град.С!

Вода пользуется широким распространением на Земле и в космосе и является важнейшим агентом геологических, особенно экзогенных, процессов. В галактике, в состав которой входит Солнечная система, обнаружены грандиозные скопления воды — обширные водяные облака. Поперечник подобных образований достигает многих сотен миллионов километров. Все чаще обнаруживается присутствие воды в составе планет, звезд и комет. Она оставила глубокие следы на поверхности Марса. Наконец, вода входит в состав многих пород, распространенных в космосе, и, в частности, обнаруженных на Луне. Установлено, что падающие на Землю каменные метеориты содержат до 1% воды.

История криолитозоны

- После формирования ~4.6 миллиарда лет назад Земля была горячей (более 200 градусов С?)
- Приходящая от Солнца энергия в то время составляла только 70% от современного значения
- Жидкая вода появилась на поверхности около ~4.3 миллиарда лет назад
- Жизнь появилась, возможно, около ~3.8 миллиарда лет назад
- Фотосинтез (поглощение углекислого газа с выделением кислорода) началось около 3.5-2.5 миллиарда лет
- Земля пережила несколько глобальных ледниковых периодов, первые свидетельства о которых относятся ко времени 2.5-2.1 миллиарда лет назад

Тепловой баланс Земли



Температура Земли определяется главным образом балансом между этими двумя составляющими

Теплопередача (теплообмен)

- Термин «теплопередача» (теплообмен) – это процесс переноса теплоты внутри тела или от одного тела к другому
- Интенсивность переноса теплоты зависит от свойств вещества, температуры и ее распределения, и подчиняется экспериментально установленным законам.

Виды теплообмена

- Второе начало термодинамики (1850 год) гласит, что теплота всегда передается от более горячего тела к более холодному, о механизме теплопередачи там не говорится ни слова.
- Существует три способа теплообмена, и за каждым из них стоит уникальный физический процесс:
 - 1) кондуктивный (теплопередача),
 - 2) конвективный,
 - 3) излучение.
- Сложным теплообменом называют процесс переноса теплоты, при котором теплообмен протекает одновременно с участием различных способов (кипение воды в кастрюле, например).

Излучение

- Нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн.
- Распределение энергии излучения тела по спектру зависит от температуры тела. При этом для всех тел с увеличением температуры максимум энергии излучения смещается в коротковолновый участок спектра (закон Вина), а общая энергия излучения возрастает.
- Излучение Земли (288К) имеет пик энергии в диапазоне невидимого инфракрасного излучения, раскаленная поверхность Солнца (6000К) излучает значительную часть энергии в диапазоне видимого света, а при ядерном взрыве ($10E+6$ К) большая доля энергии взрыва уносится коротковолновыми рентгеновским и гамма- излучением

Солнечная радиация

- Энергия, излучаемая единицей поверхности черного тела, определяется законом Стефана-Больцмана Экспериментальные (1879 г. Й.Стефан) и теоретические (1884 г. Л.Больцман) исследования

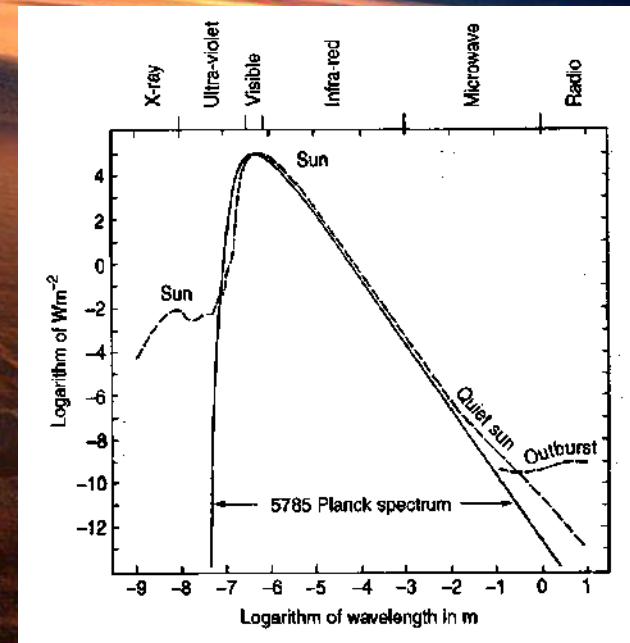
$$E = \sigma T^4$$

σ = константа

$$= 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$$

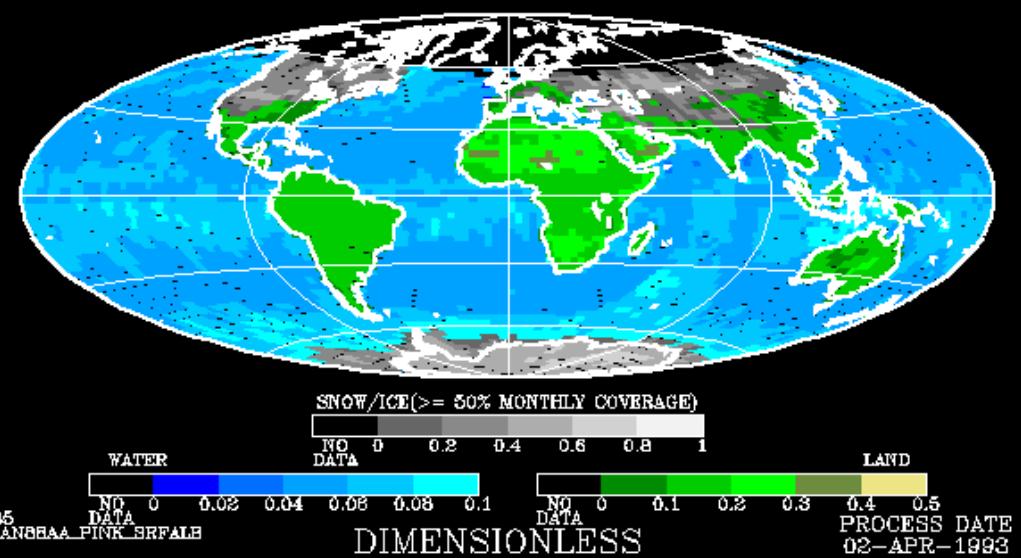
$$E_{\text{sun}} = 6.3 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$$

Не все это количество приходит на Землю



PINKER SHORTWAVE SURFACE ALBEDO
(PRODUCTION MODE)
JANUARY 1988

GLOBAL MONTHLY MEAN: 0.1098



Во второй половине 90-х годов XX века
зафиксировано уменьшение альбедо Земли
приблизительно на 2,5%

Поверхность	Альбедо (%)
Свежий снег	60-90
Тающий снег	40-70
Облака	40-90
Пустыни	30-50
Почва	5-30
Тундра	15-35
Луг	18-25
Лес	5-20
Вода	5-10
Средняя для Земли	31

Излучение и поглощение

- Закон излучения Кирхгофа — физический закон, установленный немецким физиком Кирхгофом в 1859 году: отношение излучательной способности любого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной частоты и не зависит от их формы, химического состава и прочих характеристик.
- Поэтому если альбедо тела больше (поглощательная способность меньше), то и излучать оно будет меньше (зеркальные теплоизоляционные материалы)

Излучение и поглощение



Джованни Савольдо «Мария Магдалина» (ок.1530), Национальная галерея, Лондон

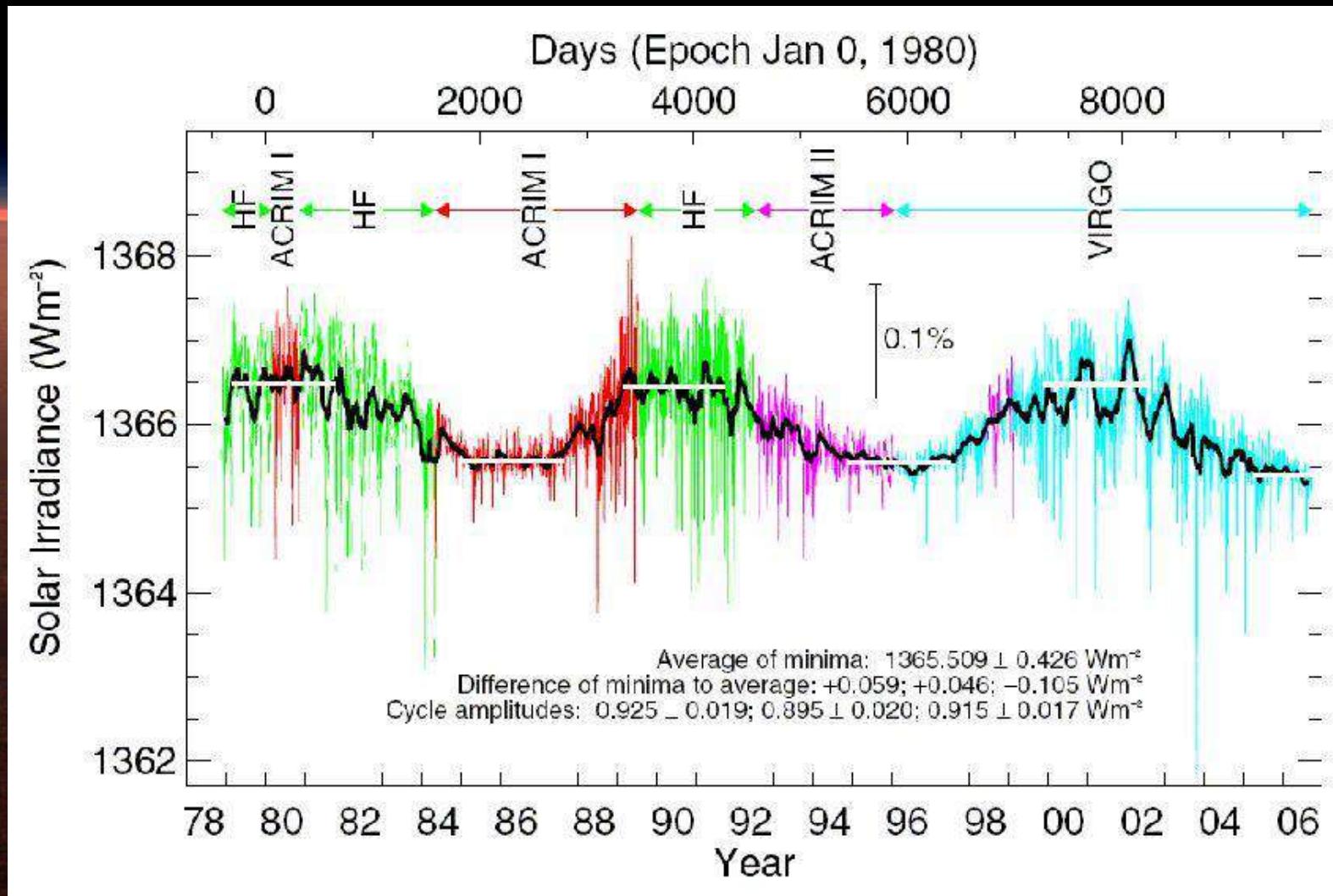
Легенда о замороженном космонавте

- Несмотря на то, что в космосе очень холодно (2.7 К), скорость остывания невелика. Теплопроводность в вакууме также близка к нулю, и тепловой поток от нагревого тела будет осуществляться только за счёт излучения. Если вдруг космонавт окажется в открытом космосе (и далеко от ближайших звёзд), и температура тела равна 310 К, площадь излучения человека примерно 2 м^2 . Излучение чёрного тела по закону Стефана-Больцмана будет примерно 1000 Ватт. Тепловыделение человека примерно до 100 Ватт. Значит, потеря тепла 900 Ватт. Пусть человек весит 100 кг и примем его теплоёмкость равной теплоёмкости воды, то есть 4180 Дж·кг⁻¹·К⁻¹. Получается, человек остынет на 1 градус за 7 минут. Для того, чтобы человек не замёрз в далёком космосе (на орбите земли картина другая, там есть солнце и земля), его скафандр должен иметь высокое альбедо, примерно 0.93-0.95 . Так что легенда о замороженном космонавте не лишена оснований, хотя, конечно, мгновенно человек не замёрзнет. Худые будут мёрзнуть быстрее полных.

Солнечная радиация

- Солнечная радиация, или поток энергии, получаемый на поверхности атмосферы:
 $= 1368 \text{ Вт}/\text{м}^2 = \text{Солнечная постоянная}$
- Измеряется со спутников
- $E_{\text{sun}} = 6.3 \times 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ на Солнце

11-летние циклы солнечной активности



- Svante August Arrhenius

1896

«Температура Земли
должна быть
около - 17 град С»



Расчет температуры Земли

Приходящая энергия (S – солнечная постоянная, α -альбедо, или доля отраженной Землей радиации)
 $\pi r^2 S(1-\alpha) = \text{Излучаемая энергия } 4\pi r^2 \sigma T_e^4$

- Решение для T_e

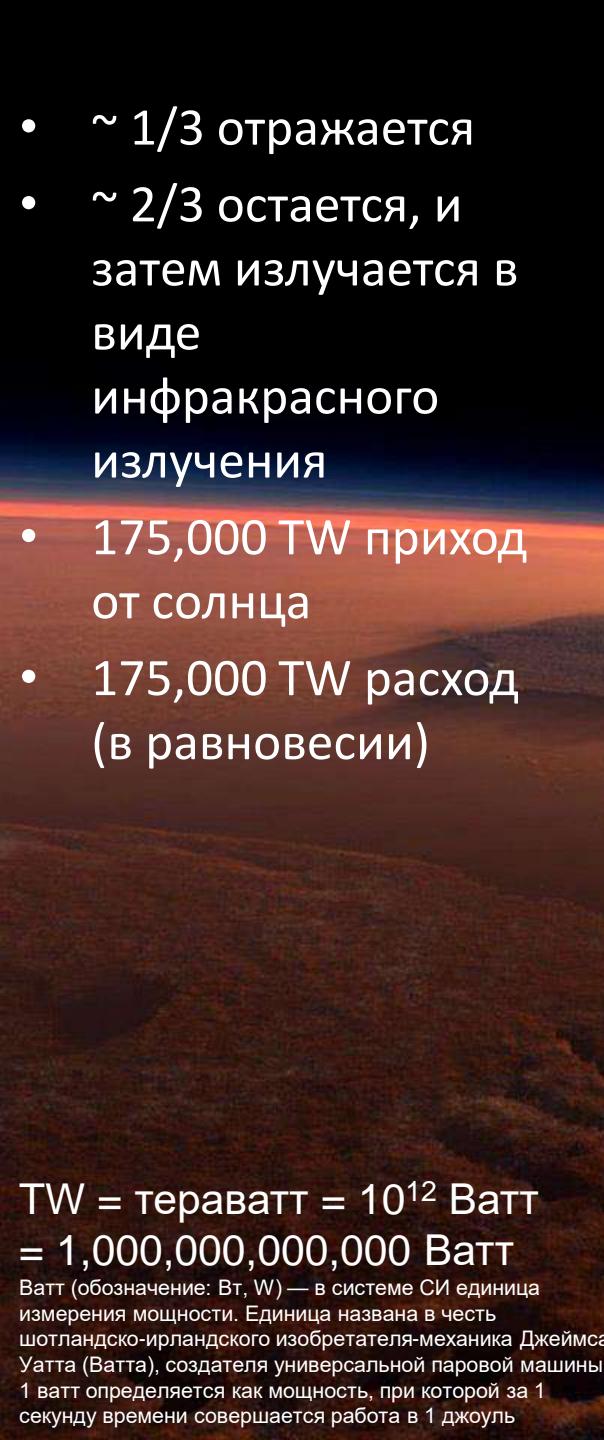
$$\frac{(S/4)(1-\alpha)}{\sigma} = T_e^4$$

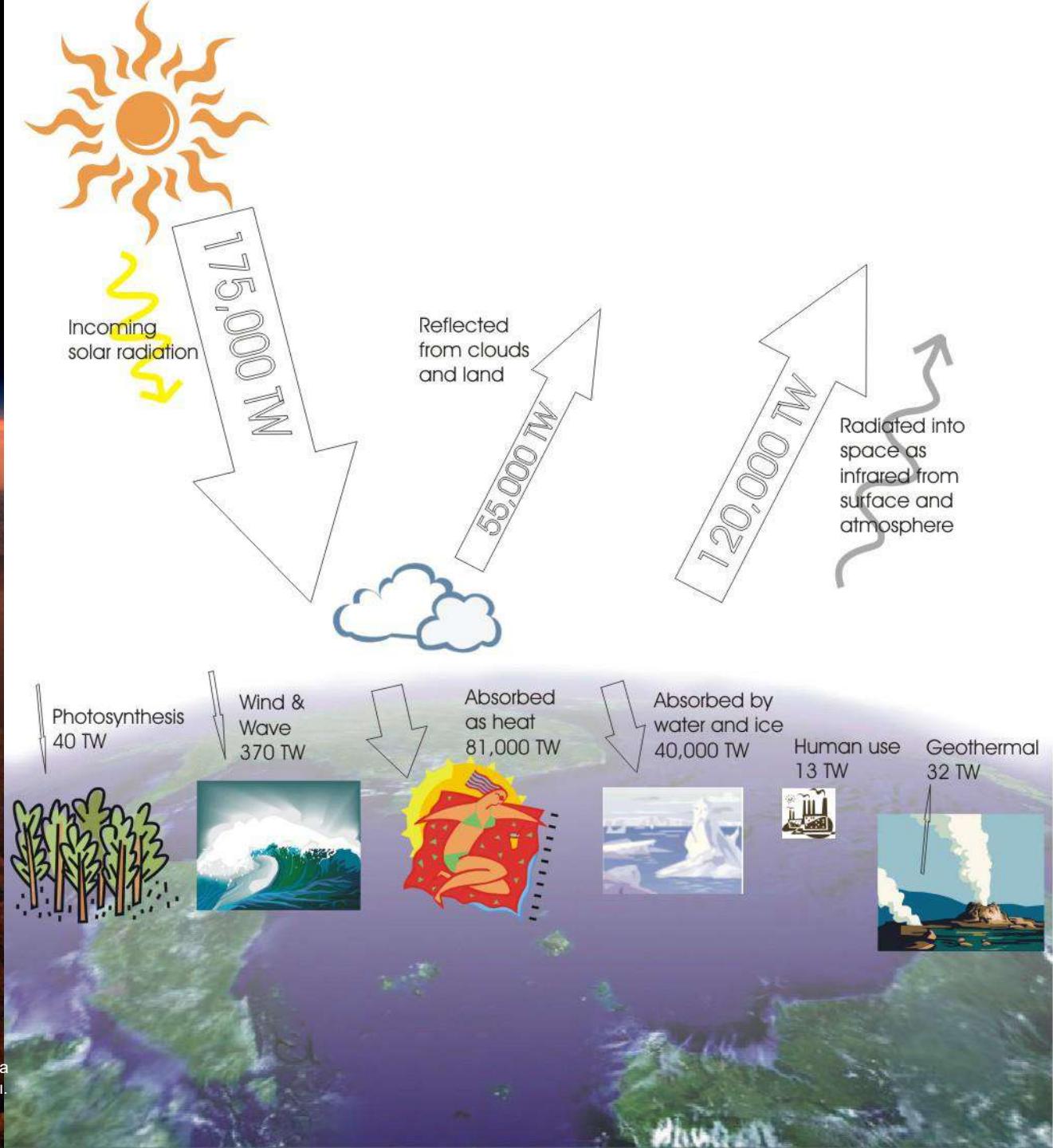
$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$$

= константа Стефана-Больцмана

$$T_e = 256 \text{ K} (-17^\circ\text{C})$$

Но средняя температура Земли около +15°C !

- ~ 1/3 отражается
 - ~ 2/3 остается, и
затем излучается в
виде
инфракрасного
излучения
 - 175,000 TW приход
от солнца
 - 175,000 TW расход
(в равновесии)
- 



Источник	Мощность
Солнечная радиация	175,000 TW
Свет звезд	$7,0 * 10^{-3}$ TW
Поток из недр, в том числе:	32 TW
Ядерные реакции	29 TW
Гравитационные процессы	3 TW
Деятельность человека	13 TW

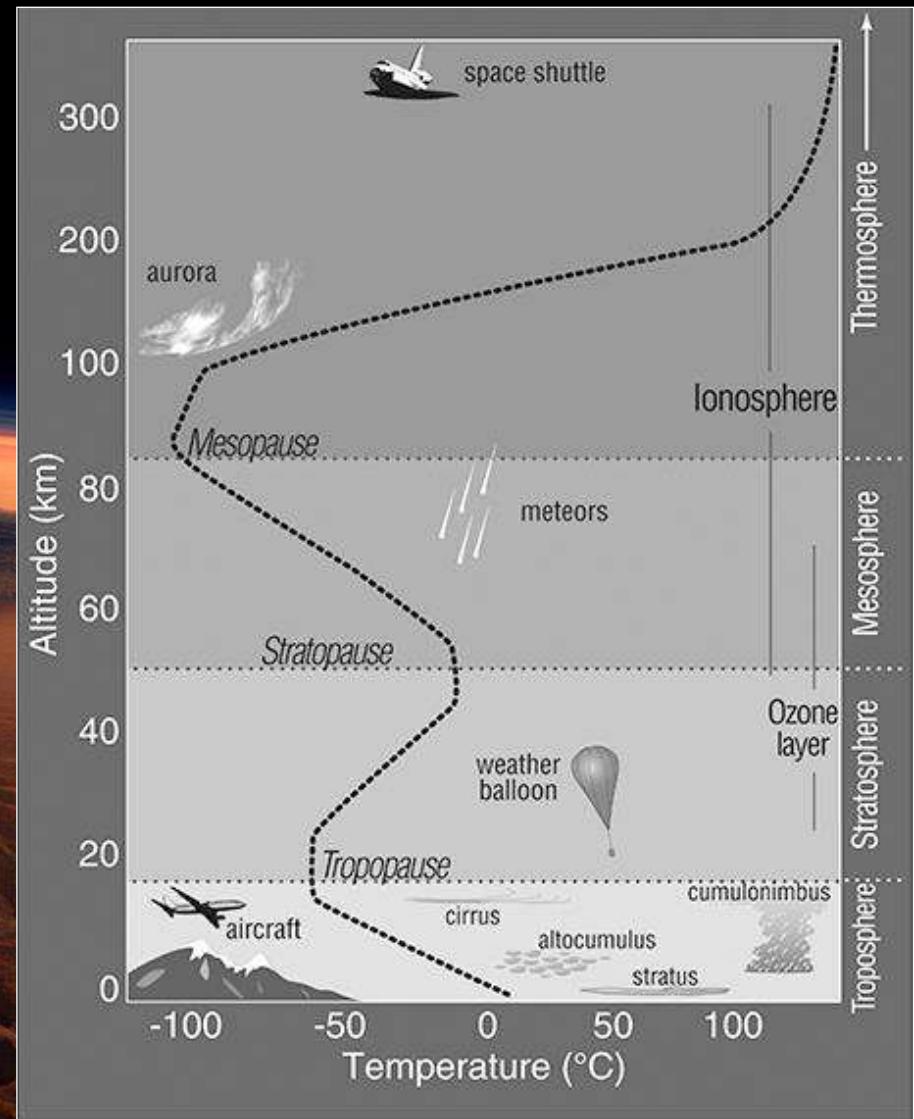
Тропосфера до высот 8-15 км,
температуры от 17° to -52°C

Стратосфера до высот 50 км,
температура увеличивается с
высотой до -3°C

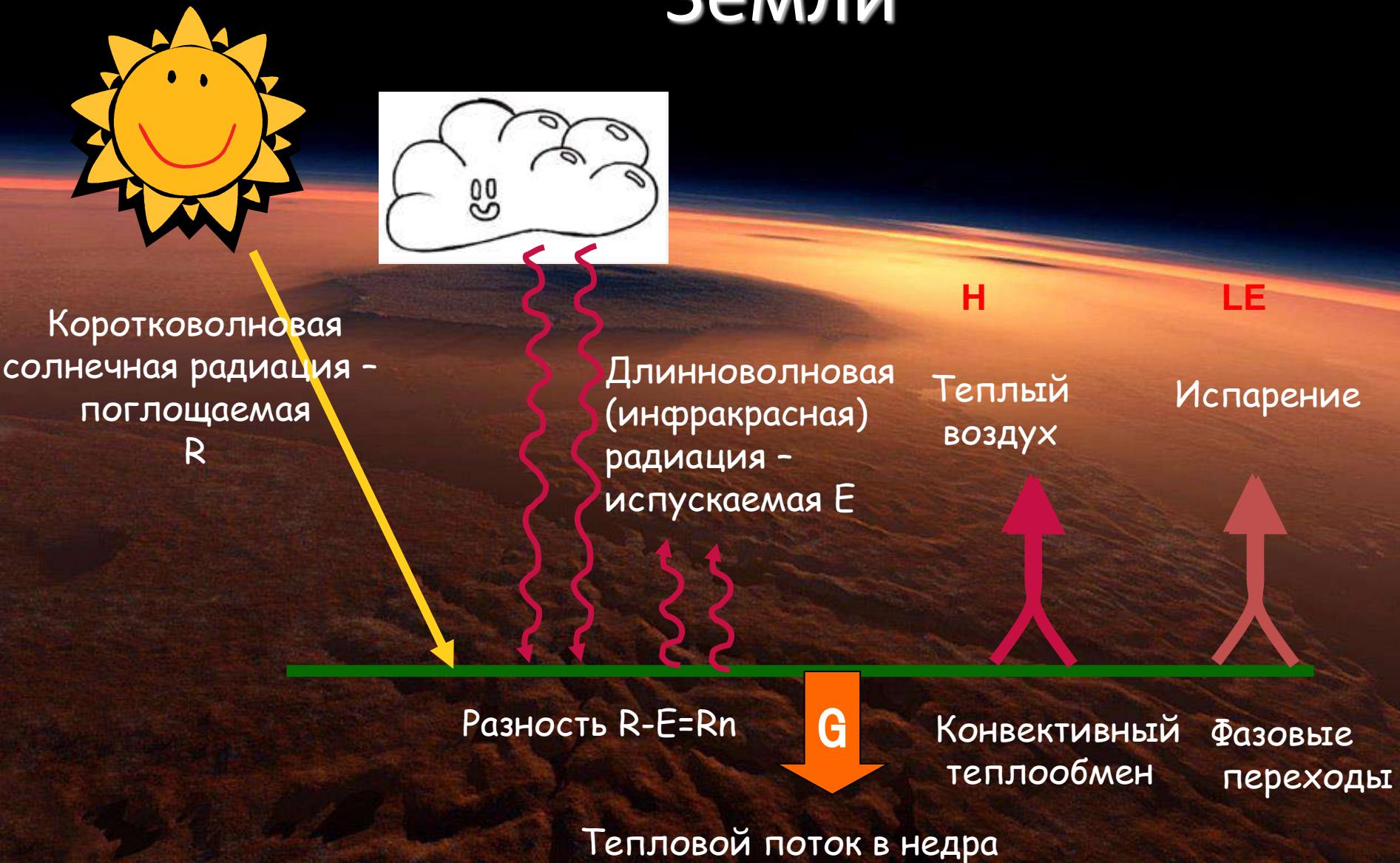
Мезосфера до высот 85 км,
температура уменьшается с
высотой до -93°C

Термосфера до высот 600 км,
температура увеличивается с
высотой до +1,700°C.

Экзосфера до высот 10000 км,
молекулы газа на солнце могут
разгоняться до температур
+2,500°C



Тепловой баланс на поверхности Земли



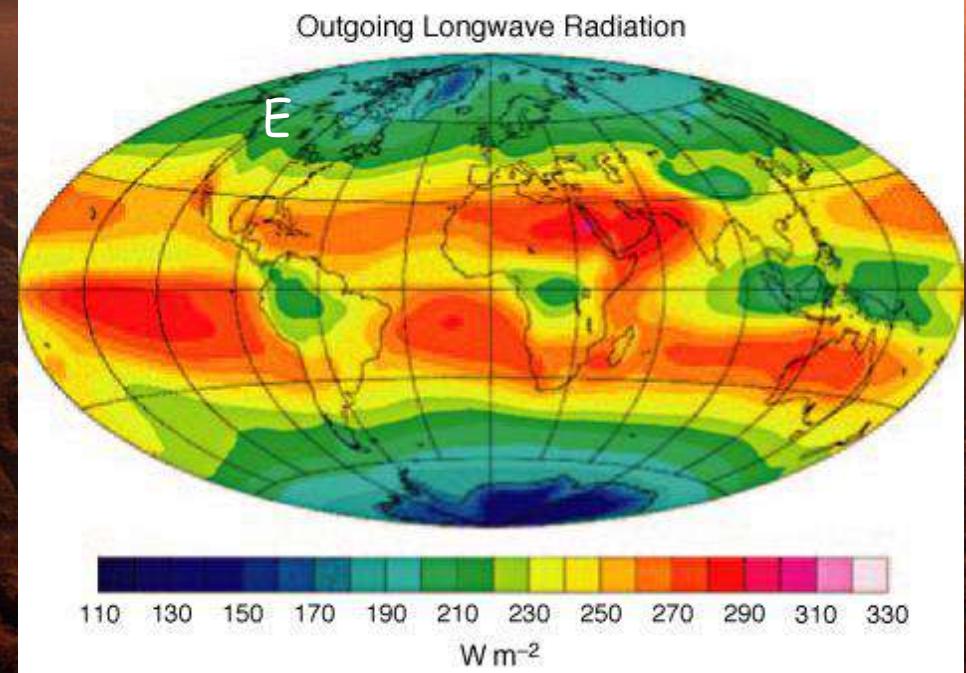
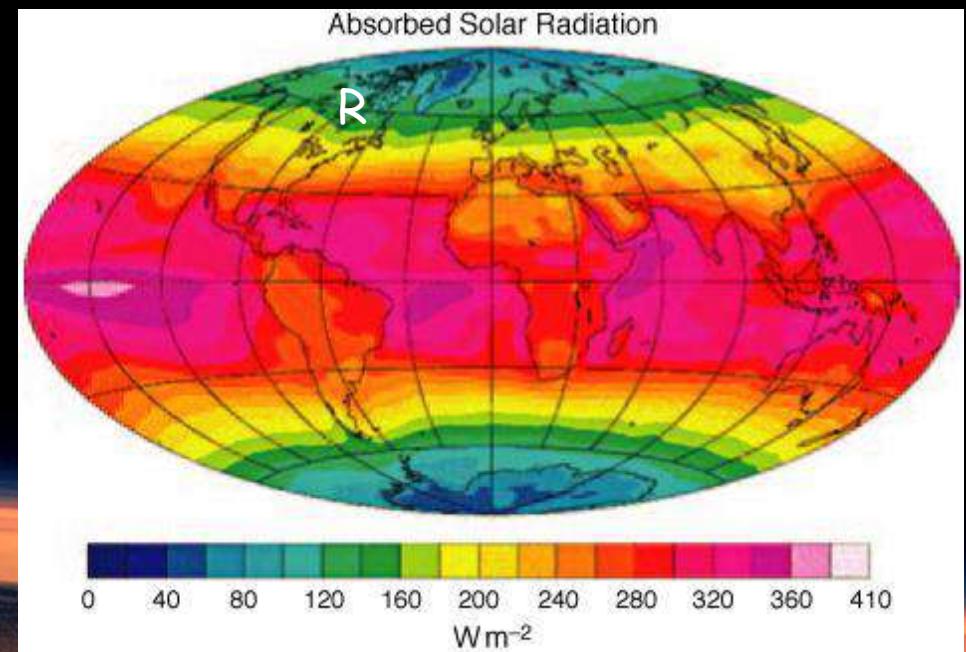
Уравнение теплового баланса на поверхности Земли

$$R_n = H + LE + G$$

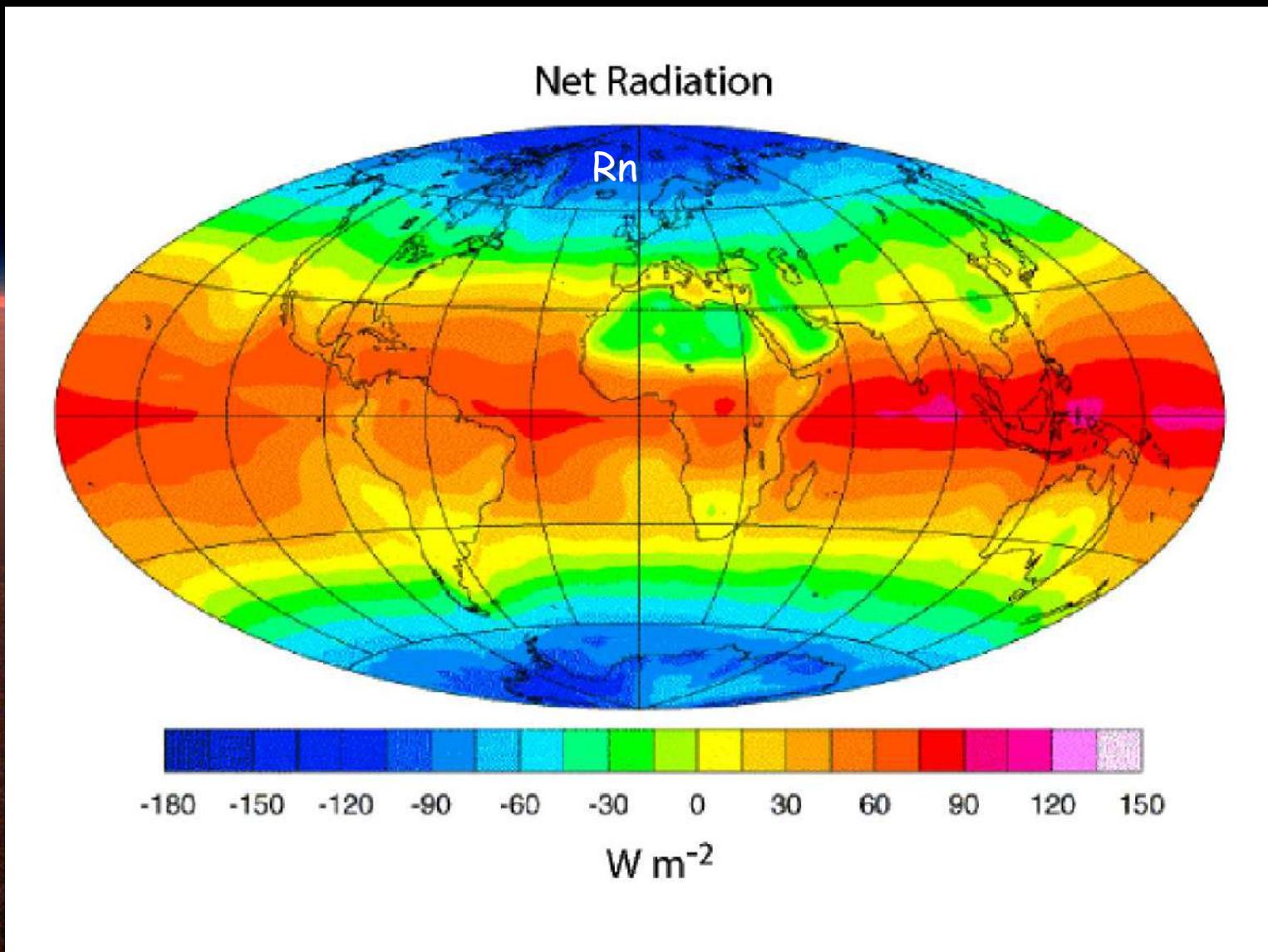
Иногда обозначают (В.А.Кудрявцев) H как р,
LE как LM, и G как A



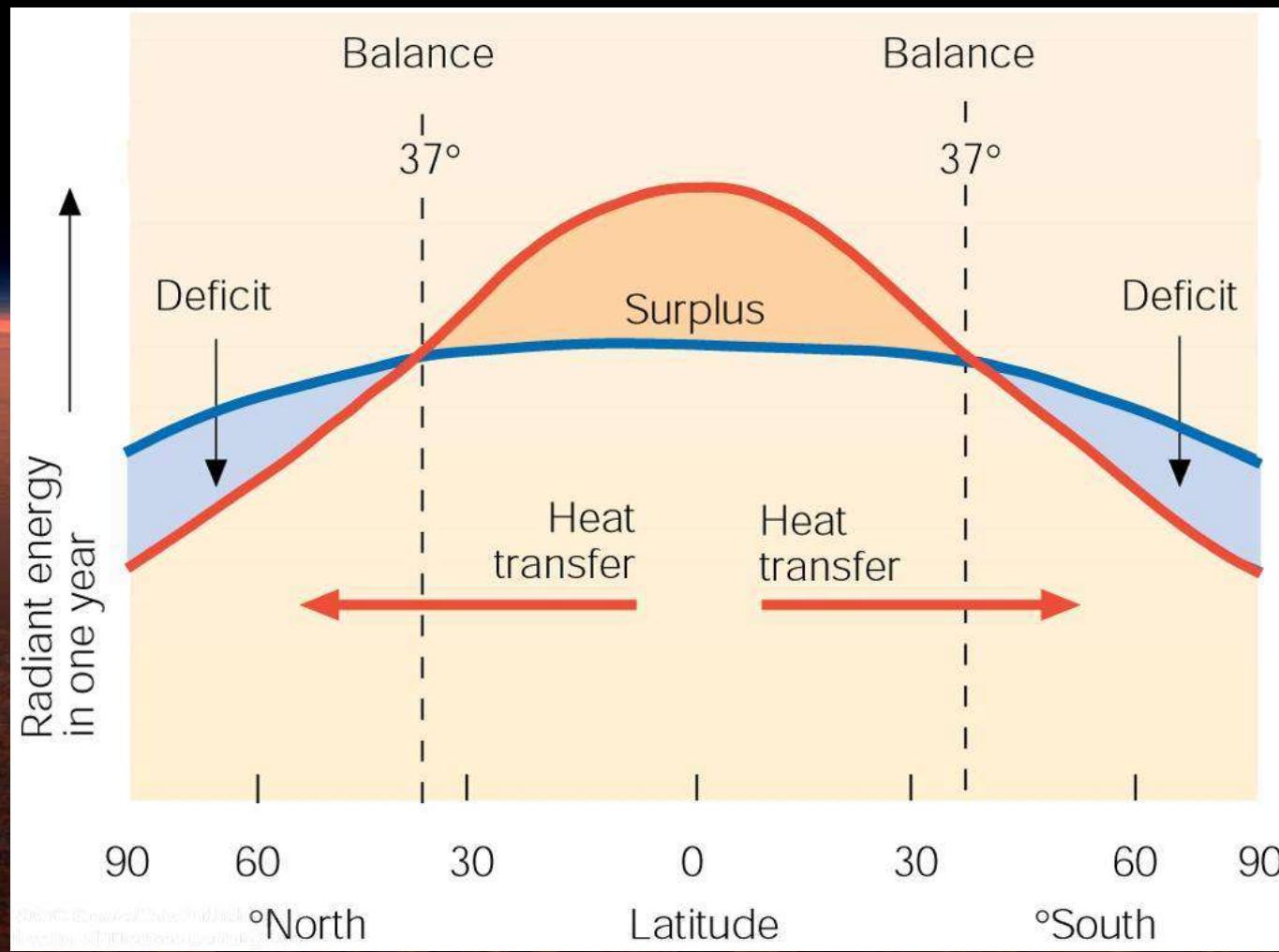
Поглощенная R и испускаемая E радиация



R_n - разность поглощенной и испускаемой радиации, или суммарная радиация

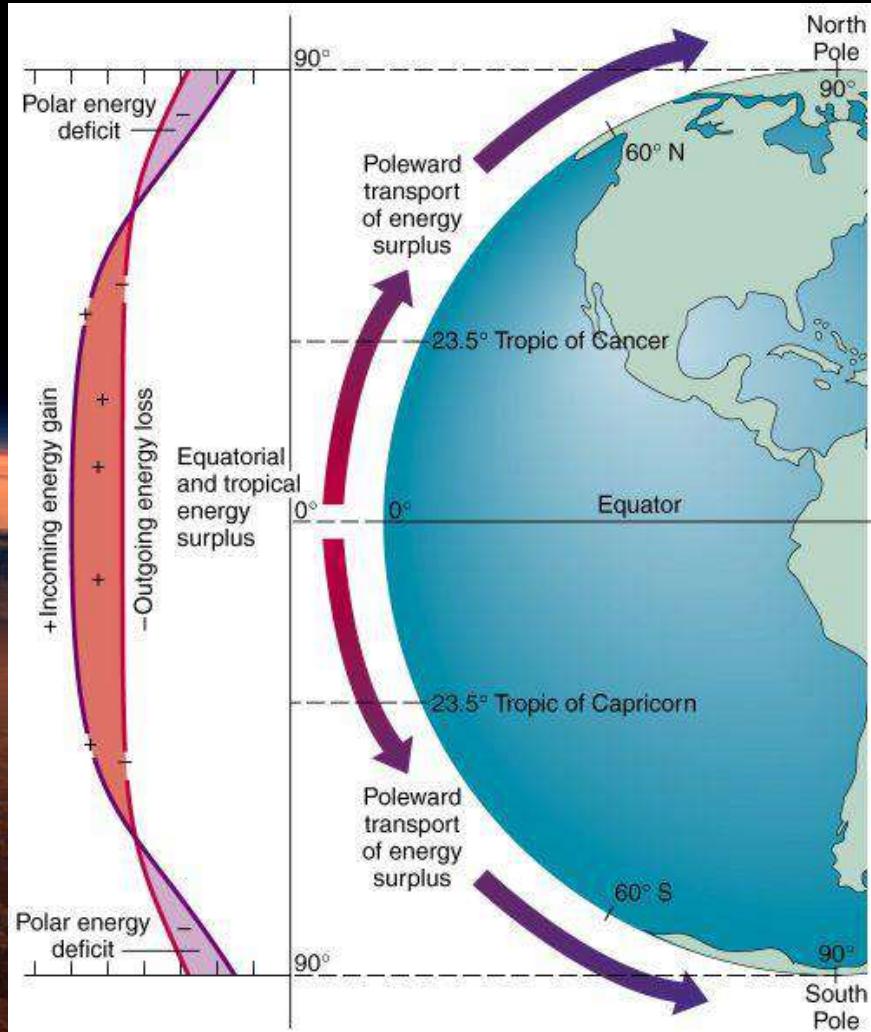


Баланс тепла Земли

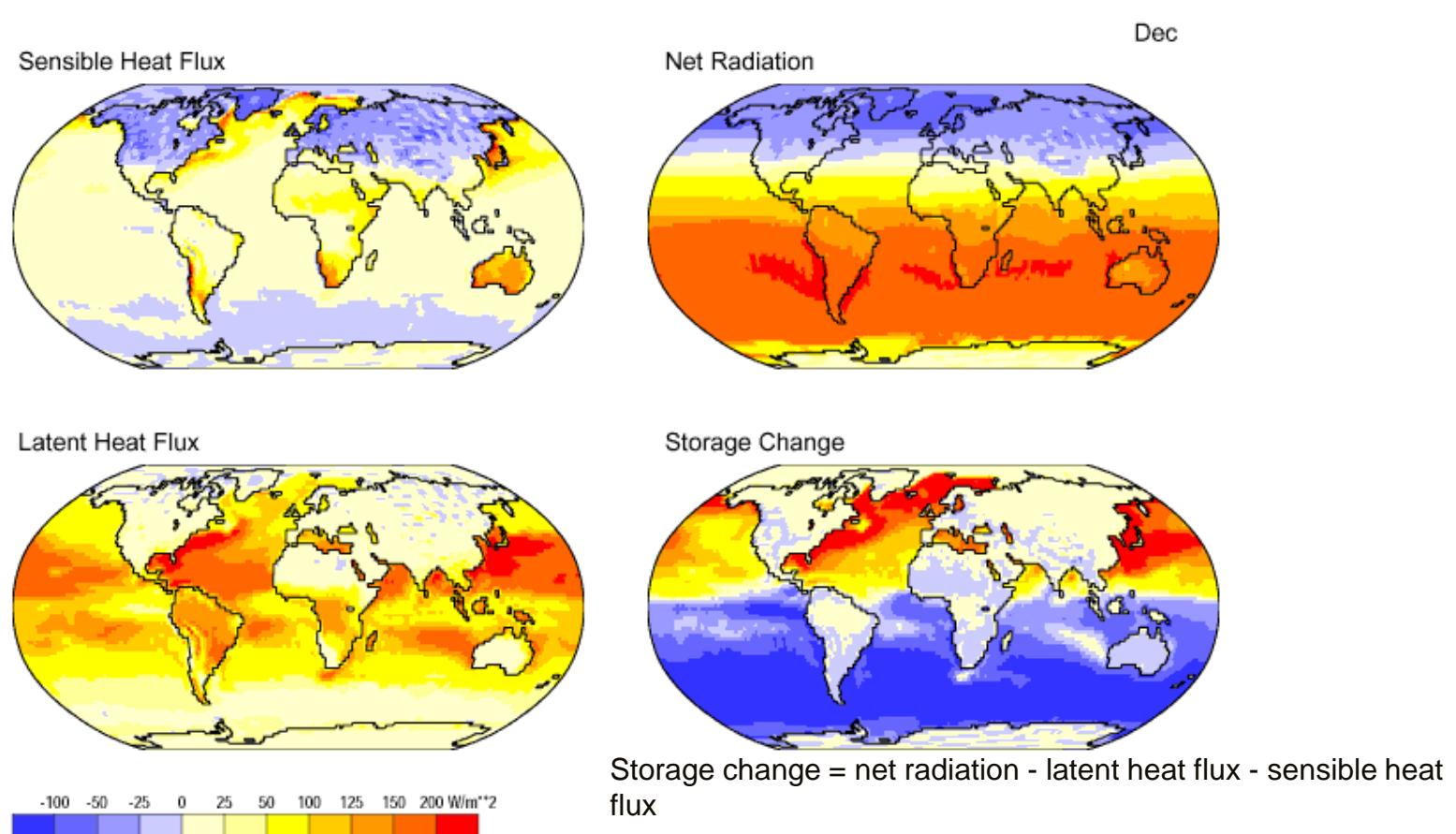


Почему не остывают полюса?

Перенос тепла
атмосферой и
океанами
происходит от
экватора к
полюсам,
поддерживая
глобальный
баланс энергии



Глобальный тепловой баланс поверхности Земли



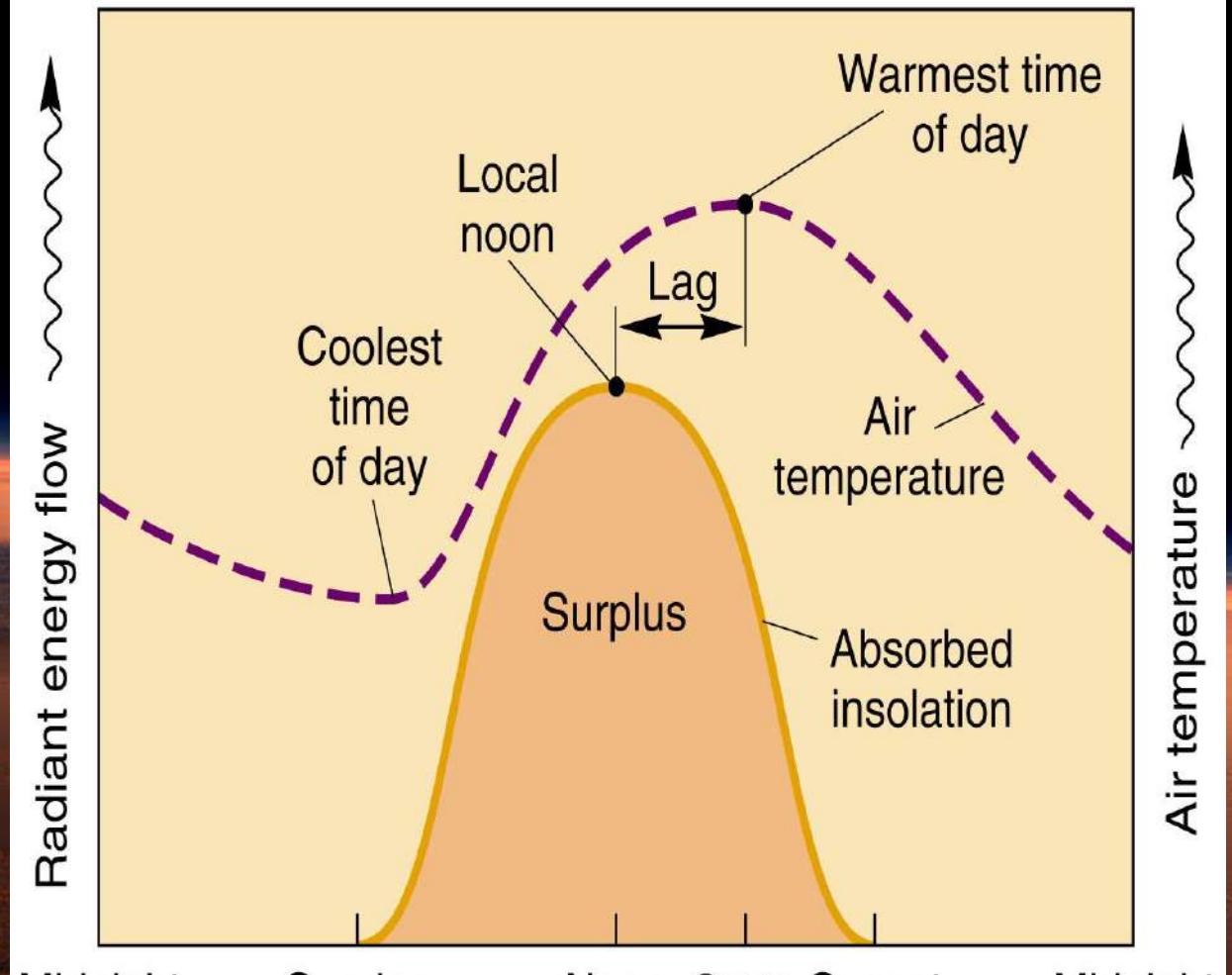
Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

$$\text{Storage change} = \text{net radiation} - \text{latent heat flux} - \text{sensible heat flux}$$

$$G = Rn - LE - H$$

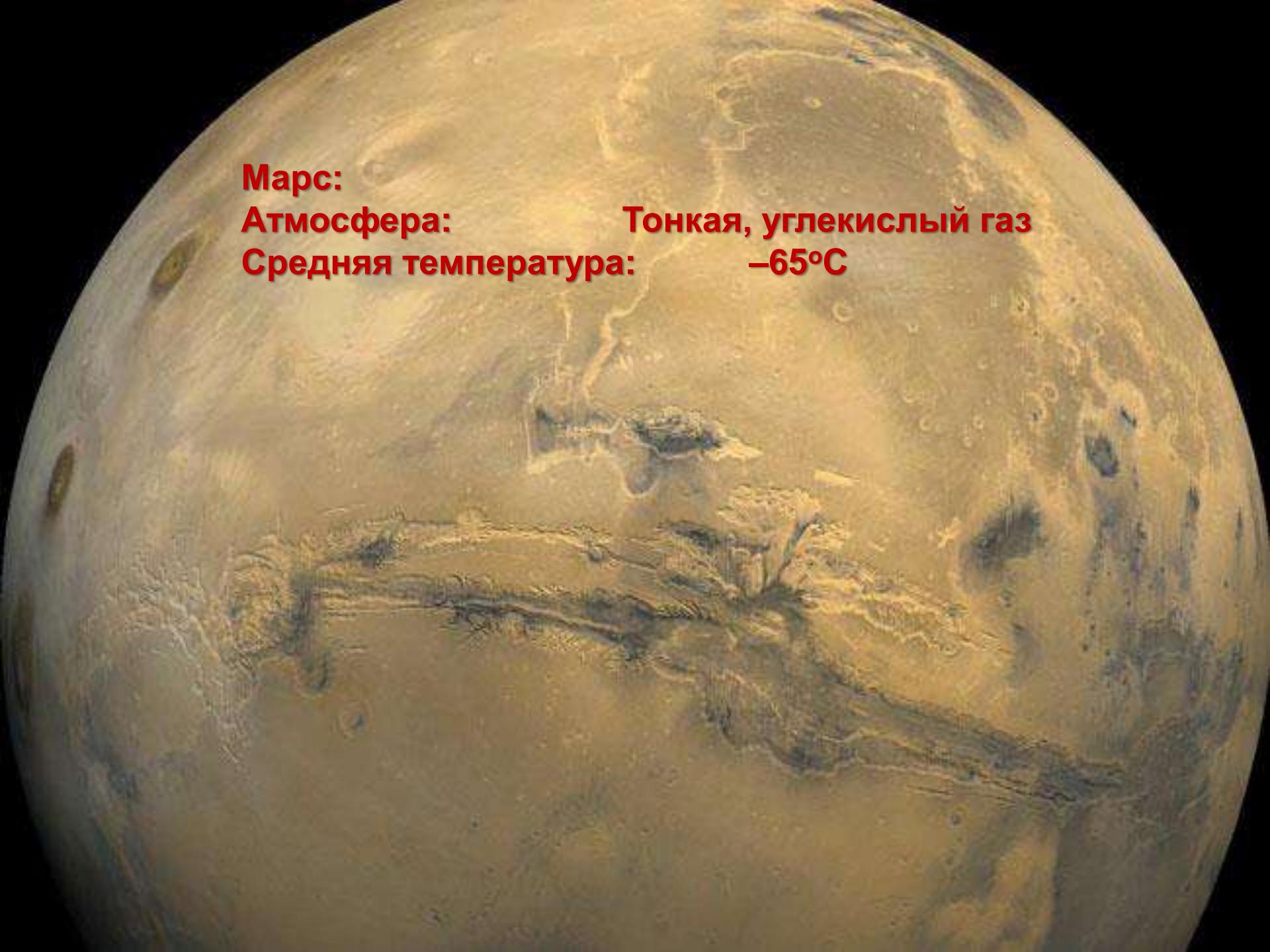
Тепловой поток в горные породы (океан) G = суммарная радиация Rn – фазовые переходы LE – конвективный теплообмен на границе с атмосферой H

Пример: суммарная радиация в течение суток



Midnight Sunrise Noon 3 P.M. Sunset Midnight

— Absorbed insolation
- - - Air temperature



Марс:

Атмосфера:

Тонкая, углекислый газ

Средняя температура:

–65°C



Венера

Атмосфера: углекислый газ (96 %) и азот (ок.4 %)

Средняя температура: +464°C



Земля

Атмосфера:

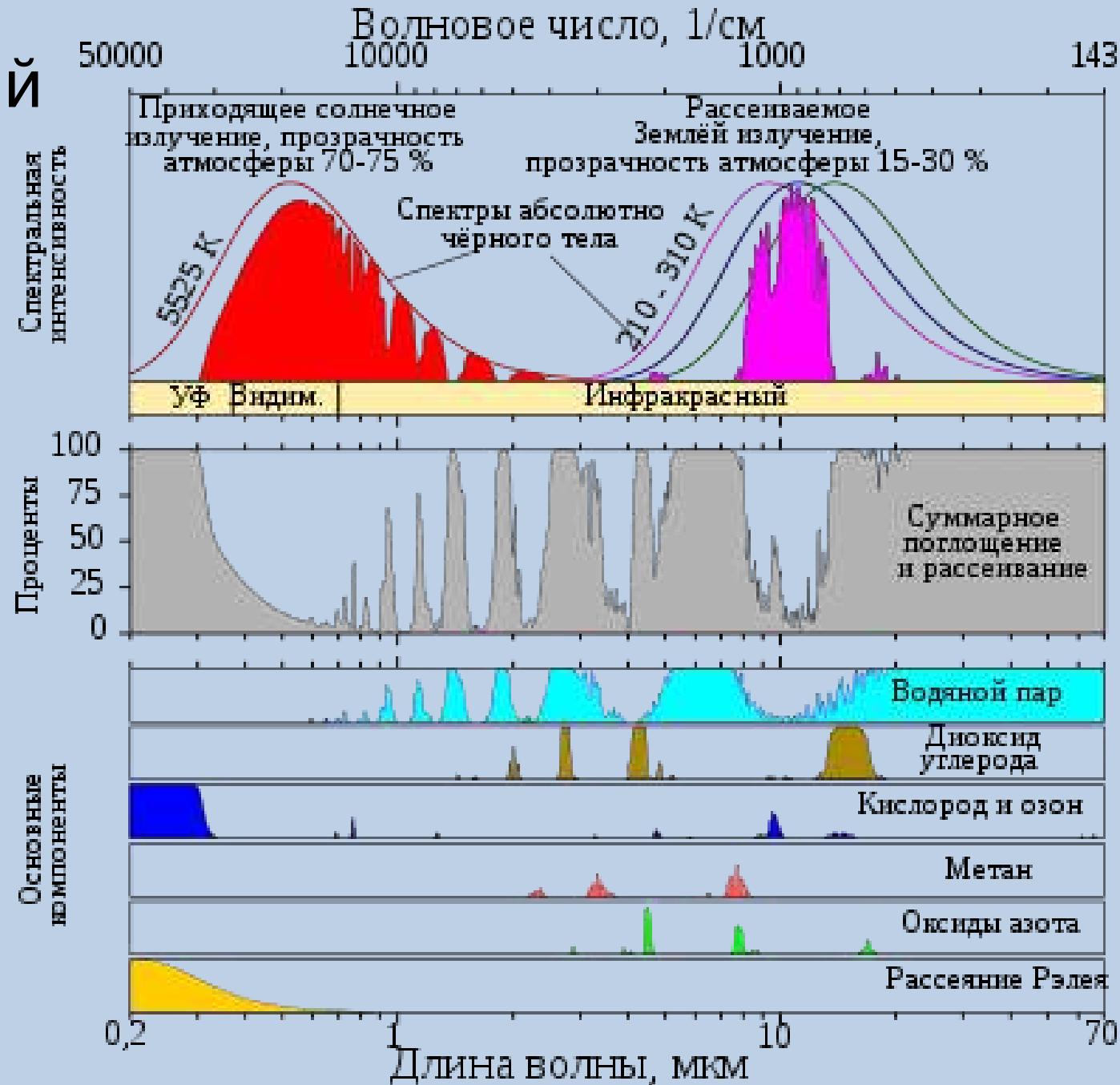
Азот,
кислород, углекислый газ, водяной
пар

Средняя температура: +15°C

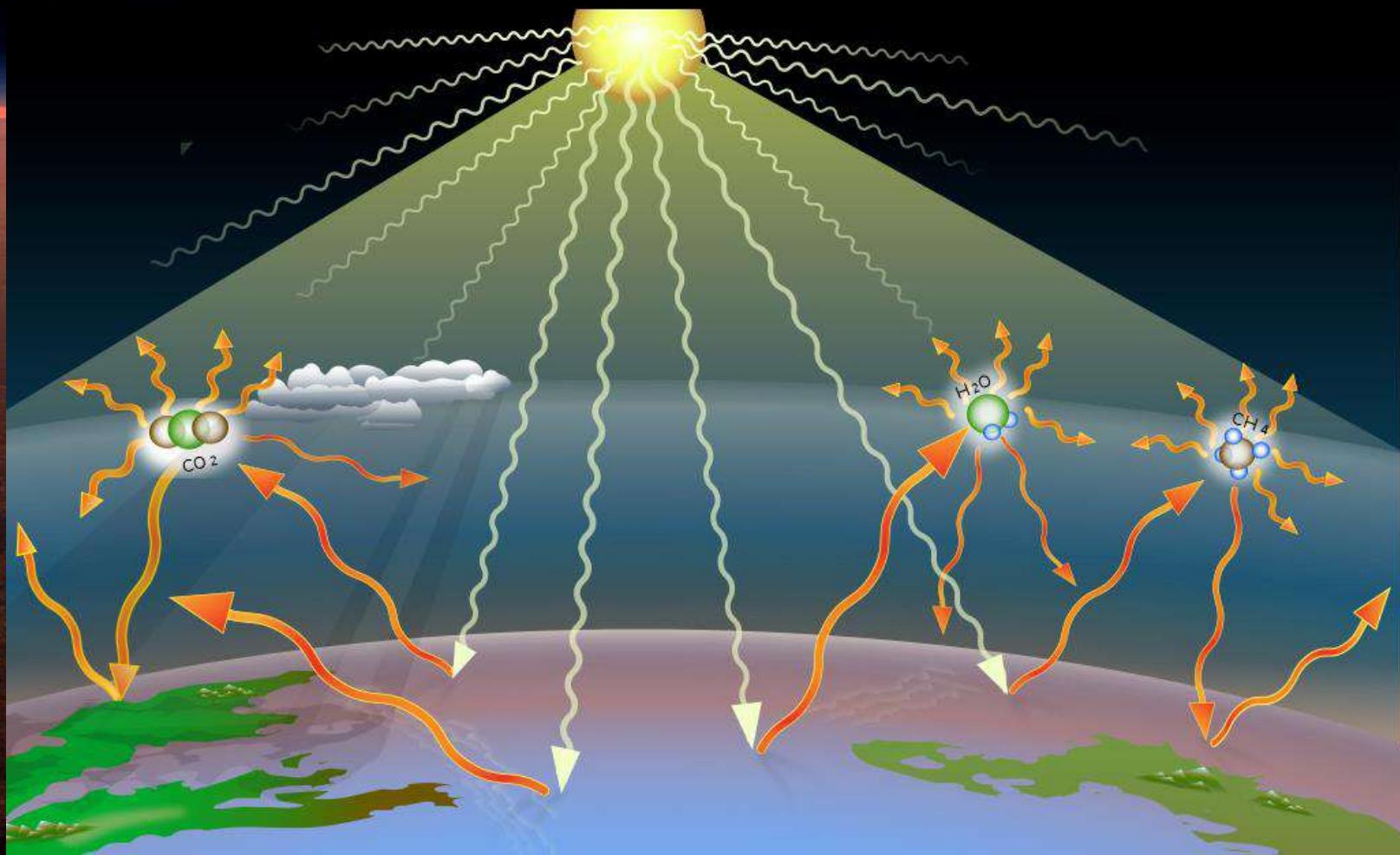


	Средняя температура, °C	Эффективная температура, °C
Меркурий	167	+160
Венера	465	-42
Земля	15	-17
Луна	-20	-3
Марс	-65	-63
Уран	-195	-220
Нептун	-200	-227
Плутон	-225	-219

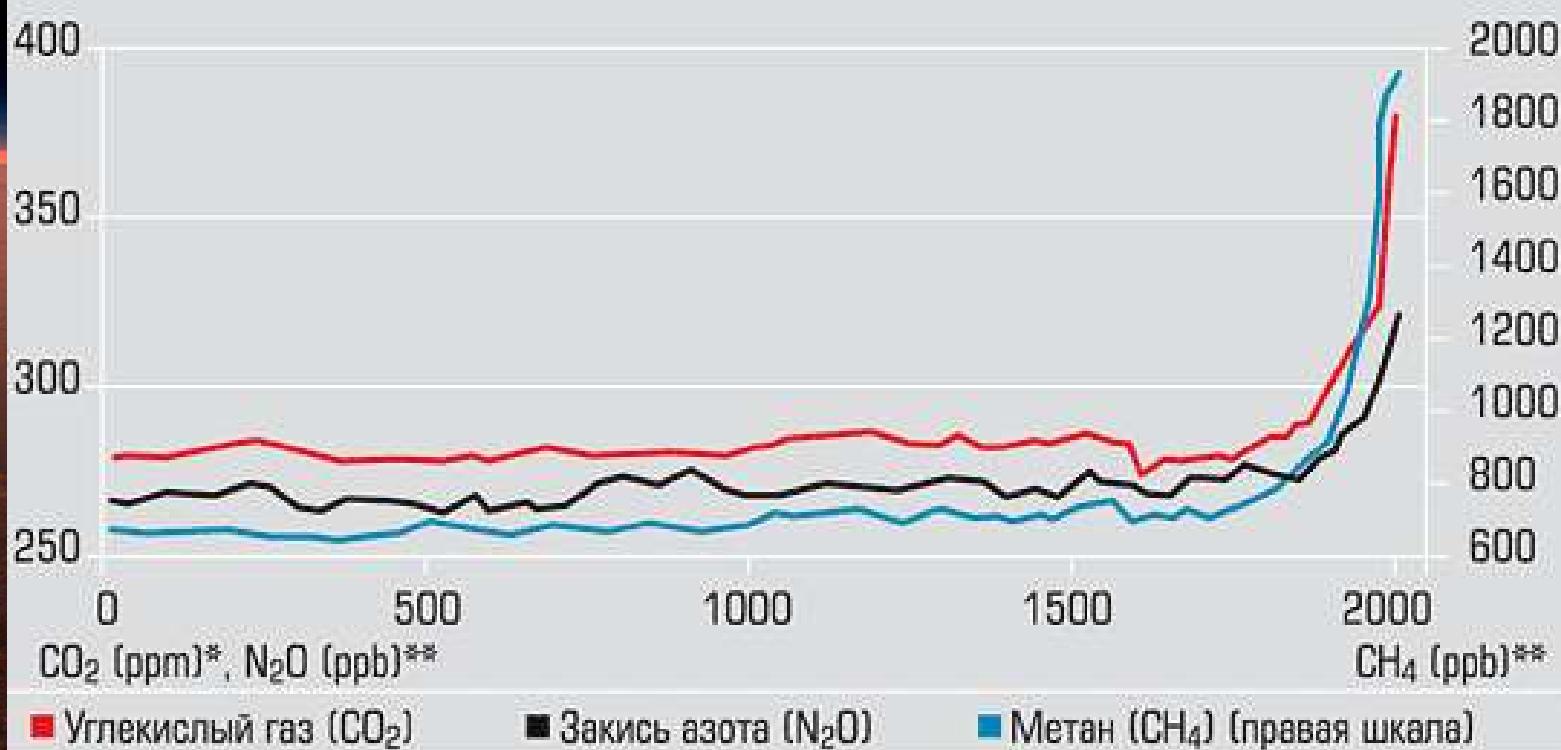
Парниковый эффект



Парниковый эффект



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



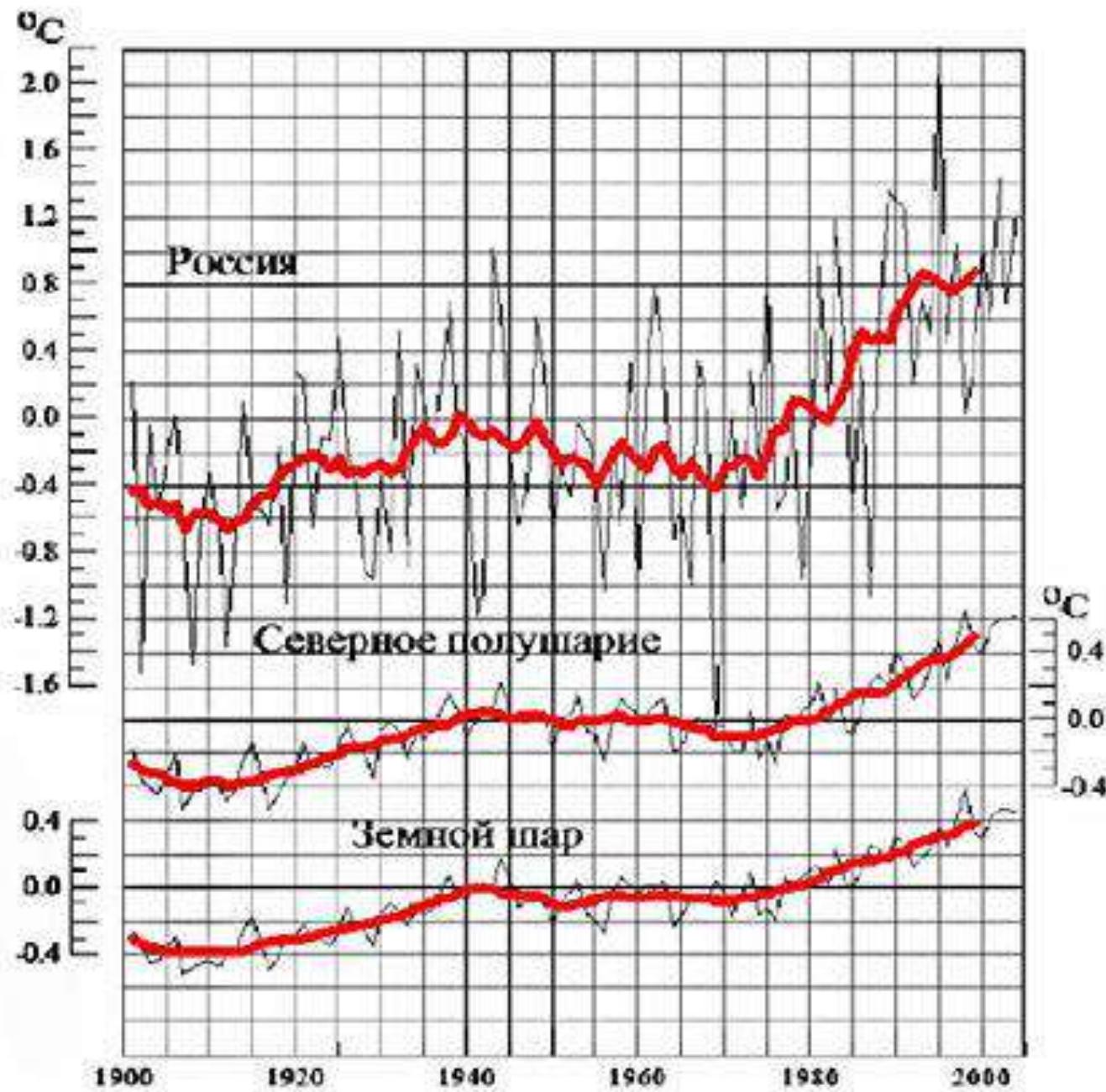
*ppm – частей на миллион.

**ppb – частей на миллиард.

Источник: Изменение климата, 2007 г. Физическая научная основа. (IPCC)

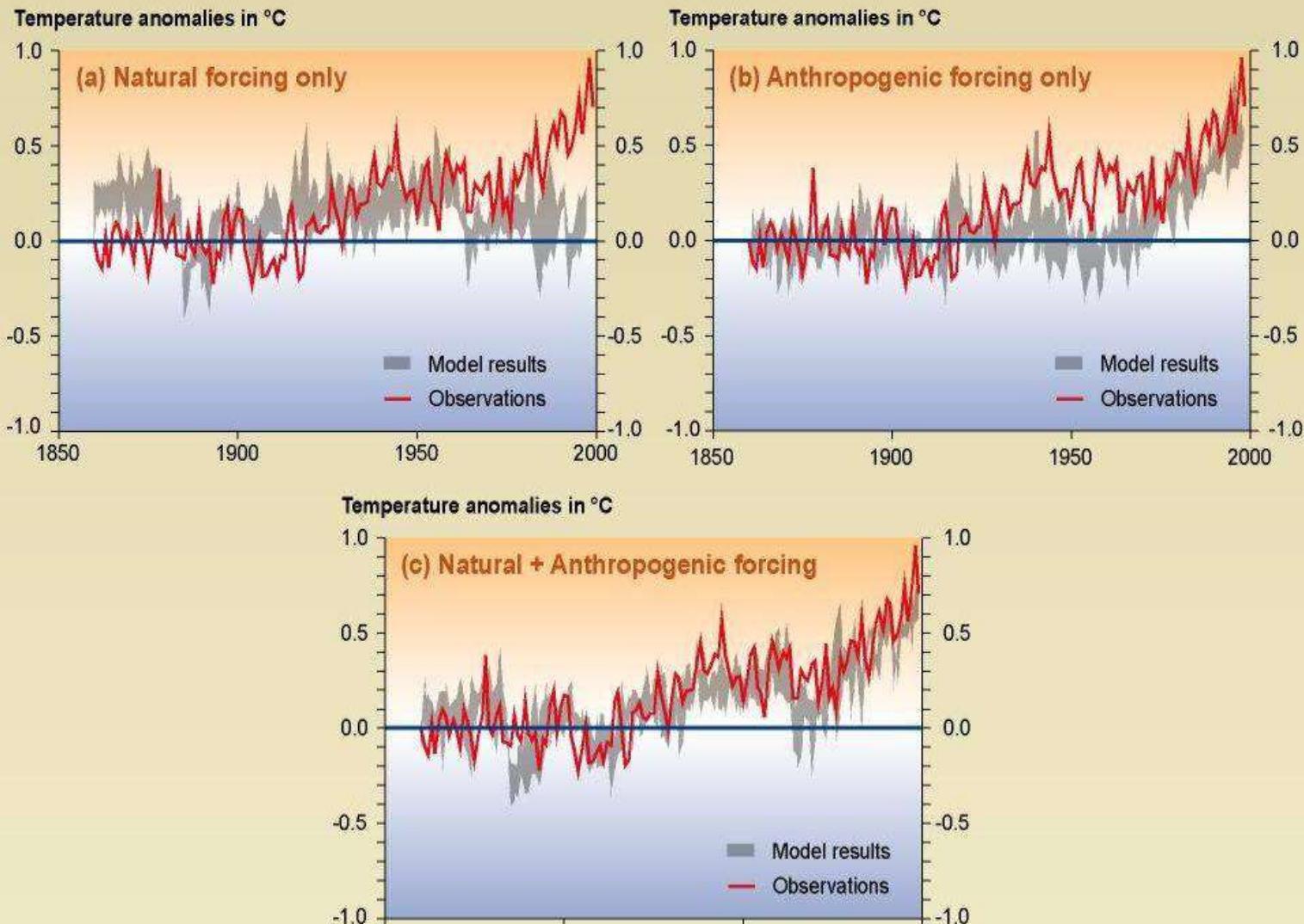
1884



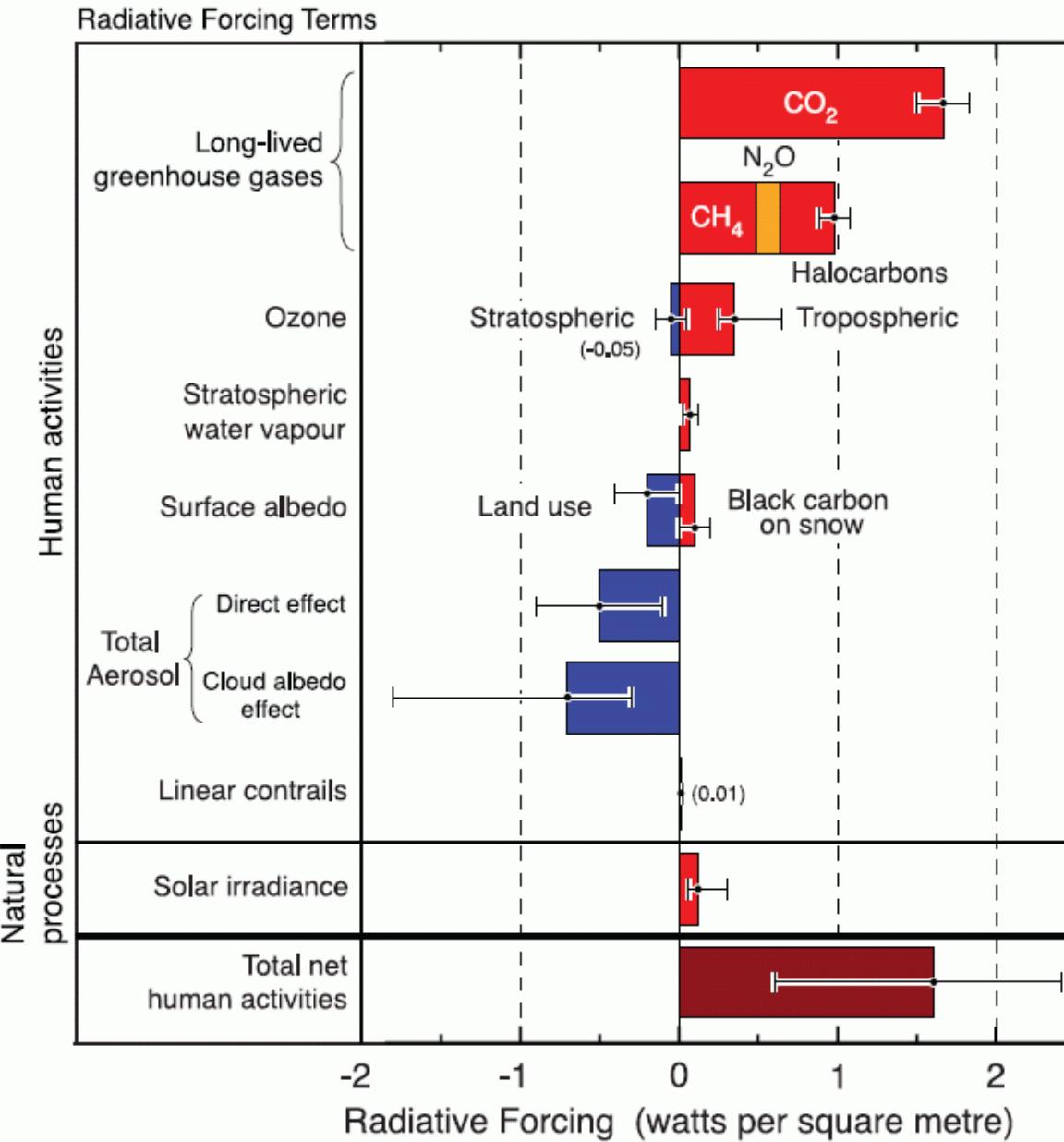


Увеличение температуры примерно совпадает с результатами моделирования

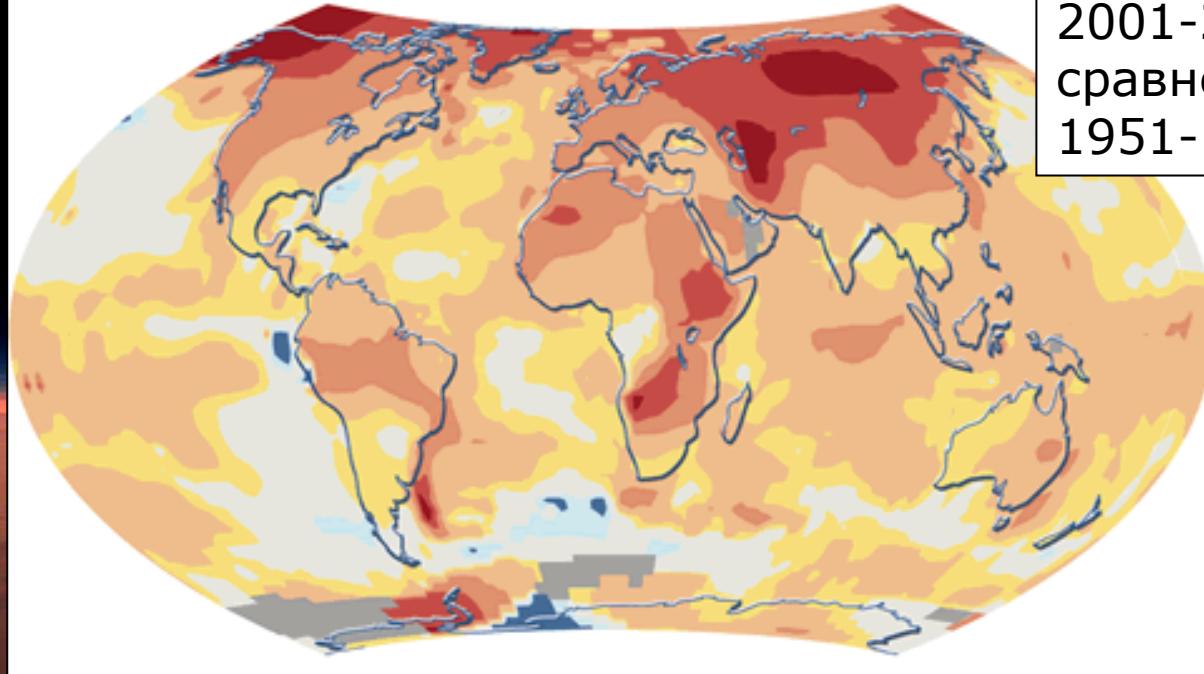
Comparison between modeled and observations of temperature rise since the year 1860



Radiative forcing of climate between 1750 and 2005



Температура в
2001-2005 гг. в
сравнении с
1951-1980 гг.



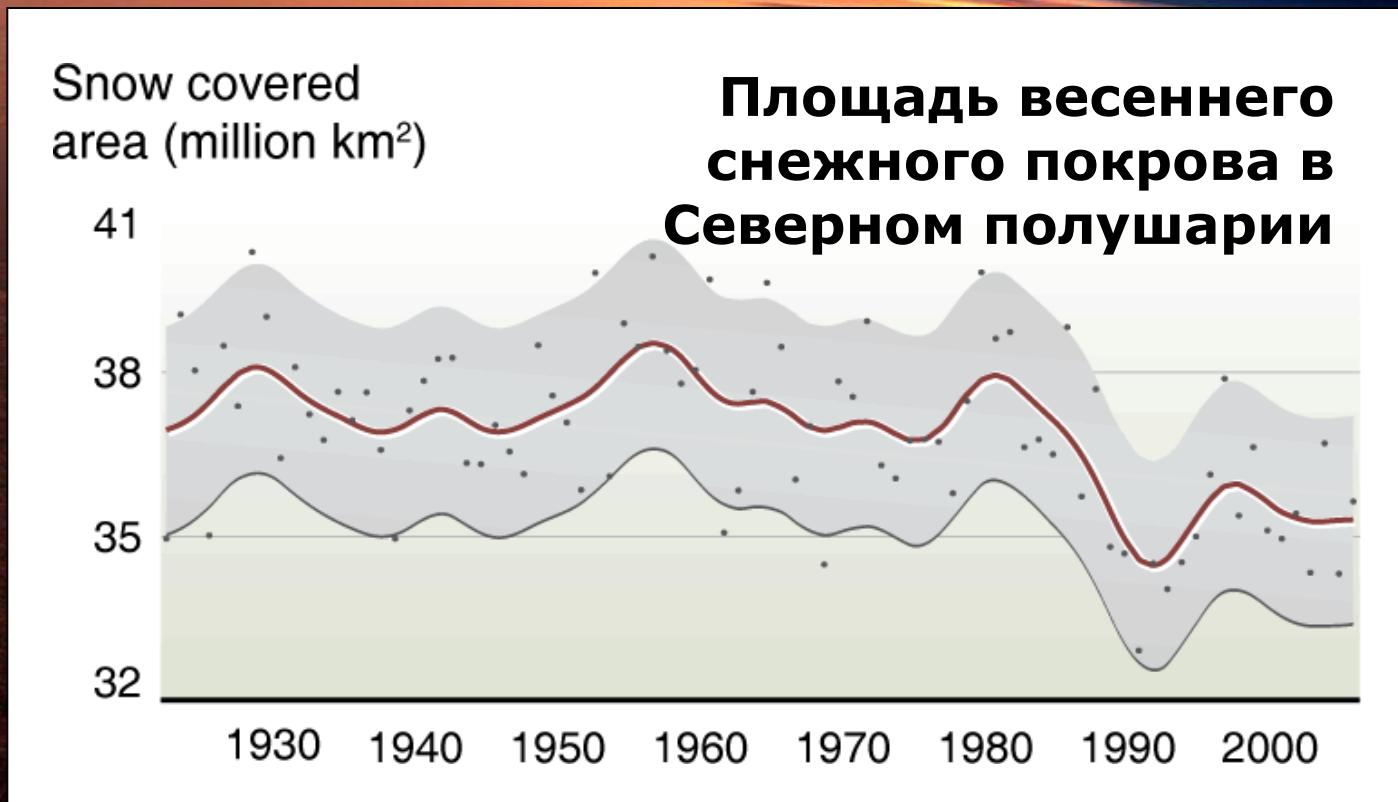
- Потепление в Арктике происходит в два раза быстрее чем в остальной части мира.
- Во многих районах потепление в горах происходит быстрее чем на равнине.



Снег влияет на климат благодаря своему изоляционному свойству и способности отражать солнечный свет.

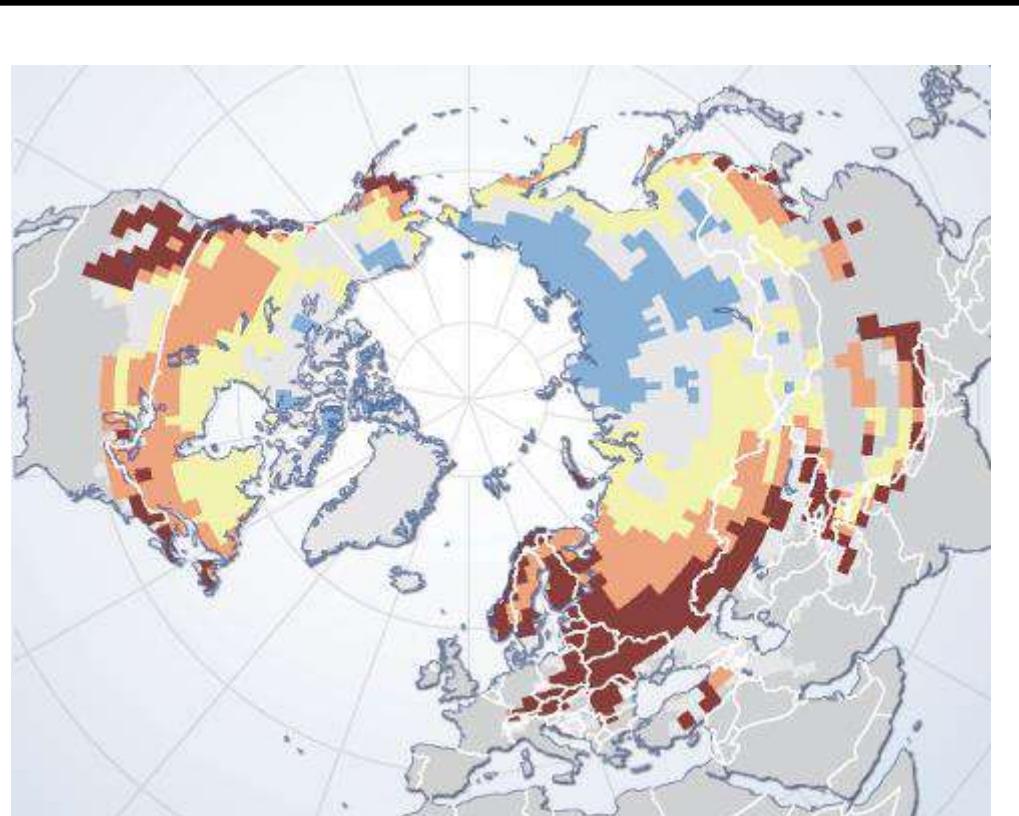
Snow

В Северном полушарии снежный покров продолжает уменьшаться, особенно весной и летом. Здесь снежный покров в среднем уменьшается на 1.3% в 10 лет.



Самое большое
уменьшение снега
в средней широте
ожидается в конце
21 века.

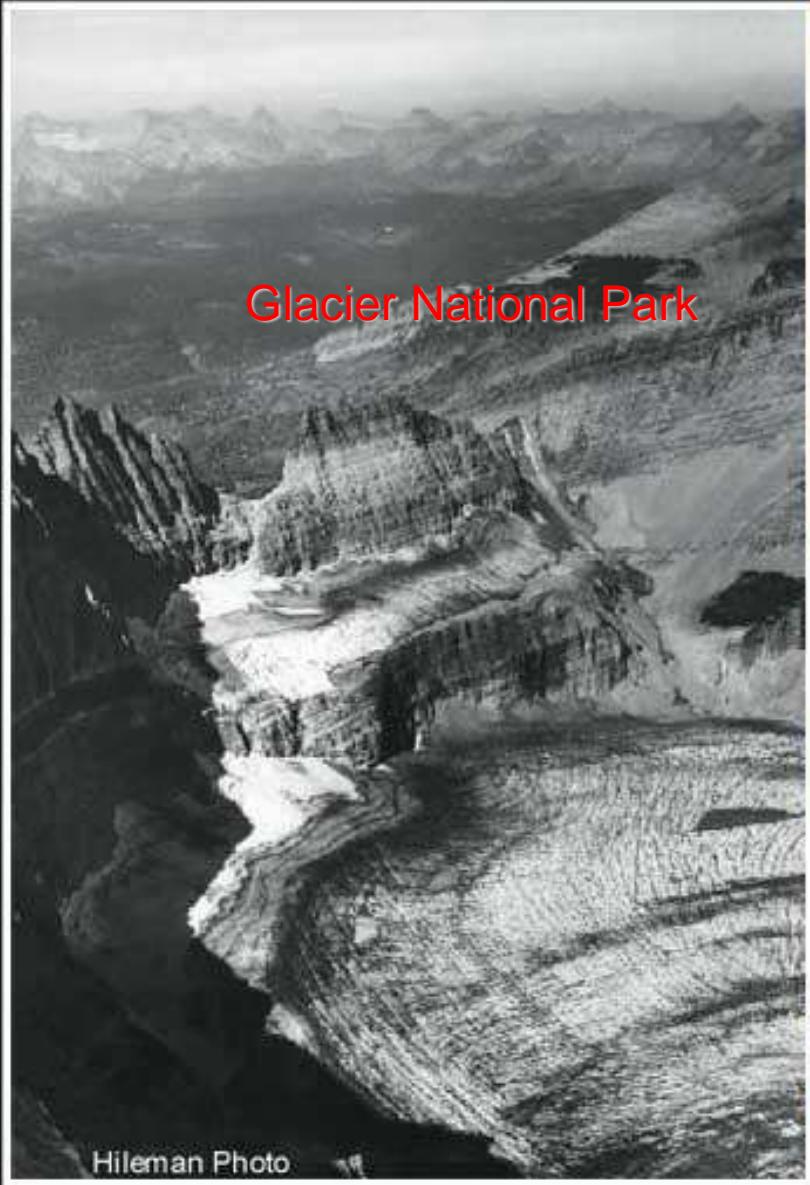
Согласно прогнозам
снеговая линия
поднимется во многих
горных районах



Желтый-красный меньше снега
Синий много снега

Ледники: взгляд

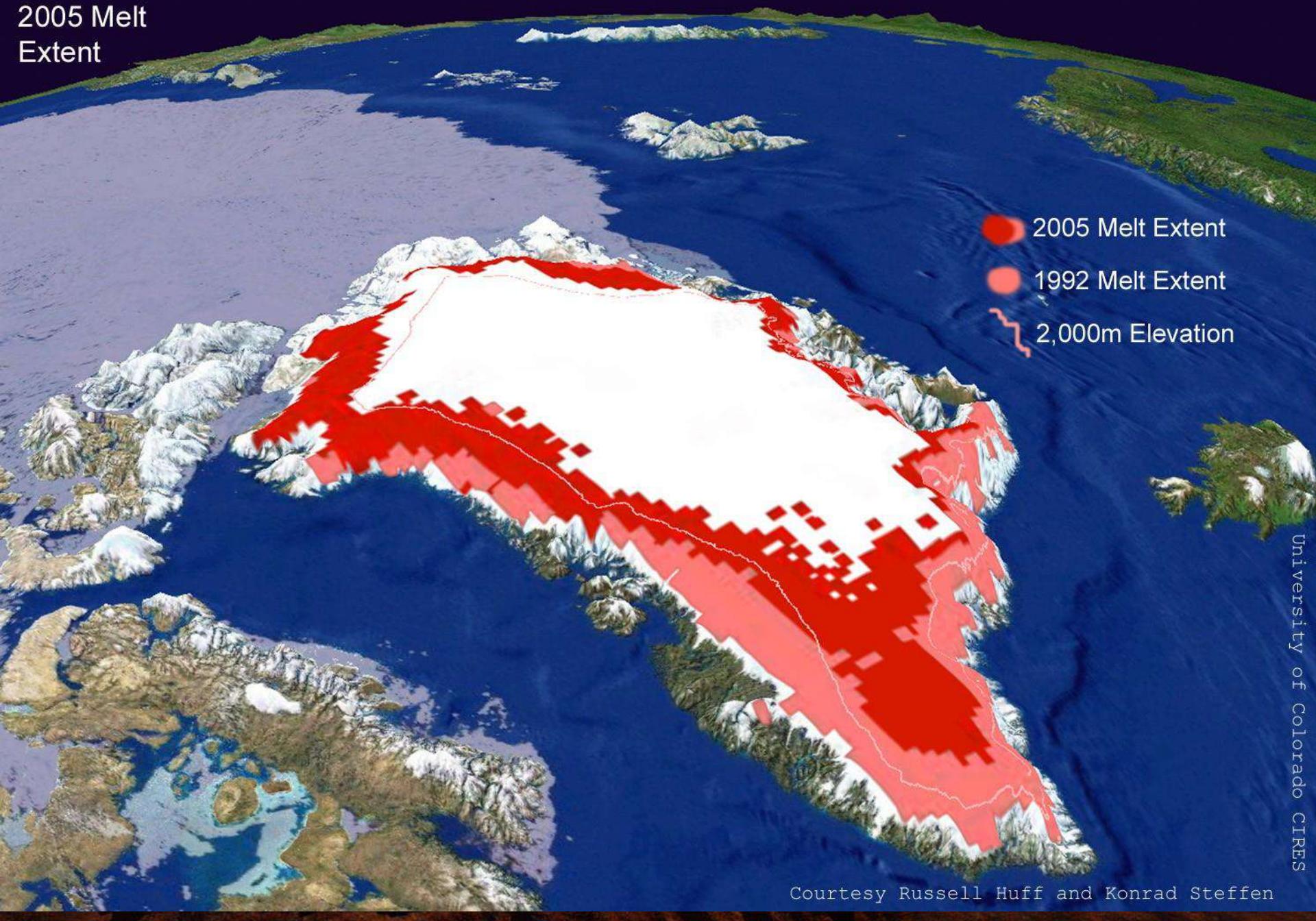




Hileman Photo

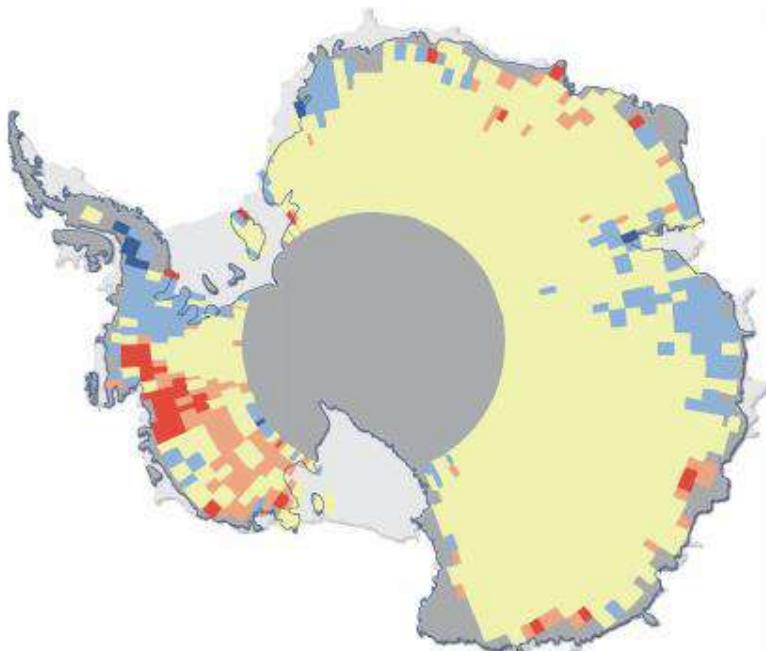


2005 Melt Extent



Ледяной покров: тенденции

Антарктика: последние изменения



Желтый = нет или
маленькоe изменение

Голубой = накопление
снега

Красный = менее
массовый (таяние и
расход льда)

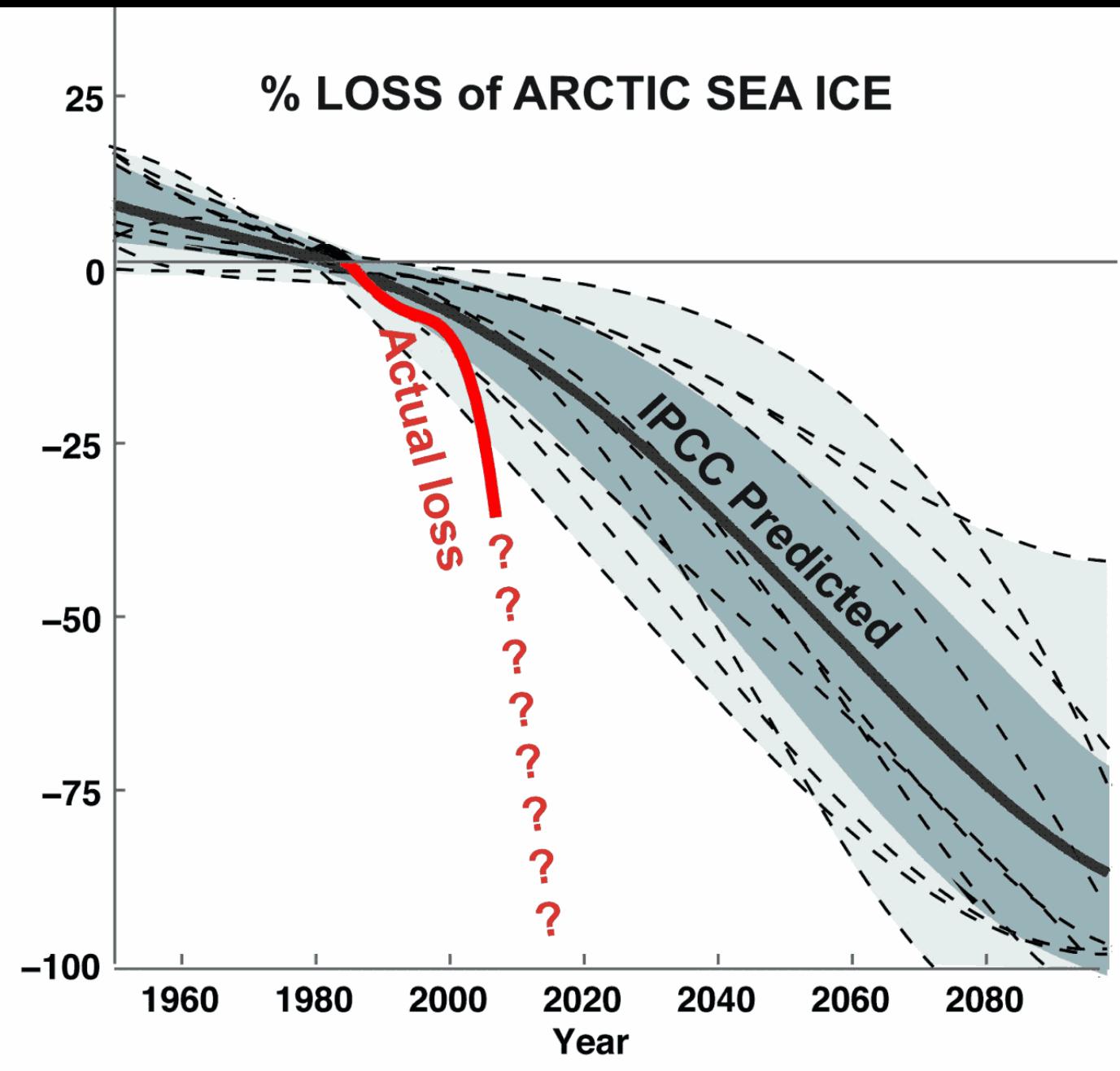
- Относительно изменений массы льда в Антарктическом ледяном покрове за последнее время пока неясно, хотя возможно произошло снижение массы.
- Шельфовые ледники становятся тоньше, а некоторые тают.

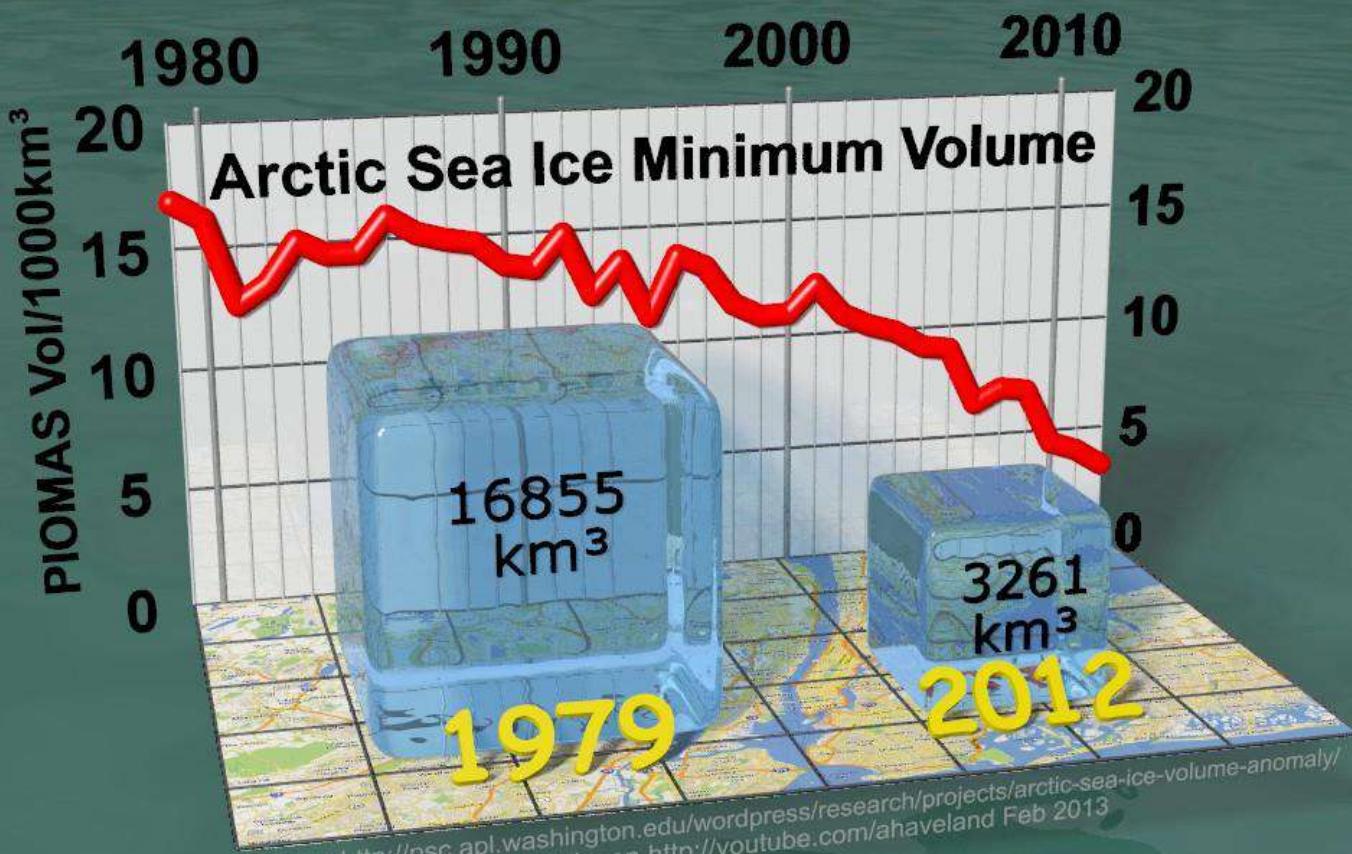
Тающая Арктика



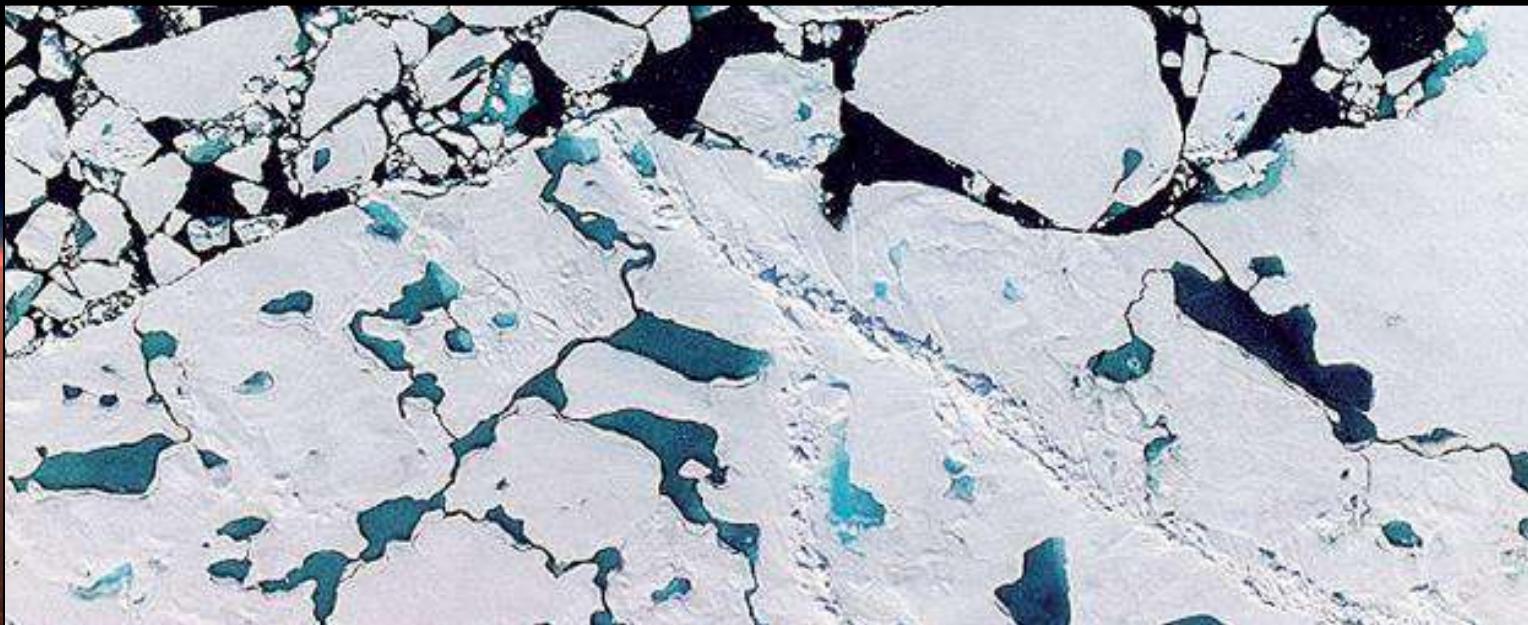
Область льдов сокращается ~10% каждые 10 лет,
Толщина льда сокращается на ~1 м за 10 лет, если
тенденции продолжатся, Артика освободится ото
льда к 2030 – 2050 году.







Морской лед: воздействия

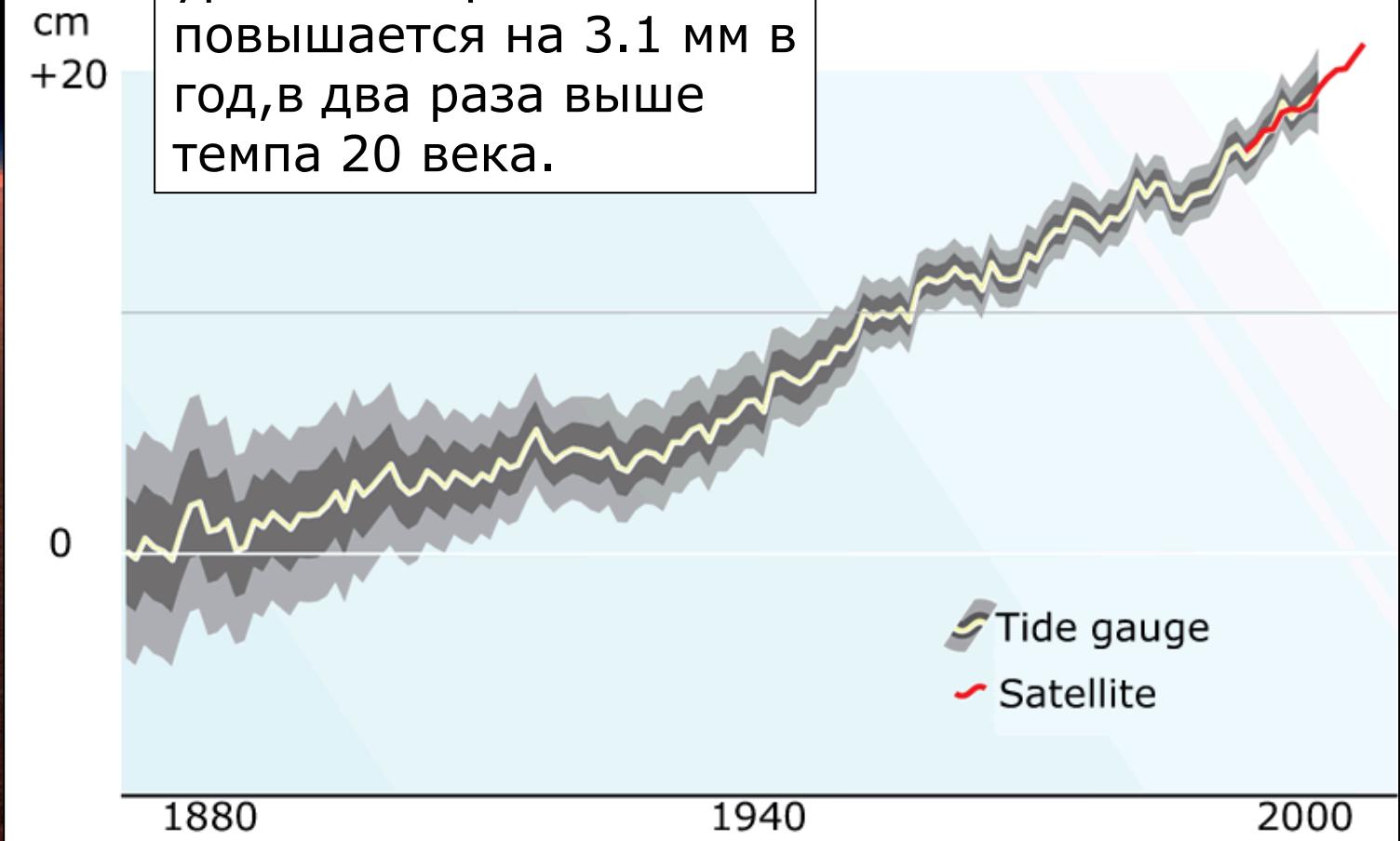


Don Perovich

- Тающий морской лед, в сочетании с тающими ледниками и ледовыми щитами, может вызвать огромные изменения в глобальной модели океанического течения. Как и снег, уменьшение морского льда повышает поглощение солнечного тепла, что ведет к повышенному потеплению.

Подъем уровня моря: тенденции

В настоящее время
уровень моря
повышается на 3.1 мм в
год, в два раза выше
темпа 20 века.



Вклады в

Повышение уровня моря: перспектива уровня моря.

Гренландский ледяной щит

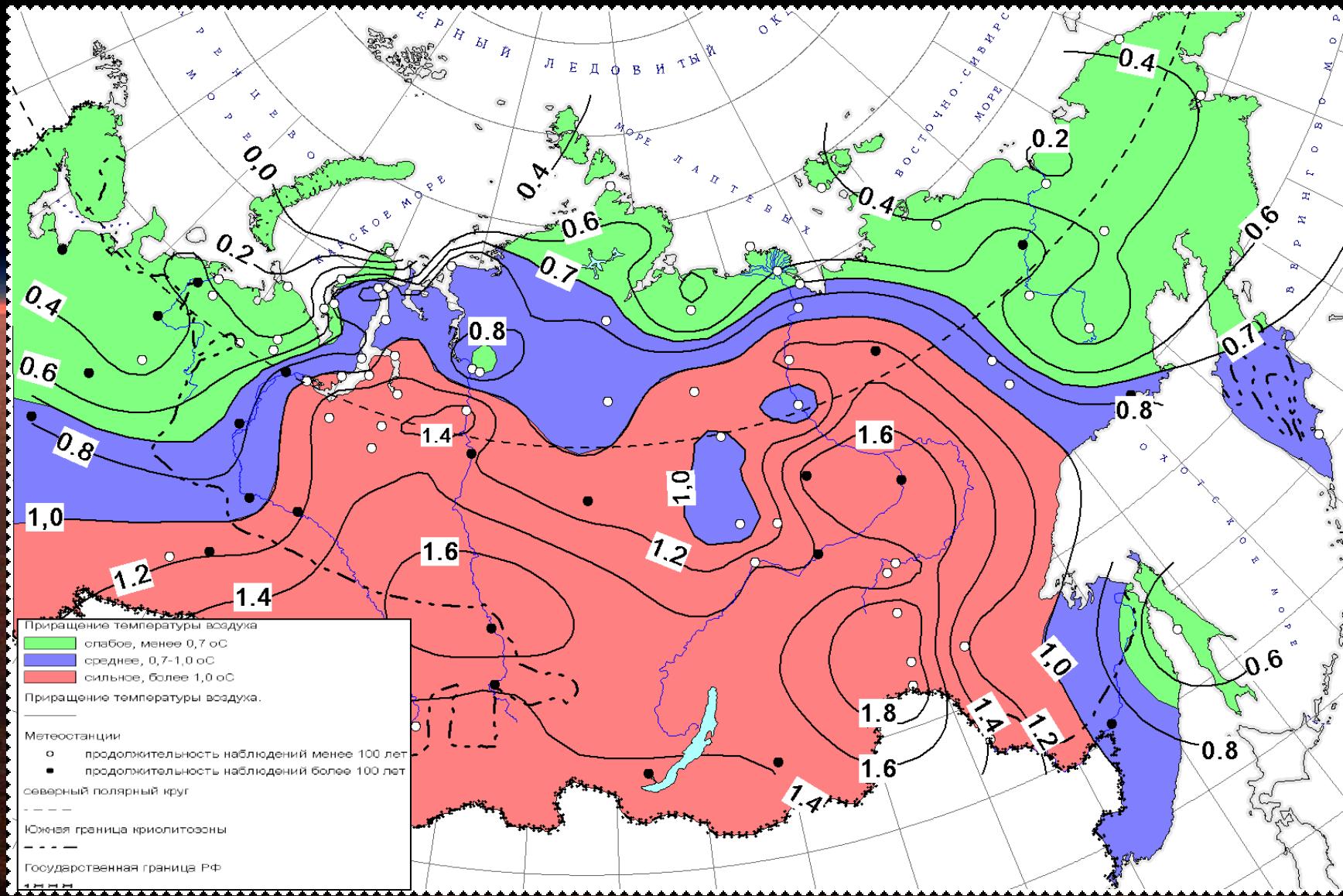
Антарктический ледяной щит

Ледники и ледяные шапки

Термальное расширение океана

Повышение уровня моря от талых вод по прогнозам может ускориться вследствие увеличения таяния льда на суше.

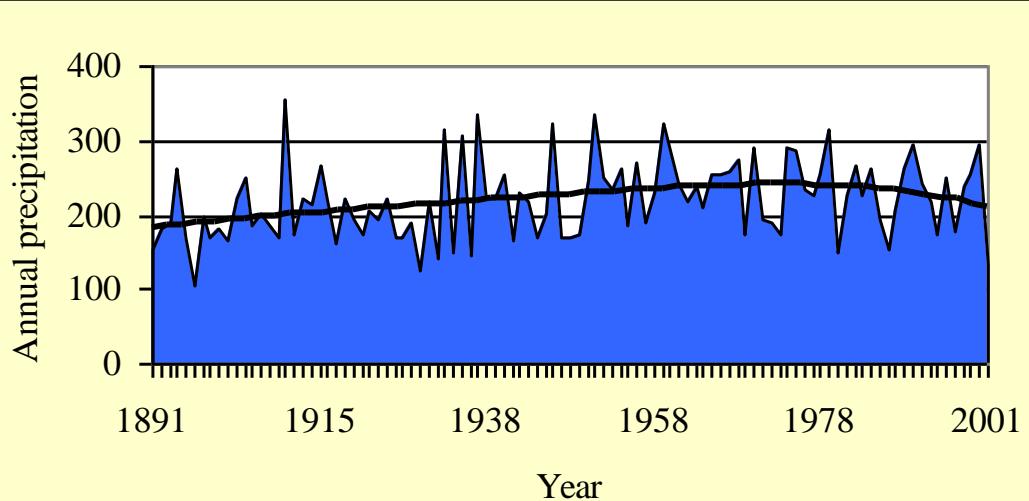
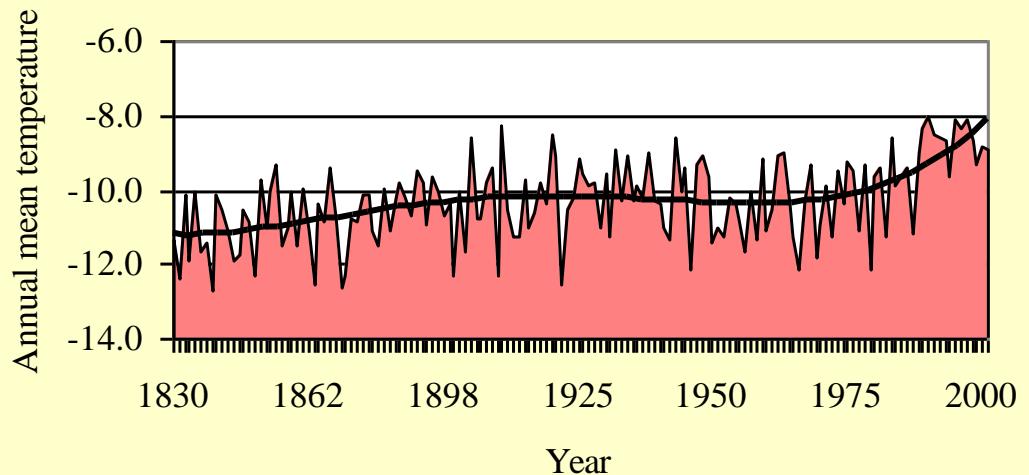
В долгосрочном плане, ледяные щиты способствуют повышению уровня моря.



ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ?

Во второй половине 1990-х годов в ряде районов Севера зафиксировано небольшое похолодание климата. За последнее десятилетие в целом (1991-2000 гг.) темпы потепления климата резко снизились, на территории Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции выявлены тенденции к прекращению потепления климата

НЕФТЕГАЗОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ	ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, град. С	
	С начала потепления по 2000 г.	За 1991-2000 гг.
Тимано-Печорская	0,6	-0,1
Западно-Сибирская	1,4	0,2
Лено-Тунгусская	1,3	0,2
Лено-Вилуйская	1,5	0,3



Многолетнемерзлые грунты: тенденции

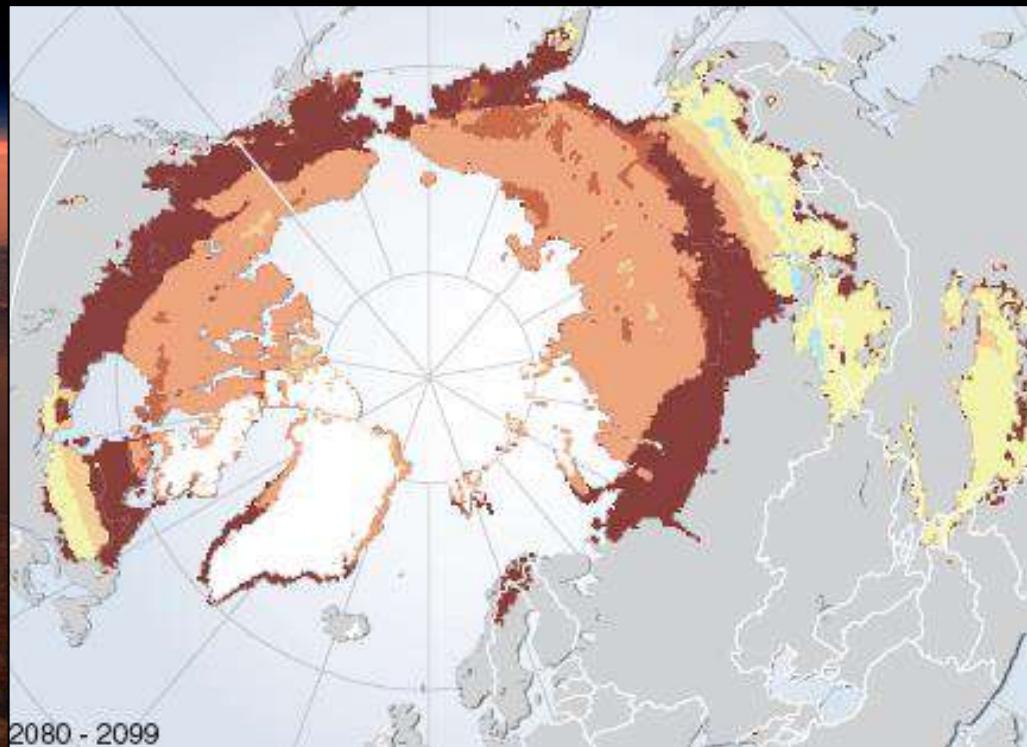
- Температура многолетнемерзлых грунтов за последние 20-30 лет повысилась почти во всех регионах Северного полушария.
- Подтверждено потепление в районе мерзлоты в горах.
- Пока не происходит повсеместное таяние.

многолетнемерзлые
грунты в Северном
полушарии



Таяние многолетнемерзлых грунтов согласно прогнозам ожидается в Субарктике к концу 21 века.

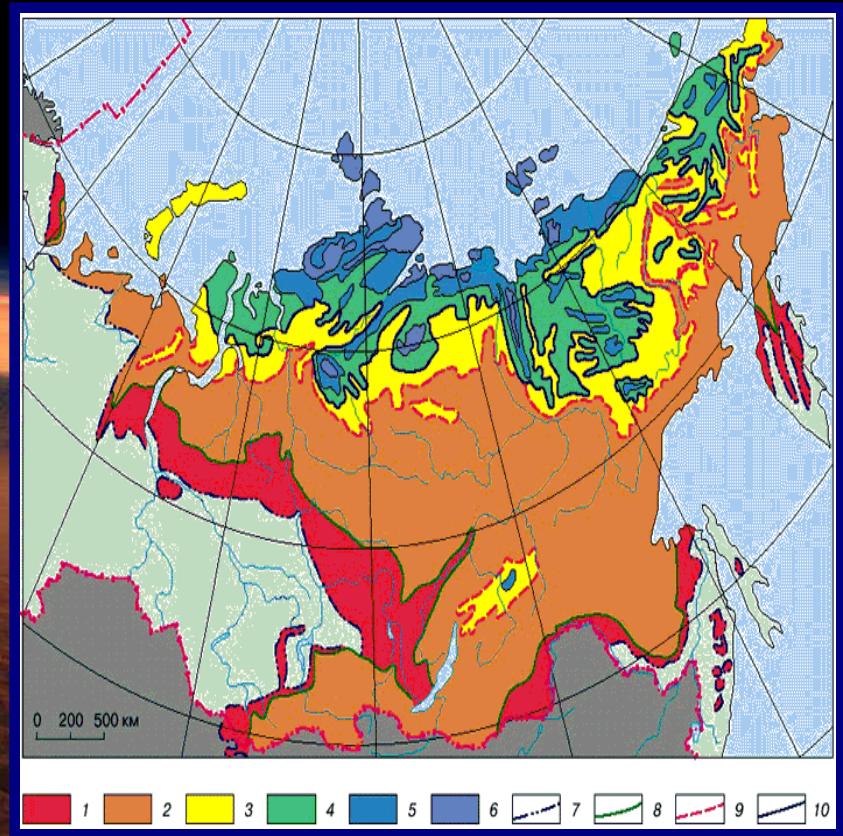
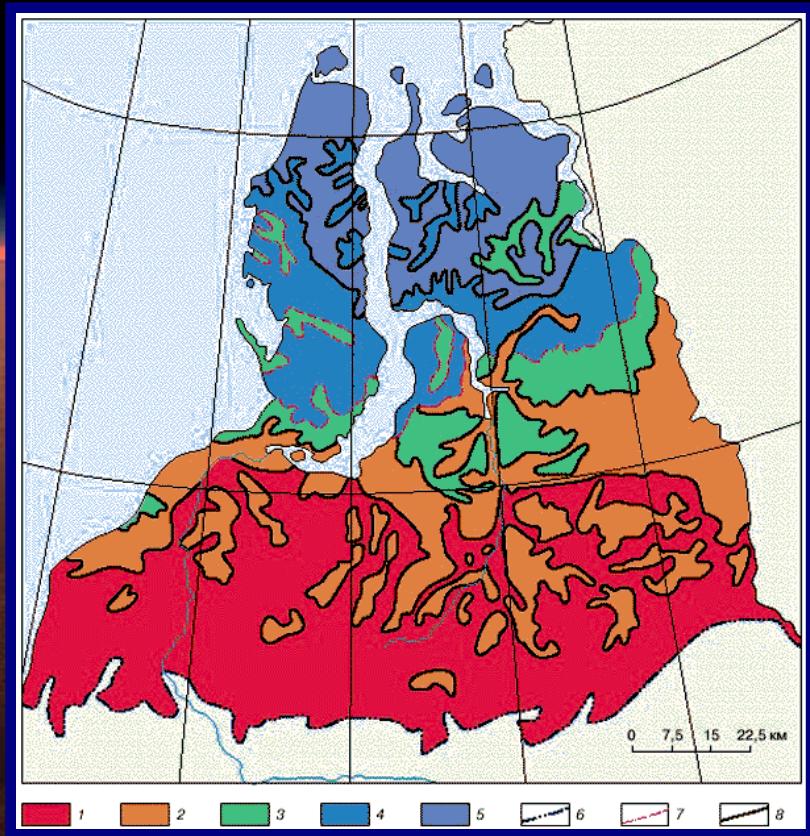
Вечная мерзлота: взгляд



Прогнозируемые изменения температуры вечной мерзлоты к 2080 - 2099

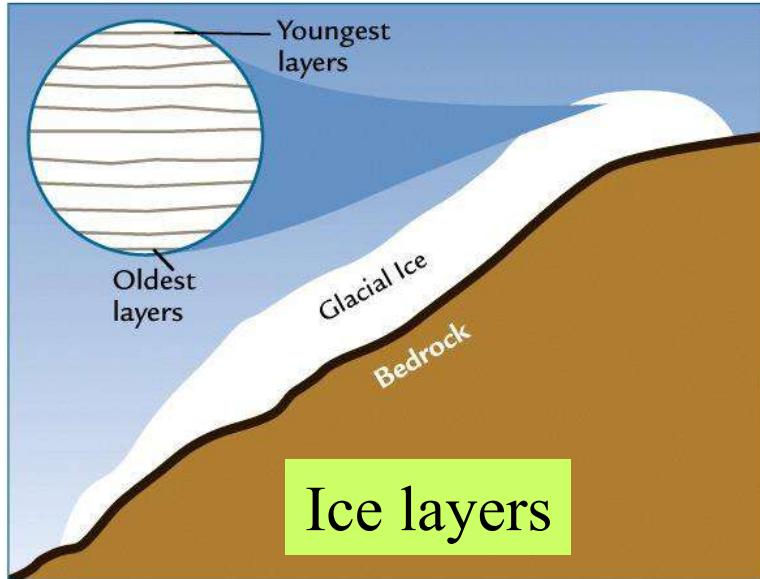
Темно красным цветом отмечены зоны таяния вечной мерзлоты

Возможное оттаивание вечной мерзлоты

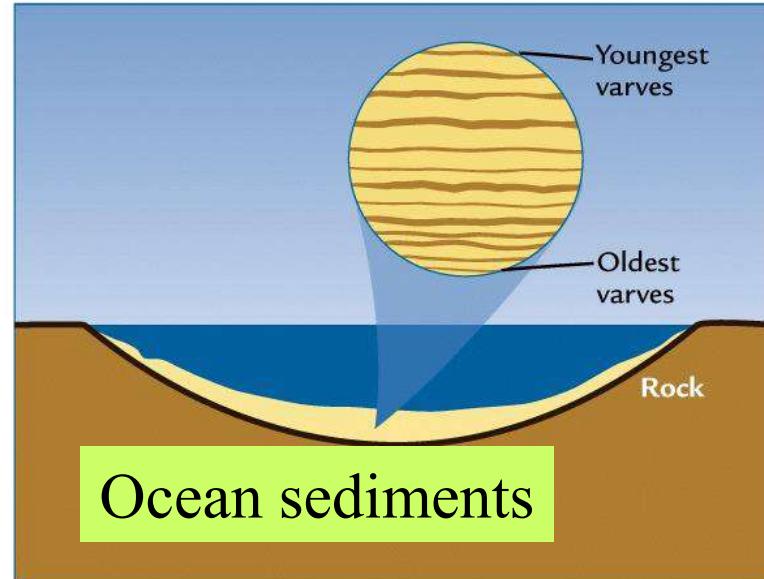


Possible permafrost change 110 years from now (4-5 deg.C): 1 – permafrost melting; 2 – “islands” of permafrost; 3 – discontinuous permafrost; 4 – permafrost of temperature -1-2 deg.C; 5 – permafrost of temperature -2-4 deg.C (Ershov et all., MSU)

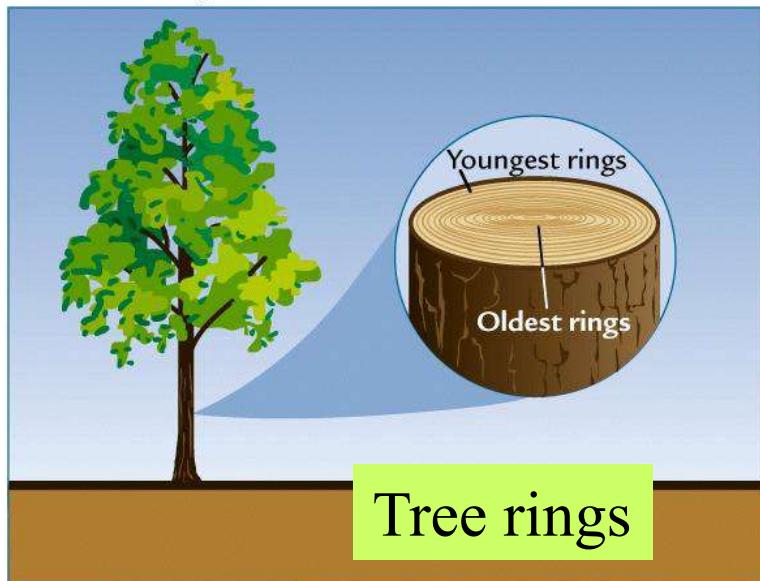
Изучение палеотемператур



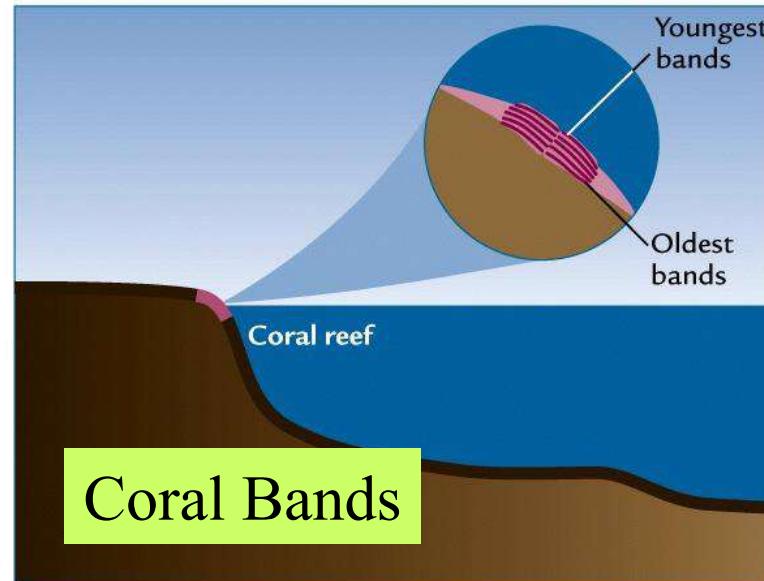
A Annual ice layers



B Annual sediment varves



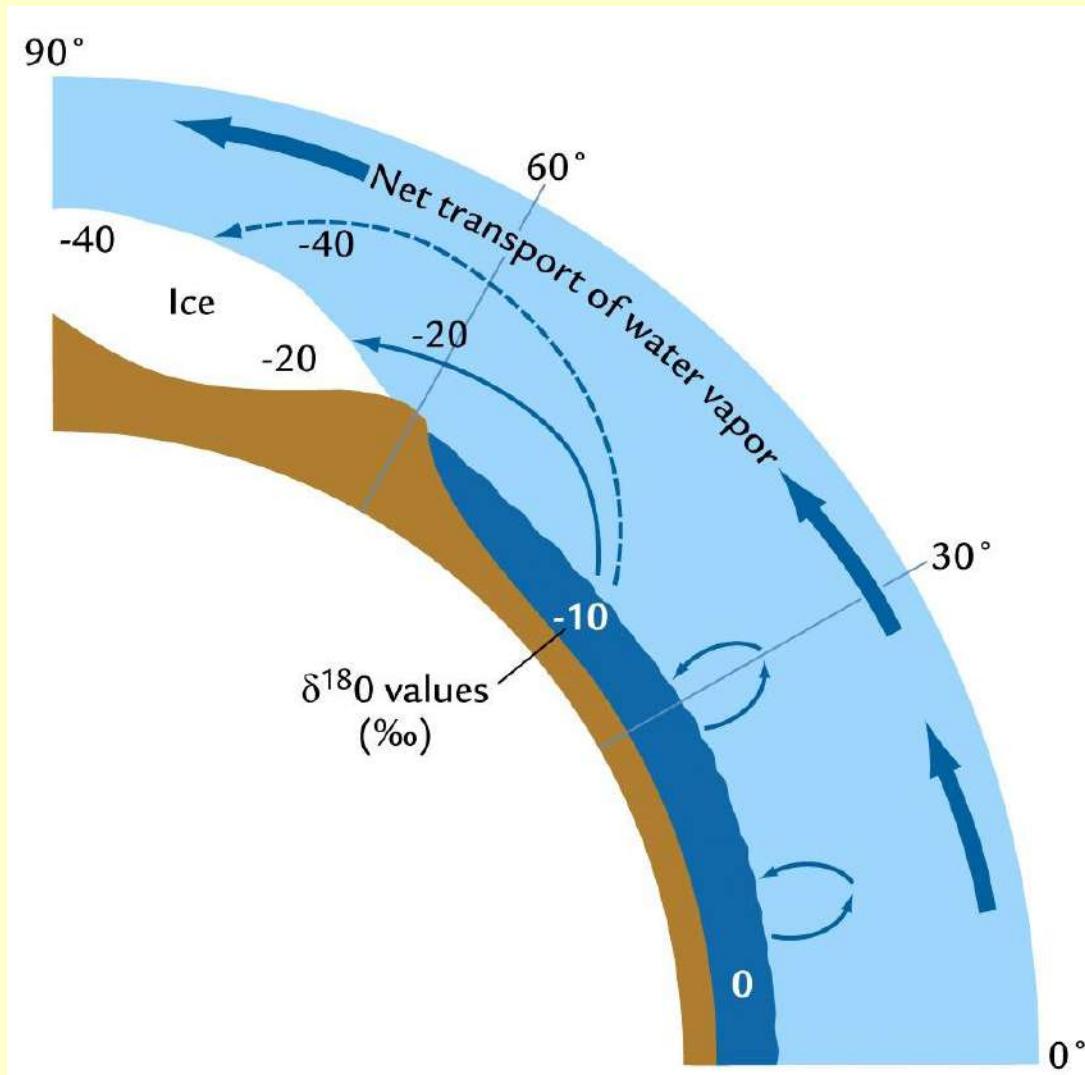
C Annual tree rings

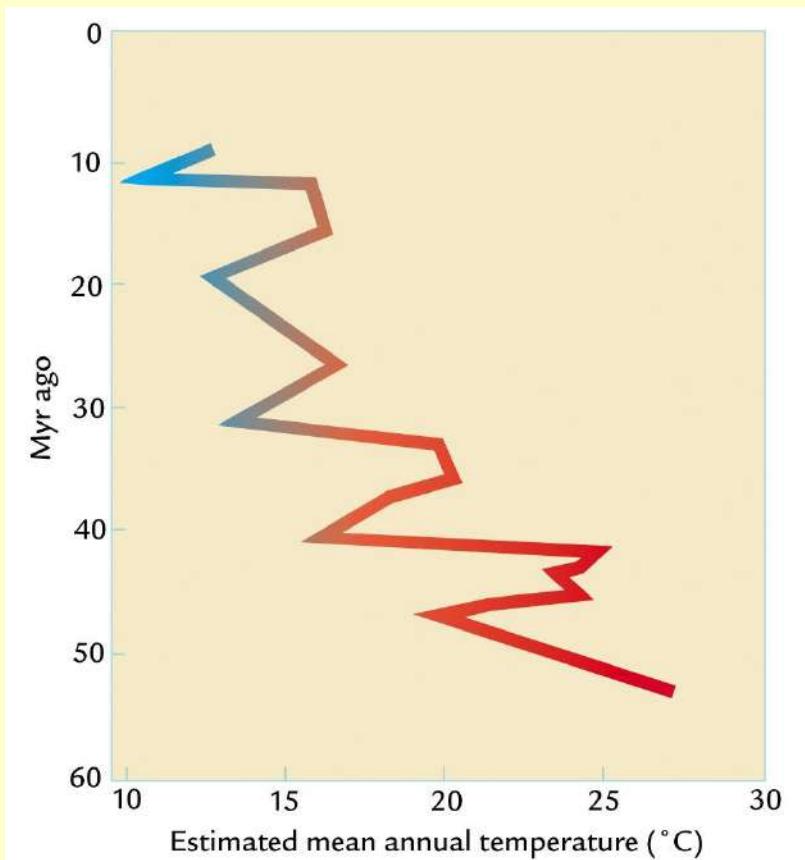
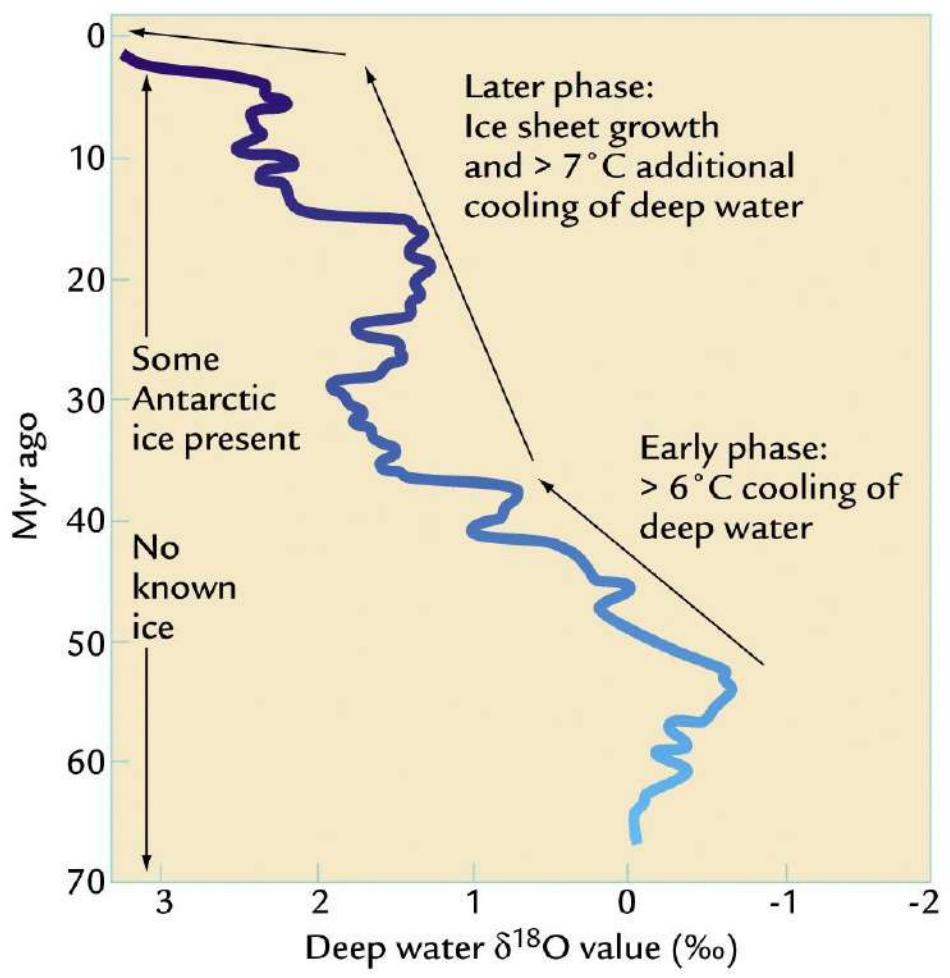


D Annual coral bands

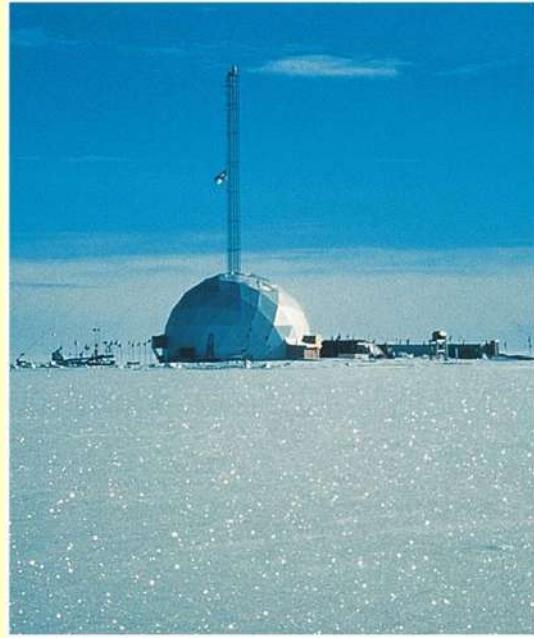
Соотношение O¹⁶ / O¹⁸

δO^{18}

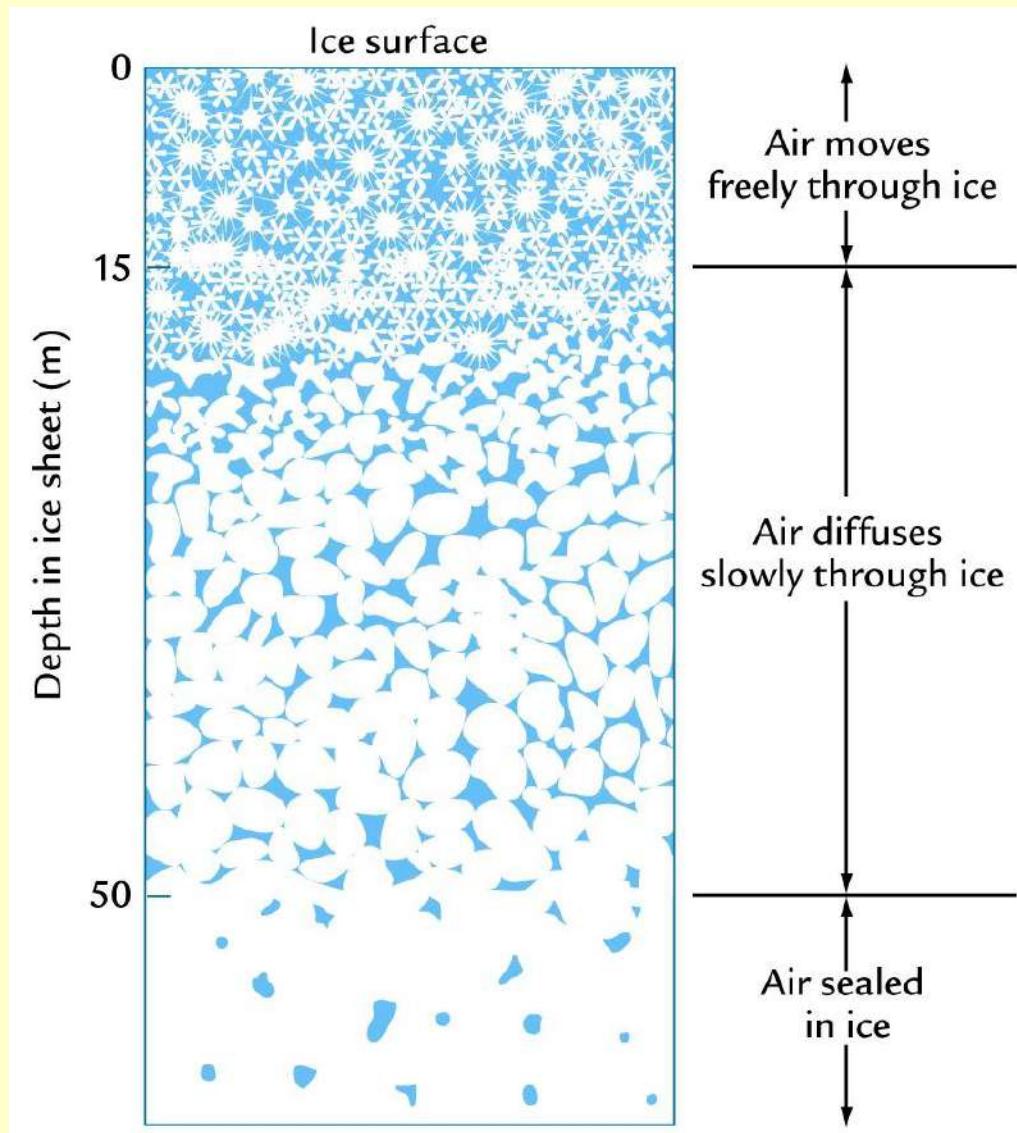




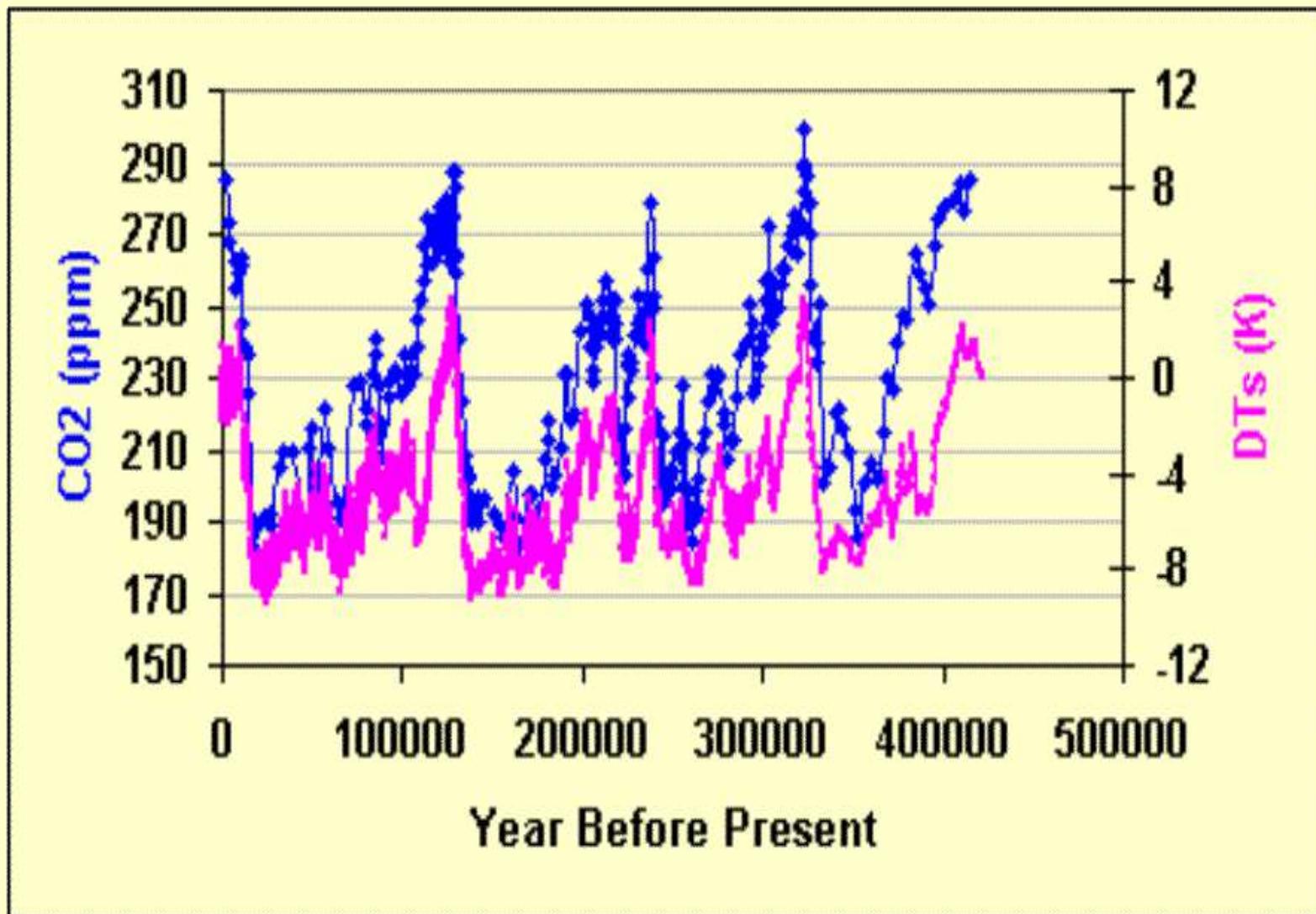
Colder climates → more ^{18}O in deep ocean (less ice snow or ice cores)



Ice core data

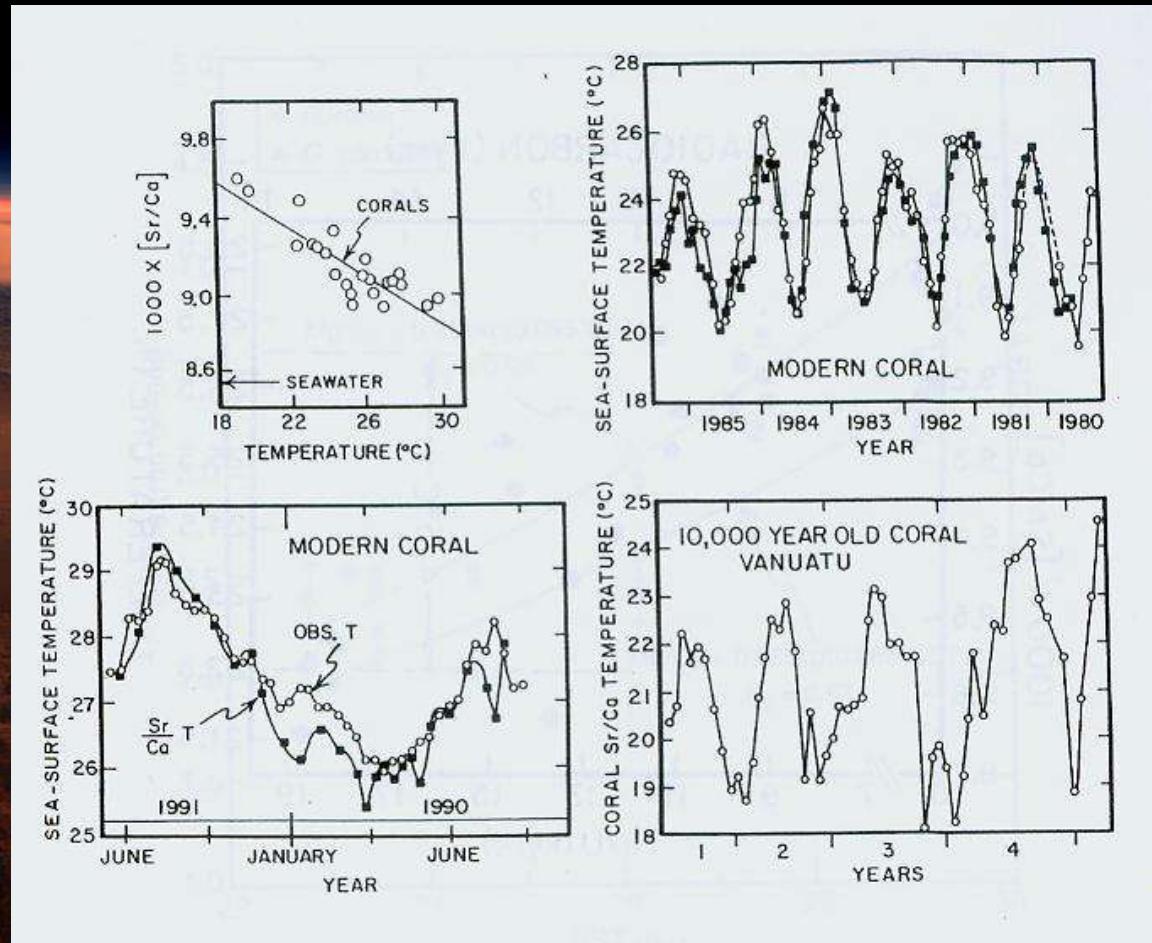


Vostok ice core data



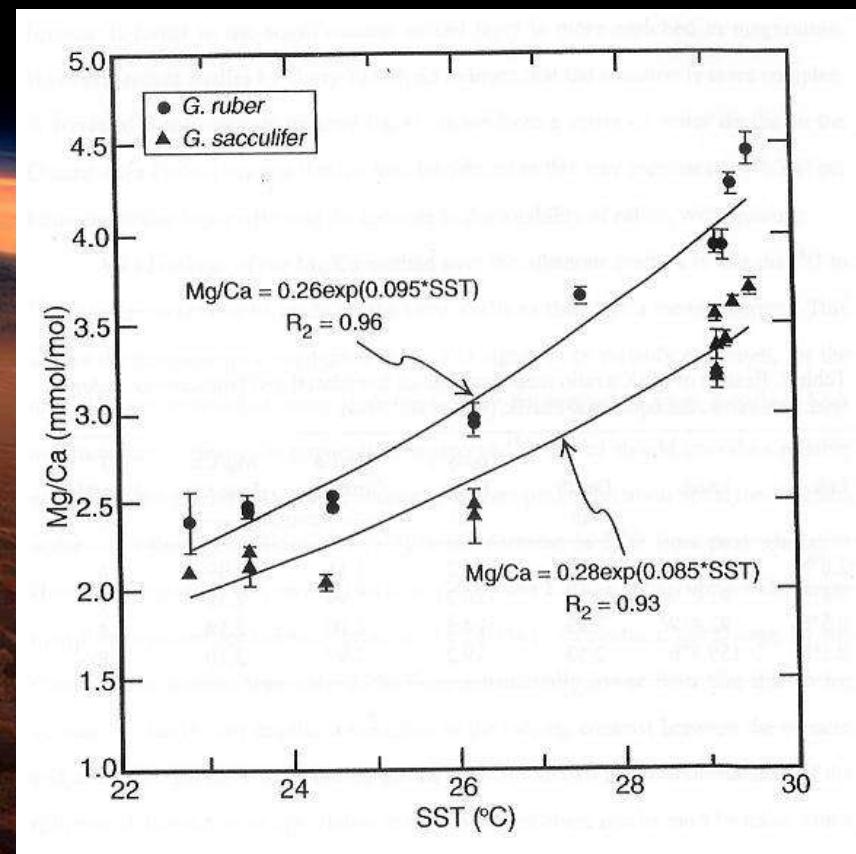
Палеотемпературы: Sr/Ca в кораллах

- Соотношение Sr/Ca зависит от температуры.



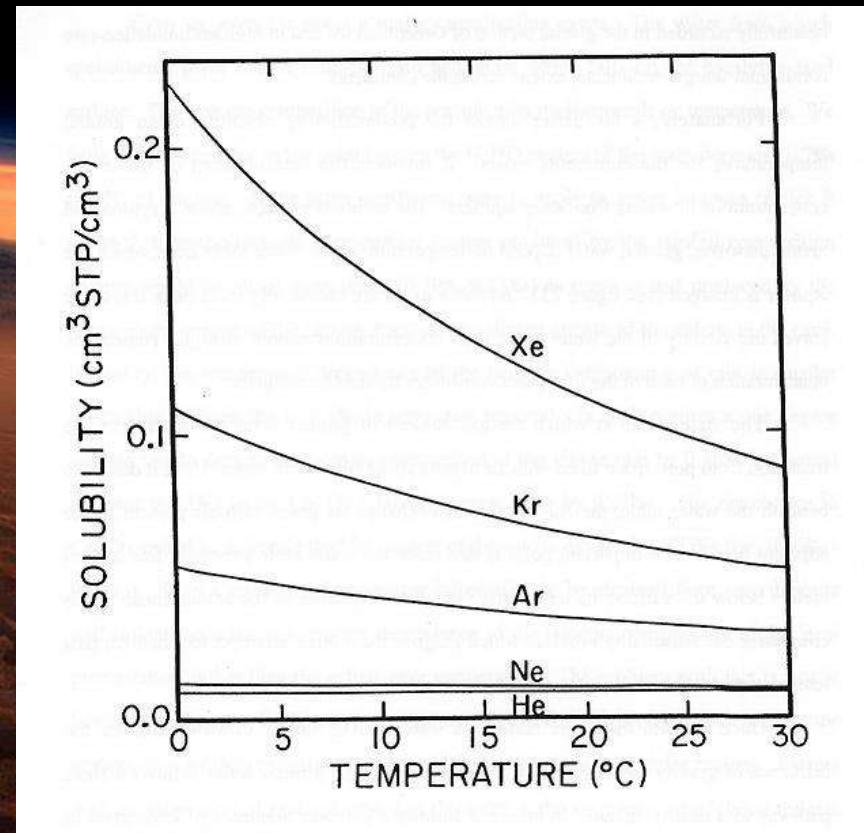
Палеотемпературы: Mg/Ca в планктоне

- Соотношение Mg/Ca в планктонных фораминиферах также зависит от температуры
- Mg/Ca и ^{18}O могут определяться из тех же раковин



Палеотемпературы: содержание инертных газов в воде/льду

- Растворимость инертных газов зависит от температуры
- Эта зависимость разная для различных газов



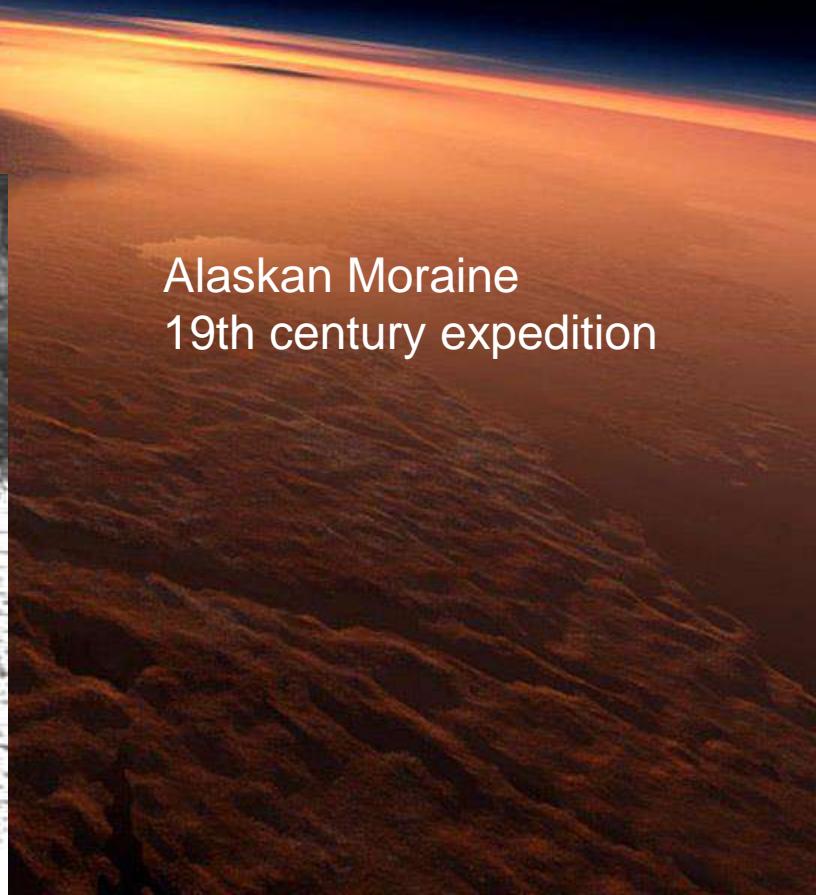
Geomorphic indicators of past climates: Moraines (rock pile at maximum extent of glacier)

Younger Dryas - The Younger Dryas stadial, also referred to as the Big Freeze, was a geologically brief ($1,300 \pm 70$ years) period of cold climatic conditions and drought which occurred between 12,800 and 11,500 years BP

Waiho Loop Moraine,
New Zealand



Alaskan Moraine
19th century expedition

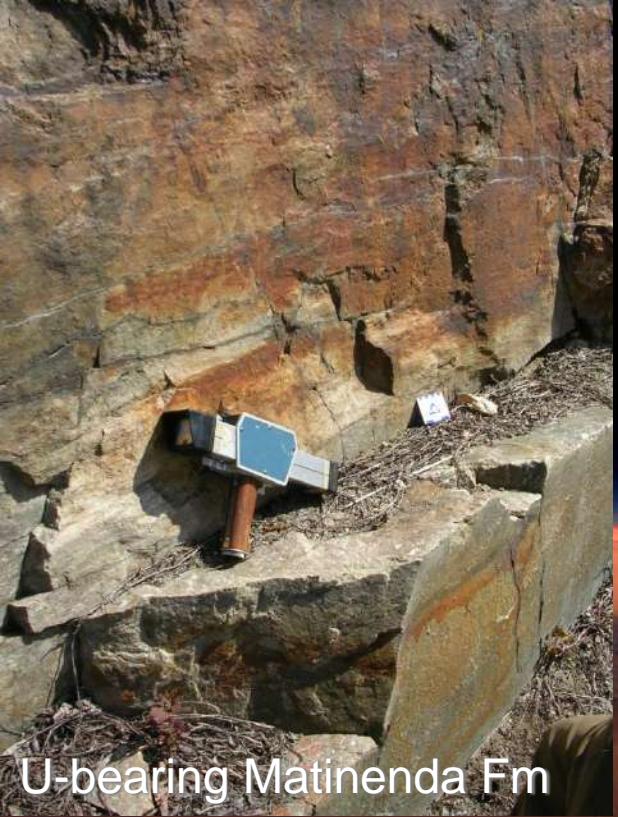




Hoffman photo

glacial marine tills, Ghaub Fm, Namibia

Huronian Supergroup Sedimentary Rocks



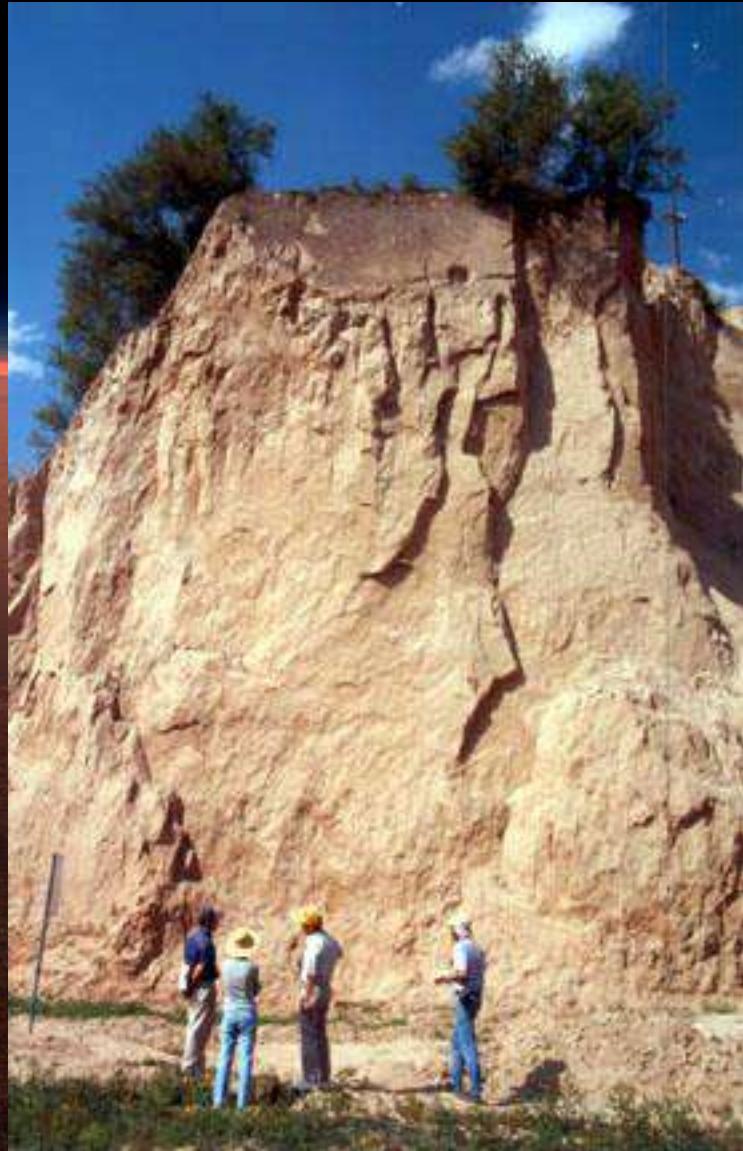


The Glacial Pavement

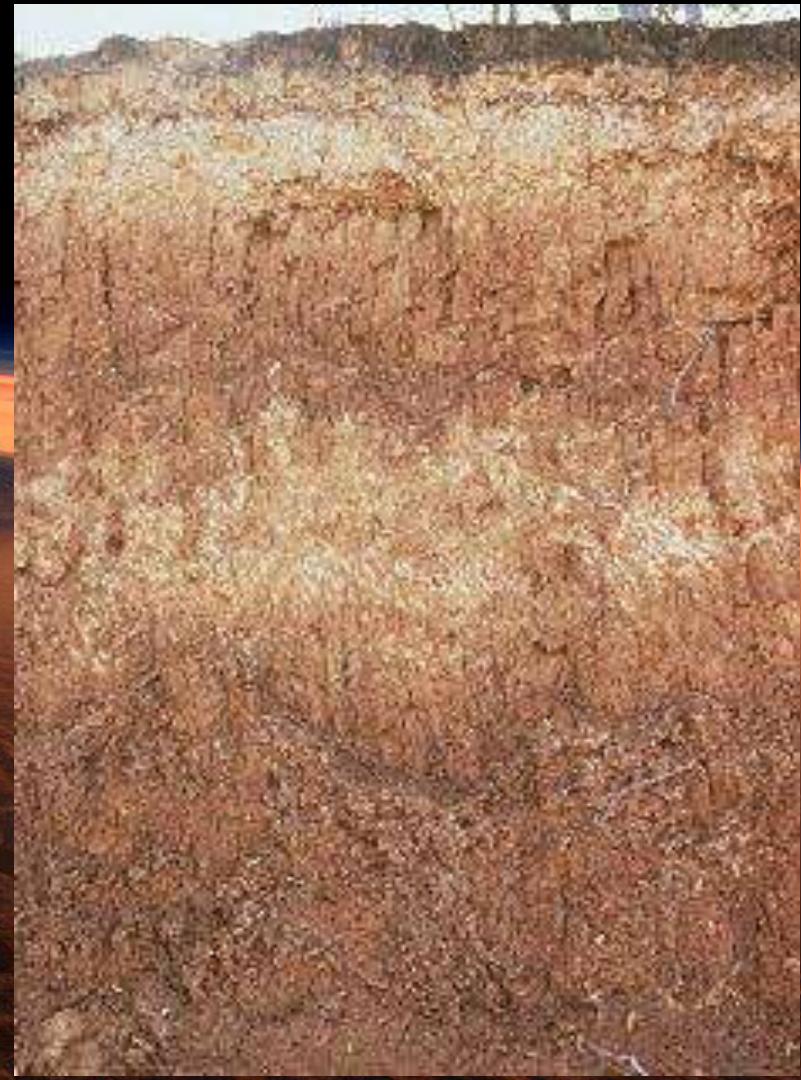


The Glacial Pavement

Geomorphic indicators of past climates: Loess and paleosols



Loess (windblown dust deposit, signifying aridity)



Loess (depositional) and paleosols (darker layers signifying weathering and organic deposition during wetter period)

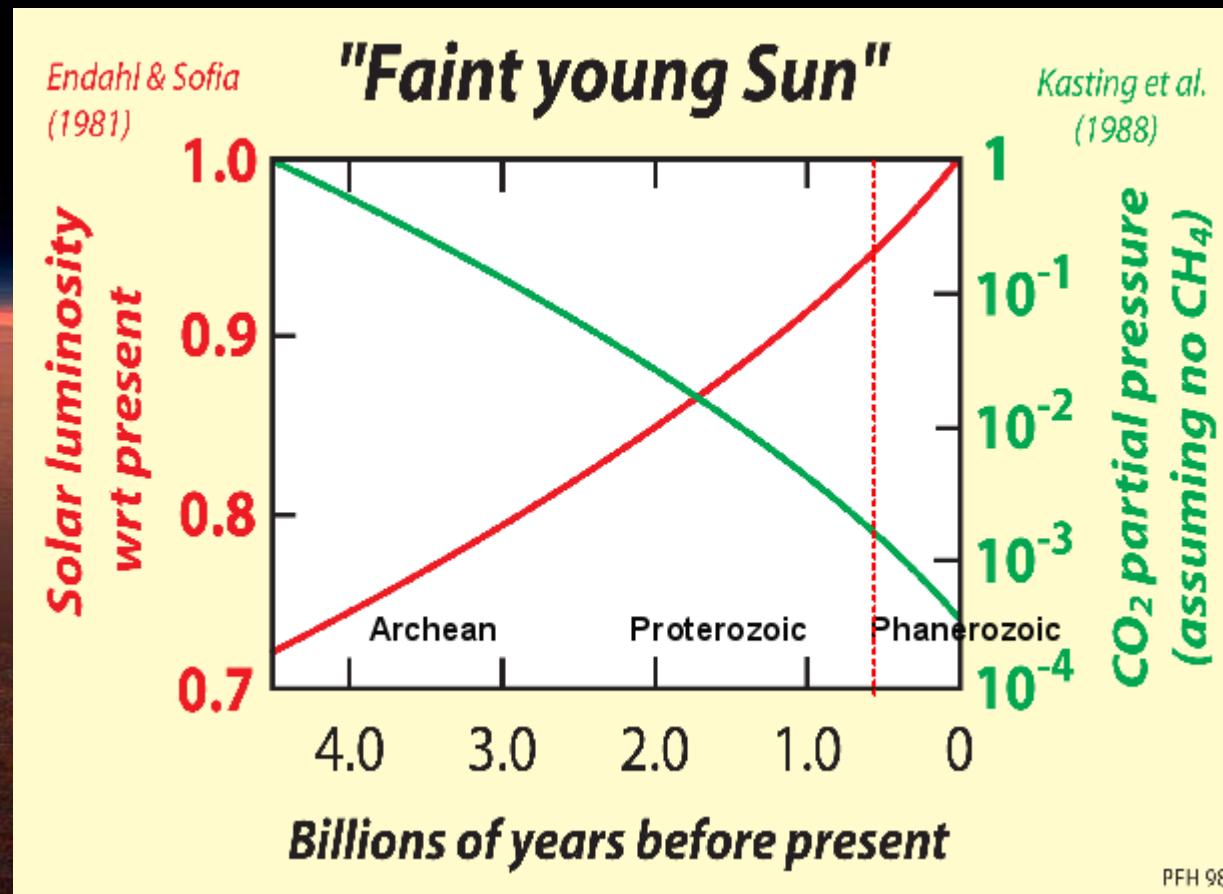
A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. The background is a dramatic, reddish-pink sky, likely from a sunset or sunrise. The lighting creates strong highlights and shadows on the ice's surface.

Общая геокриология

Палеотемпературы

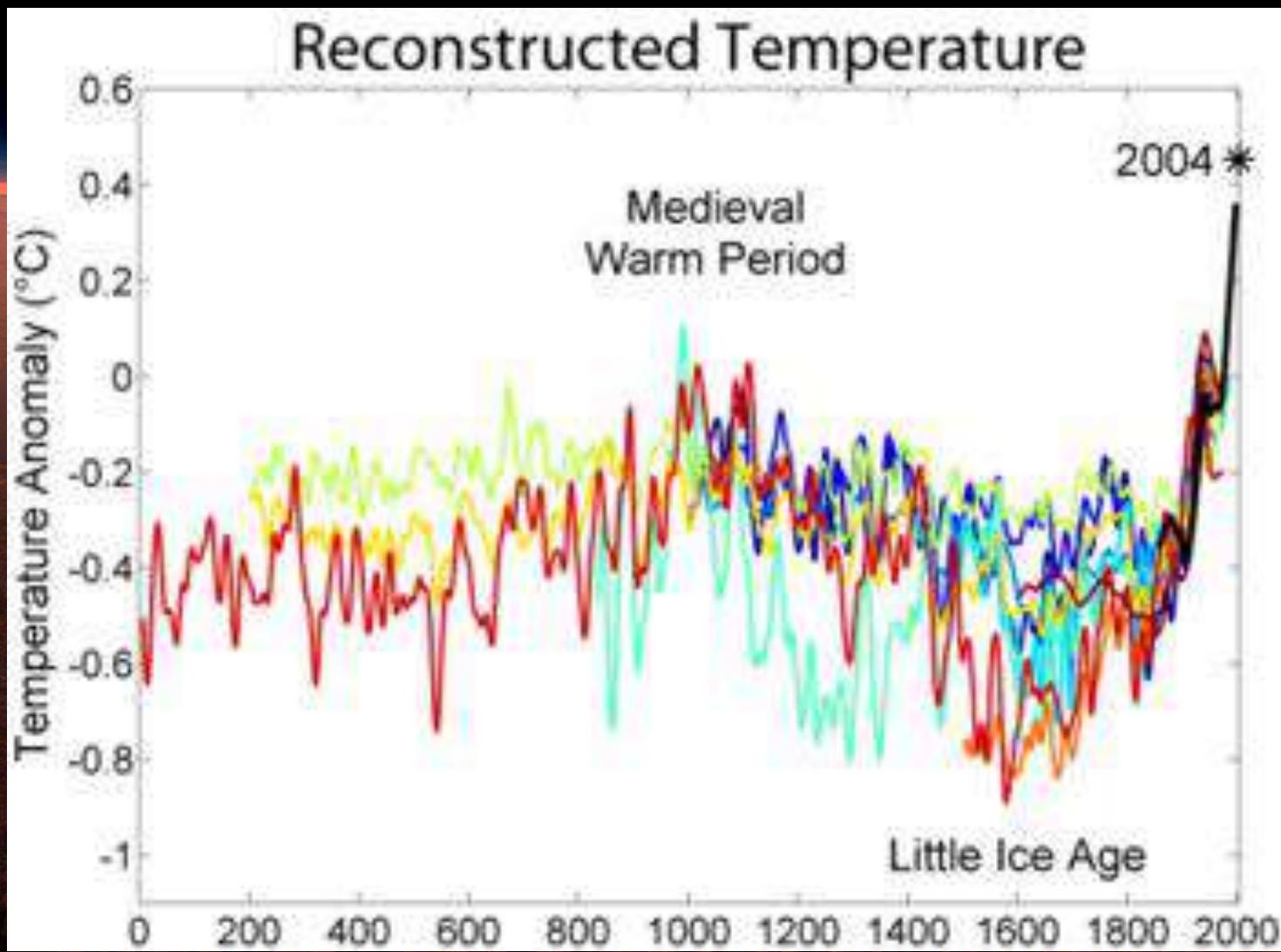


Палеотемпературы



Среди астрономов и геофизиков распространена точка зрения, что в период образования Земли, т.е. 4,6 млрд лет назад, уровень солнечной радиации был на 40% ниже, чем сейчас, и с тех пор вплоть до наших дней он увеличивался. Она основана на изучении эволюции звезд. Кроме того, атмосферы вначале еще не было, как не было и парникового эффекта. Правда, концентрация углекислого газа могла быть во много раз больше (?). Следовательно, температура на Земле должна бы постепенно возрастать. Данные же "каменной летописи" Земли свидетельствуют об обратном - температура на поверхности планеты постепенно понижалась. Так, 3,8 млрд лет назад, на основании определения отношения изотопов кислорода в кремнистых отложениях серии Иса (Гренландия), температура находилась в интервале 90-150°C. Три миллиарда лет назад она колебалась в пределах от 90 до 65°C и дальше

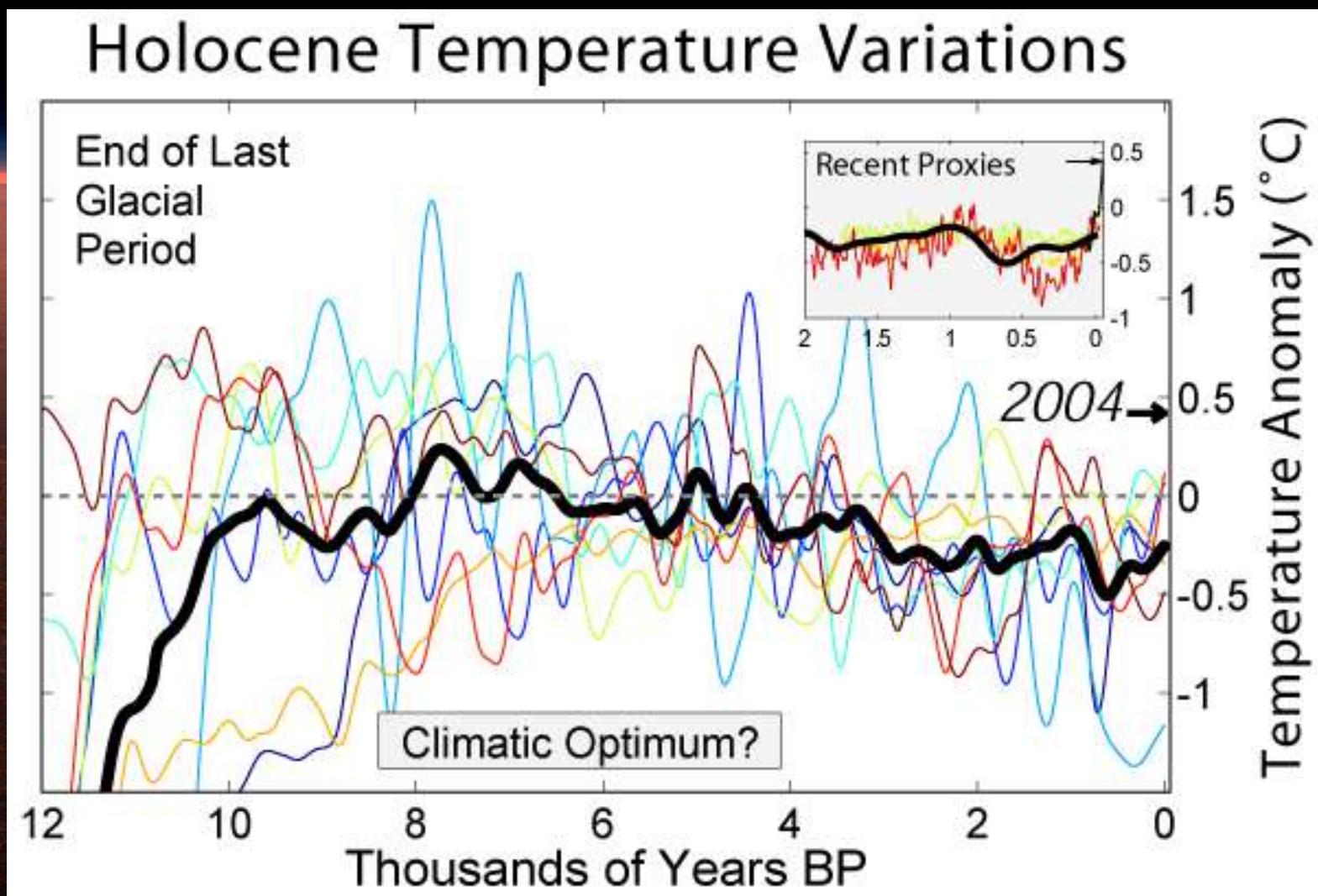
Палеотемпературы: 2 тыс. лет



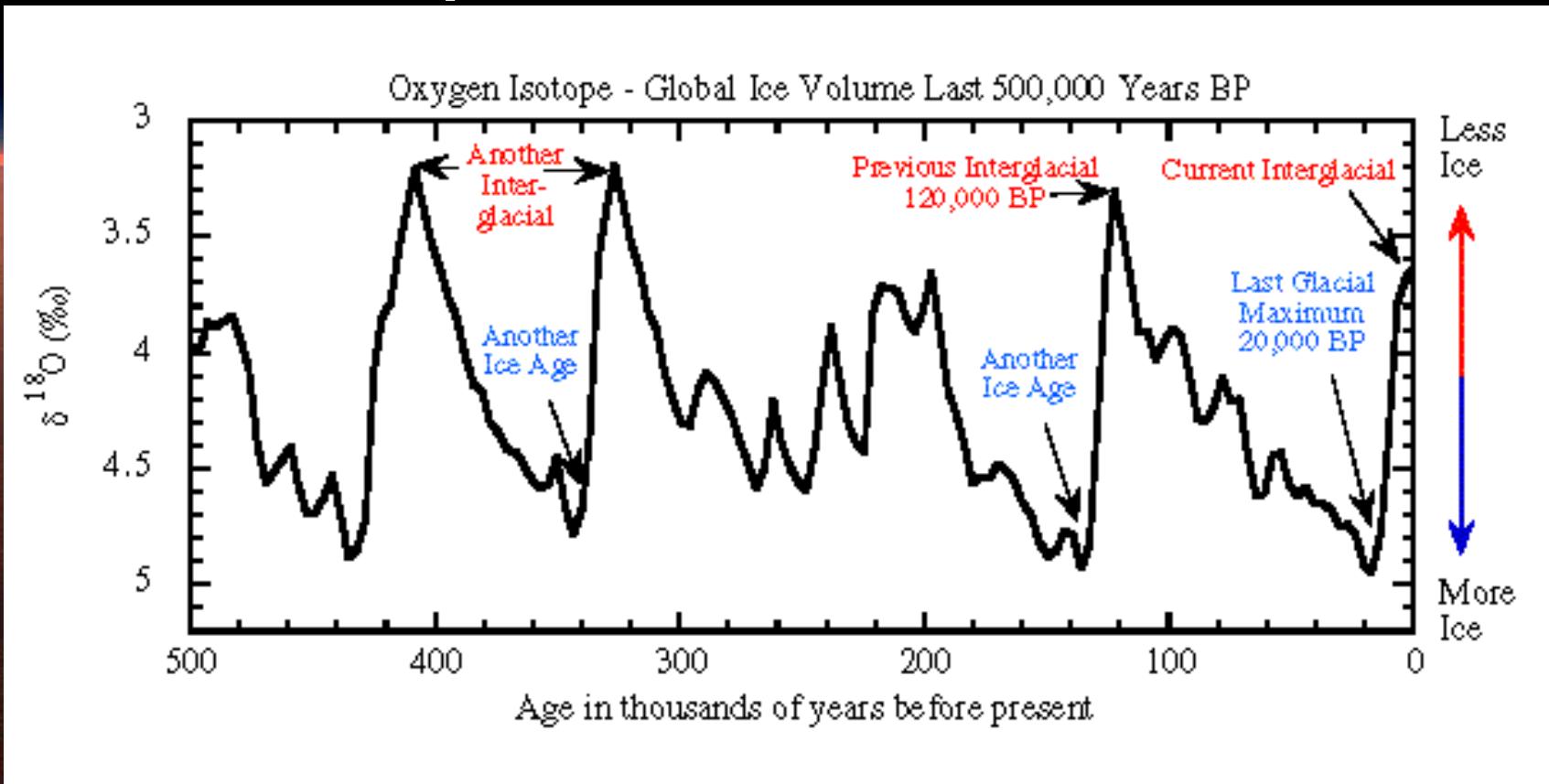
Палеотемпературы: малый ледниковый период 15-17 веков Хендрик Аверкамп (1585-1634)



Палеотемпературы: голоцен



Палеотемпературы: плейстоцен

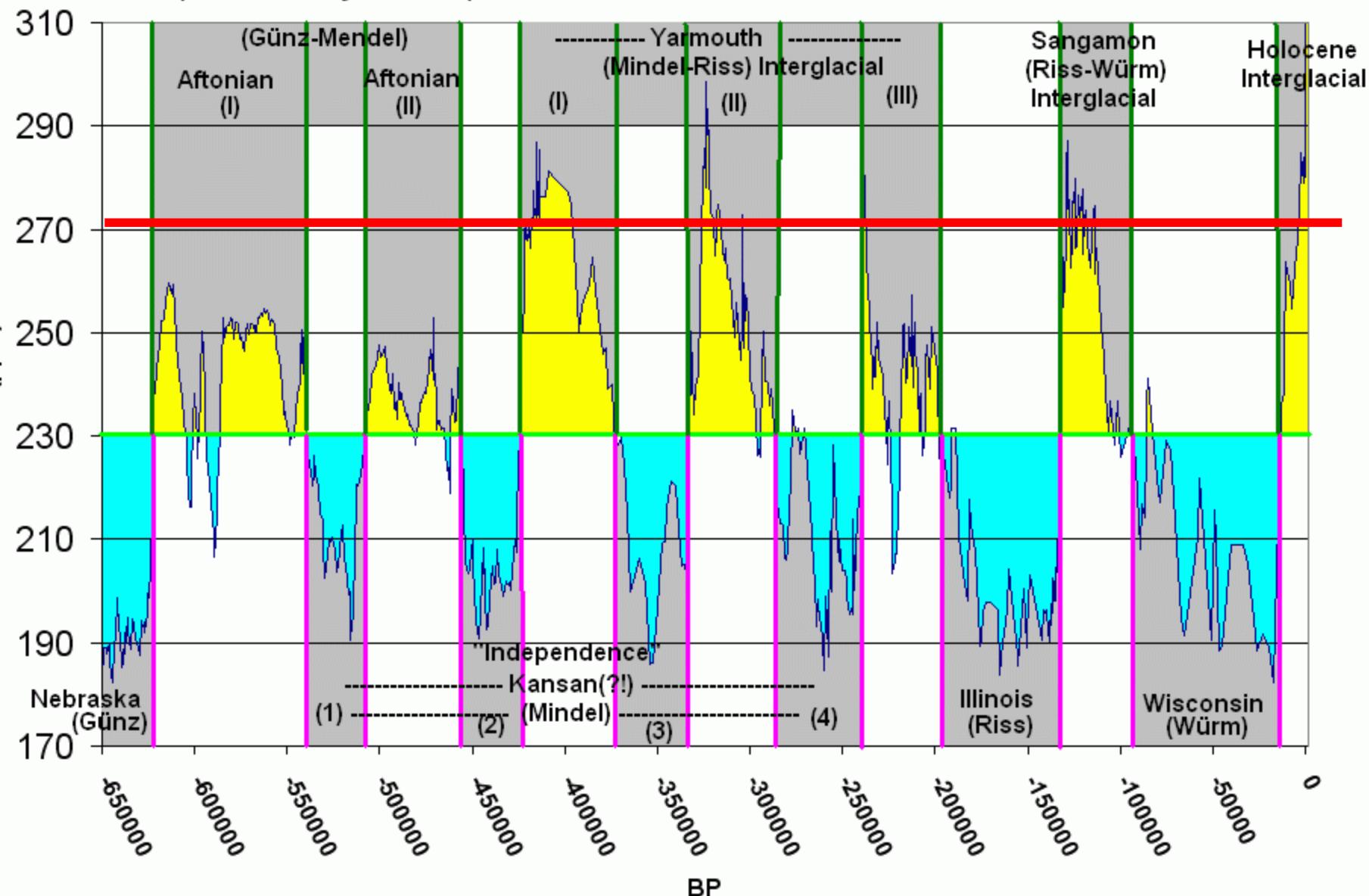


Late Pleistocene: Atmospheric CO₂ and the Glacial cycles

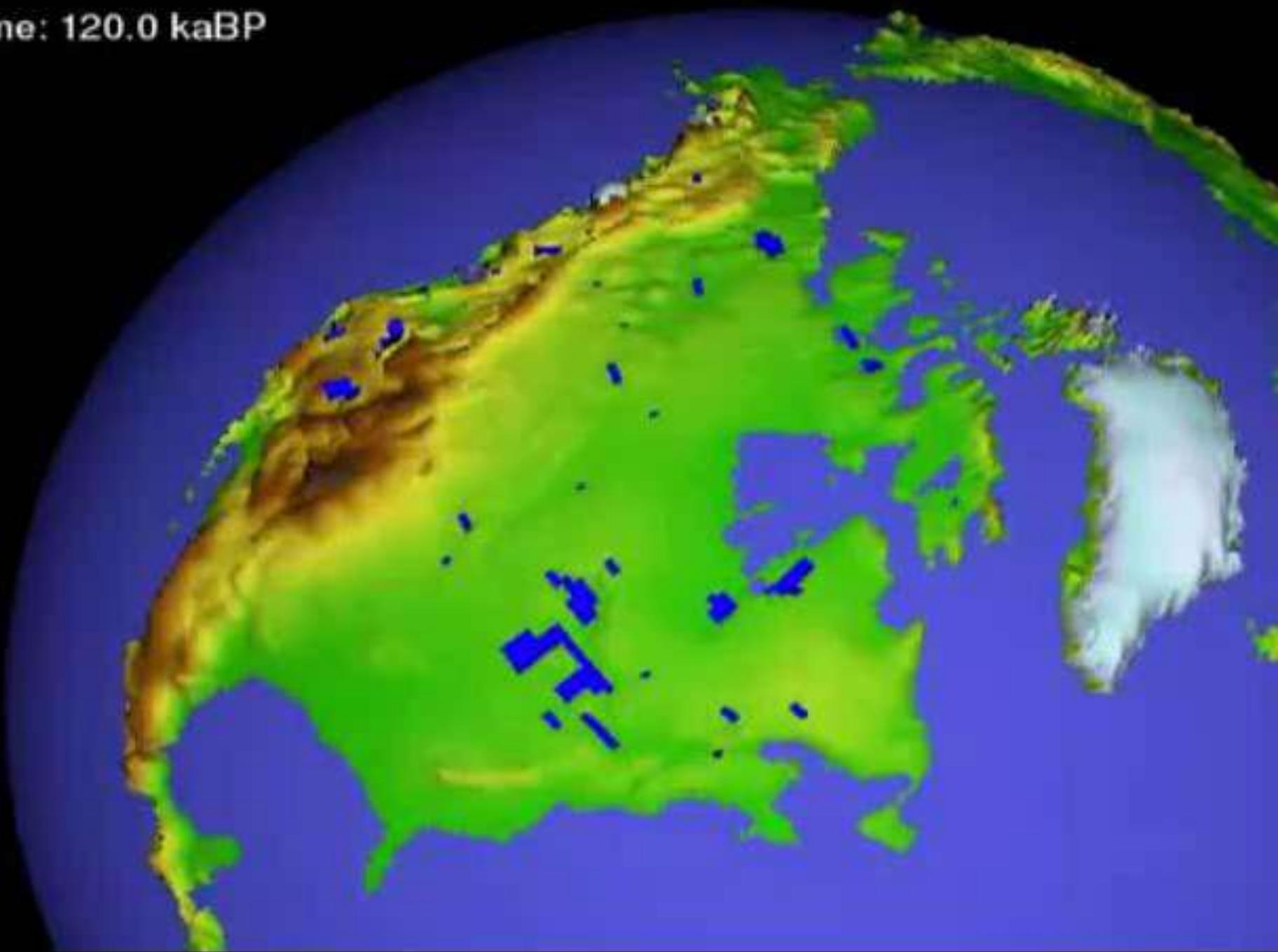
(650,000 - 0 years BP)

(ppm)

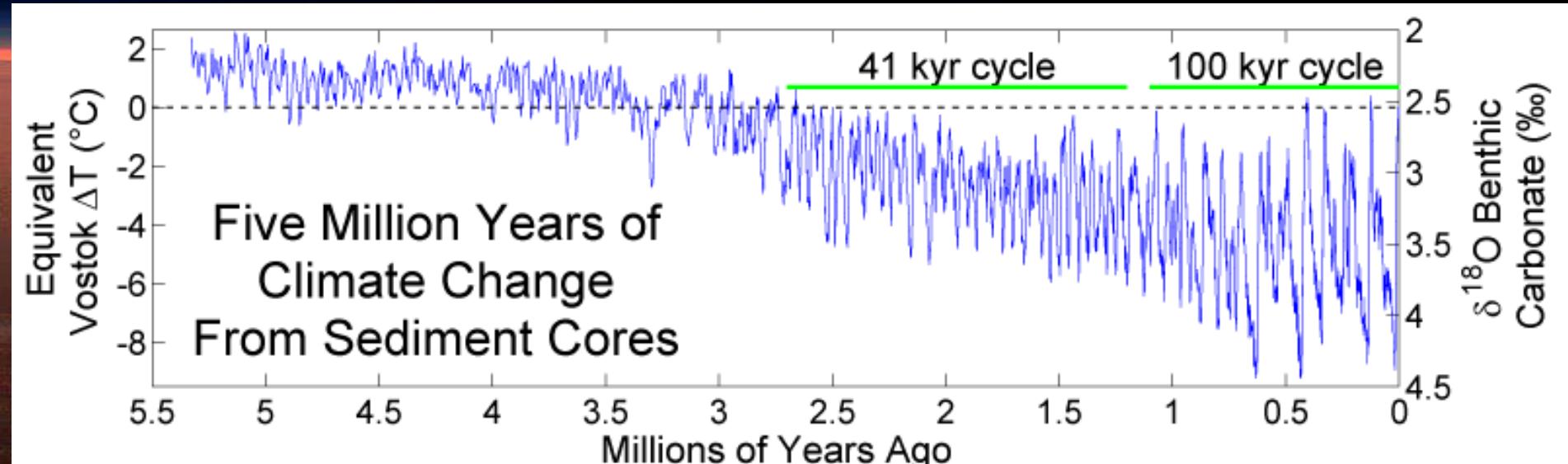
N.American & (Alpine) names



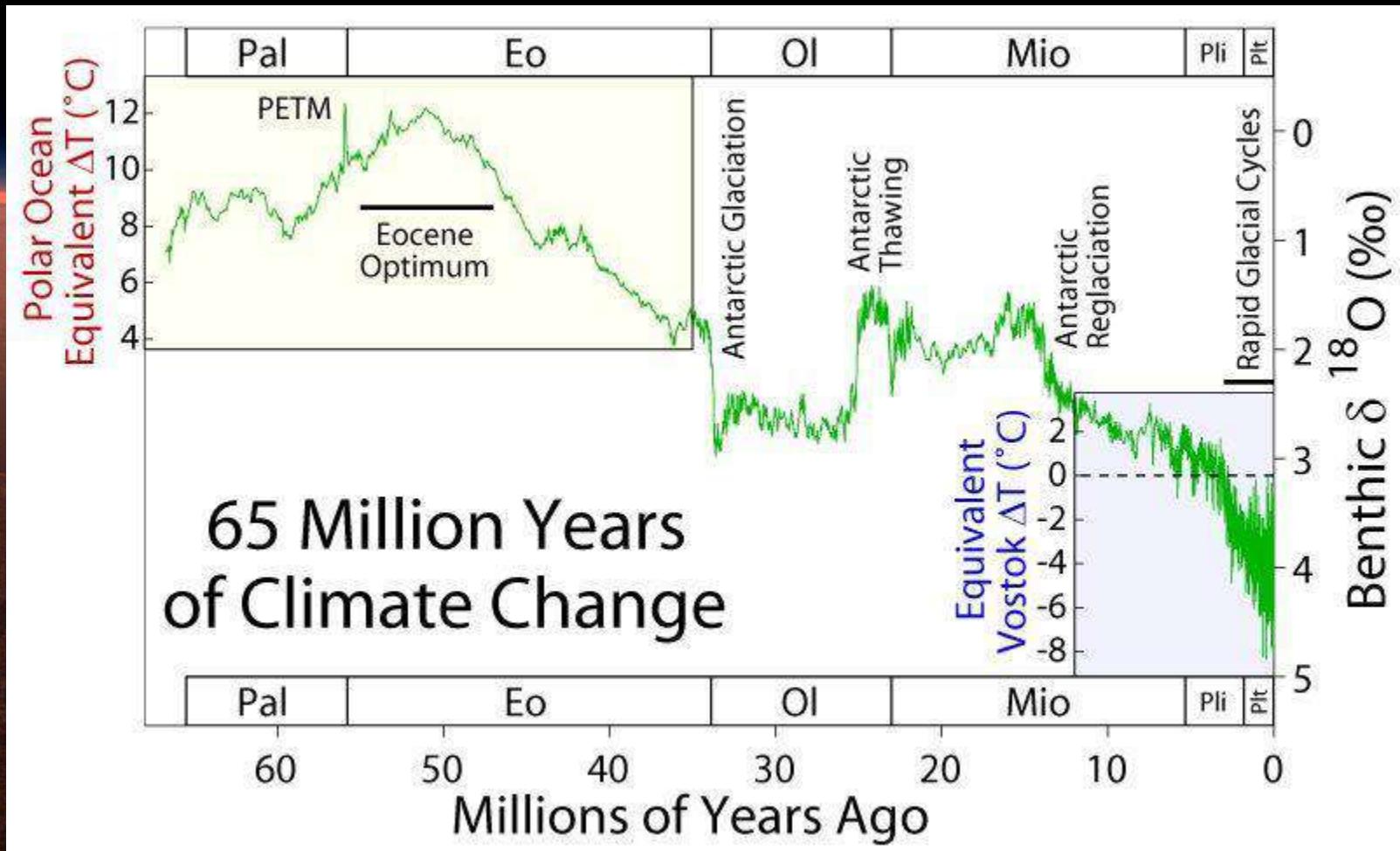
Time: 120.0 kaBP



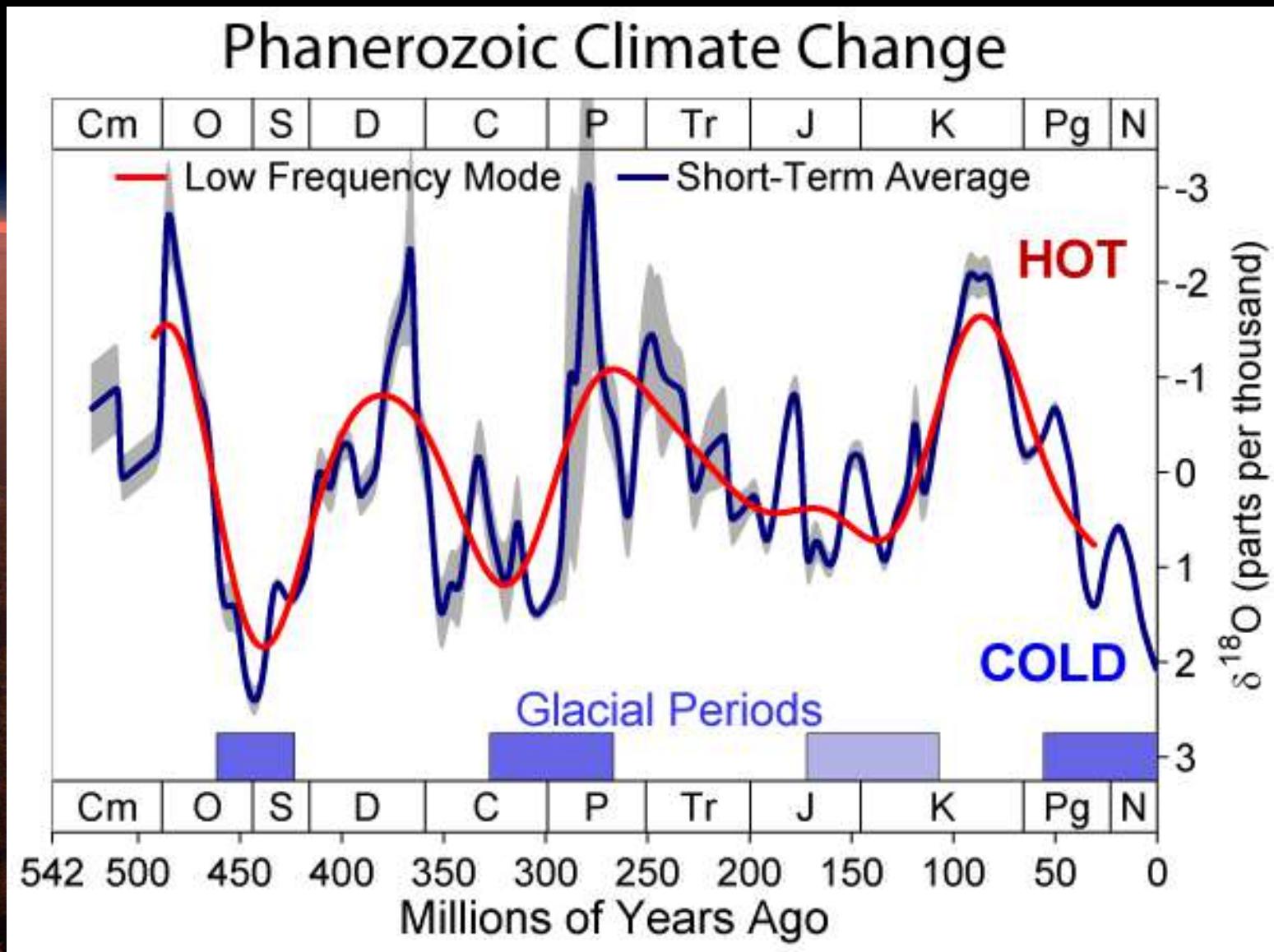
Палеотемпературы: кайнозой



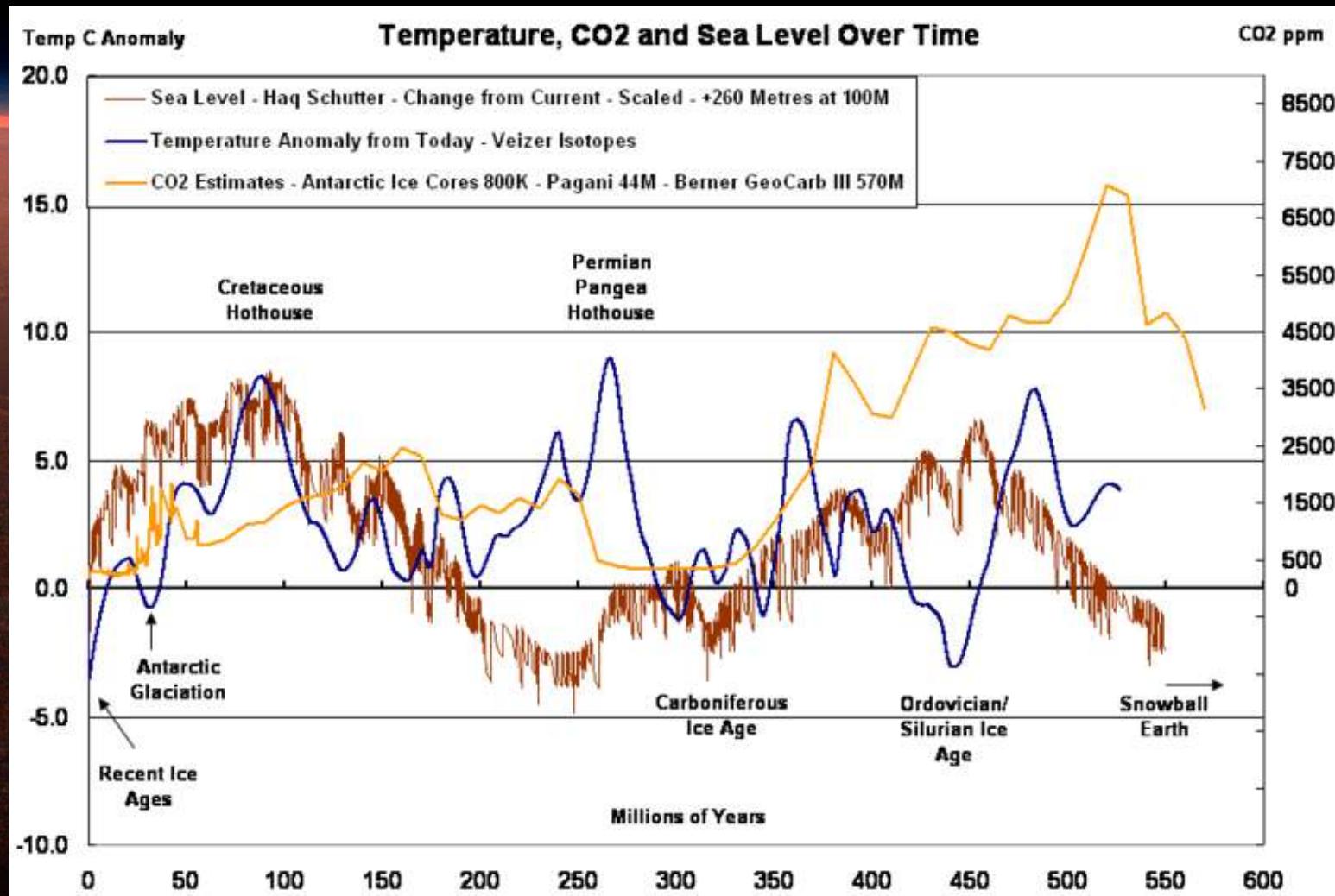
Палеотемпературы: кайнозой



Палеотемпературы: фанерозой

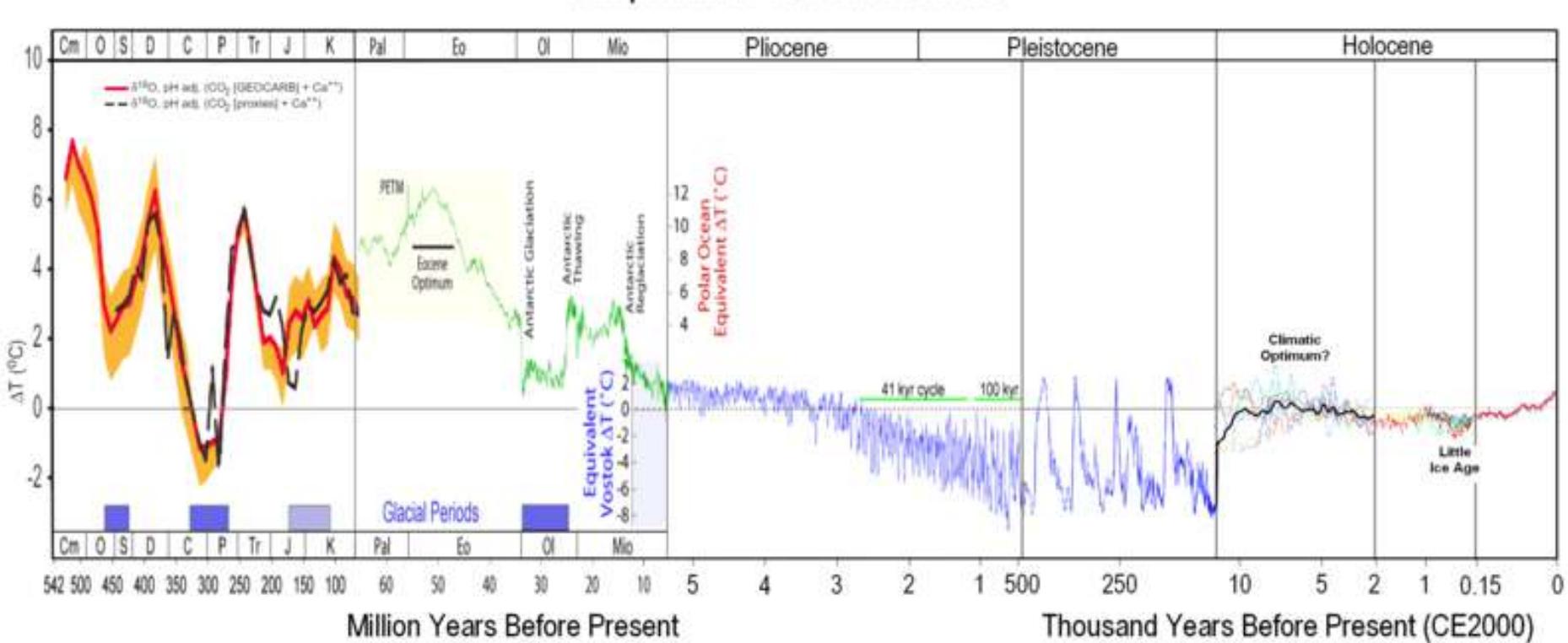


Палеотемпературы, углекислый газ, уровень океана



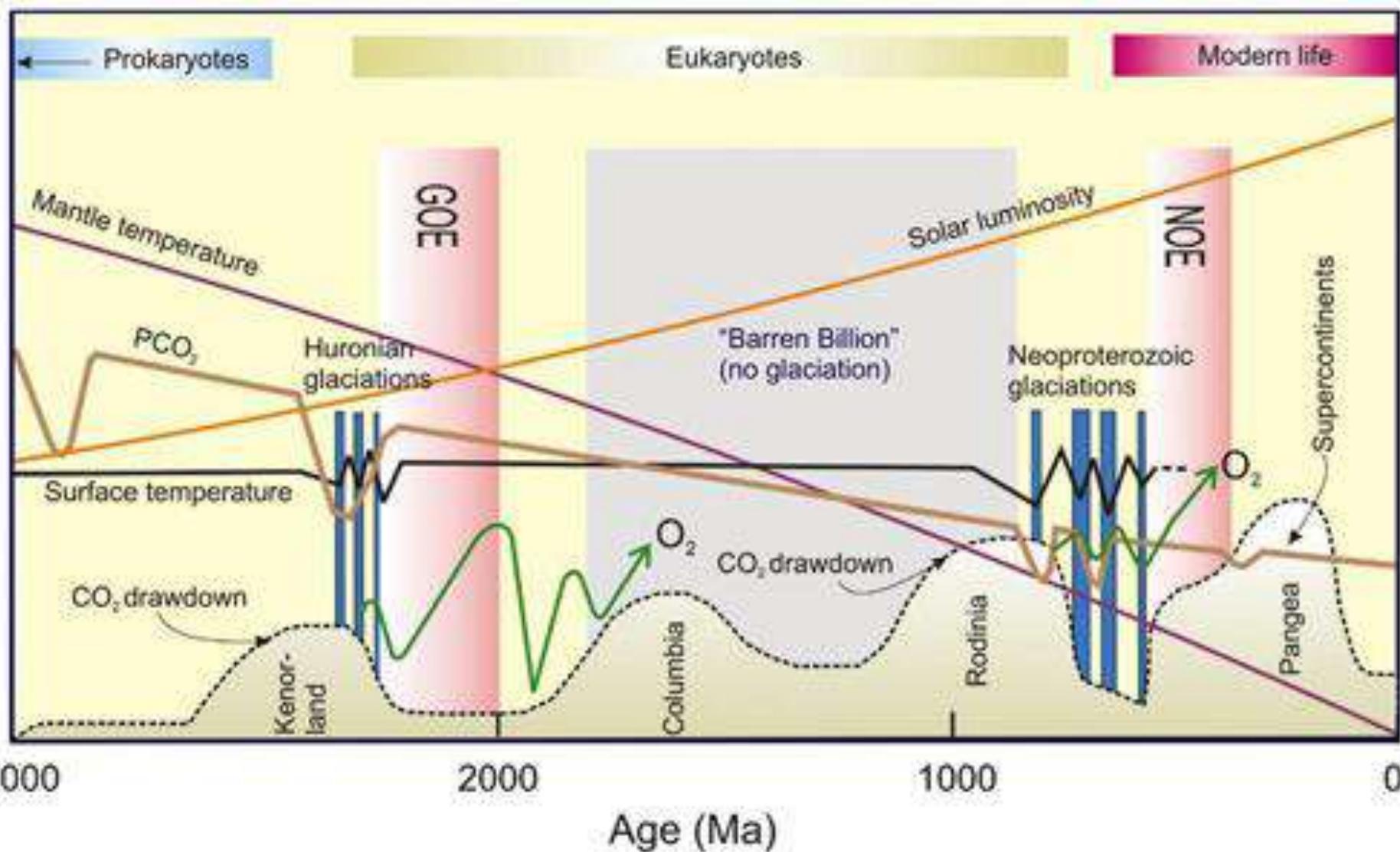
Палеотемпературы: фанерозой

Temperature of Planet Earth

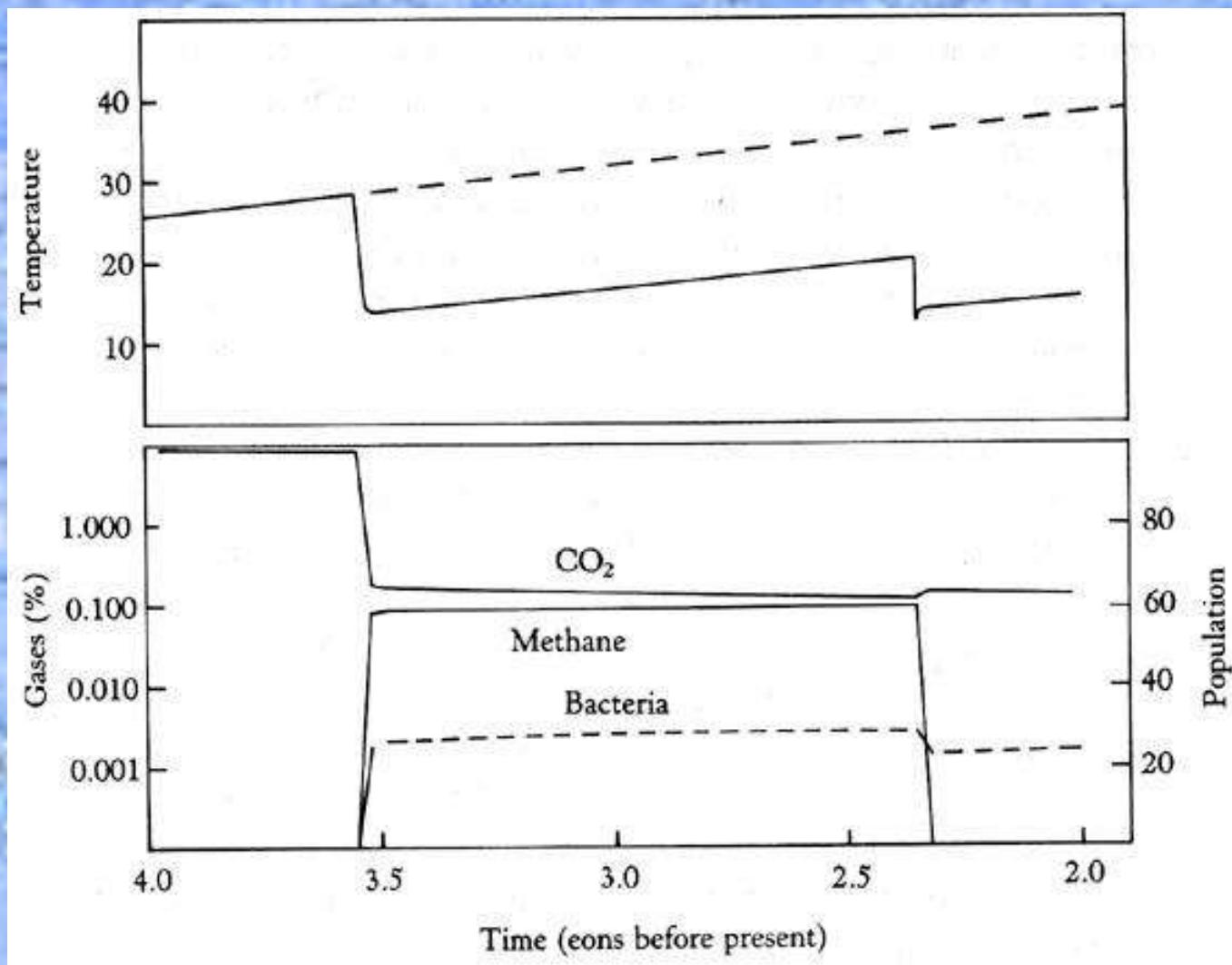


Sigman, D.M.; E.A. Boyle (October 2000).
"Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide" Nature 407 (6806): 859–869.

Палеотемпературы: докембрий



Палеотемпературы: докембрий

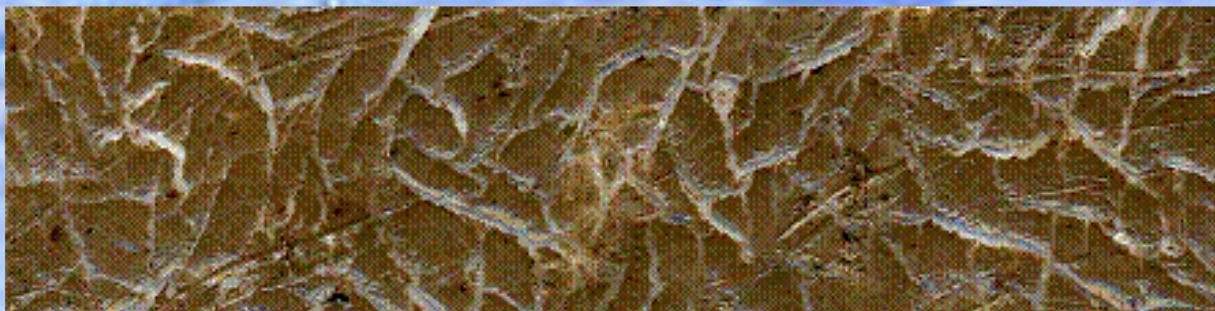


Основные понятия в геокриологии

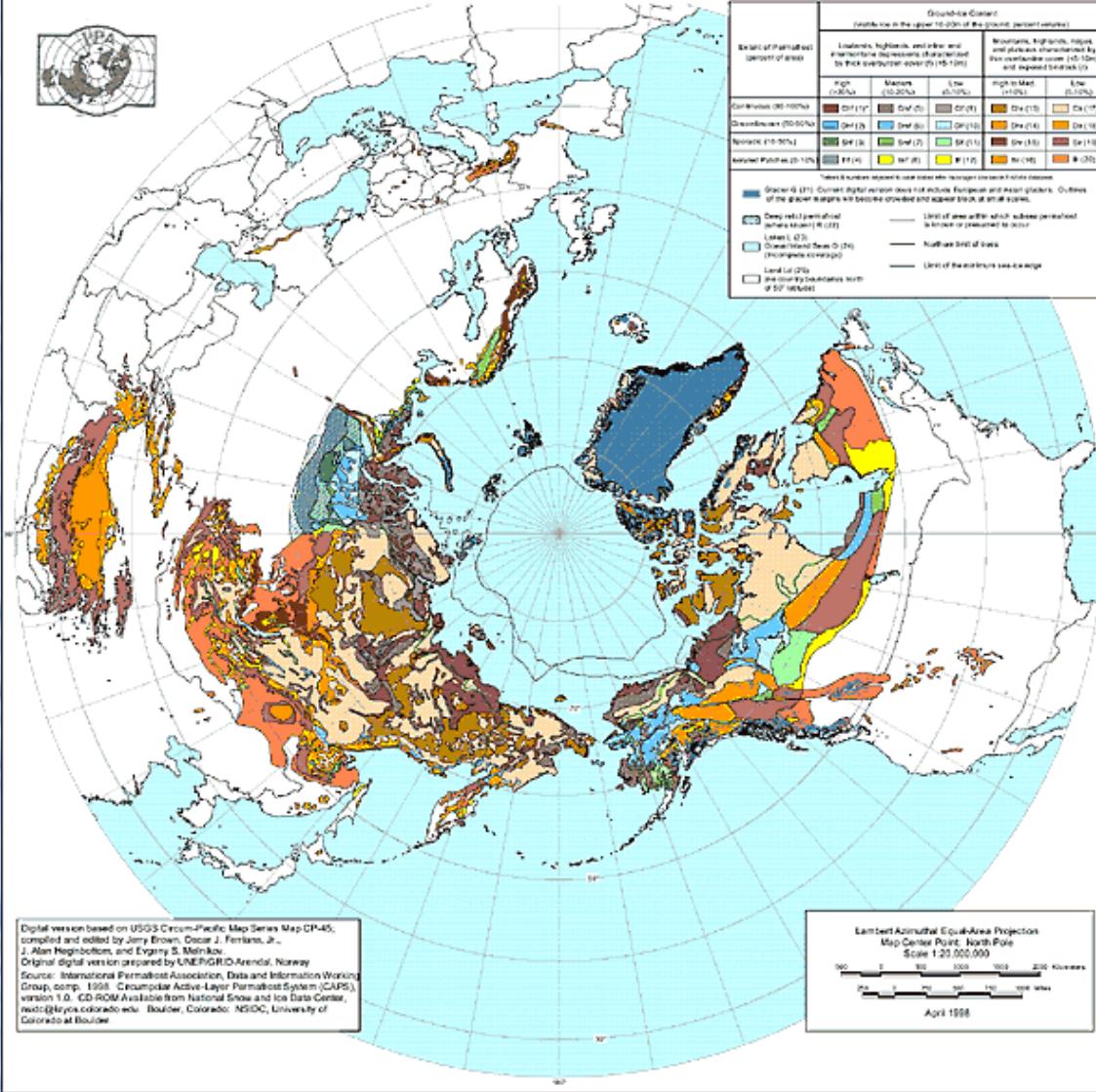


Горные породы, имеющие отрицательную температуру, могут быть **мерзлыми, морозными или охлажденными**.

Мерзлыми горными породами называются породы, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние (лед). Мерзлыми породами являются как дисперсные, так и скальные породы. В мерзлых породах естественная суммарная влажность превышает влажность незамерзшей связанной воды и присутствует лед, который может цементировать минеральные частицы и не видим глазом, а может закономерно располагаться в виде различных прослоев и линз, заполнять пустоты и трещины в породе, а также встречаются мощные залежи подземного льда. При этом лед в горных породах рассматривается как специфический минерал, а наземные и подземные скопления льда различного происхождения - как мономинеральные горные породы



CIRCUM-ARCTIC MAP OF PERMAFROST AND GROUND-ICE CONDITIONS



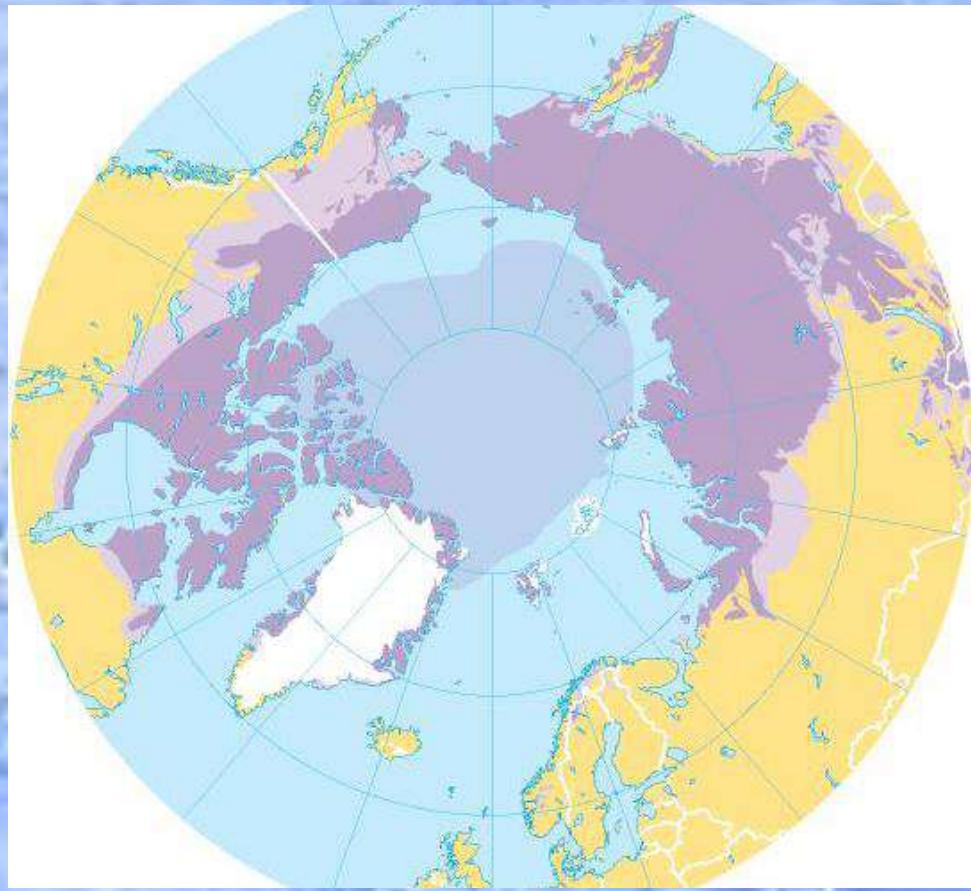
Породы, имеющие отрицательную температуру, но не содержащие льда (и воды), называют **морозными**. Это в основном скальные породы, хотя в определенных условиях встречаются морозные пески. Кроме мерзлых и морозных пород, в криолитозоне распространены охлажденные ниже 0° влажные горные породы, содержащие соленые или рассольные воды с отрицательной температурой (криопэги).

Приблизительно 75% ресурсов пресной воды на Земле сконцентрировано в виде льда (Маэно, 1988)

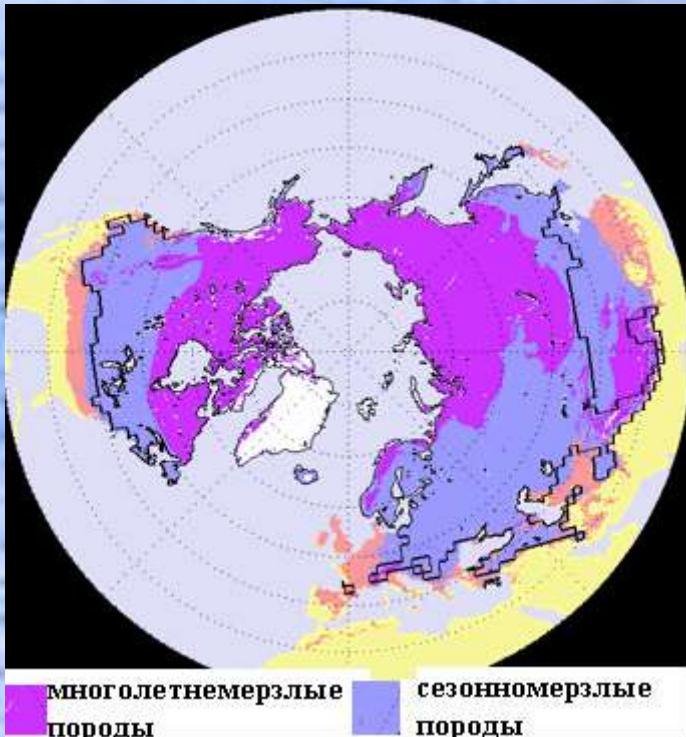
Виды льда	Масса		Площадь распространения	
	грамм	%	км ²	% от площади
Ледники и ледниковые покровы	$2,389 \cdot 10^{22}$	98,95	$1.621 \cdot 10^7$	10.9 (суши)
Подземные льды (вечная мерзлота)	$(2\text{--}5) \cdot 10^{20}$	0,83	$2.10 \cdot 10^7$	14.1 (суши)
Морские льды	$3,483 \cdot 10^{19}$	0,14	$2.60 \cdot 10^7$	7.2 (океана)
Снежный покров	$1,05 \cdot 10^{19}$	0,04	$7.24 \cdot 10^7$	14.2 (суши)
Айсберги	$7,65 \cdot 10^{18}$	0,03	$6.35 \cdot 10^6$	1.87 (океана)
Лед в атмосфере	$1,68 \cdot 10^{18}$	0,01	$5.10 \cdot 10^8$	100 (земной поверхности)
Всего	$2,423 \cdot 10^{22}$	100		

Территории с ММП



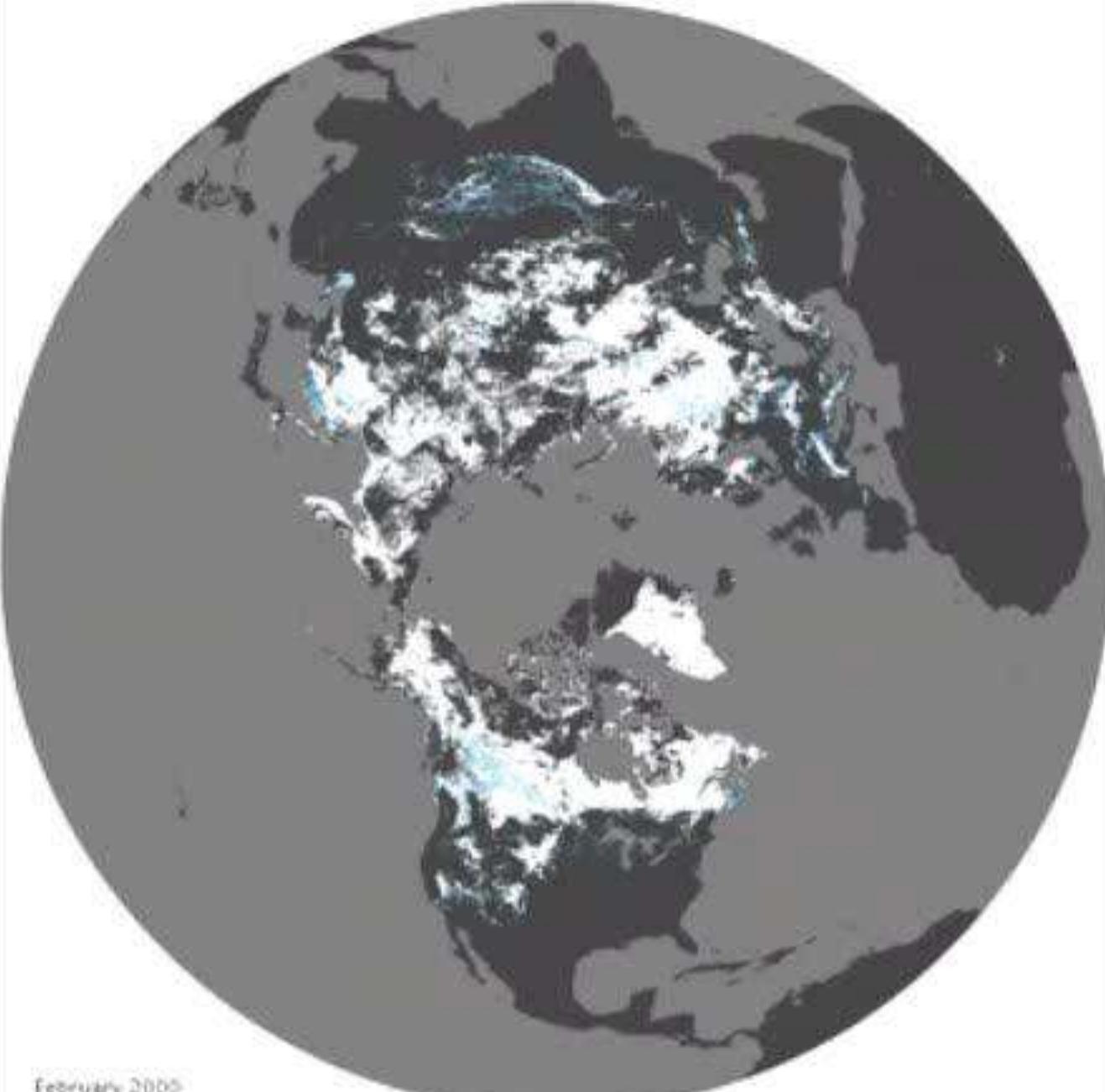


Породы с положительной температурой подразделяются на **талые** и **немерзлые**. Талые породы — это некогда промерзшие и затем оттаявшие породы, немерзлые — это породы, не находившиеся в мерзлом состоянии в геологическом прошлом.
В курсе лекций мы будем знакомиться в основном с мерзлыми породами.



По продолжительности существования мерзлого состояния породы подразделяются на:

- **кратковременномерзлые (часы, сутки);**
- **сезонномерзлые (месяцы),**
- **многолетнемерзлые (годы, сотни и тысячи лет).**



February 2000

Fractional Snow Cover (%)

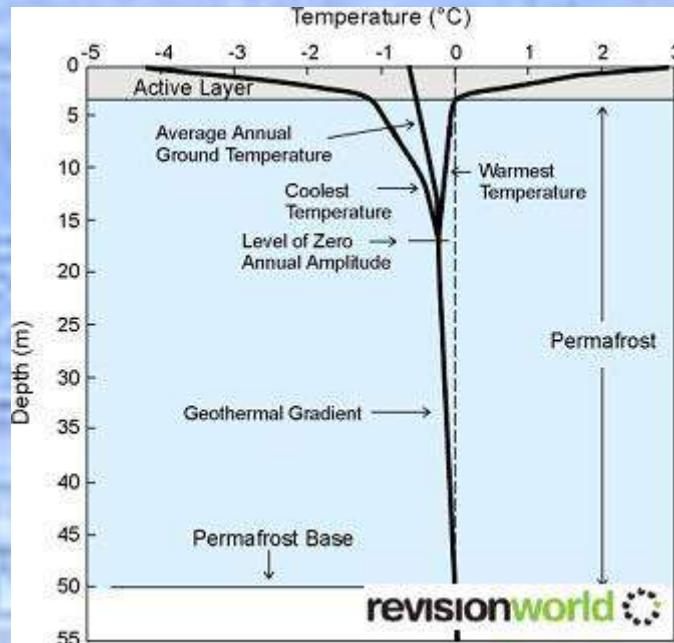
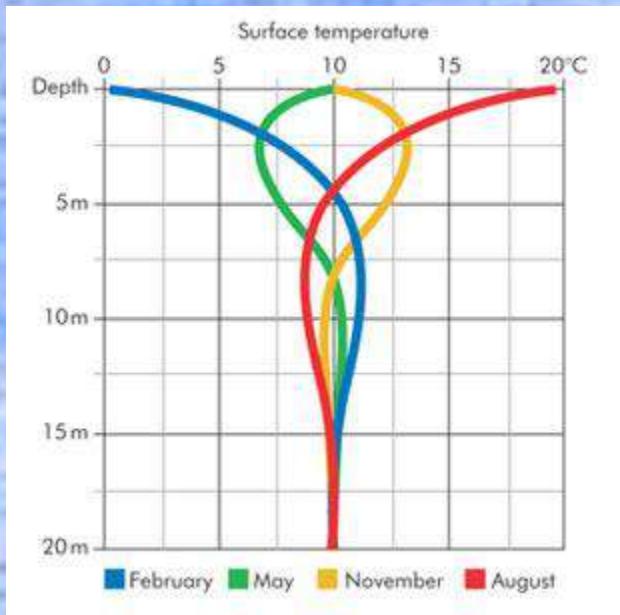
0

50

100

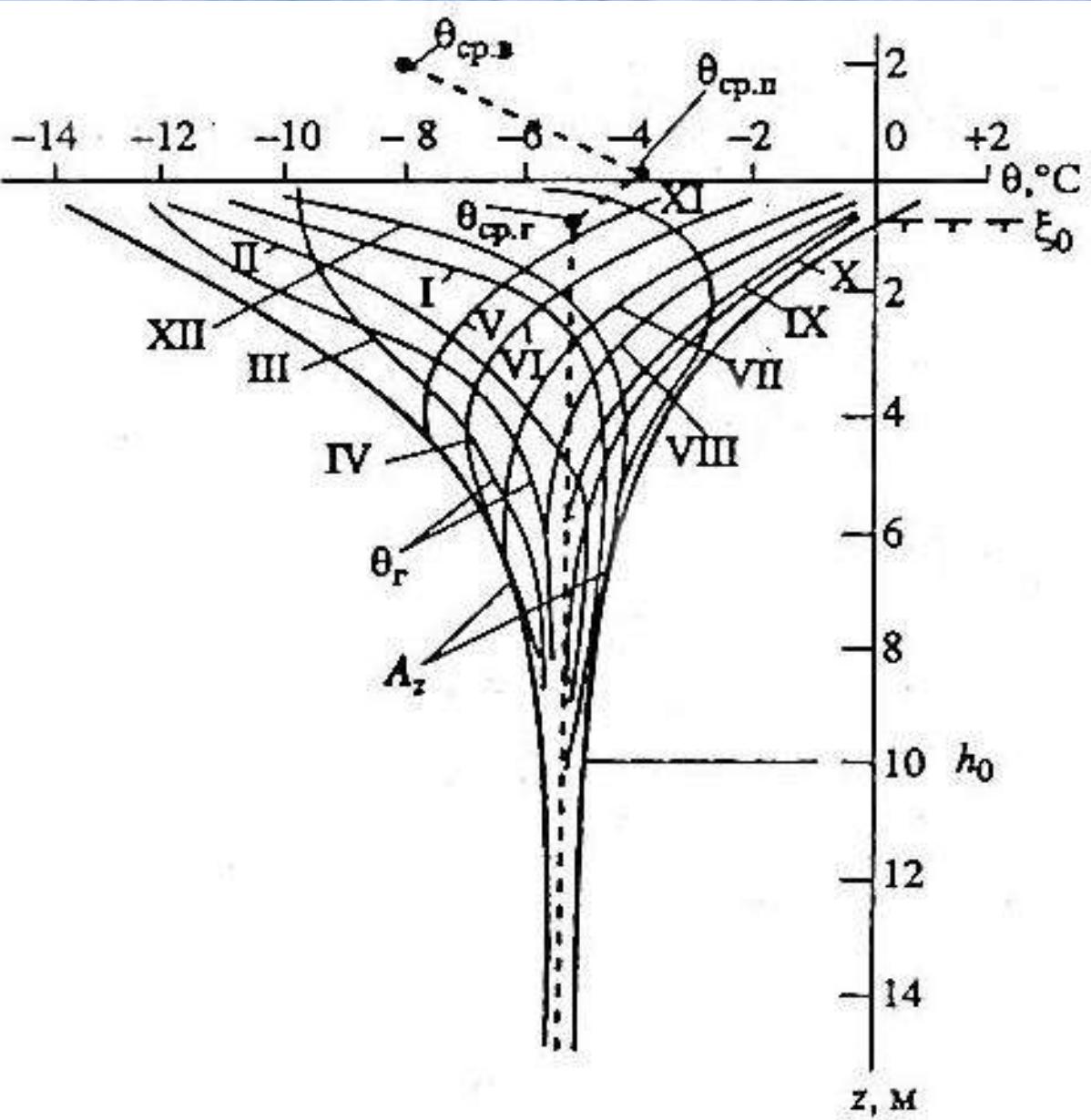
Наименование мерзлых грунтов в зависимости от времени их существования

Наименования мерзлых грунтов	Время существования в мерзлом состоянии	Авторы
Многолетнемерзлые Сезонномерзлые Кратковременно мерзлые	Годы, сотни, тысячи лет Месяцы Сутки	В.А.Кудрявцев, Б.А.Достовалов, 1978; Э.Д.Ершов, 1990
Вечномерзлые Многолетнемерзлые Сезонномерзлые Кратковременно мерзлые	Века, тысячелетия От нескольких лет до нескольких десятилетий От 1 до 2 сезонов От нескольких часов до нескольких суток	Н.А.Цытович, 1973
Вечномерзлые Перелетки Сезонномерзлые	Три и более года От 1 года до трех лет 1-й холодный сезон года	Нормативные документы по строительству и инженерным изысканиям
Многолетнемерзлые Permafrost	Более 2-х лет	Международная практика (Harris et al., 2017)



Тепловое состояние горных пород связано с теплообменом на поверхности Земли между литосферой и атмосферой.

Периодическое изменение температуры на поверхности приводит к изменению теплового состояния приповерхностных слоев горных пород. На подошве **слоя годовых колебаний или слоя нулевых годовых амплитуд** (10-20 м) температура в течение года не меняется . Там, где среднегодовая температура пород на этой глубине положительная, с поверхности развито **сезонное промерзание пород** в зимний период. В этом случае слой сезонного промерзания подстилается талыми породами.

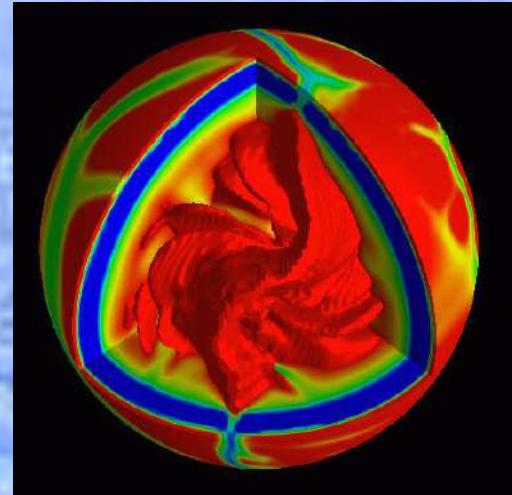


Изменение температуры мерзлых грунтов θ_r по глубине z и месяцам года, амплитуд колебаний температур A_z по глубине (огибающие кривые), среднегодовых температур воздуха θ_{cp} , поверхности грунта $\theta_{cp.p}$, грунта $\theta_{cp.g}$

Геотермический градиент:

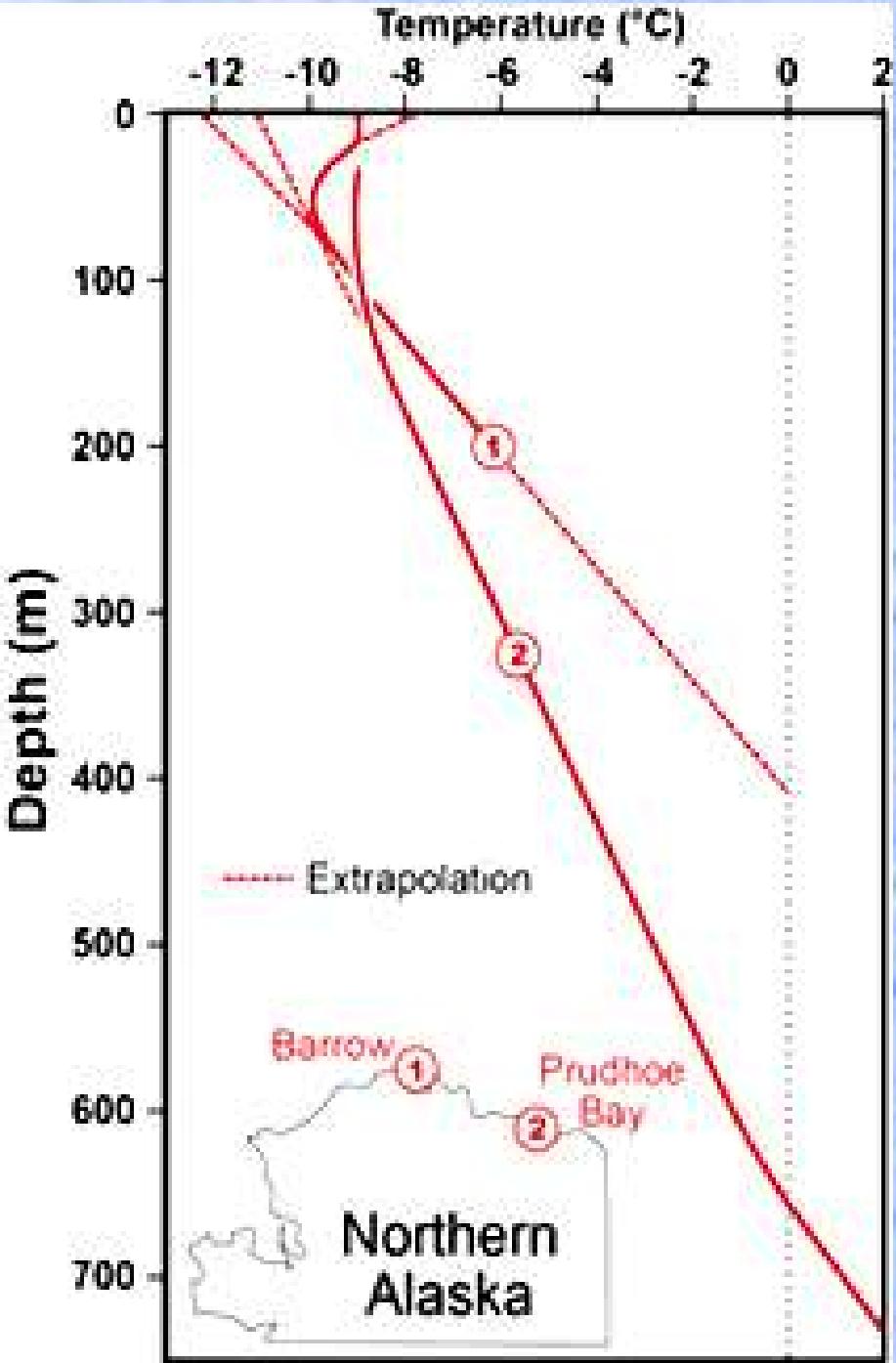
Температура изменяется на три градуса иногда каждые 100, иногда -- 150 метров, далее изменение температуры замедляется.

Расположенное в центре Земли ядро, возможно, имеет температуру 5000–6000° С. Зафиксированы случаи не только повышения, но и понижения температур.



На горе Янган-Тау - 'Горящей горе', на Урале до глубины в 300 метров температура повышается на один градус на каждый метр .

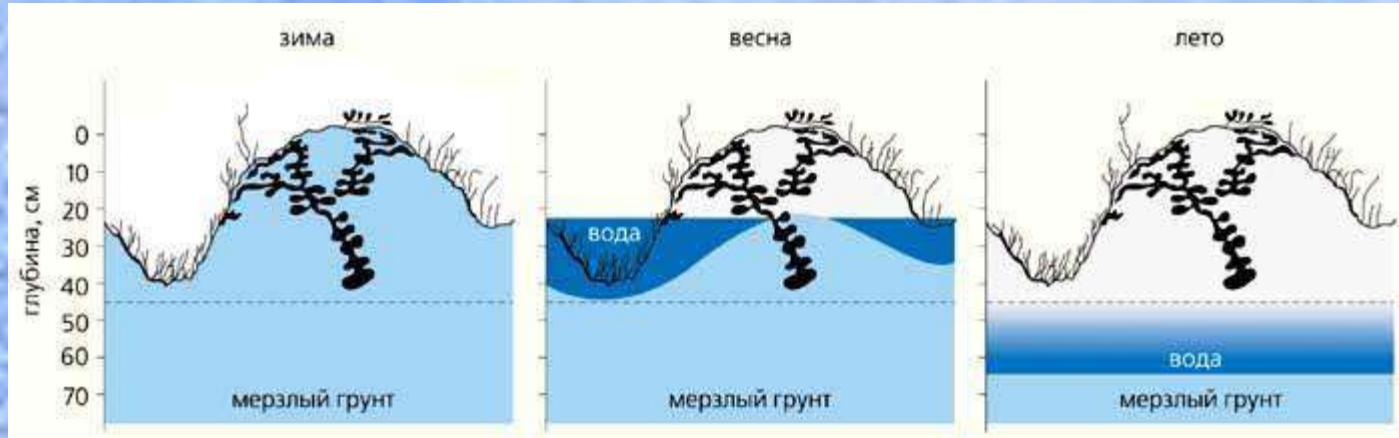
Bibliographic Entry	Result (w/surrounding text)	Standardized Result
<i>Heath Earth Science</i> . Heath, 1994: 22.	"The inner core is probably no hotter than 7000 degrees Celsius."	7300 K
<i>The Worldbook Encyclopedia</i> . Chicago: Worldbook, 1999: 20-21.	"The temperature at the core maybe as high as 7000 degrees Celsius."	7300 K
De Bremaecker, Jean-Claude. "Temperature in the core." <i>Geophysics of the Earth's Interior</i> . Canada, 1985: 296-297.	"The temperature at the inner core boundary is probably between 3400 and 5700 degrees Celsius."	3700–6000 K
Beiser, Arthur. <i>The Earth</i> . US: Time Life, 1969: 36.	"It's temperature is somewhere between 2000 and 4500 degrees Celsius."	2300–4800 K
Kubala, Bizy & Mahan Rao. <i>Earth's Core Temperature</i> . Byrdand Black, 1996.	"Earth's core temperature is estimated at around 5000 to 7000 degrees Celsius."	5300–7300



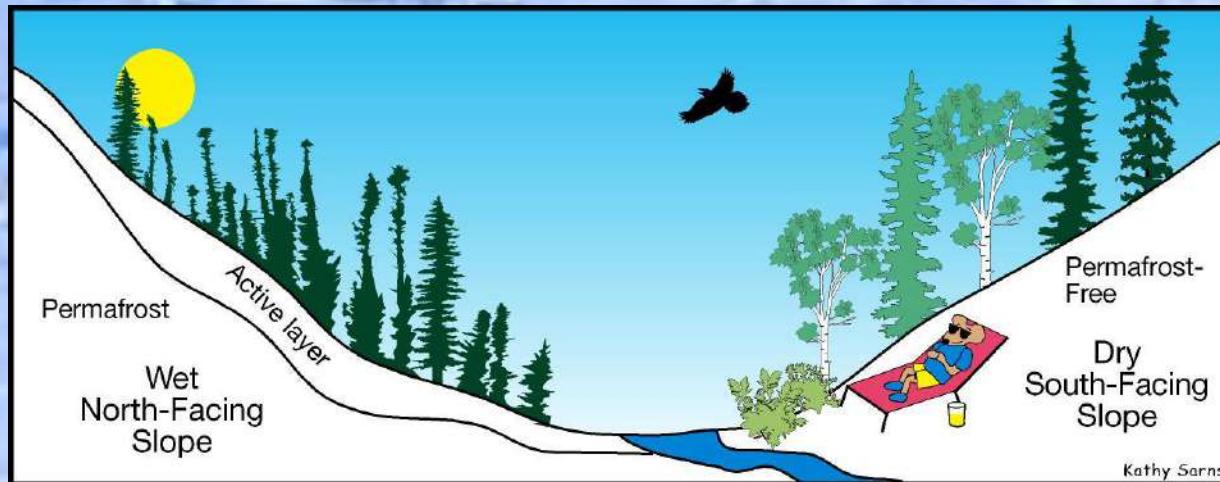
Геотермический
градиент в мерзлых
толщах

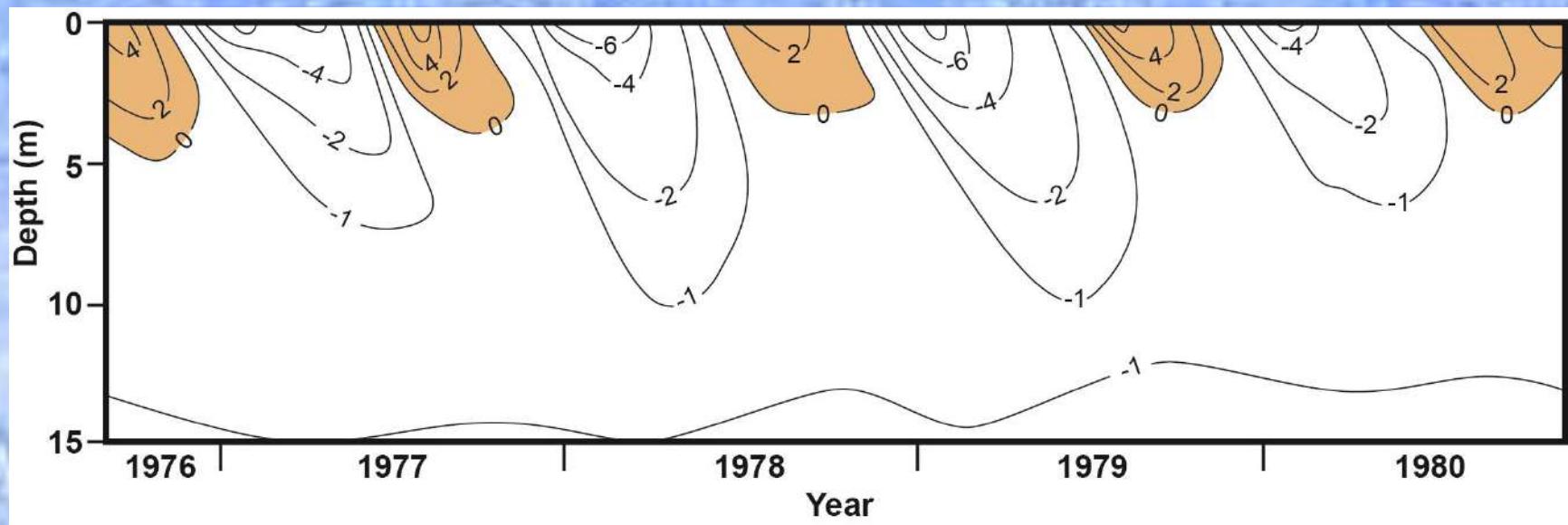


Слой сезонного
оттаивания



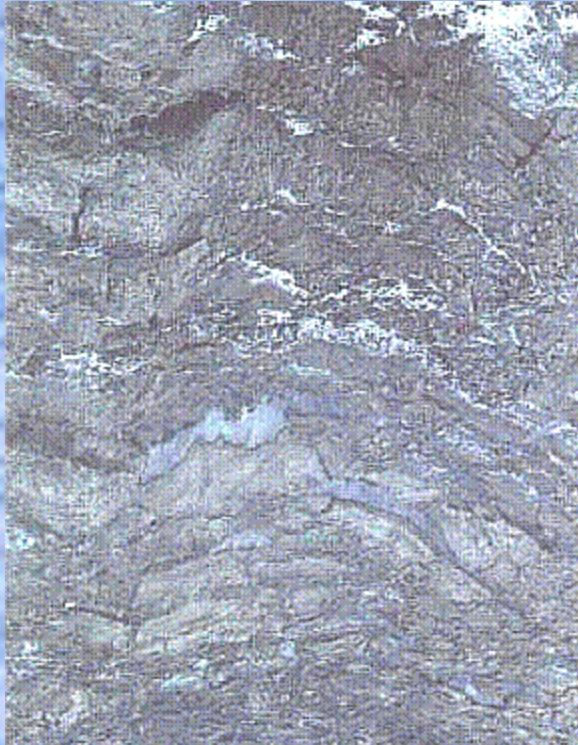
В области развития многолетнемерзлых пород среднегодовая температура пород отрицательная, а с поверхности в летний период формируется **слой сезонного оттаивания пород**. Глубина сезонного промерзания талых пород и сезонного оттаивания мерзлых пород обычно изменяется от первых десятков сантиметров в льдистых торфах до 3 – 5 м в скальных породах.





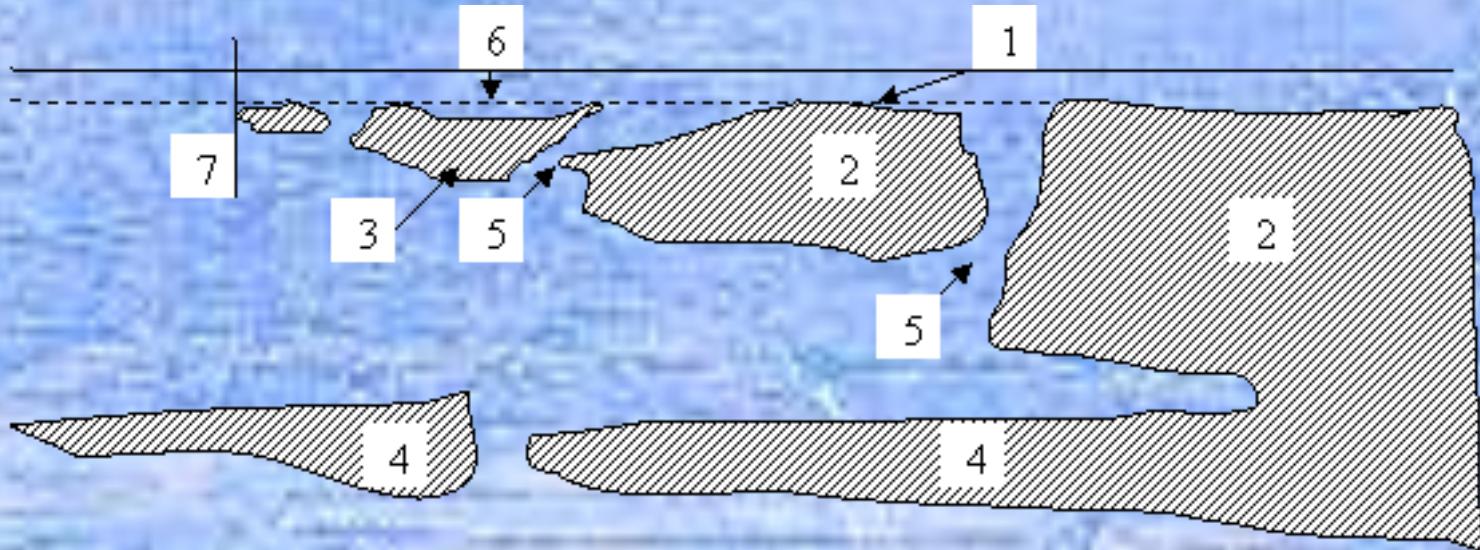
Глубина оттаивания меняется от года к году

Geotherms for site #2, Plateau Mountain, Alberta between 1976 and 1980, showing the variable shape of the lower limit of the freezing front from year to year and the variation in upfreezing from below from year to year. Maximum amount of upfreezing is about 1.5m in the dry, dense limestone bedrock.

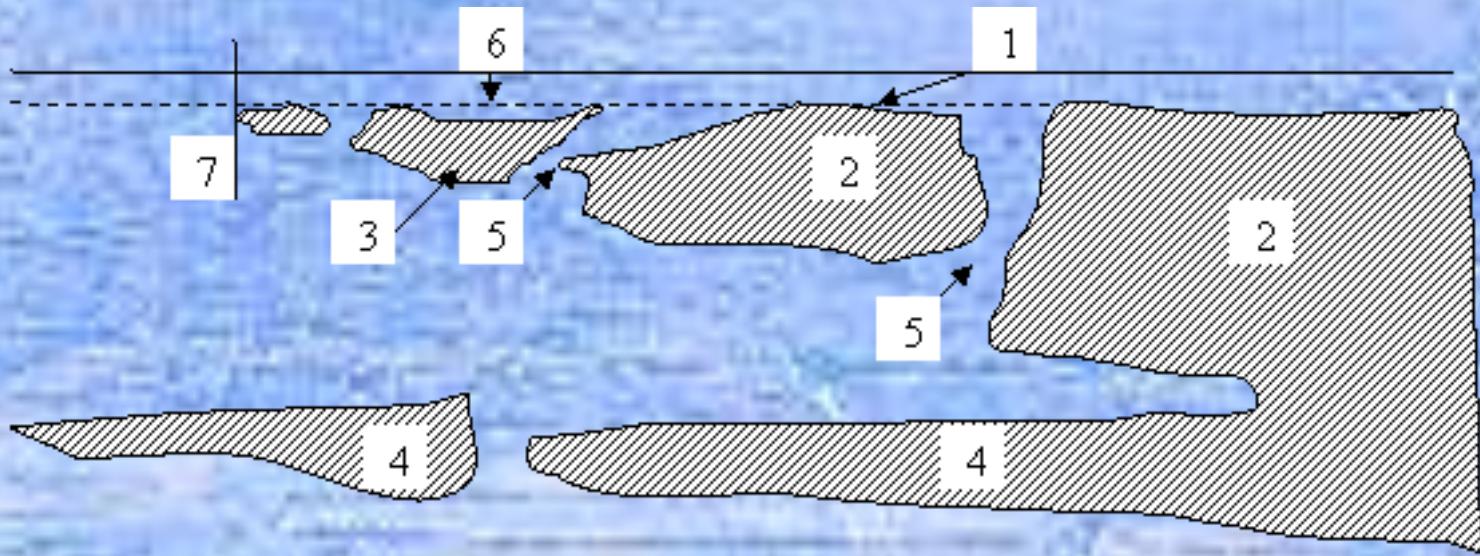


Многолетнемерзлые толщи горных пород по характеру промерзания подразделяются на **эпигенетически и сингенетически** промерзающие. К **эпигенетически** промерзшим (эпикриогенным) относятся горные породы, которые перешли в многолетнемерзлое состояние после того, как завершился процесс накопления осадков и их диагенетического преобразования.

Сингенетически промерзшие (синкриогенные) горные породы формируются на уже существующем мерзлом субстрате, когда геологически синхронно происходят накопление осадка и его переход в мерзлое состояние.

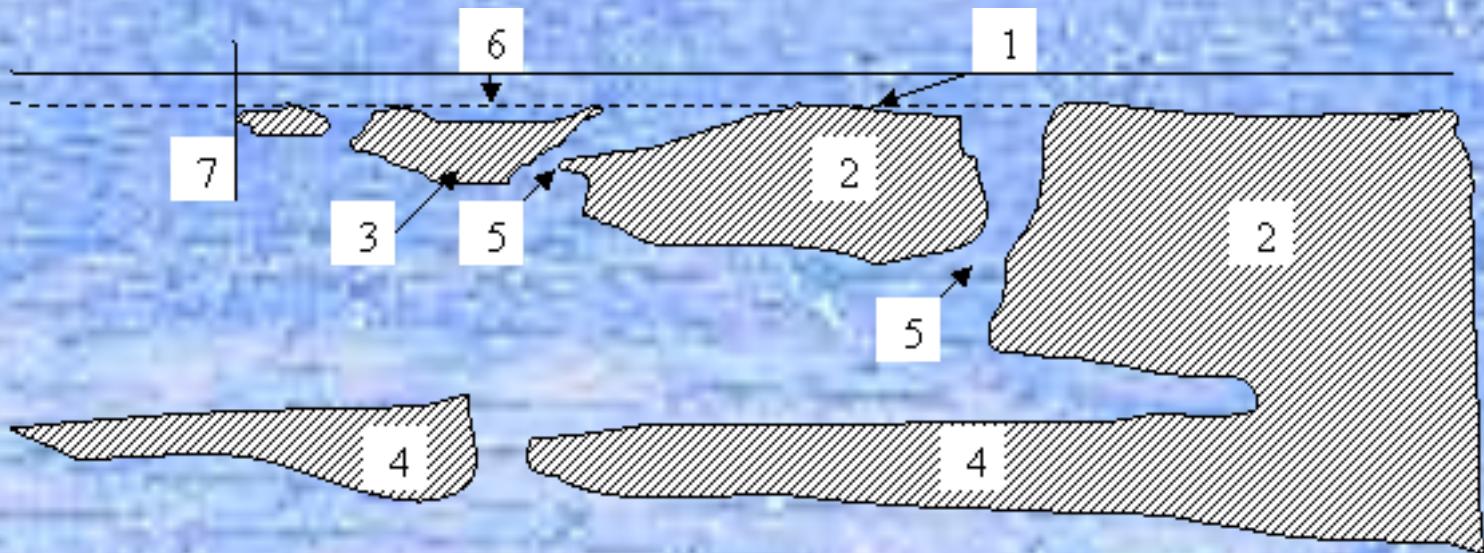


Строение переходной области на южной границе распространения многолетнемерзлых пород (по Кудрявцеву и Достовалову, 1967): 1 – слой сезонного оттаивания; 2 – многолетнемерзлые породы, распространенные с поверхности Земли; 3 - многолетнемерзлые породы, распространенные с небольшой глубины, а также перелетки; 4 - многолетнемерзлые породы, залегающие на значительной глубине, так называемые «крепицовые» толщи; 5 – сквозные талики; 6 – неквозной талик; 7 – граница распространения многолетнемерзлых пород



Глубина многолетнего промерзания горных пород по вертикали (т.е. мощность криолитозоны или мерзлой толщи) зависит от многих факторов и условий и их изменения в процессе промерзания. Поэтому строение толщи ММП и криолитозоны от кровли до подошвы может быть достаточно сложным. В вертикальном разрезе криолитозона может быть **непрерывной (сплошной) или прерывистой**.

По соотношению со слоем сезонного или многолетнего оттаивания ММП разделяются на **сливающиеся и несливающиеся**. Так, если верхняя поверхность мерзлых пород залегает непосредственно под слоем сезонного оттаивания, то мерзлые толщи являются сливющимися по разрезу. Если между верхней поверхностью мерзлой толщи и подошвой слоя зимнего промерзания сохраняется талый слой, то она является несливающейся.



При сильном потеплении климата в прошлом происходило многолетнее оттаивание мерзлой толщи с поверхности и ММП сохранялись на значительной глубине. Талые породы при дальнейшем похолодании климата снова промерзали с поверхности. Если вновь образовавшиеся ММП не смыкаются с залегающими на глубине, в этом случае толща пород называется **двуслойной**. При этом верхний слой мерзлых пород является геокриологически молодым (позднеголоценовым, современным), а нижний — древним или **«реликтовым» (4)** (позднеплейстоценовым или более древним).

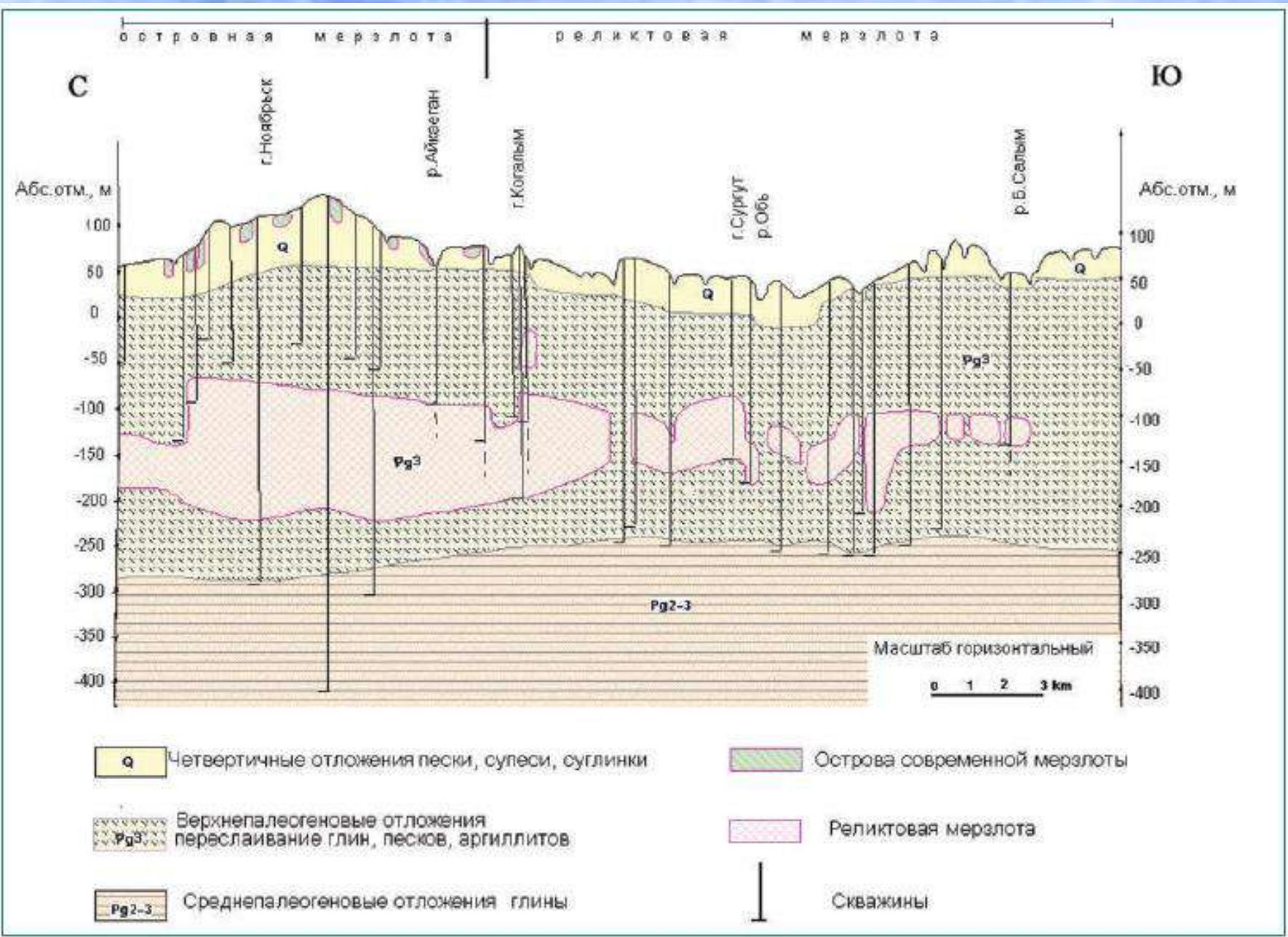
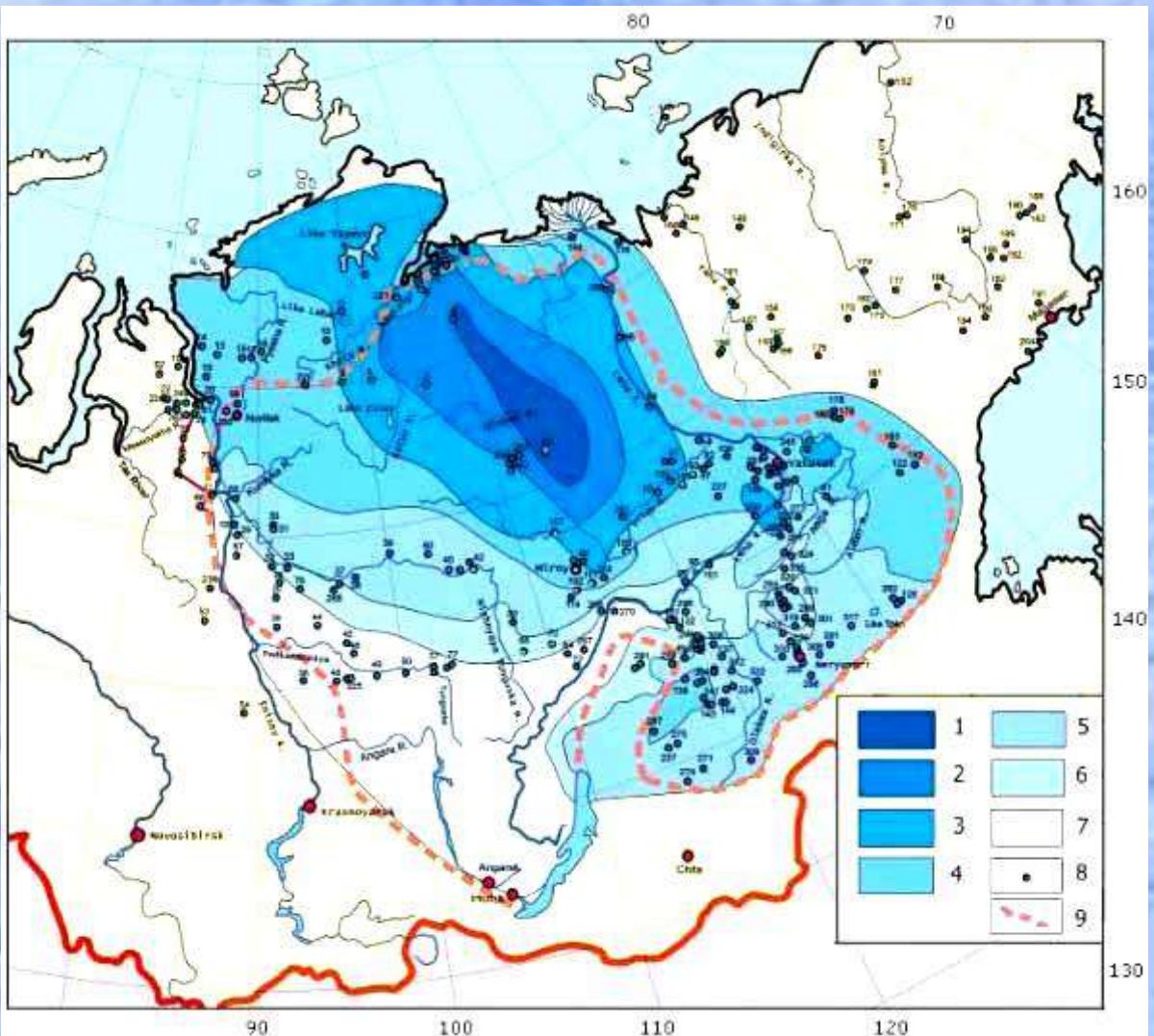
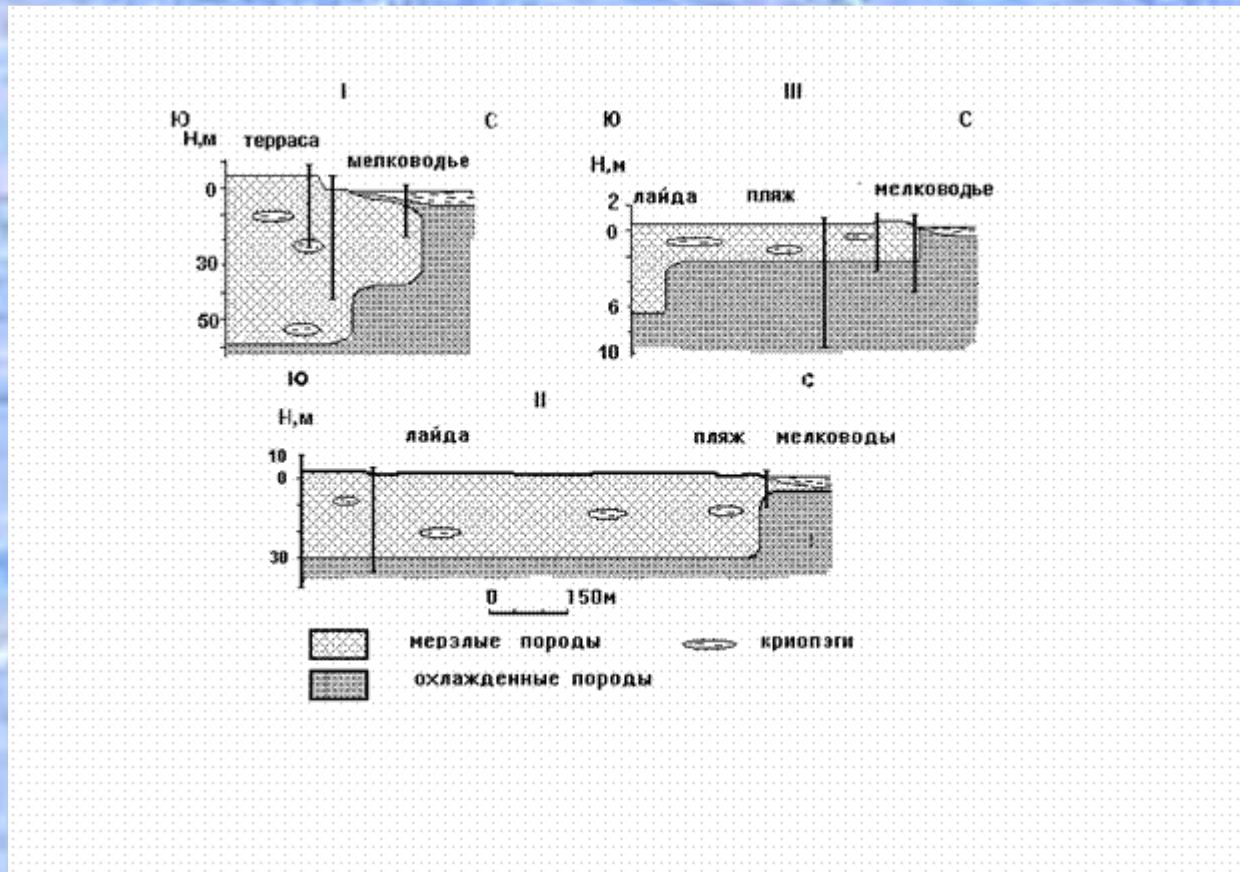


Рис. 4.3.1. Распространение мерзлых толщ на юге Западной Сибири (по Ananieva et al., 2002,



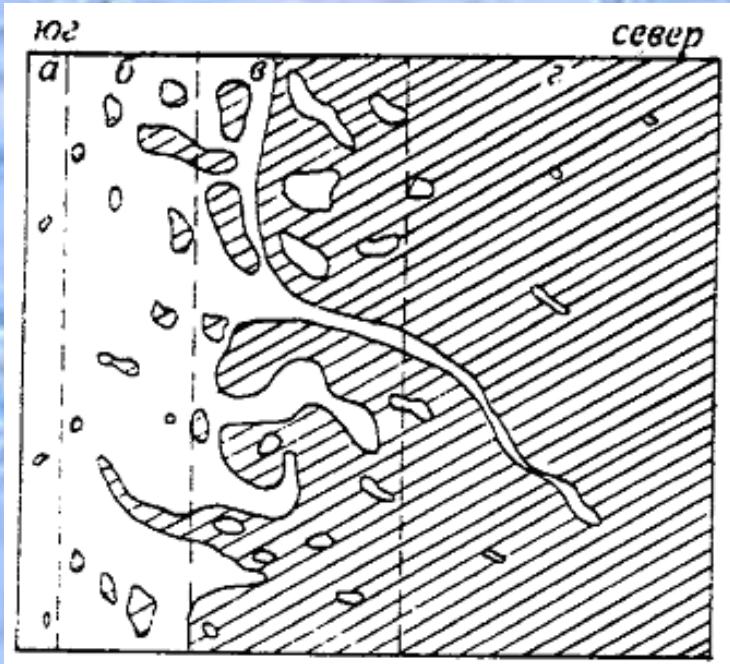
Permafrost thickness under the Russian Platform, underlain by the Yakutian Shield. 1=Continuous permafrost >1000 m thick; 2=continuous permafrost 800-1000 m thick; 3=continuous permafrost 500-800 m thick; 4= continuous permafrost 300-500 m thick; 5=continuous permafrost 100-300 m thick; 6=discontinuous permafrost <200 m thick; 7=discontinuous and sporadic permafrost <100 m thick. Dashed red line (9) is the boundary of the Siberian Platform. From Galushkin et al. (2013) with permission.

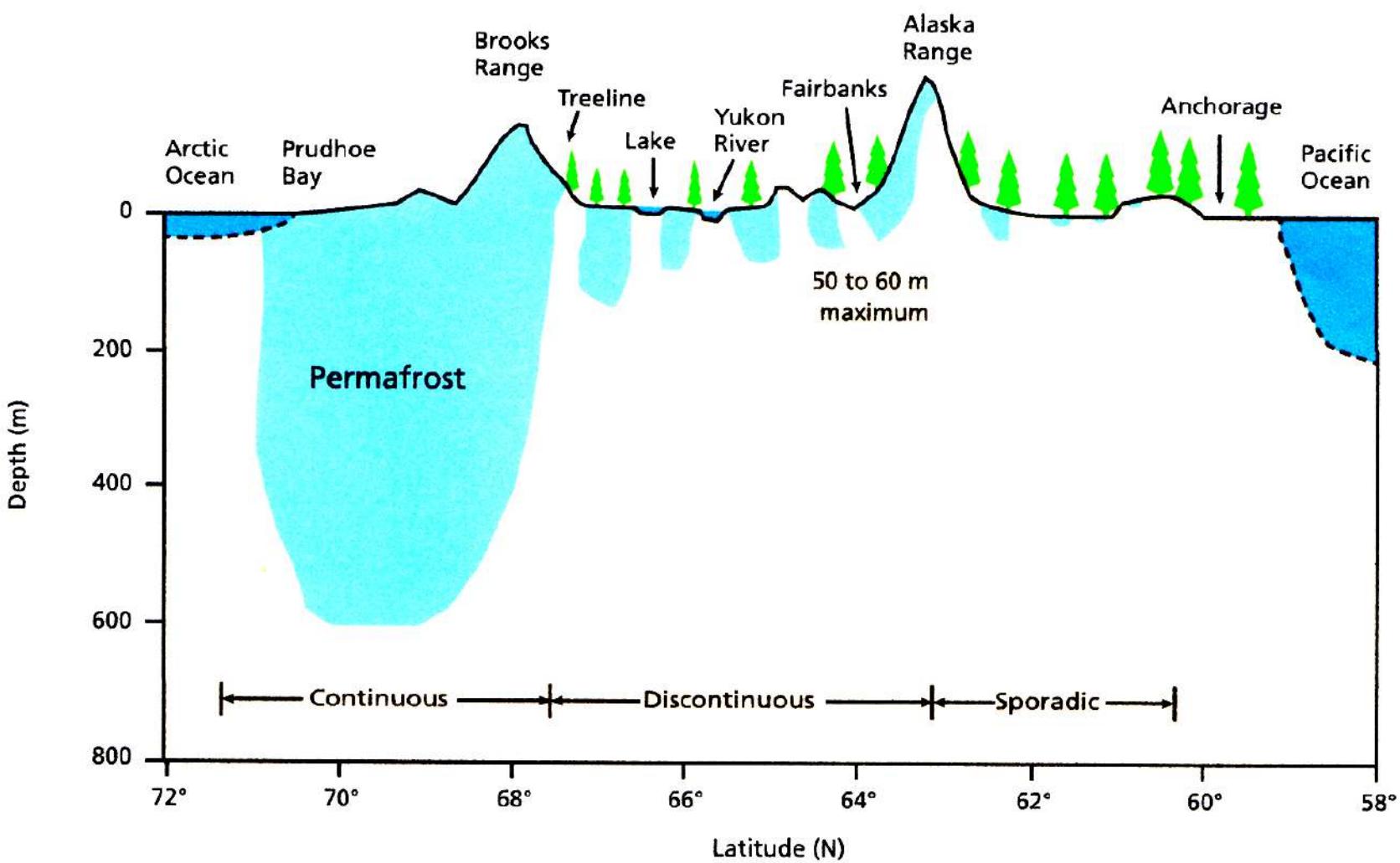
- 2) Кроме того, в разрезе криолитозоны наблюдается различное соотношение пород разных криогенных типов (мерзлых, морозных, охлажденных отрицательнотемпературных);
- 3) По составу и типу промерзания в разрезе присутствуют различные яруса слагающих ее пород (рыхлых неоген-четвертичных, как синкриогенных, так и эпикриогенных; скальных дочетвертичных эпикриогенных).



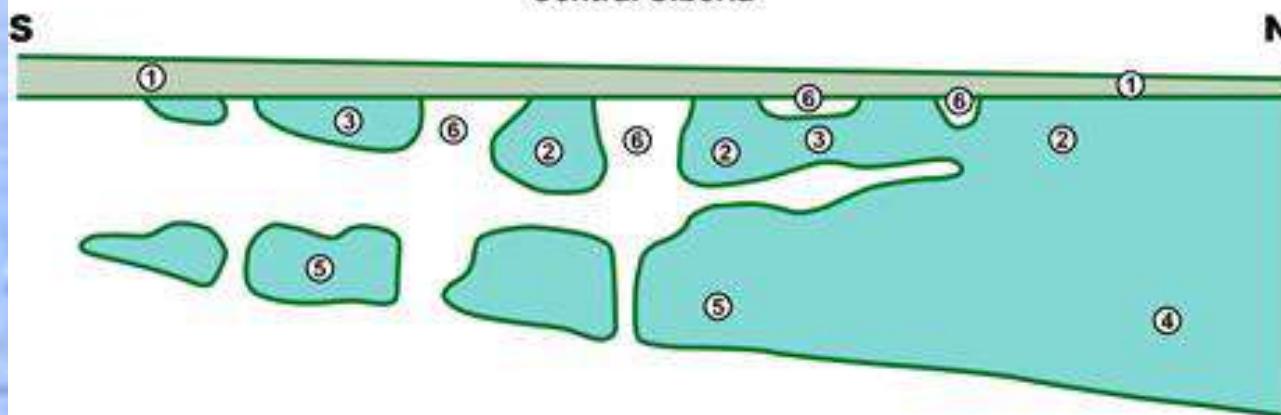
Распространение многолетнемерзлых пород по площади в зависимости от соотношения участков талых и мерзлых пород принято подразделять на четыре типа:

- 1) Островное (редкоостровное)** — отдельные разобщенные участки ММП занимают до 10% территории;
- 2) спорадическое (массивно-островное)** — 10—50% территории с ММП;
- 3) прерывистое** — 50—90% территории с ММП;
- 4) сплошное** — 90—100% с ММП. Первые три типа входят в южную геокриологическую зону, четвертый тип — в северную геокриологическую зону.





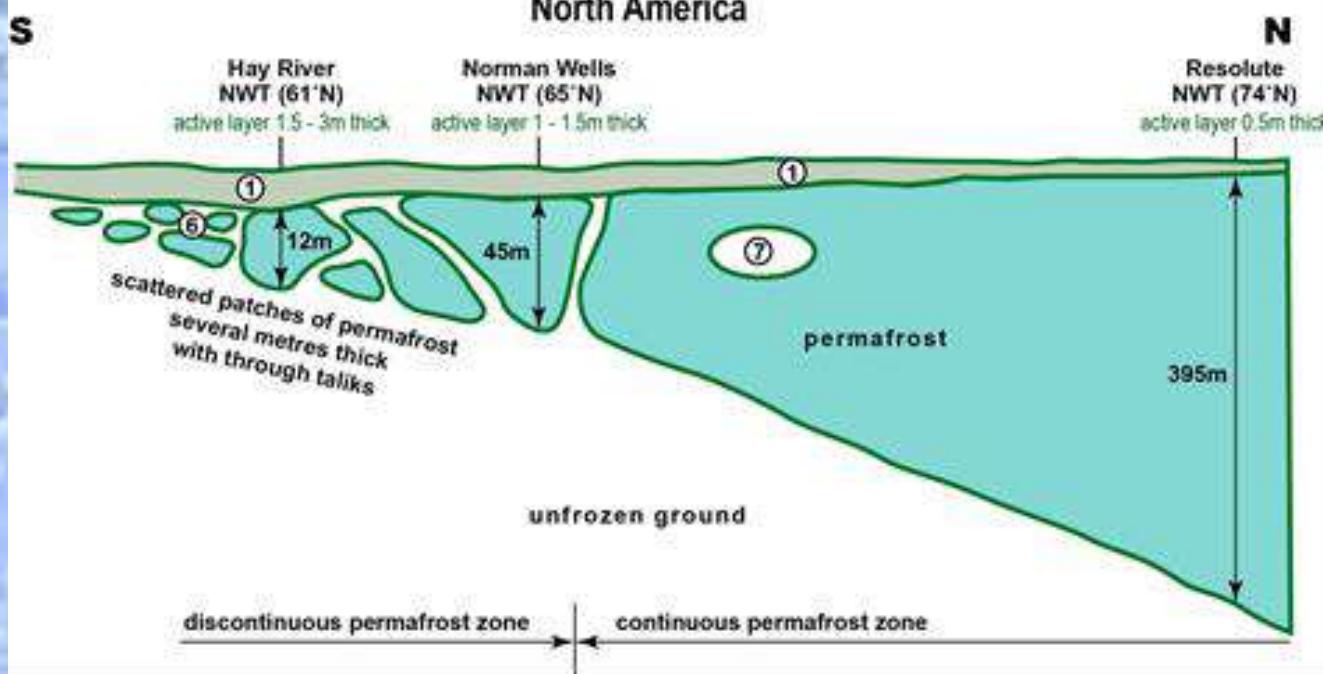
Central Siberia

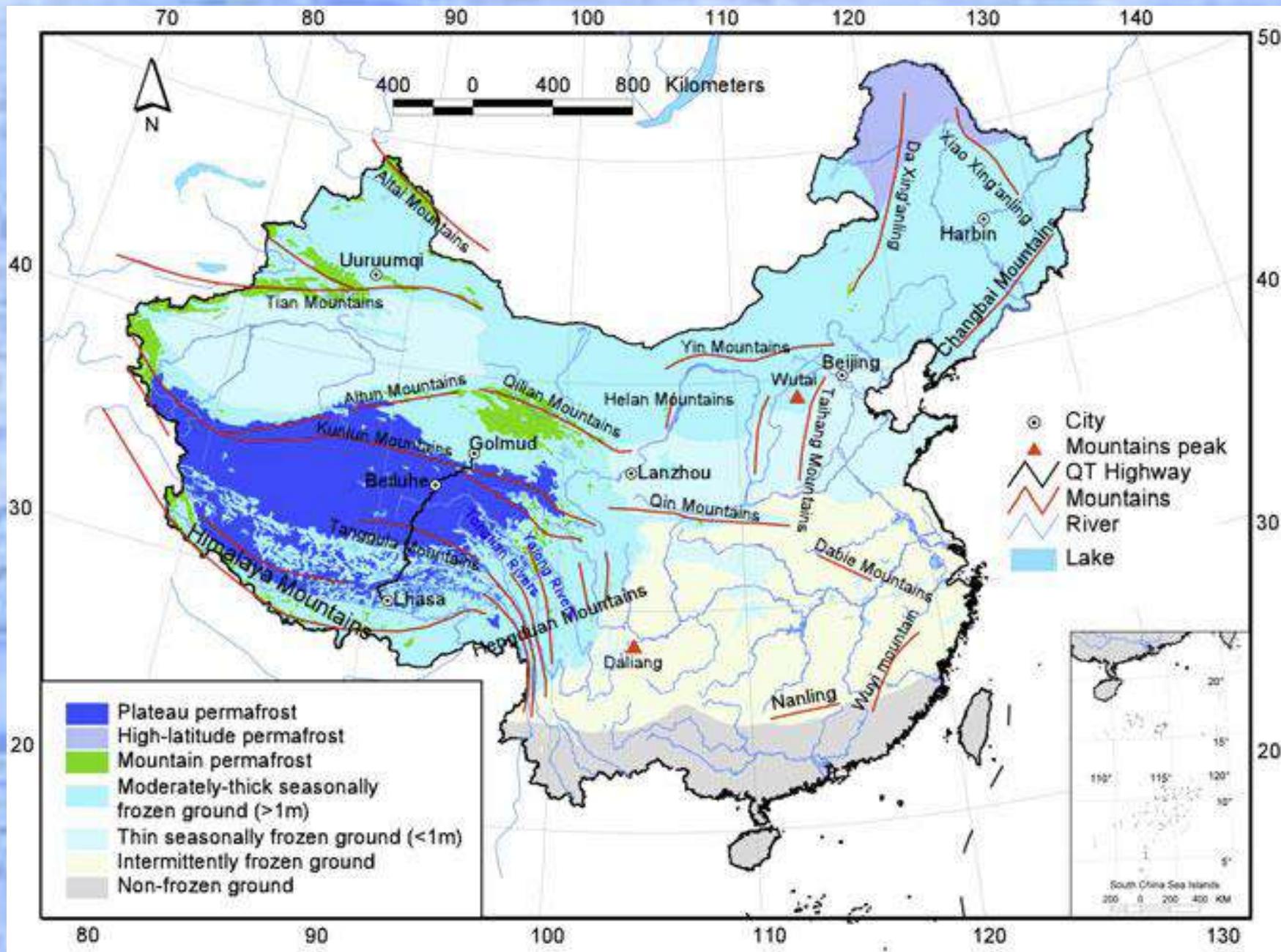


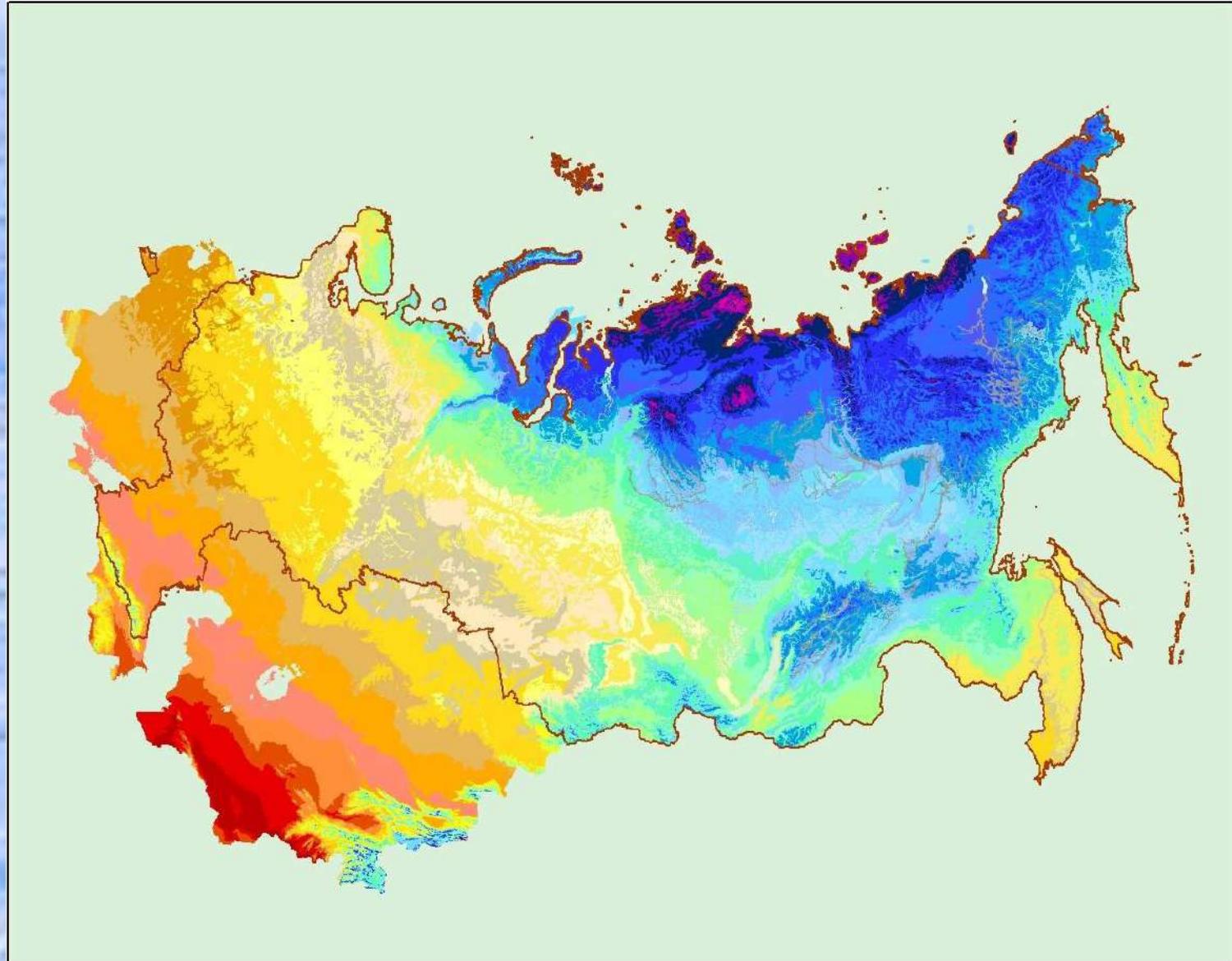
Change of character of the permafrost south to north

1. Layer of seasonal freezing and thawing
2. Contemporary continuous permafrost
3. Contemporary discontinuous permafrost
4. Relict continuous permafrost
5. Relict discontinuous permafrost
6. Open taliks
7. Closed taliks

North America







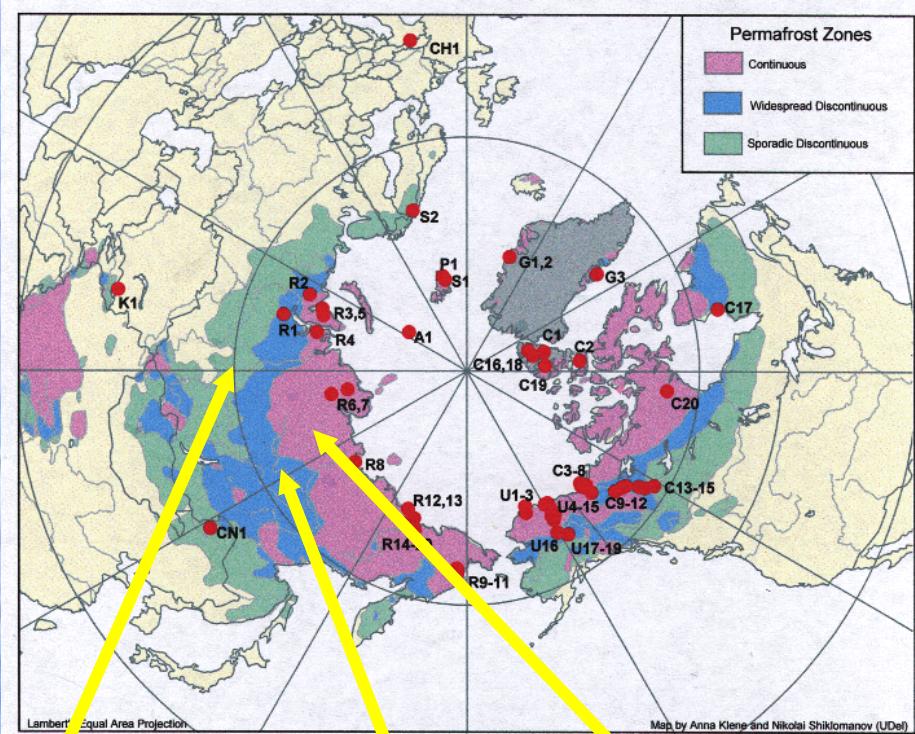
Colors are temperature intervals (MAGT) in area of permafrost, "Southern zone": +2÷-0.5°C

[light green], +2÷-2°C [yellow-green], +0.5÷-2°C [bright green], "Northern zone": -0.5÷-3°C [light blue], -0.5÷-5°C

[medium blue], -2÷-5°C [dark blue], -1÷-9°C [purple], -7÷-9°C [dark purple], -9÷-11°C [very dark blue], -11÷-13°C [black]

, -1÷-13°C [dark purple],

**Криолитозона занимает около
25% площади суши мира и 65% территории России**

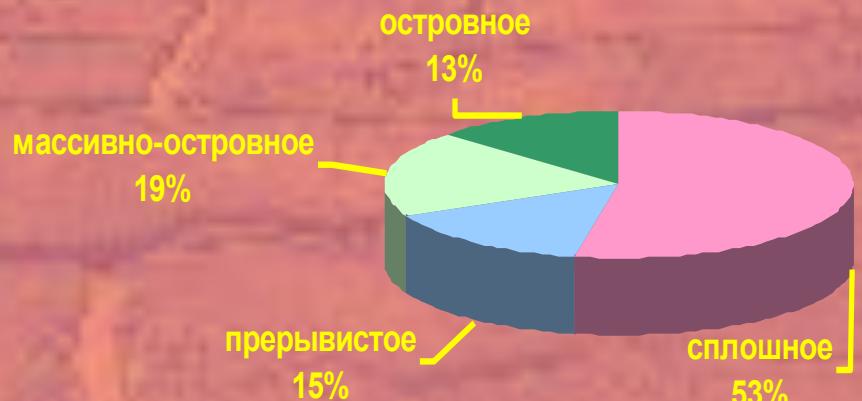


**Островное
распространение
ММП**

**Прерывистое
распространение
ММП**

**Сплошное
распространение
ММП**

**Доля основных типов
распространения ММП
в общей площади
многолетней криолитозоны
России:**



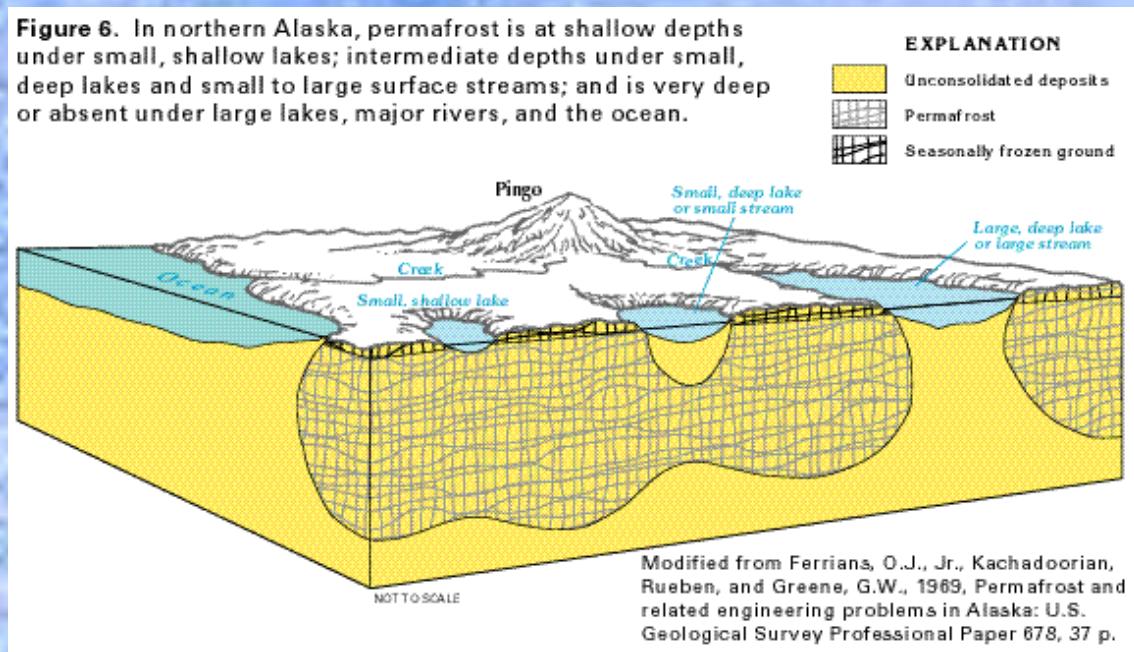
Северная и южная геокриологическая зона

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 многолетнемерзлых, талых и немерзлых пород	по площади, занимаемой многолетнемерзлыми породами в пределах зоны, %	по среднегодовой температуре почв, °C	
Многолетняя криолитозона (многолетнемерзлые горные породы)	Северная геокриологическая	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 геокриологическая	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 сезонномерзлая	То же	—	+2...+5 +5...+10 +10...+15	Длительноустойчивый Устойчивый Южный
	Южная сезонно- и кратковременномерзлая	Сплошная немерзлых пород		Выше +15	Субтропический



Южная геокриологическая зона с юга ограничена линией, называемой **южной границей распространения** ММП, которая на картах проводится по обнаруженным южным островам мерзлых пород. В горных районах низких широт граница распространения мерзлых пород называется **нижней высотной границей** их распространения.

Figure 6. In northern Alaska, permafrost is at shallow depths under small, shallow lakes; intermediate depths under small, deep lakes and small to large surface streams; and is very deep or absent under large lakes, major rivers, and the ocean.

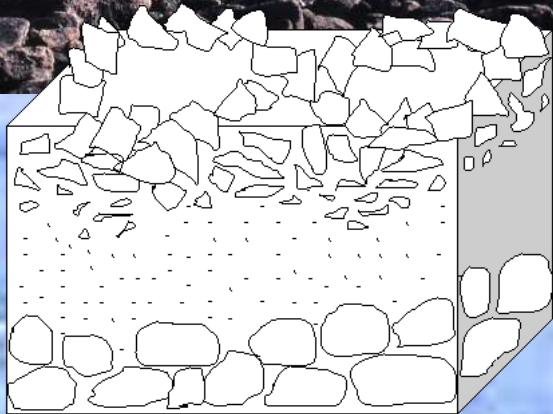


В криолитозоне, даже в северной геокриологической зоне, под крупными реками и озерами, на участках термальных источников подземных вод и в других местах встречаются участки, сложенные на всю мощность мерзлоты талыми породами. Такие участки среди ММП в пределах криолитозоны называются **таликами**. Их встречаемость уменьшается с юга на север и с возрастанием высоты рельефа. Талики могут быть сложены как водоносными, так и неводоносными породами.

История геокриологии

«А колодезя, великие государи, в Якуцком
сделать некоими мерами нельзя,
потому что земля летом только тает в
полтора аршина, а больше двух аршин
земля никогда не тает, а в исподи на дне
бывает земля всегда мёрзлая»

Из донесения якутского воеводы
М.О.Кровкова (1686 год)



Здесь так холодно, что покойники высакивают....

1 этап (до 1 половины XVIII) развития геокриологии

характеризуется обнаружением мерзлоты и первыми попытками объяснения причин ее существования. Естественно, что коренные жители Сибири всегда знали о ее существовании. В литературе первые сведения **о мерзлоте стали появляться лишь с XVI в., когда усилились поиски северного морского пути из России в Китай.** Примерно в это время появляются сведения о существовании мерзлых пород в Северной Америке. Позднее начинают поступать донесения от русских воевод и путешественников об обнаружении МП в Сибири и на Н. Земле. На север и восток Сибири отправляются целые экспедиции.

Эти экспедиции – такой же предмет национальной гордости, как Великая Отечественная война. Это был беспримерный подвиг народа, **свидетельство величия нации**, благодаря которому Россия стала страной, над которой не заходит солнце.



Процесс освоения территории Сибири русскими первопроходцами с конца XVI по XVIII столетие без преувеличений можно назвать **эпохой великих географических открытий в масштабах отечественной истории**. Ее главной особенностью являлось то, что большинство казаков, промышленных и гулящих людей, открывавших неизведанные ранее уголки Сибири, как правило, не имели светского образования, дававшего хотя бы приблизительное представления о достижениях европейской науки того времени. При этом они обладали рядом сложившихся в народной культуре самобытных навыков, дававших им возможность хорошо ориентироваться на обширных водных и сухопутных пространствах, осуществлять проходящие в экстремальных климатических условиях дальние плаванья на хрупких кочах и стругах, находить общий язык с аборигенным населением.

Отправившись в 1648 году в путешествие на небольших судах - "кочах", **Семен Дежнев и Федот Попов** первыми в мире доказали существование пролива между Азией и Америкой, подробно описали Чукотку, основали Анадырский острог.

Первопроходец **Василий Поярков в 1643-1646** руководил отрядом, посланным из Якутска для поиска путей в Приамурье. Его отряд первым совершил путешествие по Амуру, открыл реку Зея, Амурско-Зейскую равнину. Результатом похода Пояркова стало расширение русских владений на Дальнем Востоке, получение ценных сведений о природе и населении Приамурья.



Василий Васильевич Прончищев (1702–1736) — русский полярный исследователь Арктики и морской офицер. Участник и деятель большой северной экспедиции. На него была возложена задача произвести описание берега Ледовитого океана от устья Лены к западу. Под его командой была дубель-шлюпка "Якутск" (длиной 70 фут., шириной 18 фут., углублением 6,5 фут.). На этом судне он вышел 30 июня 1735 г. из Якутска вместе с лейтенантом Лассиниусом. 13 августа Прончищев был у выхода в море у Быковского мыса; с ним были: подштурман Челюскин, геодезист Чекин, иеромонах, подлекарь и до 50 человек команды. Экспедицию сопровождала молодая жена Прончищева Татьяна Фёдоровна — первая европейская женщина, участница полярного плавания, бывшая так далеко на севере. Обогнув дельту, Прончищев подошел к устью Оленека, где и зазимовал в двух избах, построенных им же из плавника. Летом 1736 г. Прончищев вышел в океан и описал берег на запад до Анабары, по которому посыпал геодезиста, и через льды добрался до Хатангской губы; отсюда он прошел на запад до 77°29' северной широты — самое северное плавание в этих местах до 1878 г. (Вега). Льды вынудили Прончищева вернуться к Хатангской губе и далее к Оленеку. Тем временем Прончищев, больной с самого начала плавания, скончался. Войти в устье удалось только 2 сентября; вскоре после этого похоронили Прончищева, неподалеку от Усть-Оленека, на высокой сопке. Несмотря на уговоры команды, Татьяна не покинула могилу любимого. Через пять дней скончалась и она. Ее похоронили рядом с Василием (русские «Ромео и Джульетта»).

Экспедиция Прончищева была первой, которая составила точную карту русла реки Лена от Якутска до устья, а также карту побережья моря Лаптевых от дельты Лены до залива Фаддея. Общая длина описанной Прончищевым береговой линии составила около 500 километров.



На берегу, в бухте, что носит имена Марии и Василия Прончищевых, можно найти цветы ледяной сиверсии (*Siewersia glacialis*). Лепестки таймырской розы - прозрачно-нежные.

Рядом с волшебным цветком в вечной мерзлоте были процарапаны слова: **"Не срывайте. Ради них. Ради всех".**





В 1754 г. Ломоносов дал вполне научное представление об условиях развития и широком распространении ММП. Он отмечал, что в Сибири, включая горные страны на границе с Китаем, **земля все лето находится в мерзлом состоянии**. Связывал он это с тем, что **«зимний холод летний жар преодолевает»** в связи с холодным климатом.

2 этап (2я половина XVIII - 1 половина XIX в.) – это накопление фактического материала и признание научной общественностью широкого распространения мерзлоты на территории Сибири и Дальнего Востока. В этот этап организуются крупные экспедиции на северо-восток Сибири, острова Северного Ледовитого океана, на Дальний восток. В то время исследователи были естествоиспытателями широкого профиля и подробно описывали все, что видели, в том числе и мерзлые породы, и подземные льды. Их имена навсегда остались в истории. В географических названиях Арктики - имена Прончищева, братьев Лаптевых, Врангеля, Анжу и др. Именем Миддендорфа назван вид кустарниковой бересклеты, широко развитой на северо-востоке и.т.д.



Алексáндр Фёдорович Мíddenдорф (нем. Alexander Theodor von Middendorff; 18 августа 1815 — 24 января 1894) — один из основоположников мерзлотоведения, российский путешественник, географ, ботаник и натуралист. В 1842 году Академия наук по рекомендации К. М. Бэра поручила Миддендорфу организовать экспедицию в Северную и Восточную Сибирь. В период подготовки экспедиции Миддендорф составил карту Таймыра, используя работы С. И. Челюскина и Х. П. Лаптева.

В период своей экспедиции в Северную Сибирь и на Дальний Восток в 1842—1845 открыл плато Пutorana, стал первым исследователем полуострова Таймыр. В числе научных достижений Александра Миддендорфа первая научная характеристика климата Сибири, определение южной границы распространения многолетней (вечной) мерзлоты, Внизу – лилейник Миддендорфа



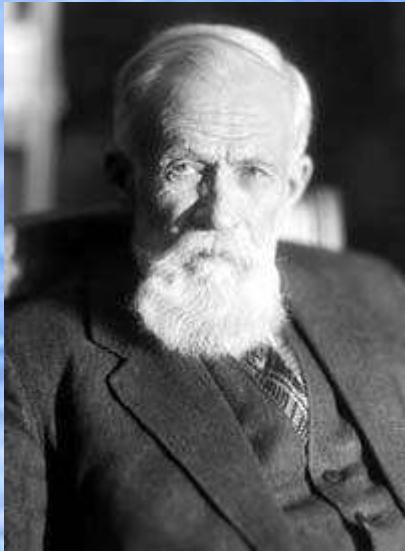
Figure 10.A Louis Agassiz (1807–1873) played a major role in the development of glacial theory. (Courtesy of Harvard University Archives)

Одним из первых мнение о ледниковом периоде высказал великий немецкий поэт И.-В. Гёте, который, как известно, увлекался естественными науками. Нужно в самом деле иметь воображение, чтобы представить себе эти ледники.

Дальнейшее развитие ледниковой теории связано с исследованиями Л. Агассиза в Швейцарии в 30-х годах позапрошлого века.



Историческим памятником в изучении мерзлых пород стала Шергинская шахта. Ф.Шергин в 1828 г. возглавлял работу по проходке колодца в г. Якутске. За 9 лет прорыли колодец глубиной 116 м и не вскрыли воду. Зато были получены первые сведения о мощности ММП (более 116 м). Были проведены первые измерения Т пород, установлена зависимость СТС от литологического состава пород.



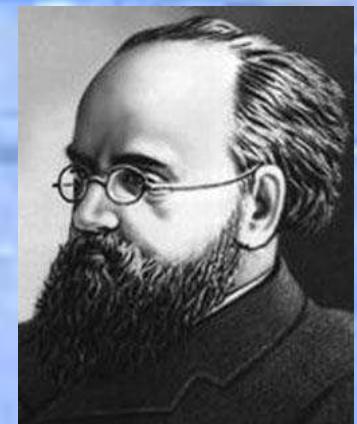
Влади́мир Афана́сьевич Обруче́в (28 сентября (10 октября) 1863, село Клепенино, Тверская губерния — 19 июня 1956, Москва) — русский геолог, палеонтолог, географ, писатель-фантаст . Исследователь геологии Сибири, Центральной и Средней Азии, открыл несколько хребтов в горах Наньшань, хребты Даурский и Борщовочный, исследовал нагорье Бэйшань. В 1892—1894 Обручев участвовал в качестве геолога в четвёртой экспедиции Григория Потанина. В 1890-х Обручев занимался проектированием Закаспийской и Транссибирской железной дорог. Первый штатный геолог Сибири. Его именем был назван первый институт мерзлотоведения в Москве.

3 этап (2я половина XIX - начало XX в.) – в связи с началом промышленного освоения Сибири зарождается инженерное мерзлотоведение. Активное изучение МП было вызвано необходимостью предотвращения деформаций и разрушения инженерных сооружений, а также серьезными затруднениями в водоснабжении.



С именем князя **Петра Алексеевича Кропоткина** (1842 — 1921) — русский революционер, теоретик анархизма, географ. С ним связаны первые исследования и первые научные обобщения по проблеме древнего оледенения Сибири, которые остаются актуальными и сегодня. Известно, что Кропоткин был выдающимся геологом своего времени, одним из основоположников теории великих древних оледенений Земли

Звучали, однако, и голоса скептиков, выражавших сомнения в физической возможности оледенений Сибири. Тон этих возражений задал крупнейший климатолог того времени **Алексадр Иванович Войков**, утверждавший, что климат Сибири был резко континентальным, а значит — слишком сухим, чтобы обеспечить развитие ледниковых покровов





Руаль Амундсен (16 июля 1872 — вероятно, 18 июня 1928) — норвежский полярный путешественник и исследователь. Первый человек, достигший Южного полюса (14 декабря 1911 года). Первый человек (совместно с Оскаром Вистингом), побывавший на обоих географических полюсах планеты. Первый исследователь, совершивший морской переход и Северо-восточным (вдоль берегов Сибири), и Северо-западным морским путём (по проливам Канадского архипелага). Погиб в 1928 году во время поисков экспедиции Умберто Нобиле.

Одному журналисту, который спрашивал, что же его так очаровывает в полярных областях, Амундсен ответил: «Ах, если бы вам когда-нибудь довелось увидеть своими глазами, как там чудесно, — там я хотел бы умереть».

Вероятно, один из лучших в мире организаторов полярных экспедиций: «Ко всему подготовиться, все предусмотреть, а потом ни перед чем не отступать...»

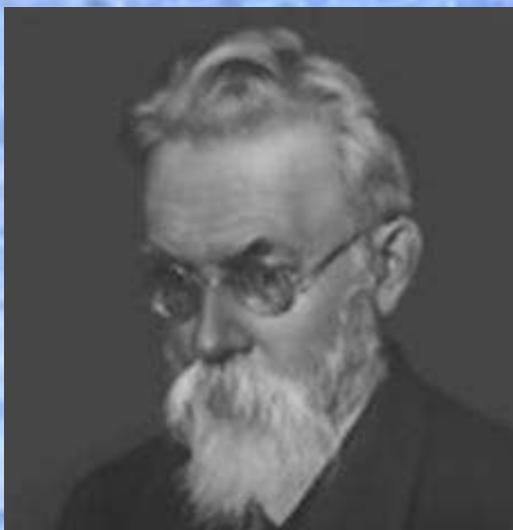


**НИНА АЛЕКСАНДРОВНА
ВЕЛЬМИНА
(1912-1999 гг.)**

*Гидрогеолог-мерзлотовед,
кандидат технических наук,
член Союза писателей СССР и РФ*

4этап (начало – середина XX в.) – становление геокриологии (мерзлотоведения) как науки.

Этап характеризуется организацией специальных учреждений по подготовке кадров для изучения КЛЗ. По инициативе Сумгина и Вернадского организована КИВМ (1929). С 1927 по 1936 она организовала мерзлотные станции в Сков., Петр.-Заб., Ан., Иг., Як., Вор., Нор. Мерзлотные исследования выполнялись для проектирования БАМ (1932-1935). В 1936 КИВМ была реорганизована в комитет по вечной мерзлоте, а затем в Ин-т мерзлотоведения им Обручева (1939). В этот этап регулярно проводятся всесоюзные совещания по мерзлотоведению, публикуются монографии и специальные журналы. Встает проблема молодых кадров мерзлотоведов. В начале Сумгин и др. читали отдельные курсы лекций в ЛГУ, МГРИ, МГУ.



Михаил Иванович Сумгин (1873—1942) — один из основателей учения о вечной мерзлоте.

В 1929 году по его инициативе и при поддержке академика В. И. Вернадского в АН СССР организована постоянная комиссия по изучению вечной мерзлоты (КИВМ) под председательством академика В. А. Обручева. В 1939 году Комиссия преобразована в Институт мерзлотоведения им. В. А. Обручева. С именем Сумгина связаны основополагающие понятия и первые классификацииечно- и сезонномёрзлых горных пород.

В 1927 г. М.И. Сумгин обобщил накопленные к тому времени знания в книге «Вечная мерзлота почвы в пределах СССР».

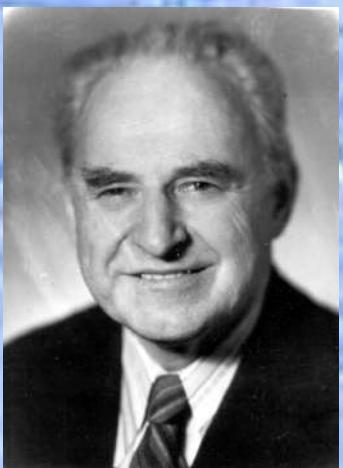
Криосфера (от греч. *Kryos* — холод и *Sphaira* — шар) — одна из географических оболочек Земли, характеризующаяся наличием или возможностью существования льда. Криосфера расположена в пределах теплового взаимодействия атмосферы, гидросферы и литосферы. Нижняя граница совпадает с подошвой слоя мёрзлых и охлажденных горных пород. Этот слой характеризуется большой устойчивостью и достигает максимальной глубины залегания от поверхности Земли в высоких широтах - в Антарктиде (свыше 4 км) и Субарктике (около 1,5 км), но отличается сезонной изменчивостью и выклинивается в средних и низких широтах. Верхняя граница криосферы проходит на высотах около 100 км над уровнем моря.

Криолитозона (от крио..., греч. *lithos* — камень и зона), часть криосферы, самый верхний слой земной коры, характеризующийся в течение всего года или хотя бы короткое время (но не менее суток) отрицательной температурой почв и горных пород и наличием или возможностью существования подземных льдов. Главная особенность К. — протекание процессов в интервале температур, включающем точку замерзания воды (0°C). Термин предложен П. Ф. Швецовым в 1955

Швецов Петр Филимонович [14 (27).01.1910—09.06.1992], советский мерзлотовед и гидрогеолог, член-корр. АН СССР (1953). Сотрудник института мерзлотоведения (в 1956—58 директор); с 1962 заведующий лабораторией Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО). Основные труды связаны с изучением подземных вод и геотермических условий многолетнемёрзлых толщ.



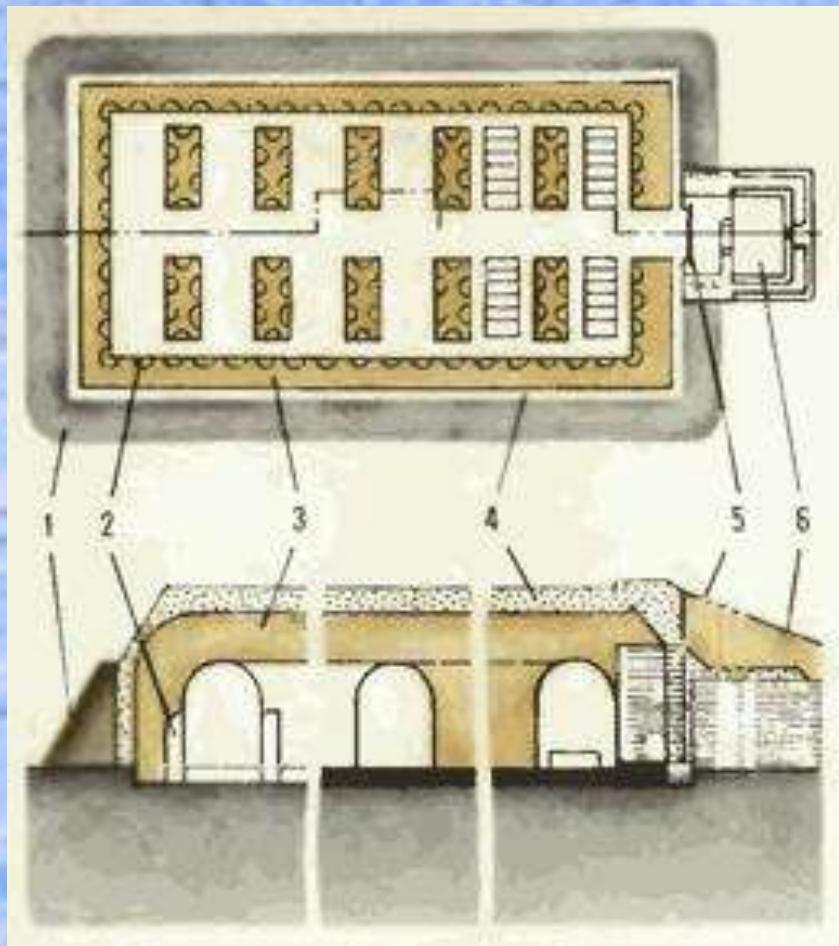
Цытович Николай Александрович [р. 25.5.1900, с. Мхиничи Чериковского района Могилёвской области 1984], учёный в области геокриологии, механики грунтов, инженерной геологии, член-корреспондент АН СССР (1943). Работал в институте мерзлотоведения АН СССР; с 1952 заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева. В 1947–53 председатель Президиума Якутского филиала АН СССР. В 1931 году Николаем Александровичем совместно с М.И.Сумгиным была написана первая инструкция по исследованию вечной мерзлоты в строительных целях. Автор учебника для вузов «Основы механики грунтов» (1934), переведённого на многие языки мира.



Вялов Сергей Степанович — доктор технических наук, профессор. Создатель теории реологии мерзлых грунтов.



Школа в г.Якутске с проветриваемым подпольем
(построена в 80-х гг. 20 столетия)

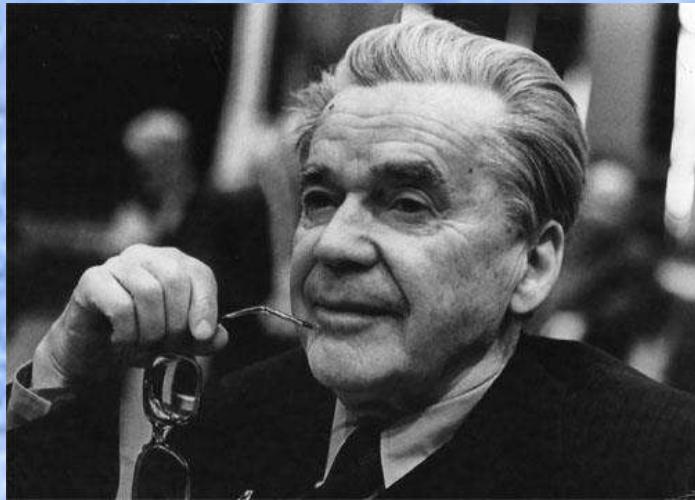


**Крылов Михаил
Михайлович** –
изобретатель
«искусственной
мерзлоты» -
огромных ледяных
складов, автор
предложения о
защите дамбы
Дмитровского
водохранилища во
время Великой
Отечественной
войны.



В 1953 г. на геологическом факультете МГУ организована **кафедра мерзлотоведения**

В 1961 г. **Московский ин-т мерзлотоведения был реорганизован – мерзлотные отделы в ПНИИИС и НИИОСП Госстроя СССР и ИМ СО АНССР в Якутске** (П.И. Мельников). 1970 – Научный совет по криологии Земли при Президиуме АН СССР, 1983 – МАМ. Проводятся активные мерзлотные исследования в проектных и НИ организациях разл. профиля и на кафедрах ВУЗов.



Павел Иванович Мельников (1908- 1994). В 1941 г. на базе Якутской экспедиции Института мерзлотоведения им. В.А.Обручева Постановлением СНК СССР было решено организовать в г.Якутске научно-исследовательскую мерзлотную станцию этого института (ЯНИМС). Начальником ее назначается П.И.Мельников. Благодаря энергии, настойчивости и энтузиазму П.И.Мельникова ЯНИМС за короткий период становится одной из ведущих научных организаций г.Якутска и республики. В 1942 г. впервые в Якутии сооружается подземная научная лаборатория для изучения и испытания мерзлых грунтов.

Павел Иванович Мельников был первым Президентом Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA, США, Аляска, Фебенкс).



Владимир Алексеевич Кудрявцев (23.07.1911, Петербург 28.05.1982, Москва; похоронен на Кунцевском кладбище) мерзлотовед и гидрогеолог, заслуженный деятель науки РСФСР (1971), доктор географических наук (1950), профессор геологического факультета, декан геологического факультета (1962—1963, 1971—1981), основатель (1953) и зав. кафедрой мерзлотоведения, главный редактор и составитель Геокриологической карты СССР масштаба 1:2500000, главный редактор журнала "Вестн. Моск. ун-та. Сер. геология" (1971—1982), главный редактор издания "Мерзлотные исследования" (МГУ; 1960—1982), член редколлегии многотомного издания "Инженерная геология СССР" (1970—1982). Награжден орденами Трудового Красного Знамени (1981), Красной Звезды (1945), "Знак Почета" (1963); лауреат 1-ой премии имени М.В.Ломоносова за цикл исследований по разработке и внедрению в практику методики геокриологической (мерзлотной) съемки и прогноза, 1977 г.

A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. The background is a dramatic, reddish-pink sky, likely from a sunset or sunrise. The lighting creates strong highlights and shadows on the ice's surface.

Общая геокриология

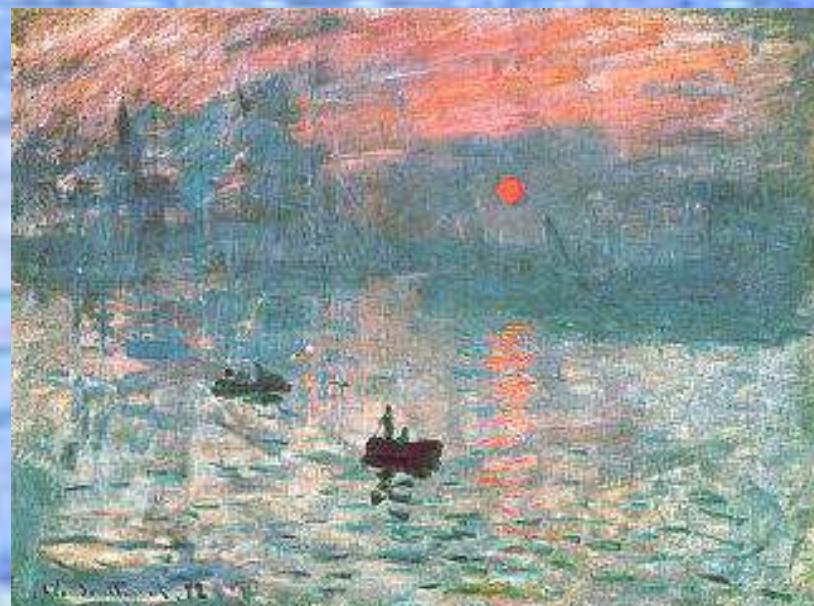
**Методология геокриологии включает также
принцип**

**«все течет, все изменяется...»
(Гераклит, 6 в. до н.э.)**

**Поэтому важна не «фотография» (В.А.Кудрявцев)
природы, а закономерности ее развития**

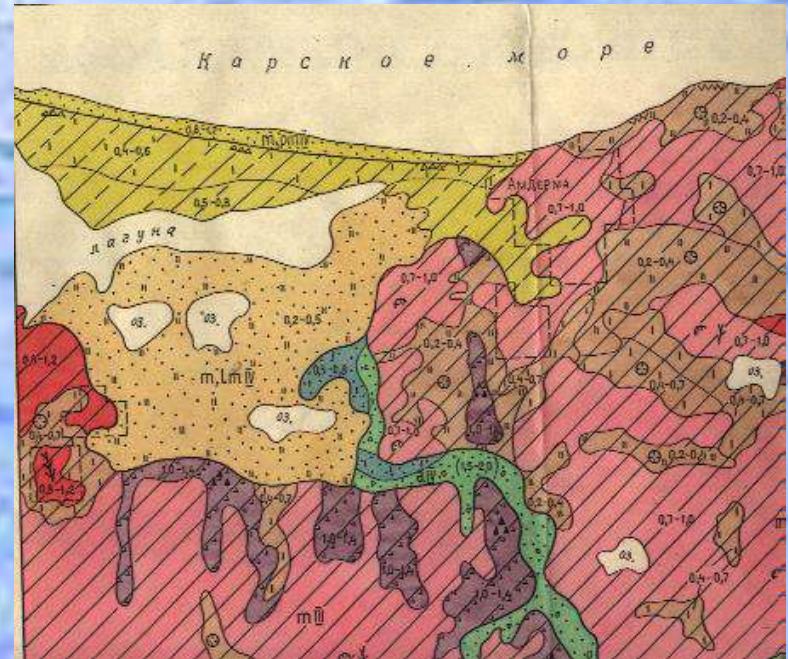
Ладшафтно-ключевой метод

Прибой в Северном ледовитом океане.
Фото

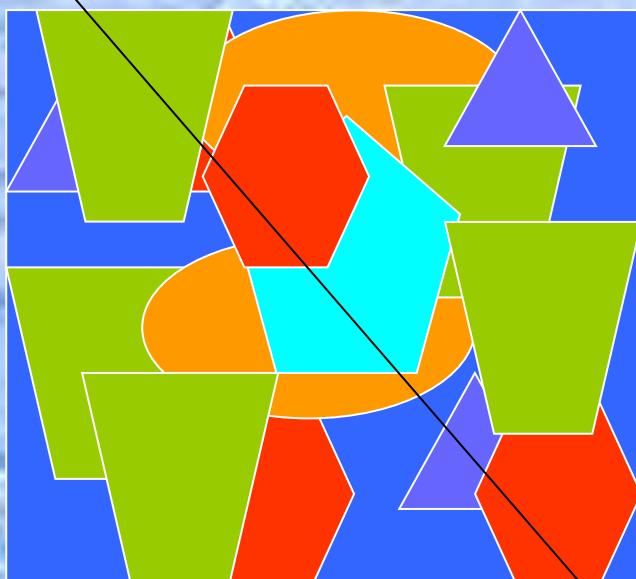


“Впечатление” Клода Моне (1872).
«Главная» картина импрессионизма -
Порт города Гавр (Франция):
... “В наброске для комнатных обоев и то
больше законченности, чем в этом
морском пейзаже”

Ладшафтно-ключевой метод - один из наиболее используемых в геокриологии

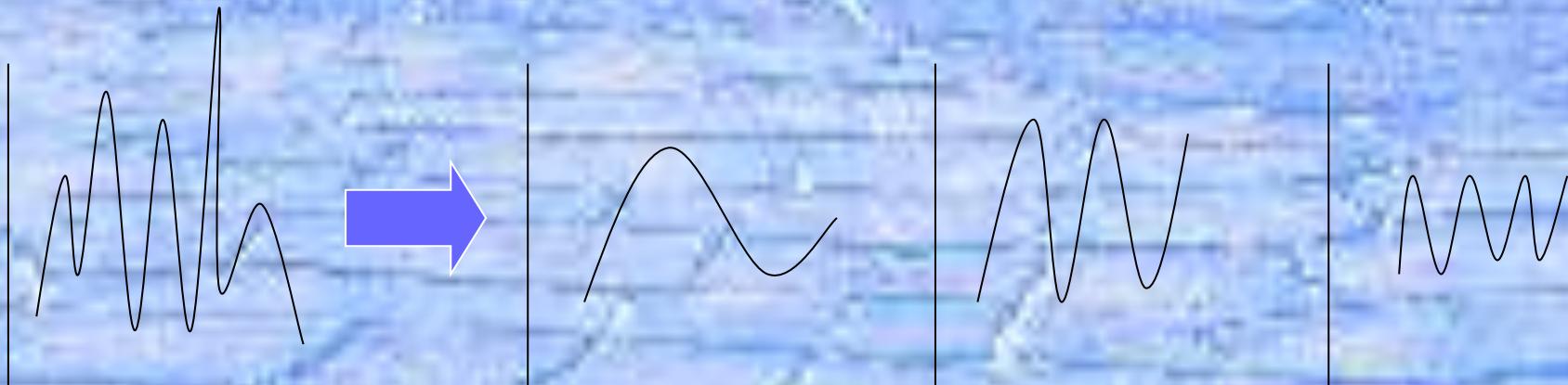


Ладшафтно-ключевой метод



мерзлые породы

Важно использование математики:



Важно также не уходить
с математикой в
потусторонний мир

Тепловой (температурный) режим горных пород



Распределение температур зимой

T

H

LE

$R-E=Rn$ –
Суммарная радиация отрицательна

Теплый
воздух

Испарение –
конденсация



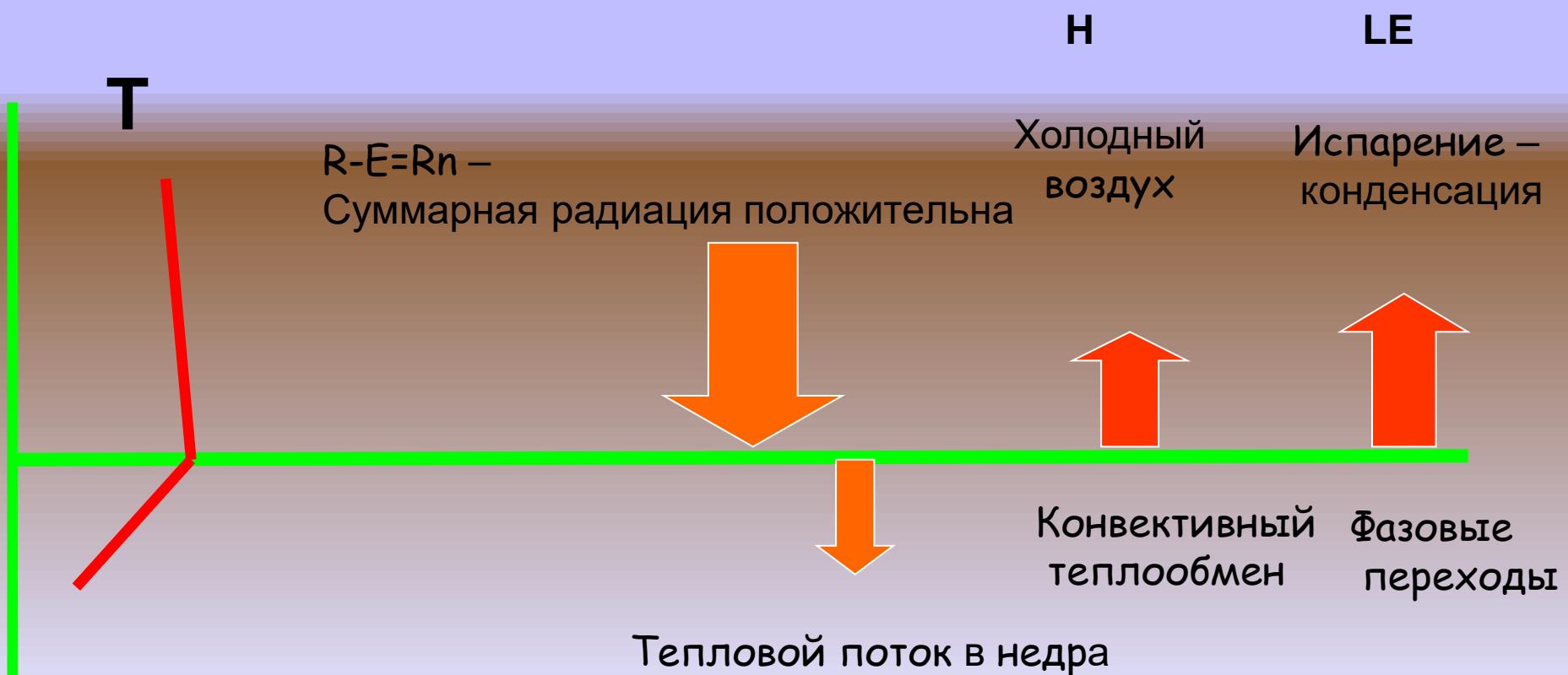
Конвективный
теплообмен



Фазовые
переходы

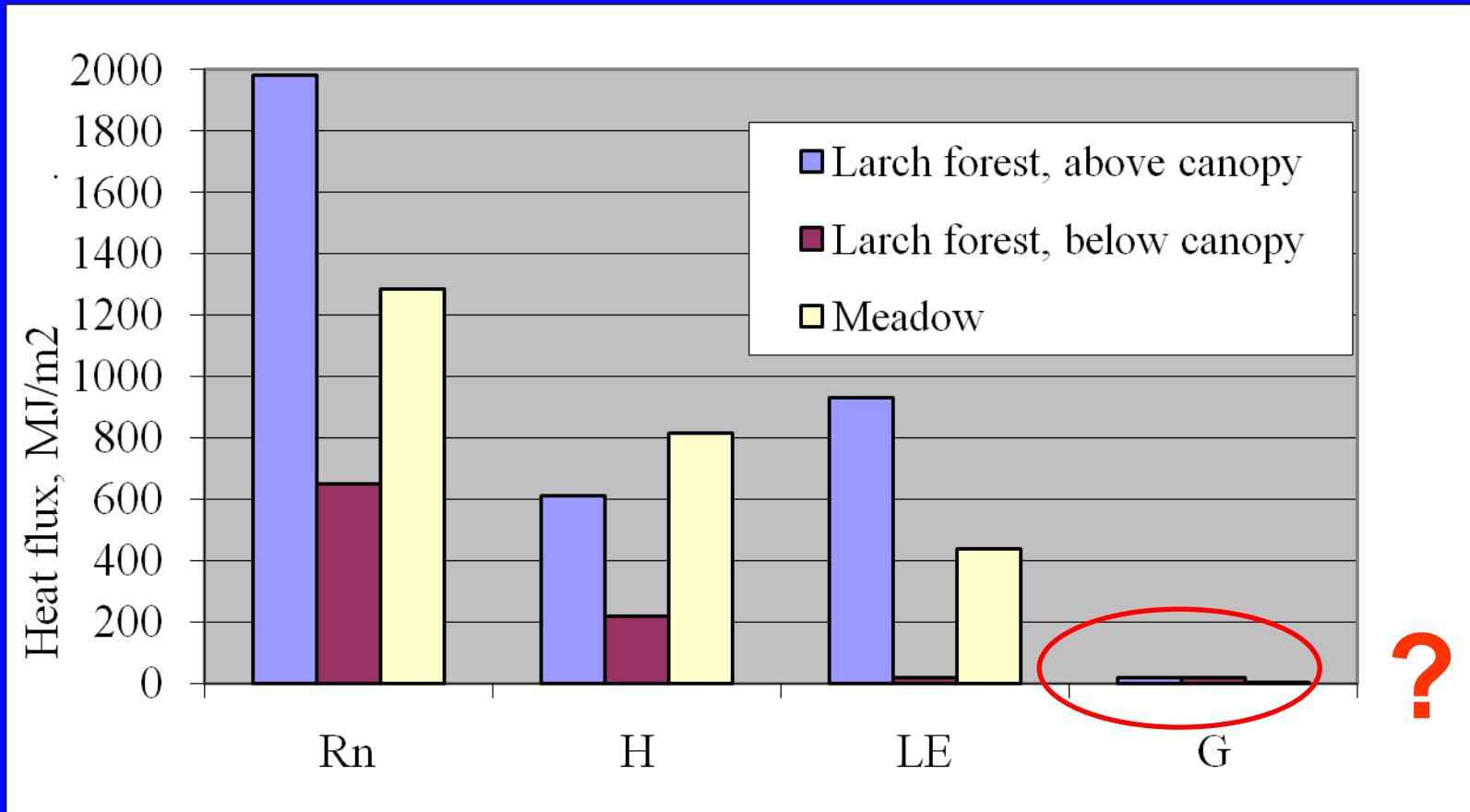
Тепловой поток из недр

Распределение температур летом



Можем ли мы подсчитать тепловой поток в горные породы из уравнения теплового баланса?

$$G = Rn - H - LE$$



Необходимо определение температур поверхности горных пород

Существует несколько способов нахождения функциональной связи $t_{\text{дп}}$ с отдельными составляющими радиационно-теплового баланса.

В частности, можно определить разность среднегодовой температуры дневной поверхности и воздуха - Δt_R - посредством использования величины турбулентной составляющей r радиационно-теплового баланса. При известном коэффициенте теплоотдачи k с поверхности искомая связь может быть выражена уравнением:

$$H = k \Delta t_R = R - LE - G,$$

$$\text{откуда } \Delta t_R = (R - LE - G) / k$$

Процессы теплопроводности (диффузии, фильтрации) описываются уравнениями с частными производными 2-го порядка параболического типа – **уравнение Фурье**.

Чтобы его определить, рассмотрим физические закономерности при распространении тепла.

Теплопроводность

Плотность теплового потока $q(z, \tau)$, т.е. количество тепла, проходящее в единицу времени через единицу площади ($\text{дж}/\text{м}^2*\text{с}$, или $\text{вт}/\text{м}^2$), зависит от **коэффициента теплопроводности** λ ($\text{вт}/\text{м}^*\text{град}$) и градиента температуры dt/dz (град/м):

$$q(z, \tau) = -\lambda(z) \frac{\partial t}{\partial z}$$

Теплоемкость

Теплоёмкость — количество теплоты, поглощаемой (выделяемой) телом в процессе нагревания (остывания) на 1 градус (kelвина)

Это физическая величина, определяемая как отношение количества теплоты δQ , поглощаемой/выделяемой термодинамической системой при бесконечно малом изменении её температуры T , к величине этого изменения $d T$

$$C = \frac{\delta Q}{dT}$$

Закон теплопроводности Фурье

коэффициент температуропроводности $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$



Жан-Батист Жозеф Фурье́ (фр. Jean-Baptiste Joseph Fourier; 21 марта 1768, Осер, Франция — 16 мая 1830, Париж) — французский математик и физик.

Член Парижской академии наук (1817), Французской академии (1826), иностранный член Лондонского королевского общества (1823), иностранный почётный член Петербургской академии наук (1829).

Жан-Батист Жозеф Фурье был 12-м из 15 детей в семье портного. Фурье было девять лет, в том же году скончался отец.

В своей первой школе, которой руководил церковный музыкант, Фурье показывал успехи в изучении французского и латыни. В возрасте 12 лет Фурье устроили в военную школу при бенедиктинском монастыре. К 13 годам Жозеф заинтересовался математикой, а в возрасте 14 лет он освоил шеститомный «Курс математики» Безу.

В это же время он стал собирать свечные огарки в здании школы, чтобы иметь возможность заниматься по ночам.

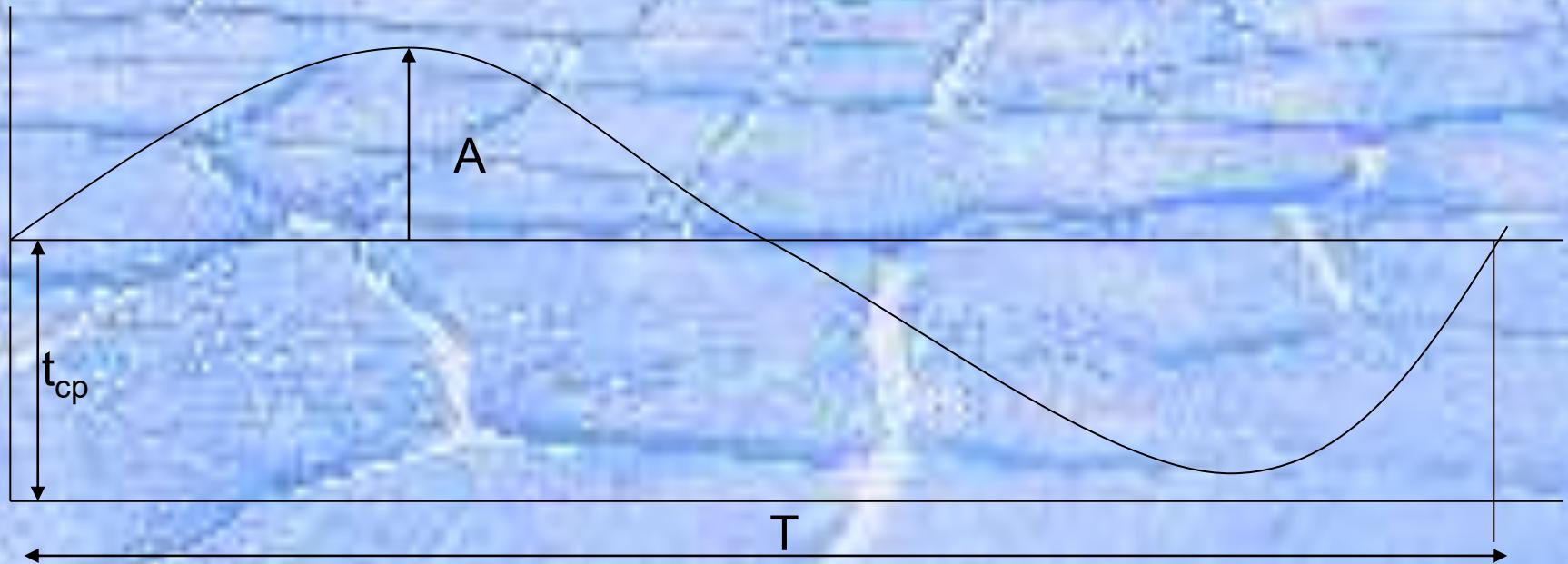
В 17-летнем возрасте он грезил военной карьерой и хотел стать артиллеристом или военным инженером. Несмотря на поддержку школьных учителей и инспекторов Фурье получил отказ, связанный с его незнатным происхождением

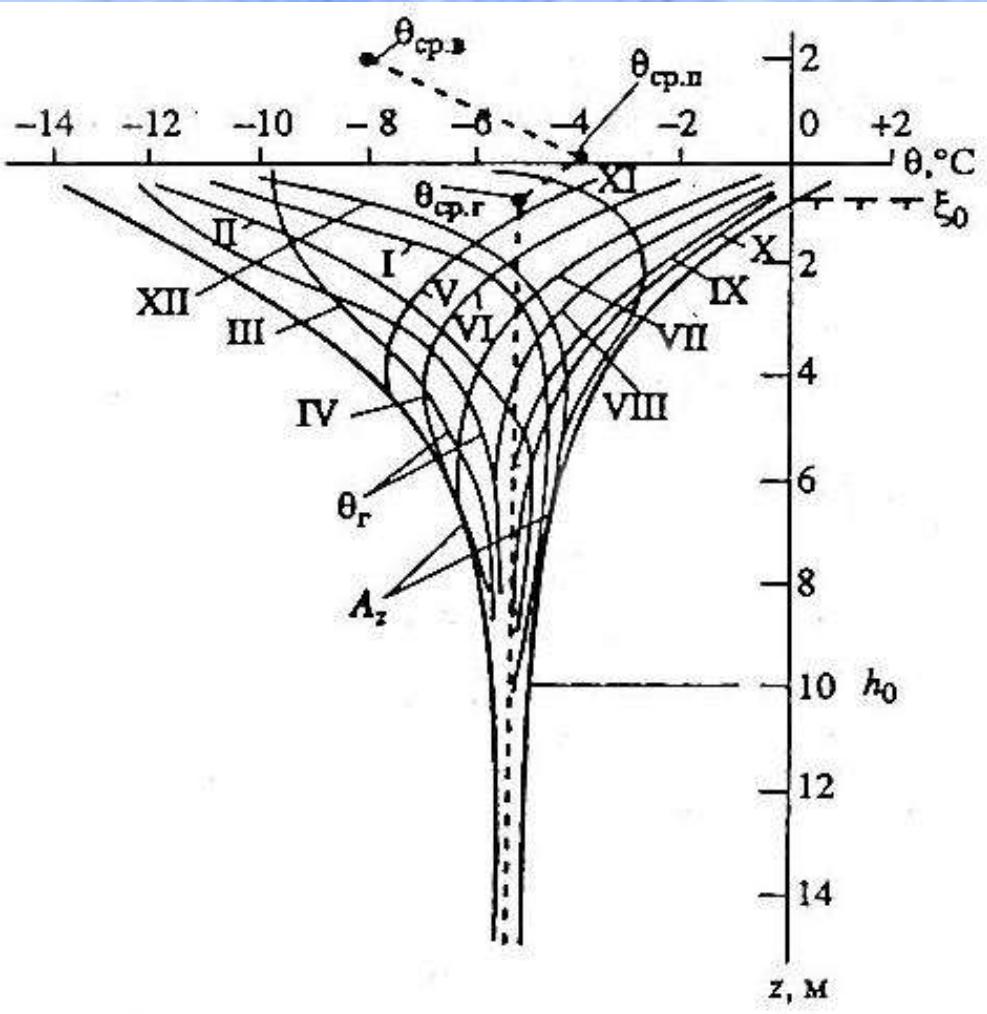
Для решения уравнения теплопроводности необходимы **краевые**
(начальные и граничные) условия

Начальное условие задается функцией
 $t(x,t)$ в **начальный момент** τ_0

Температурные волны

Колебания температуры на поверхности носят периодический характер – суточные, сезонные, многолетние и другие





Физическая амплитуда – разность максимальной (минимальной) и средней температуры.

Метеорологическая амплитуда – разность максимальной и минимальной температур.

Физическая амплитуда =
Метеорологическая
амплитуда/2

↔ Физическая амплитуда

↔ Метеорологическая амплитуда

Решение уравнения Фурье для температурных волн имеет вид

$$t(z, \tau) = t_0 + A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z} \cos(\varpi\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z)$$

Для установившихся периодических колебаний с периодом Т Фурье вывел следующие зависимости:

Первый закон Фурье – экспоненциальное убывание амплитуды с глубиной:

$$A(z) = Ae^{-\sqrt{\frac{\pi C}{\lambda T}}z}$$

$$t(z, \tau) = t_0 + Ae^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z} \cos(\varpi\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z)$$

Второй закон Фурье – колебания
происходят со сдвигом фаз,
пропорциональным грубине:

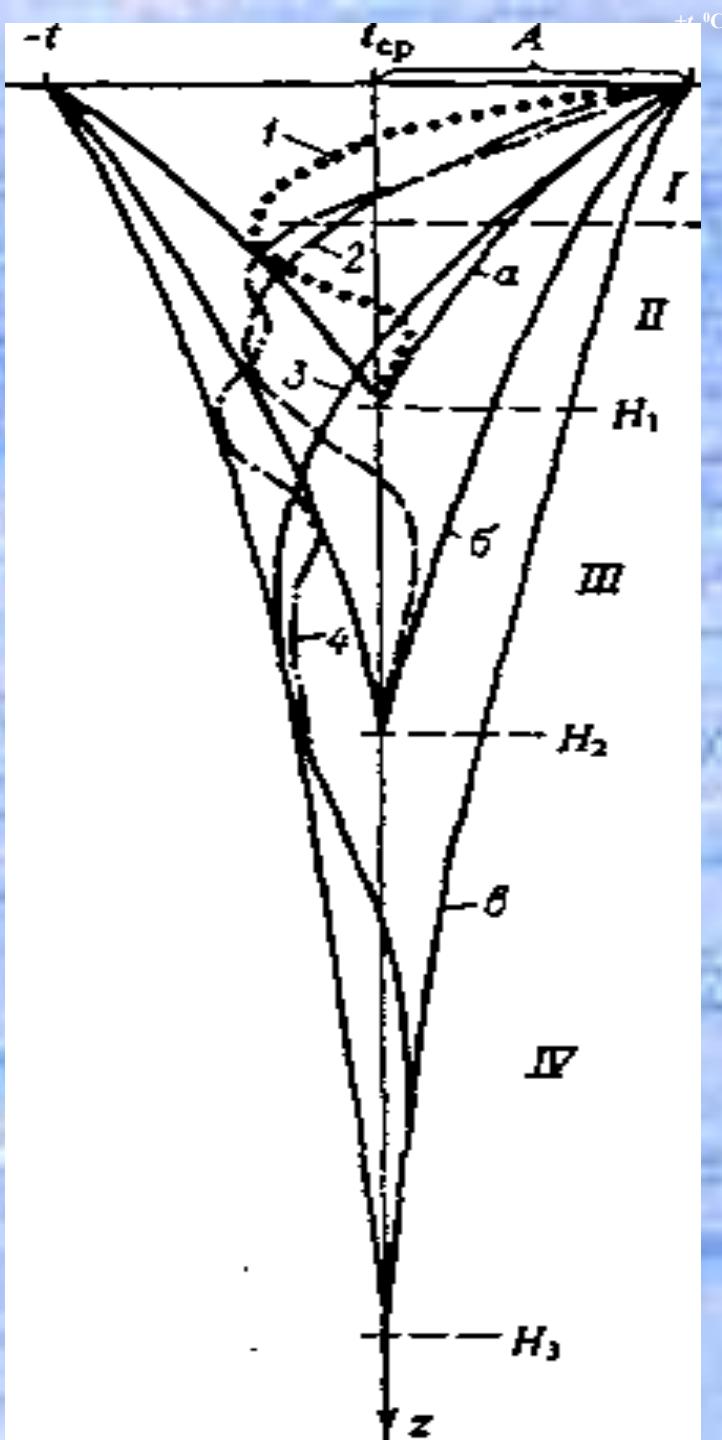
$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{CT}{\pi \lambda}} z$$

$$t(z, \tau) = t_0 + A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z} \cos(\varpi \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}}z)$$

Третий закон Фурье – глубина проникновения температур зависит от периода колебаний на поверхности:

$$\frac{z_2}{z_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

$$t(z, \tau) = t_0 + A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a^2}} z} \cos(\varpi \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a^2}} z)$$



Затухание амплитуд с глубиной в зависимости от периода

колебаний температур:

1 — $T_1 = 10$ лет;

2 — $T_2 = 40$ лет;

3 — $T_3 = 300$ лет;

4 — суммарная

температура пород;

а, б, в— огибающие колебаний температур с различными периодами

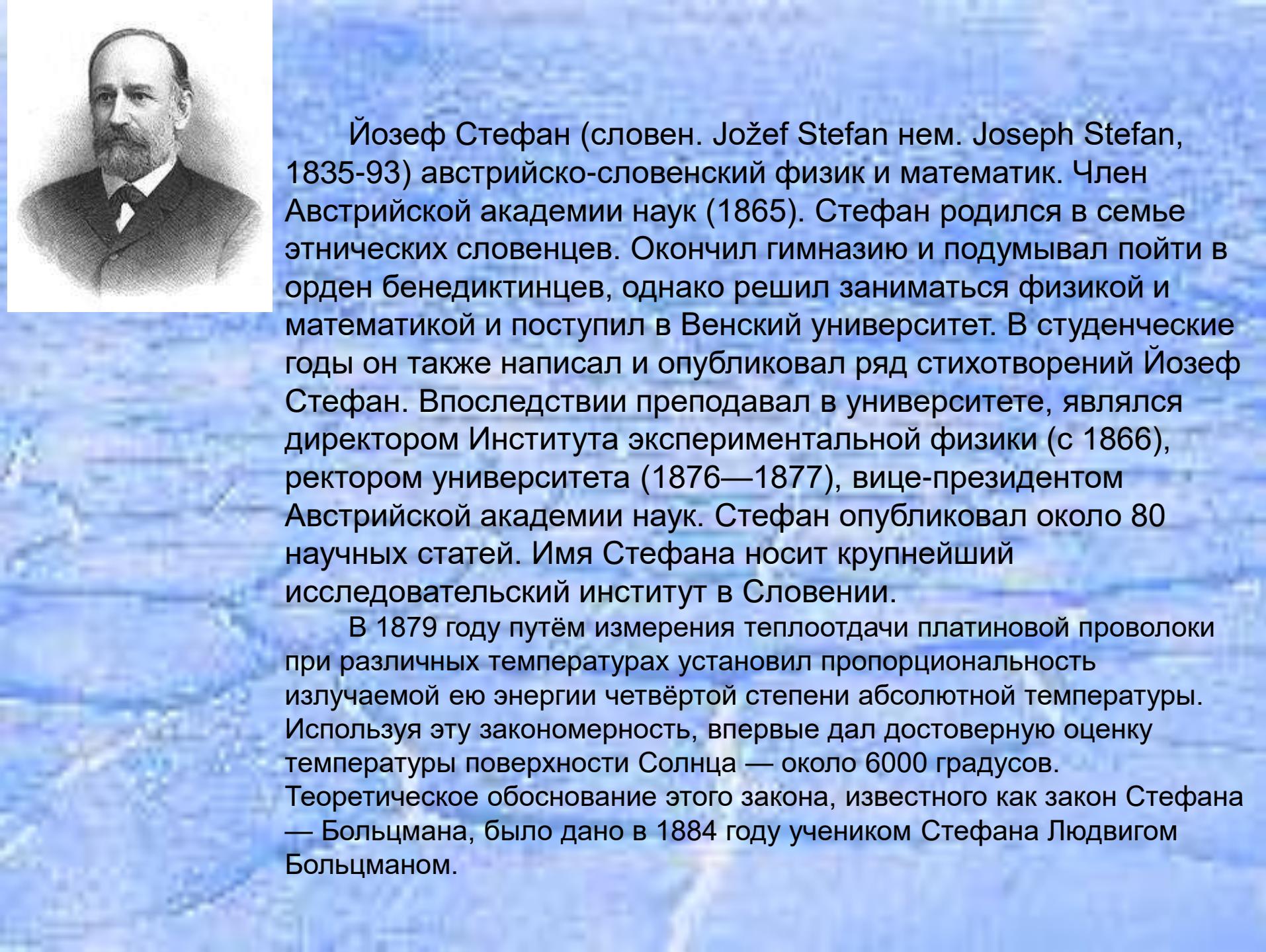
Задача промерзания (оттаивания) – задача Стефана

Проблема была впервые изучена Ламе и Клапейроном в 1831 году.
Стефан решил проблему, когда он вычислял, насколько быстро растет слой
льда на воде

$$\frac{\partial t_f}{\partial \tau} = a_f^{-2} \frac{\partial^2 t_f}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial t_{uf}}{\partial \tau} = a_{uf}^{-2} \frac{\partial^2 t_{uf}}{\partial x^2}$$

$$\lambda_f \frac{\partial t_f}{\partial z_{(z=\xi)}} - \lambda_{uf} \frac{\partial t_{uf}}{\partial z_{(z=\xi)}} = Q \frac{d\xi}{d\tau}$$



Йозеф Стефан (словен. Jožef Stefan нем. Joseph Stefan, 1835–93) австрийско-словенский физик и математик. Член Австрийской академии наук (1865). Стефан родился в семье этнических словенцев. Окончил гимназию и подумывал пойти в орден бенедиктинцев, однако решил заниматься физикой и математикой и поступил в Венский университет. В студенческие годы он также написал и опубликовал ряд стихотворений Йозеф Стефан. Впоследствии преподавал в университете, являлся директором Института экспериментальной физики (с 1866), ректором университета (1876—1877), вице-президентом Австрийской академии наук. Стефан опубликовал около 80 научных статей. Имя Стефана носит крупнейший исследовательский институт в Словении.

В 1879 году путём измерения теплоотдачи платиновой проволоки при различных температурах установил пропорциональность излучаемой ею энергии четвёртой степени абсолютной температуры. Используя эту закономерность, впервые дал достоверную оценку температуры поверхности Солнца — около 6000 градусов. Теоретическое обоснование этого закона, известного как закон Стефана — Больцмана, было дано в 1884 году учеником Стефана Людвигом Больцманом.



Клапейрон, Бенуа Поль Эмиль

Учился в парижской Политехнической школе (1816—1818). В 1820 году отправился со своим товарищем Ламе в Россию, где был принят на службу в Корпус инженеров путей сообщения, получил чин майора и стал профессором в институте Корпуса. 28 августа (9 сентября) 1825 года ему было присвоено звание подполковника, 6 (18) декабря 1829 года — полковника. За время службы в России удостоился нескольких орденов, был избран членом Санкт-Петербургского минералогического общества и член-корреспондентом Петербургской академии наук. Вернувшись в 1831 году во Францию, (и решив задачу об охлаждении металла) Клапейрон участвовал в постройке многих железных дорог и составил множество проектов по постройке мостов и дорог. В 1858 году был избран в члены Парижской академии наук на место Коши. Одна из улиц Парижа получила его имя. Его имя также внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни

Задача Стефана является одной из наиболее сложных задач уравнений в частных производных.

Попытки ее решения осуществлялись Ляме и Клапейроном (1831), Заальшютцом (1862), и самим Стефаном (1889), а в позднее время Рубинштейном (1947), Меламедом (1957), Будак (1964).

Сегодня применяются численные методы.

Меламед, Владимир Григорьевич –
сотрудник кафедры геокриологии

Решение задачи Стефана сведением к
системе обыкновенных
дифференциальных уравнений: Автореферат
дисс. на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук / М-во высш. образования СССР. Моск. гос.
ун-т им. М. В. Ломоносова. - Москва : 1957. - **7 с.** : граф.; 21 см.

Упрощенное решение приписывается
Ламе, Клапейрону и Стефану.

Формула Стефана:

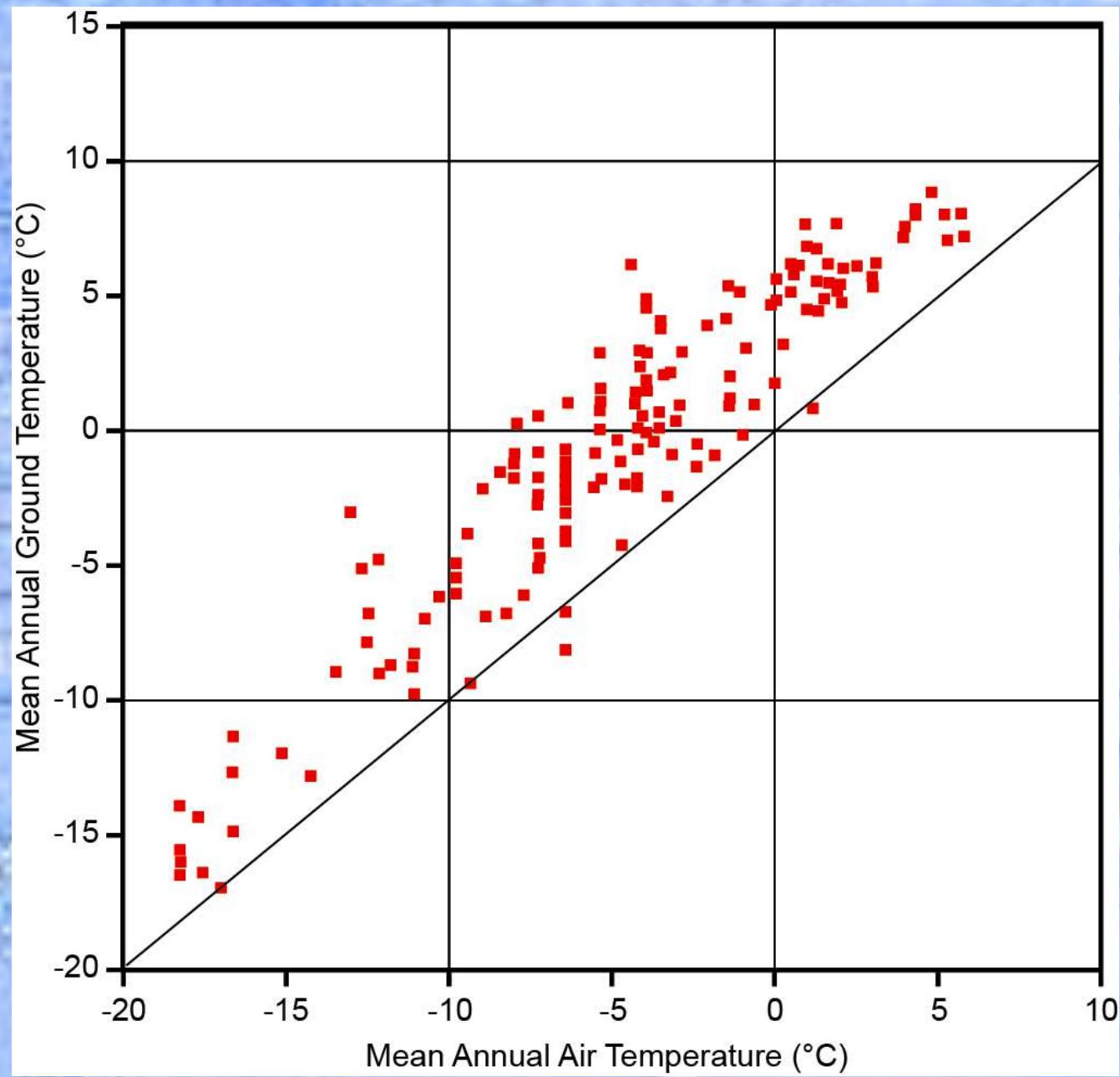
$$\xi(\tau) = \sqrt{\frac{2\lambda_f \Omega}{Q}}$$

$$\Omega = \tau |t_f|$$

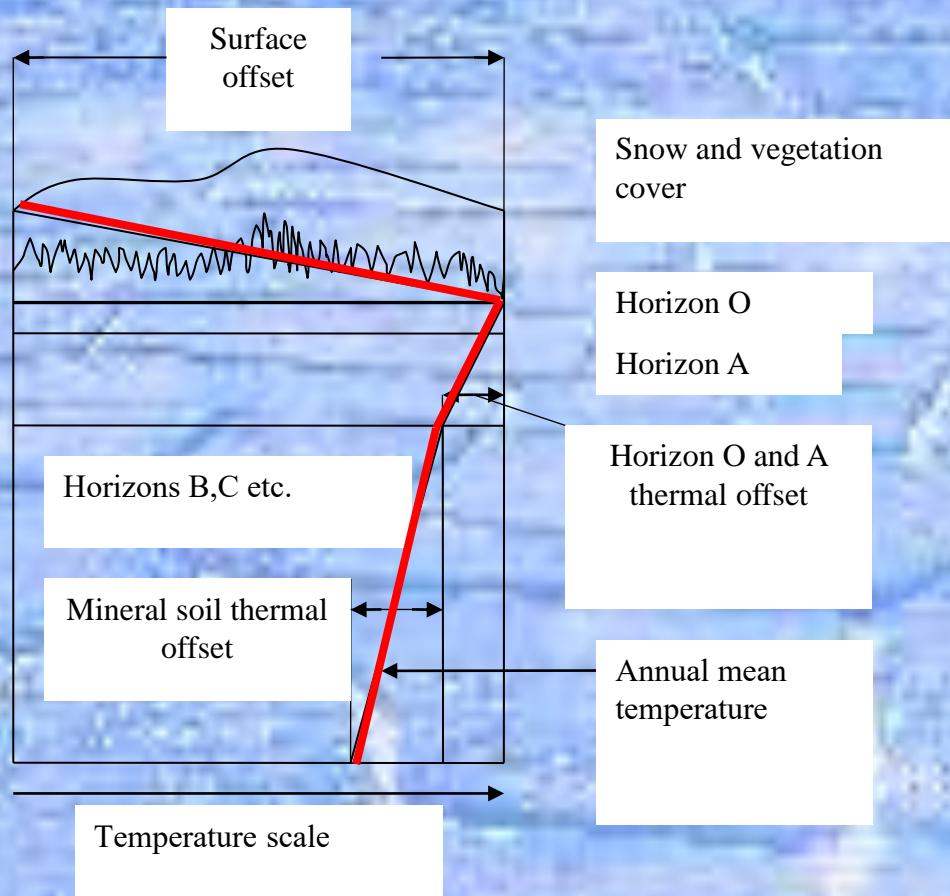
Как найти среднегодовую температуру пород?
Из уравнения радиационно-теплового баланса?
По данным метеонаблюдений?

Среднегодовая $t_{\text{дп}}$ может существенно отличаться от среднегодовой температуры пород на подошве слоя сезонного промерзания или протаивания t_ξ за счет воздействия снежного и растительного покровов, инфильтрующихся летних осадков и других факторов, термодинамическое условие образования и существования многолетнемерзлых толщ горных пород должно быть представлено в следующем виде:

$$t_\xi = t_{\text{дп}} + \Delta t_{\text{сн}} \pm \Delta t_{\text{раст}} + \Delta t_{\text{инф}} - \Delta t_\lambda \leq 0^\circ\text{C}$$

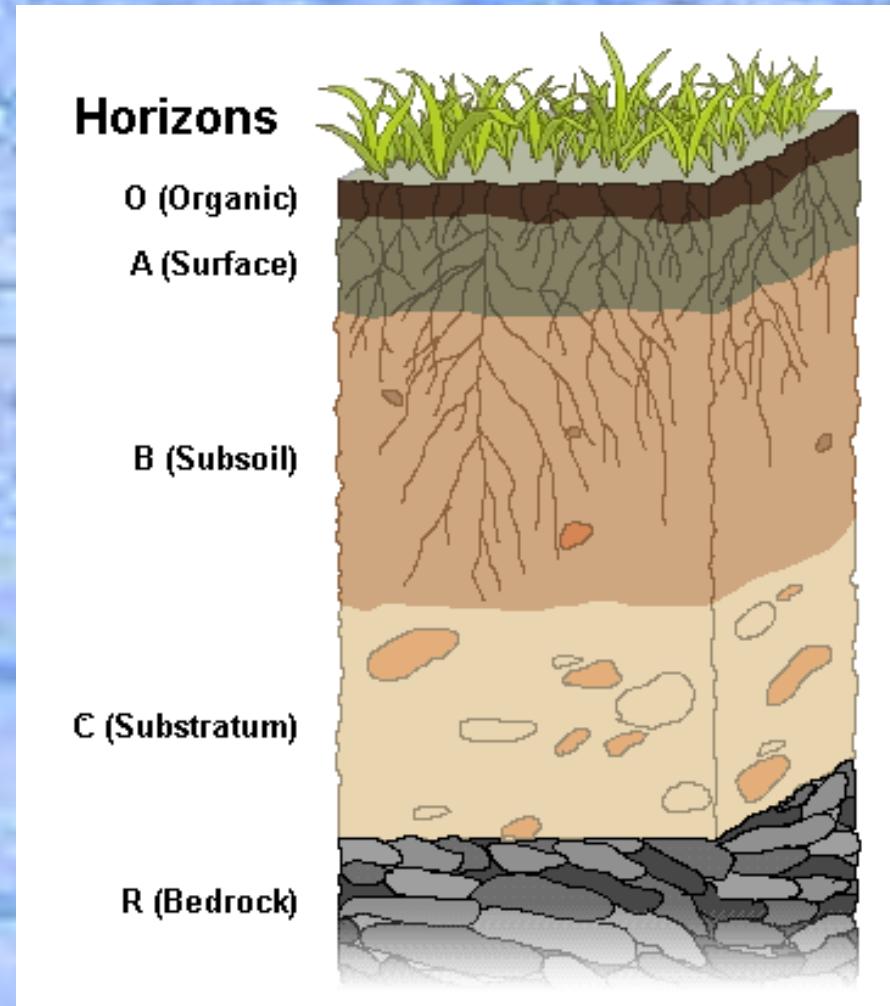


Изменения среднегодовой температуры в слое сезонного оттаивания



Почвенные горизонты О и А

значительно влияют на температурный режим

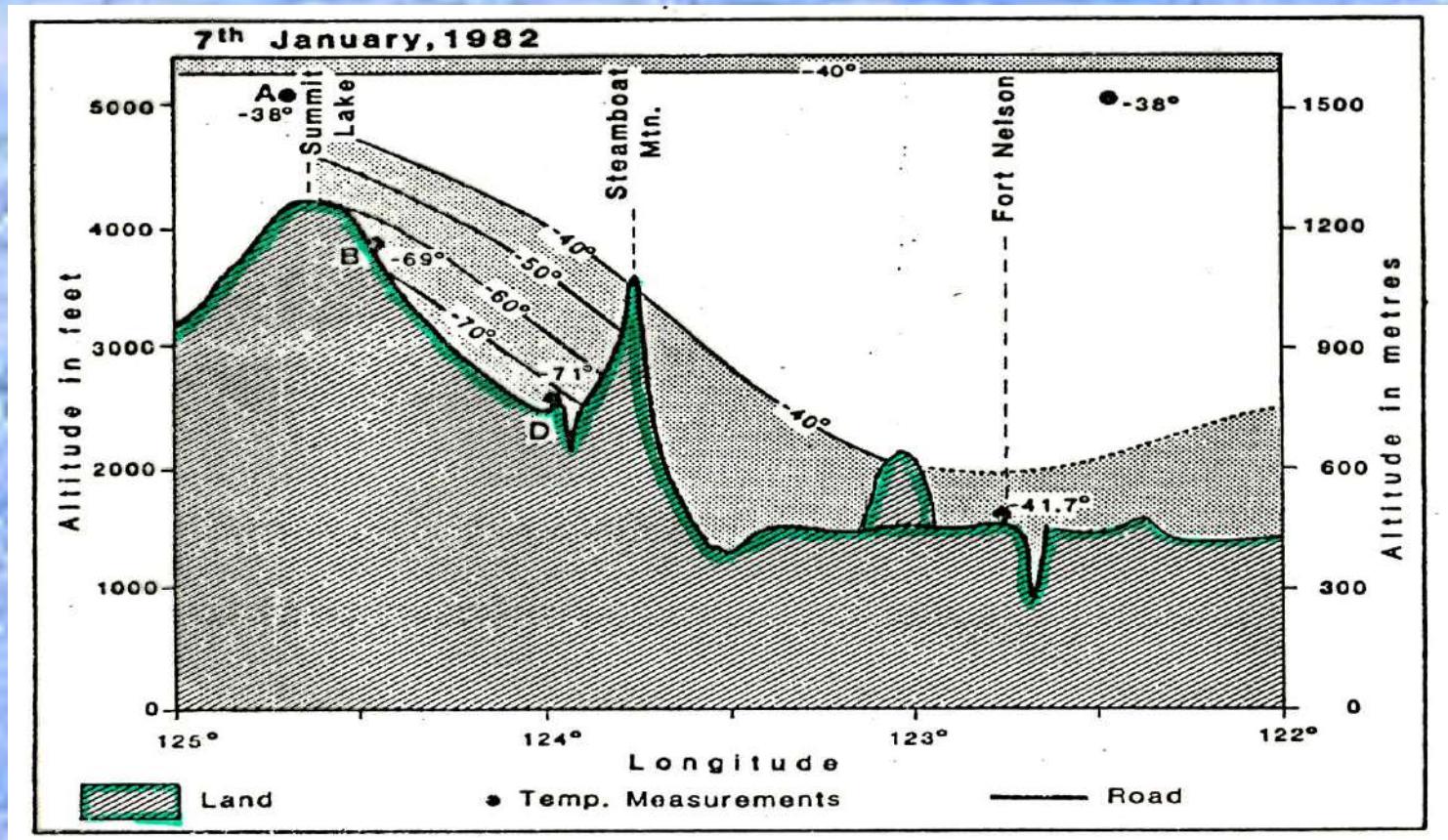


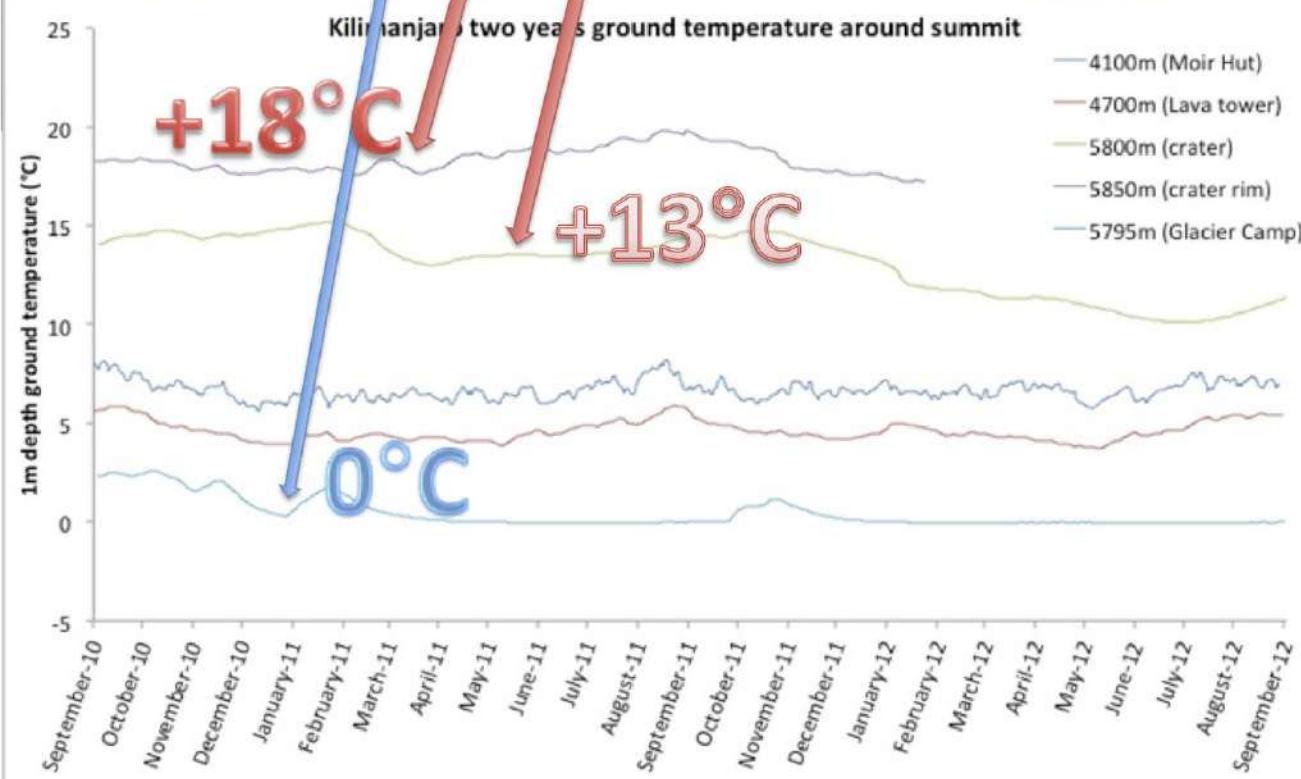
Влияние рельефа – около 6 градусов на 1 км подъема Инверсия в Сибири



Влияние рельефа

Anatomy of the cold air drainage west of Fort Nelson, British Columbia on January 7th, 1982, showing the uncorrected temperature distribution (Harris, 1983b).





На формирование **tcp** оказывает влияние **экспозиция и крутизна склонов.**

Понижение tcp и сокращение Ап в зависимости от экспозиции (при прочих равных условиях) происходит в направлении от южных, юго-западных к северо-восточным и северным. Разность **tcp** и **Ап** на склонах южной и северной экспозиций определяется **в основном различием в летних температурах** воздуха, поскольку зимой при малом поступлении энергии склоны охлаждаются одинаково .

Летнее нагревание оказывается более сильным на южных склонах. В связи с этим на северных склонах глубина сезонного оттаивания меньше.



Количественно влияние экспозиции и крутизны склонов на температурный режим пород может быть оценено через **радиационные поправки к температуре и амплитуде колебаний температур**, исходя из составляющих радиационно-теплового баланса разных склонов, как это было рассмотрено выше.

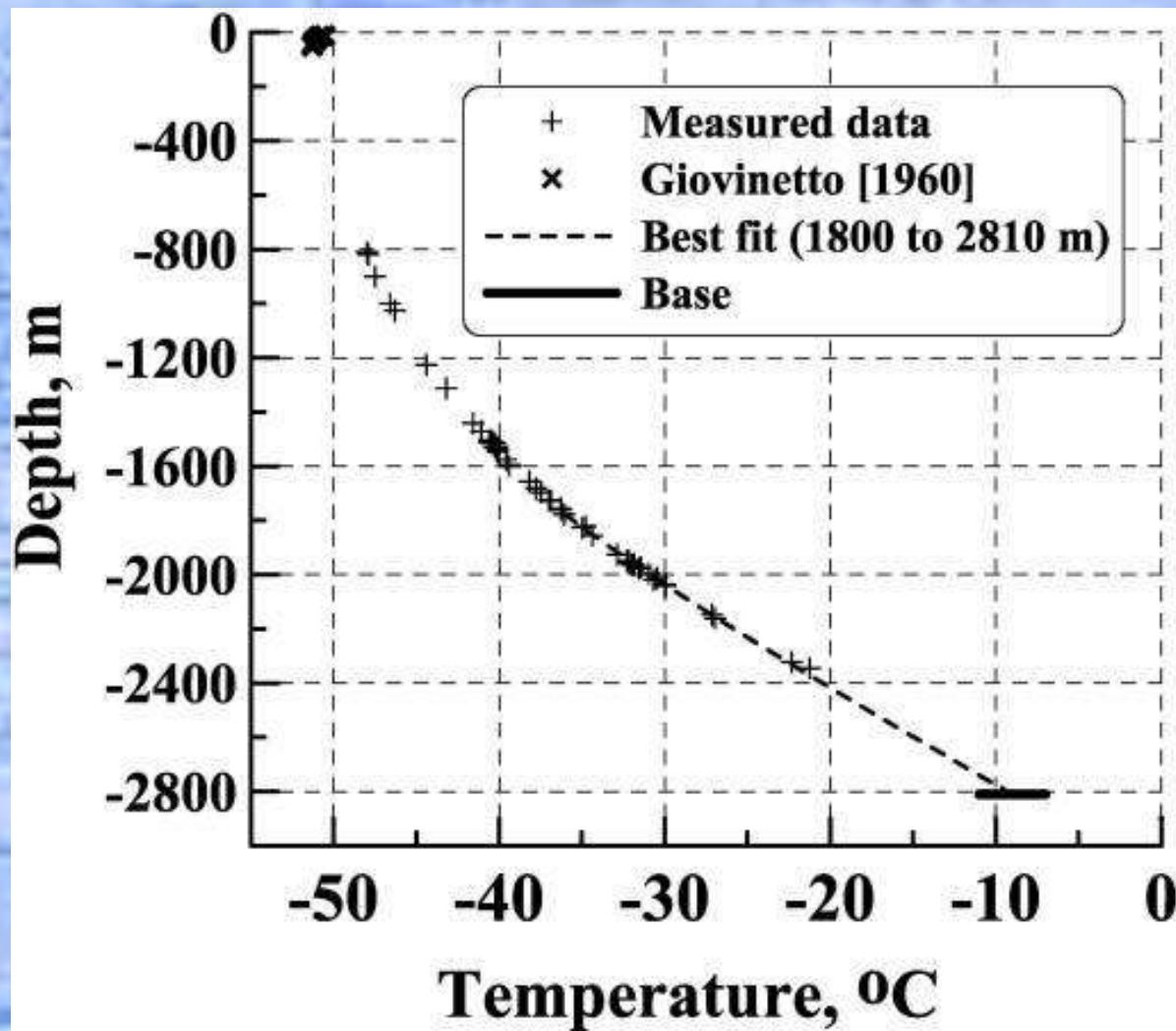
$$H = k\Delta t_R = R - LE - G,$$

откуда $\Delta t_R = (R - LE - G) / k$

Влияние снежного покрова

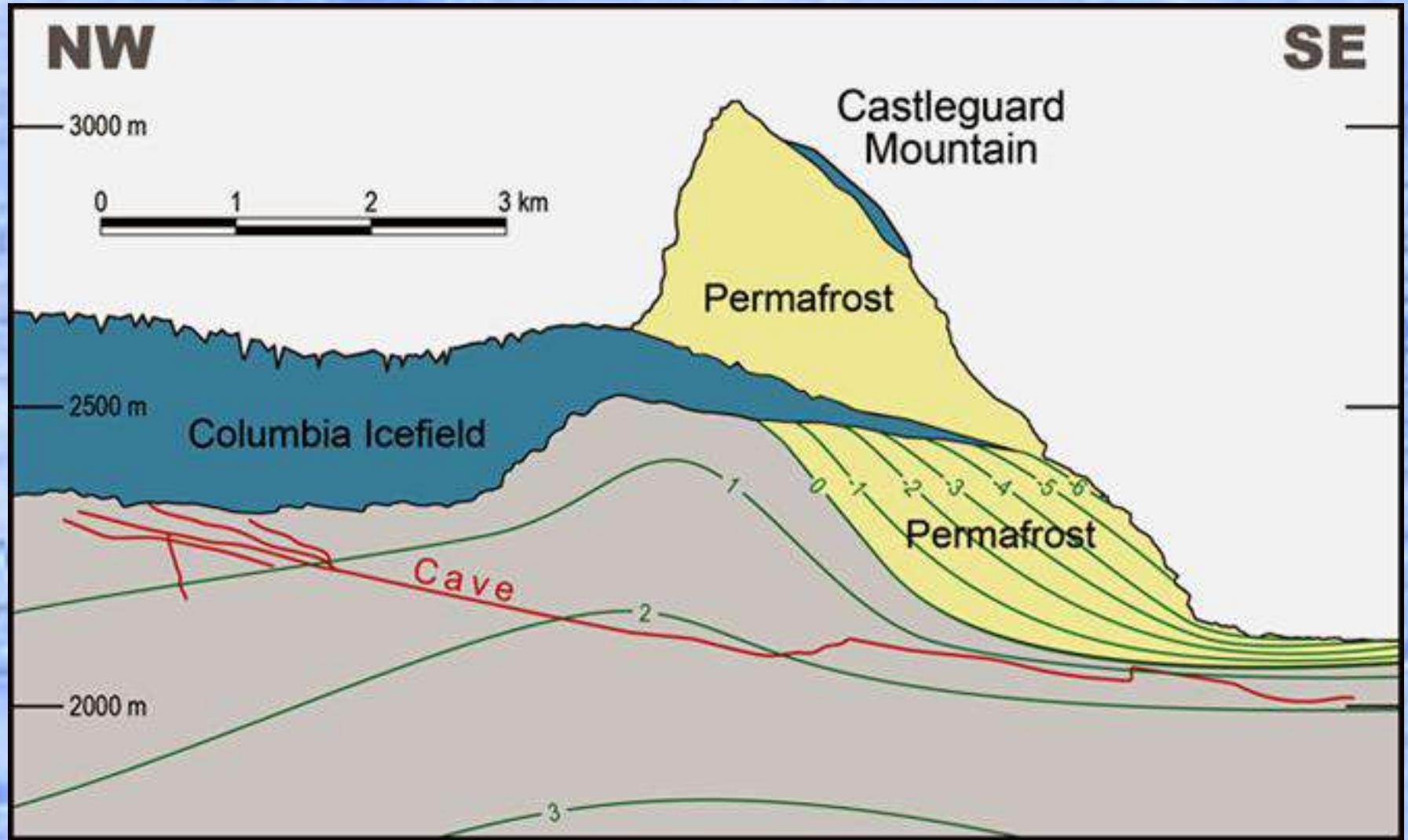
Снежный покров является одним из **наиболее мощных факторов** формирования температурного режима пород. Снежный покров в значительной степени изменяет характер радиационно-теплового баланса на поверхности.





Соотношение ледников и многолетнемерзлых толщ

Ground temperatures in the borehole through the Antarctic ice cap beneath the Vostok station in Antarctica (from Giovinetto, 1960, and Price et al., 2002).



Соотношение ледников и многолетнемерзлых толщ

Permafrost distribution in relation to the Columbia Icefield in Banff National Park, Alberta.

Влияние растительного покрова

Лесная и кустарниковая растительность

В различных регионах в зависимости от лесообразующей породы и сомкнутости крон среднегодовая **температура воздуха в лесу понижается на 0,5-2,0 град. С.**

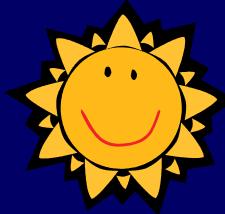
Наибольшим охлаждающим влиянием отличаются **еловые и сосновые леса** с сомкнутостью крон более 0,5. При доминирующем охлаждающем влиянии леса в **районах с континентальным климатом в редкостойных лиственничных лесах среднегодовая температура воздуха оказывается на 0,3-0,6 град. С выше, чем на открытом участке.**

Это, очевидно, объясняется относительно **небольшим сокращением приходящей солнечной радиации в таких лесах и значительным уменьшением коэффициента турбулентного обмена** вследствие погашения лесом скорости ветра.

Влияние напочвенных растительных покровов

Отличительная особенность **увлажненных естественных напочвенных покровов** - существенное изменение их теплопроводности при **переходе из талого состояния в мерзлое**. По данным натурных наблюдений коэффициент теплопроводности мохово-лишайниковых покровов в талом состоянии примерно **в 1,5-2 раза меньше, чем в мерзлом**. Зимой моховой покров вследствие резкого увеличения коэффициента теплопроводности в значительно меньшей степени влияет на температурный режим грунтов. В среднем за зиму температура подо мхами незначительно отличается от температуры на их поверхности.

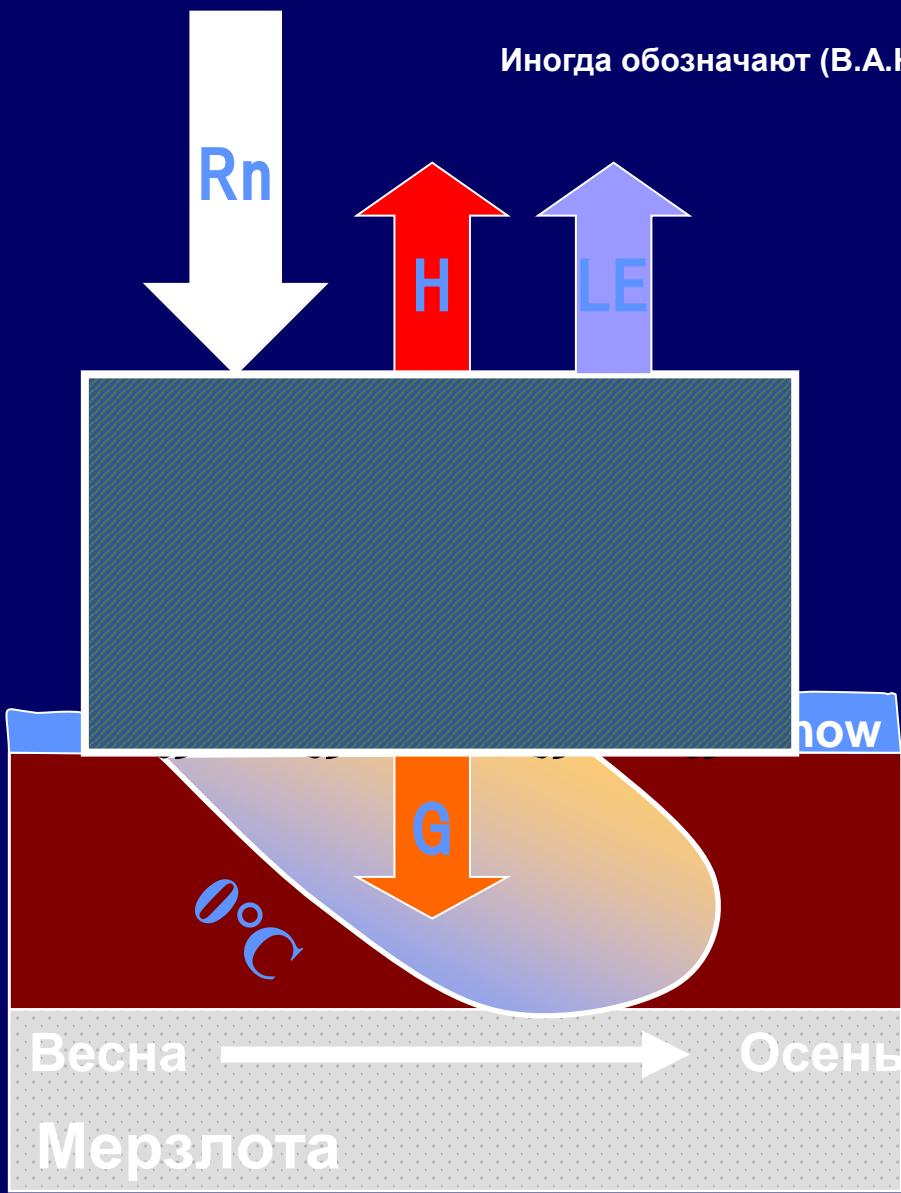
Чем больше толщина мохового покрова и чем меньше его влажность, тем большее влияние он оказывает на ΔT пород. **Максимальное охлаждающее влияние оказывают мощные сфагновые мхи, под которыми среднегодовая температура может понижаться на 2-4 градуса С.**



$$Rn = H + LE + G$$

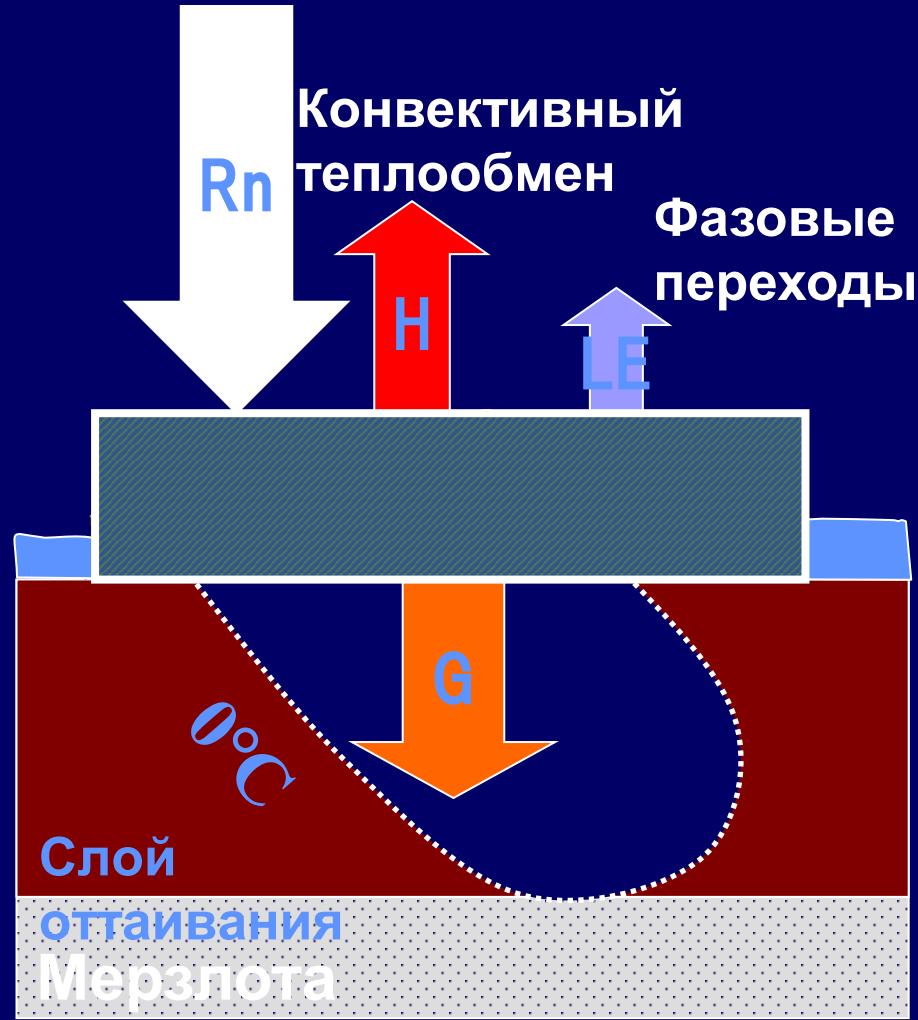
Иногда обозначают (В.А.Кудрявцев) H как r , LE как LM , и G как A

Суммарная радиация



Тайга

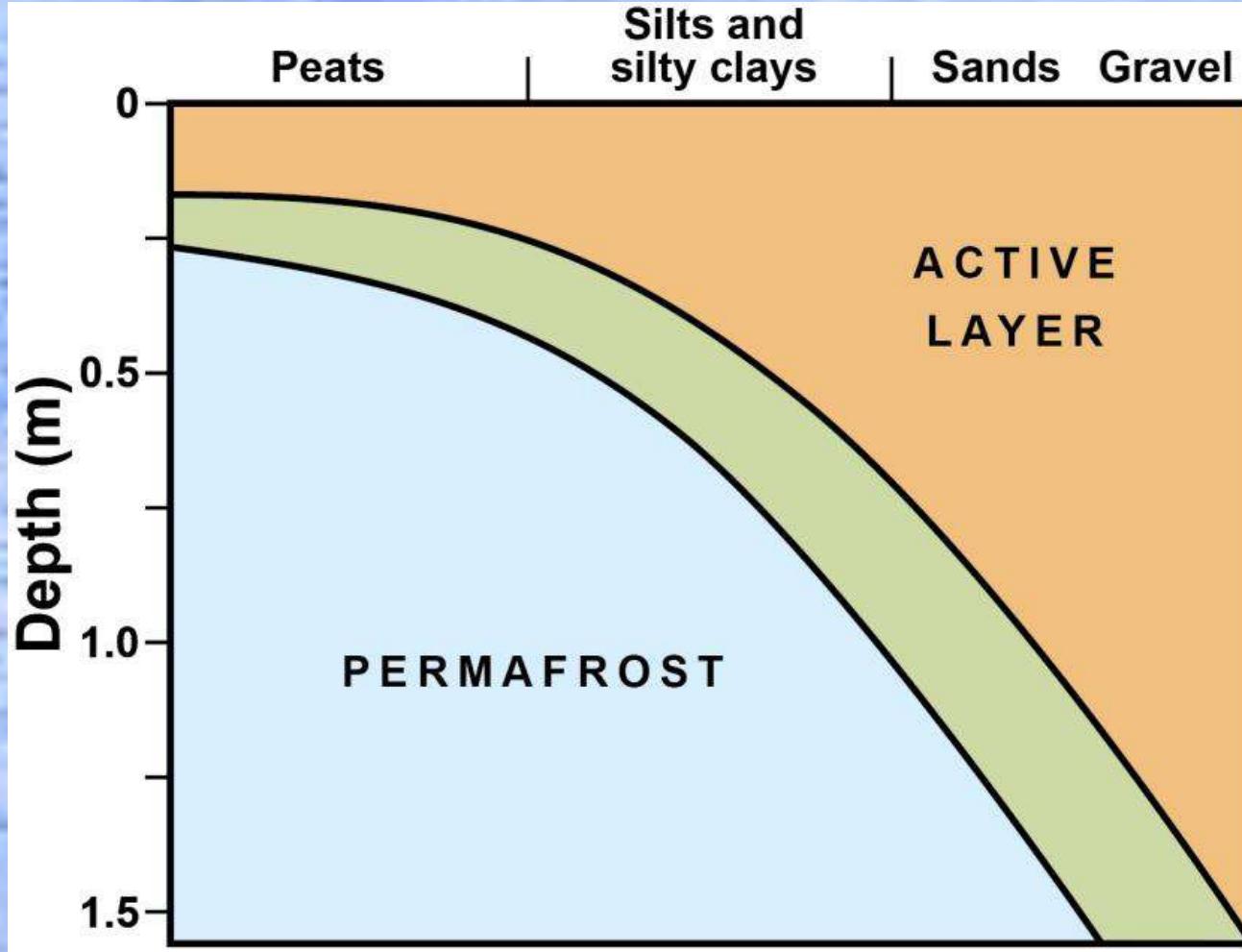
Courtesy of Dr. G.Iwahana



Вырубка

Влияние состава и свойств пород на температурный режим пород

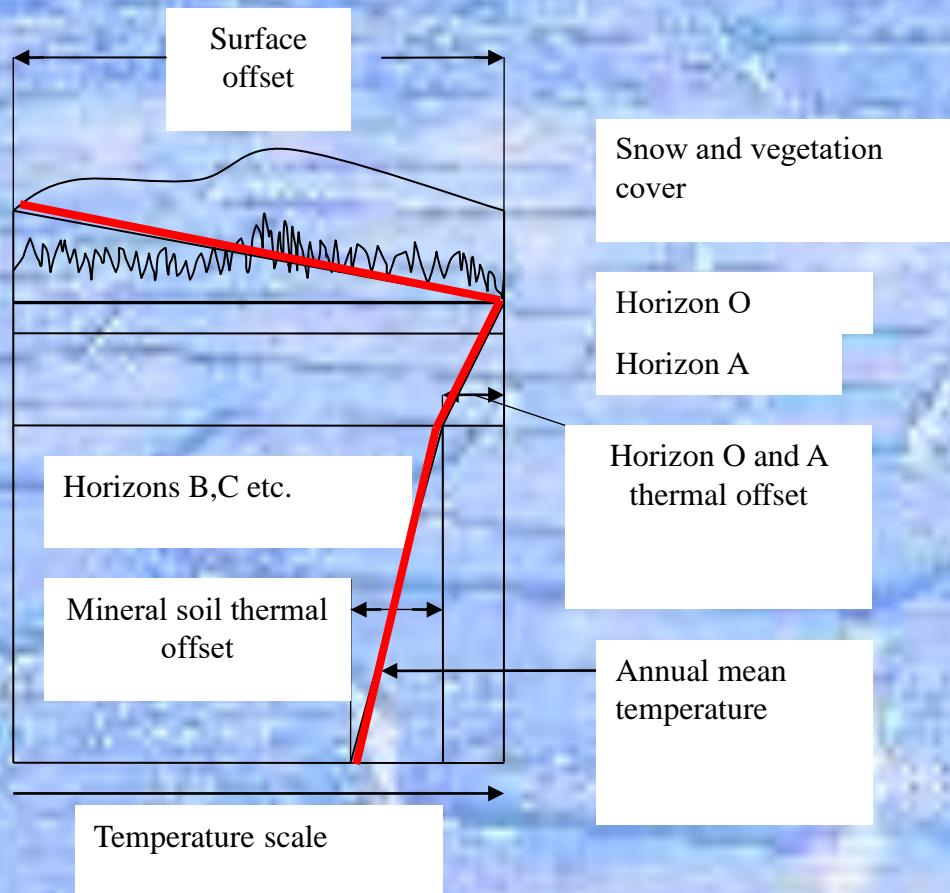
Состав и влажность пород оказывают существенное влияние на среднегодовую температуру на подошве слоя сезонного промерзания (оттаивания) t_ξ . Это влияние связано с формированием **температурной сдвигки**, величина которой как раз и определяется составом и влажностью пород сезонноталого (сезонномерзлого) слоя, поскольку она **оказывается пропорциональной отношению коэффициентов теплопроводности** мерзлого и талого грунтов, а также величине годовых теплооборотов.



Влияние состава пород на глубину промерзания (оттаивания)

Effect of differences in soil type on active layer thickness in a given Arctic environment (modified from Mackay, 1970)

Изменения среднегодовой температуры в слое сезонного оттаивания



Приближенный метод для оценки влияния атмосферных осадков на среднегодовую температуру на подошве слоя сезонного оттаивания предложил **В.А. Кудрявцев** (Достовалов, Кудрявцев, 1967).

Основной предпосылкой метода является то, что инфильтрующиеся осадки охлаждаются в слое ξ до 0°C , отдавая весь запас тепла на фазовые переходы воды при оттаивании и на некоторое повышение температуры пород. **Расчетное уравнение** имеет следующий вид:

$$\Delta t_{\text{ос}} = (Q_{\text{ос}} \xi) / (\lambda_{\text{пр}} T),$$

где $\Delta t_{\text{ос}}$ – повышение среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного оттаивания (t_{ξ}) по сравнению со среднегодовой температурой на поверхности пород ($t_{\text{п}}$) за счет инфильтрации атмосферных осадков, $^{\circ}\text{C}$; ξ – глубина сезонного оттаивания, м; T – год, ч; $Q_{\text{ос}}$ – суммарный теплопоток, поступающий в слой ξ с осадками, ккал / м^2 ; $\lambda_{\text{пр}}$ – приведенная теплопроводность пород в слое ξ , ккал / ($\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Advection is the name used for heat moving through the ground by the movement of water, either vertically from the surface, or sub-horizontally downslope. In the past, this has generally been ignored, but lateral advection of heat in the form of the movement of water in the surface soil layers through taliks parallel to the ground surface or surface meteoric waters descending down the through-pores in the sediments has produced serious problems.

Адвекция (от лат. *advectio* — доставка) — в метеорологии перемещение воздуха в горизонтальном направлении и перенос вместе с ним его свойств: температуры, влажности и других. В этом смысле говорят, например, об адвекции тепла и холода.

Адвекция — перенос воды в горизонтальном и в более редком употреблении термина — в вертикальном направлениях: - подъем (апвеллинг) или опускание (даунвеллинг) масс воды в морях, озерах, водохранилищах и других водоемах.

Влияние водного покрова на температурный режим донных отложений

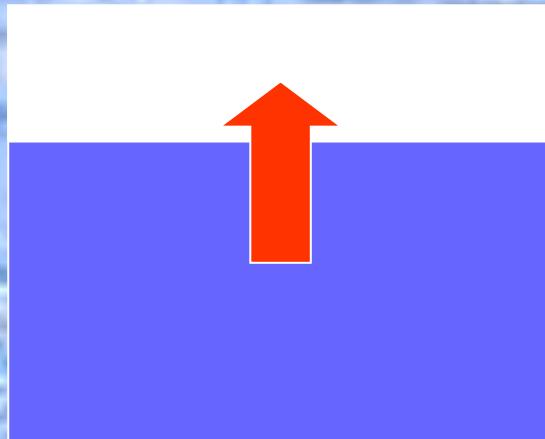
Водные покровы оказывают **сильное влияние на температурный режим подстилающих пород** и зависит оно от глубины водоема, его генезиса, продолжительности существования, занимаемой им площади и от гидродинамической связи с подземными водами (если она существует).

В зависимости от глубины водоема температурный режим донных отложений формируется различно.

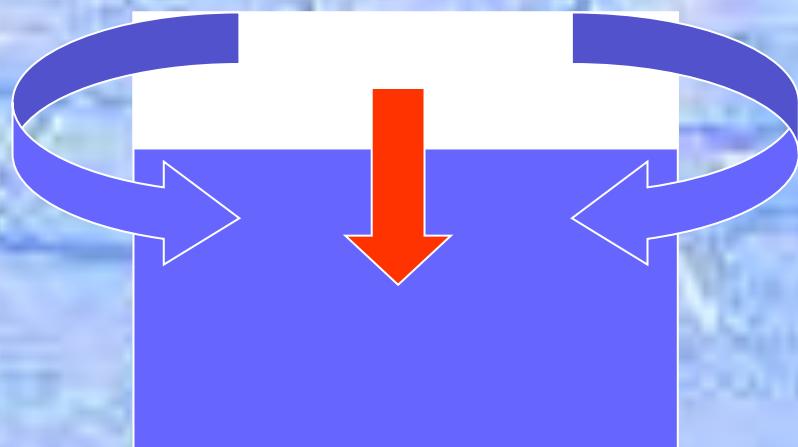
В мелких водоемах он определяется теплообменом на поверхности водоема, конвективным теплопереносом в результате ветрового перемешивания и сезонным льдообразованием.

Главной причиной существования водоемов и донных отложений в талом состоянии даже в самых высоких широтах является специфический **механизм образования и разрушения ледяного покрова** на водной поверхности.

Лед легче воды!

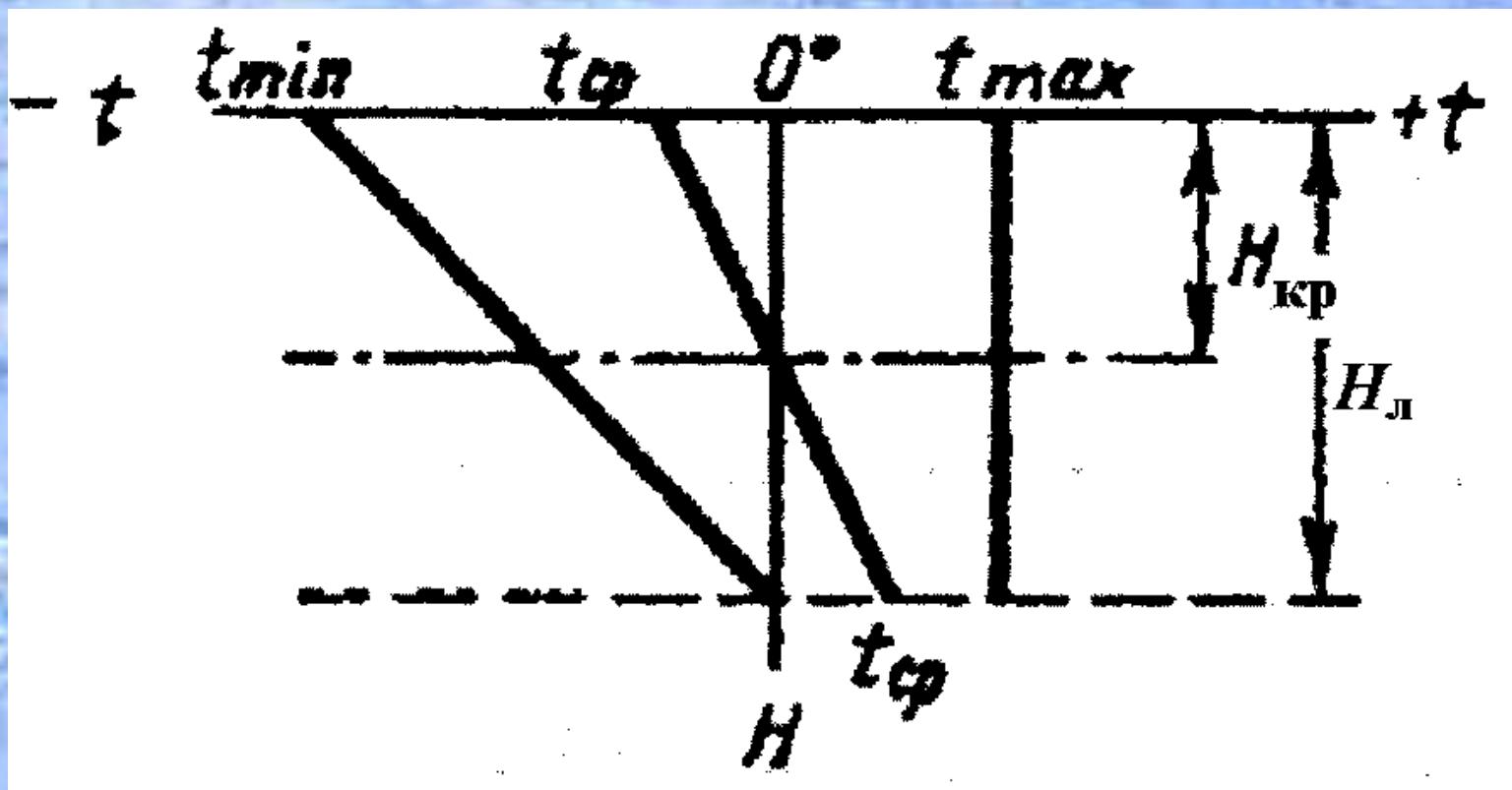


Осень - промерзание

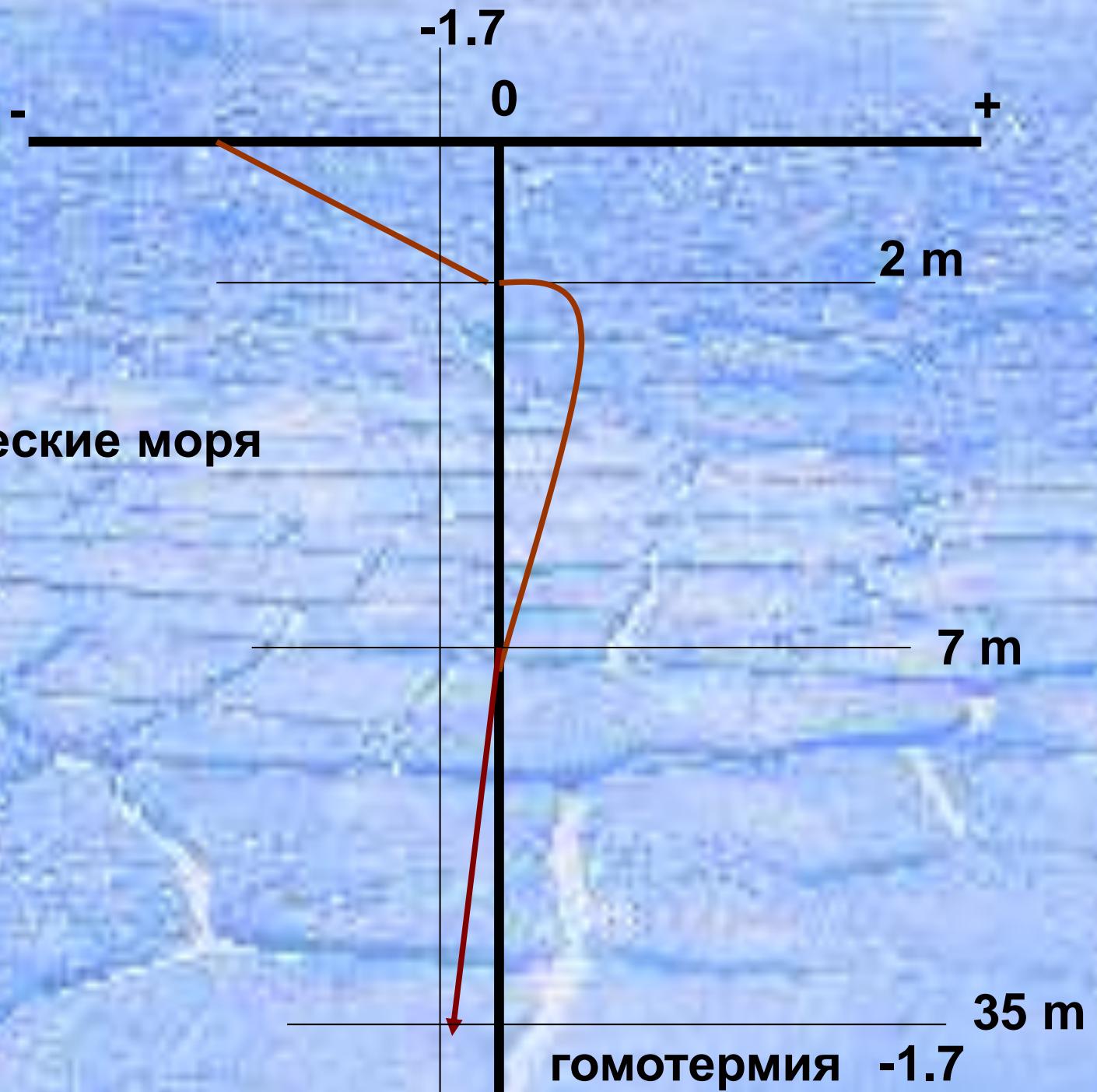


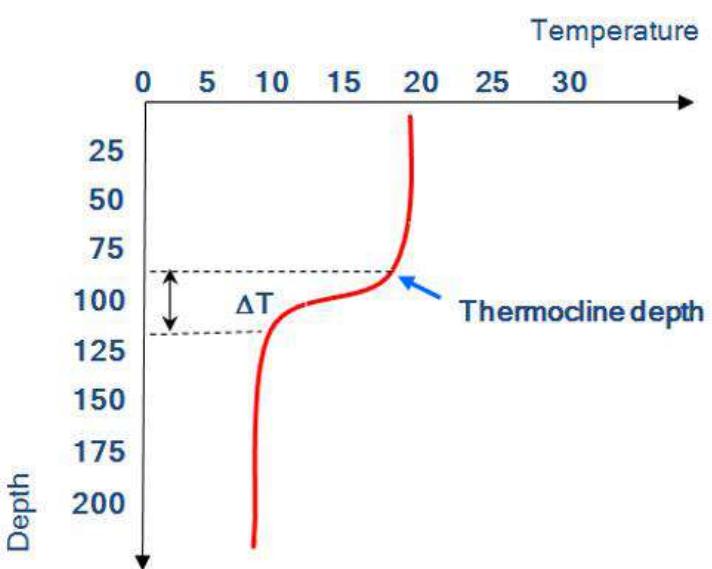
Весна - таяние

Влияние мелких водоемов на температурный режим подстилающих горных пород определяется с помощью приближенной оценки В.А. Кудрявцева (1954).



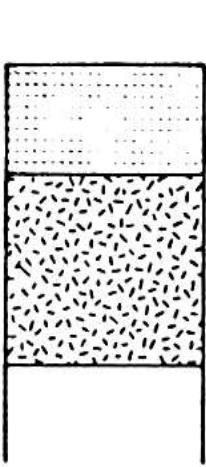
Арктические моря



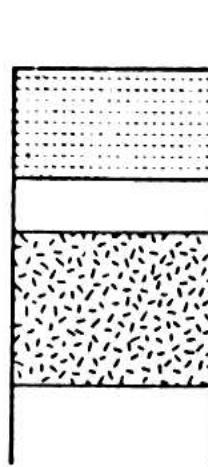


хорошо известно другое явление, получившее название термоклина. Оно проявляется в виде резкого снижения или повышения температуры слоя воды. Такие слои, имеющие резкие температурные отличия, возникают из-за плохого перемешивания воды. Термоклин может возникать при увеличении стока теплых вод в море или при таянии ледников. Слои с резкой температурой обычно располагаются в море на глубине не более 200 метров и существуют относительно недолго, но бывает и глубоководный термоклин. Он начинается на глубинах более двух тысяч метров, и способен существовать достаточно долго. Непосредственно с термоклином связано и явление пикноклина, в среде подводников именуемого «жидким грунтом». Это явление представляет собой резкий скачок плотности воды на глубине.

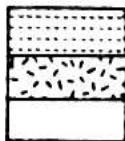
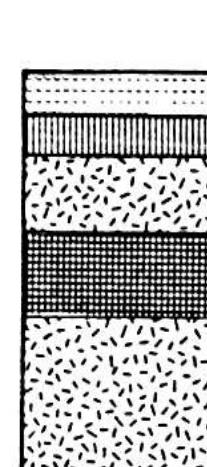
Negative Sea-bottom Temperatures



Positive Water Temperatures



Shallow Water Temperatures



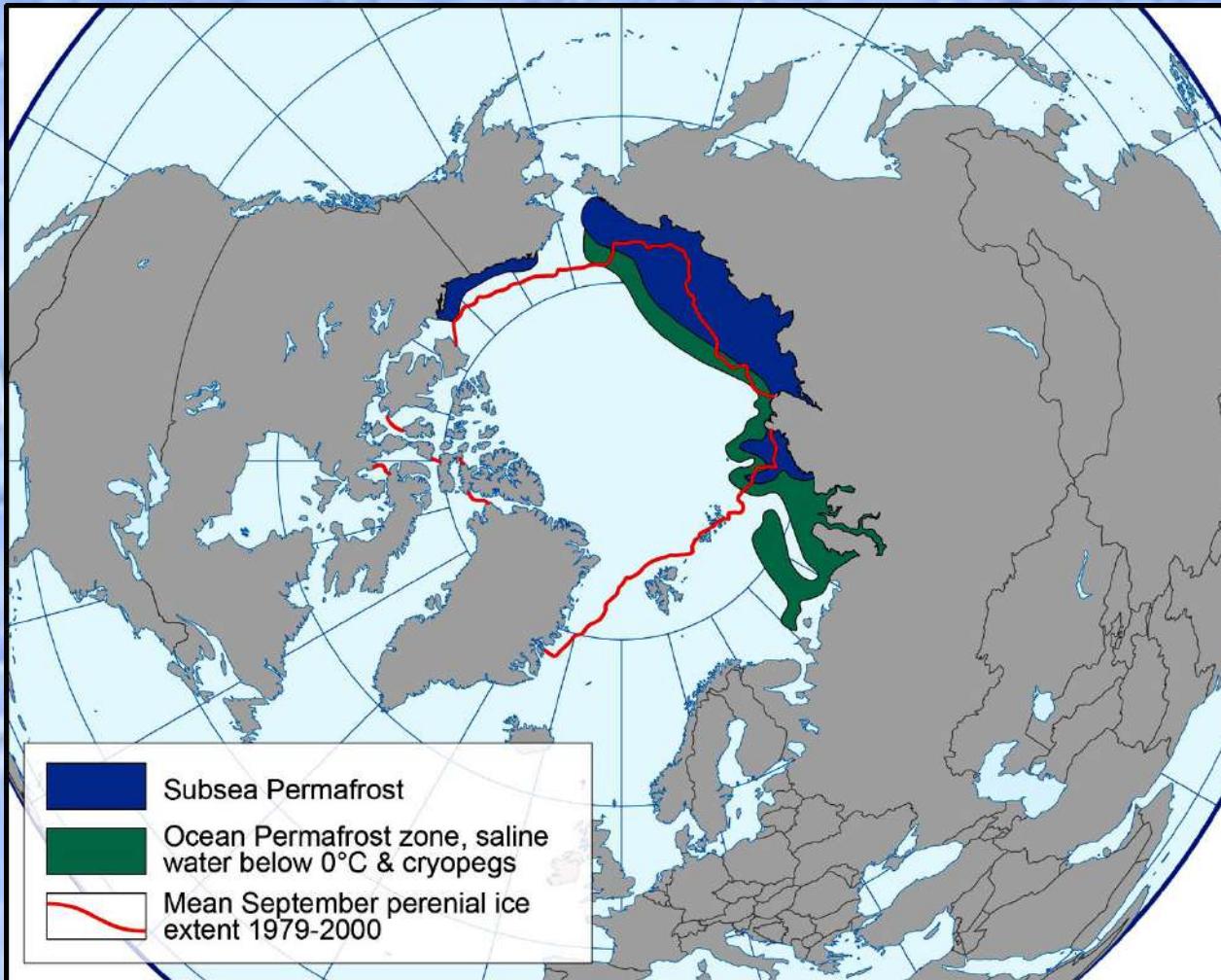
Water
Permafrost
Unfrozen



Active layer
Talik

Thermal conditions of disequilibrium beneath various types of water bodies (after Mackay, 1972; Hollingshead *et al.*, 1978). The shallow water differs from the other cases by becoming frozen to the bottom each winter

Многолетнемерзлые толщи в Арктике



The background image shows a massive, multi-tiered iceberg floating in dark, choppy water. The sky above is a deep, reddish-orange color, suggesting either a sunset or a sunrise. The ice itself is a pale blue-grey, with intricate patterns of cracks and ridges. A small portion of a white boat is visible on the right side.

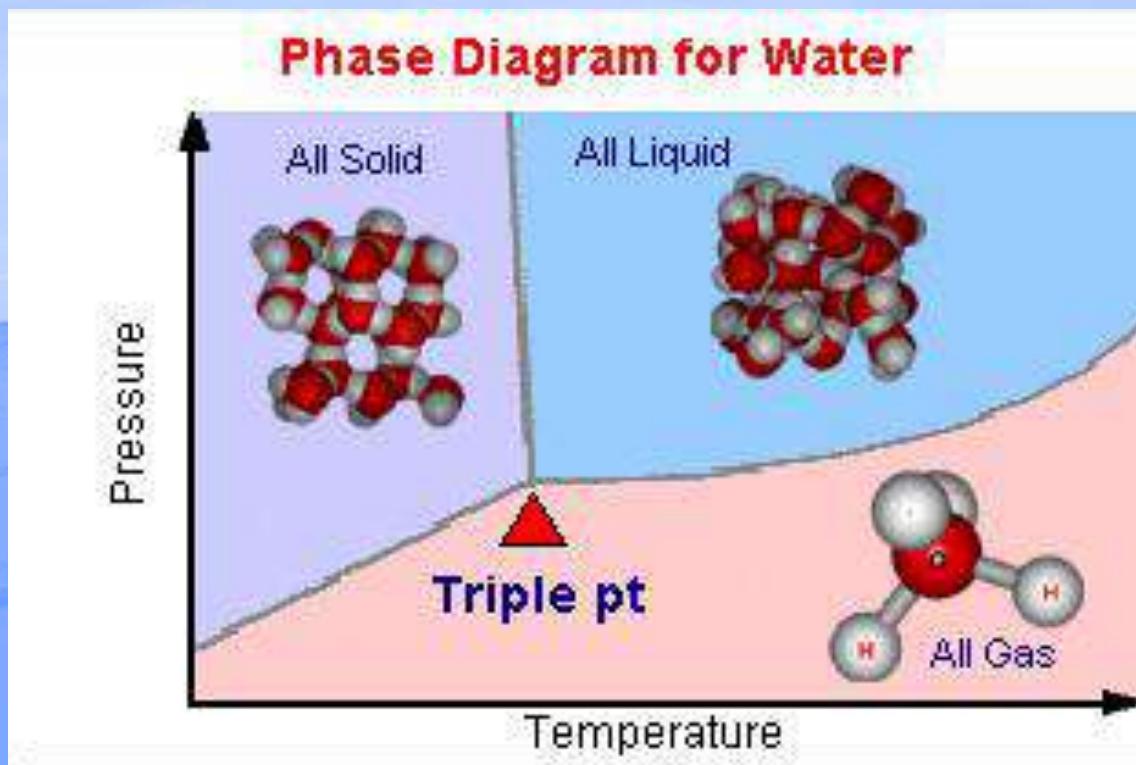
Общая геокриология

СОСТАВ МЕРЗЛЫХ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД

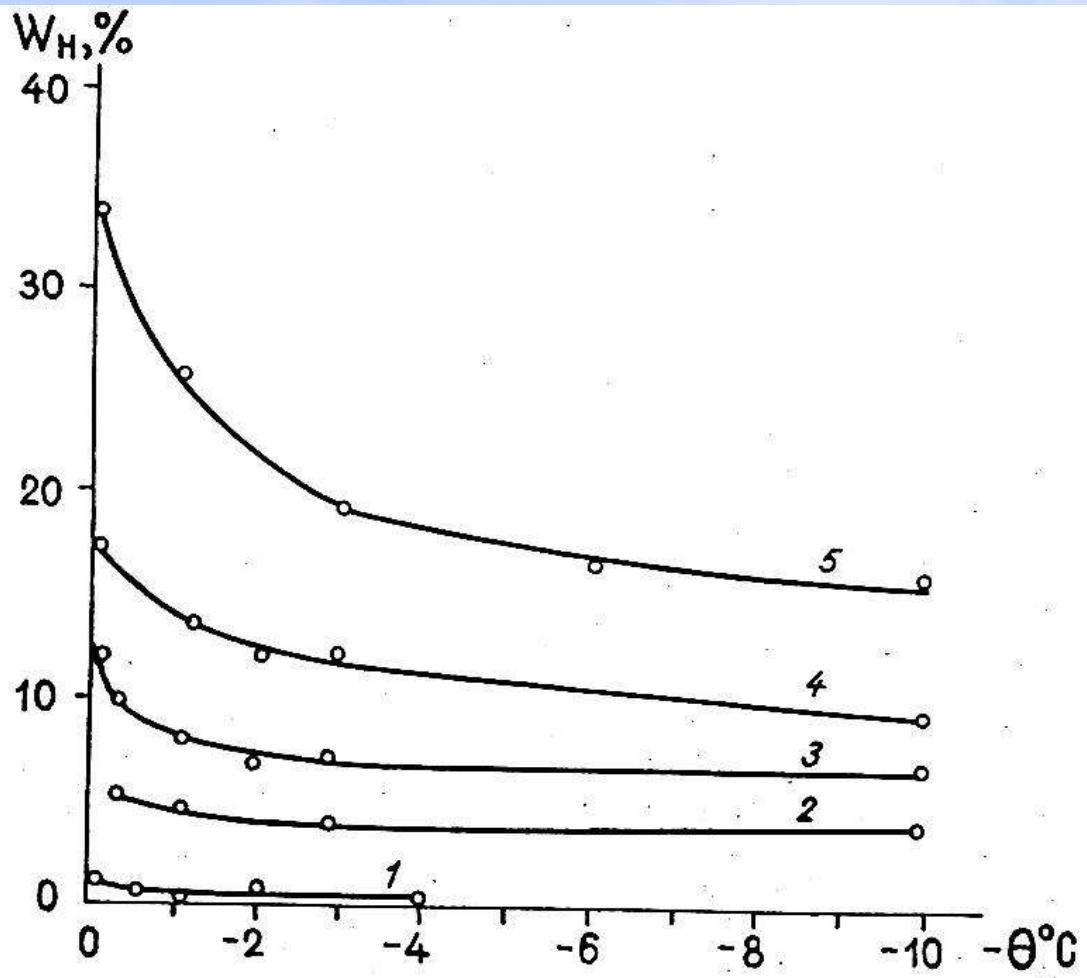
Горные породы в мерзлом состоянии представляют собой сложные по составу и строению природные тела. Особой сложностью отличаются дисперсные породы. Они являются многокомпонентными и многофазными системами, в которые входят следующие основные составляющие:

- 1) скелет** (минеральный, органо-минеральный и органический);
- 2) твердая фаза воды** (лед и кристаллогидраты или цеолиты);
- 3) жидккая фаза воды** (связанная вода и растворы солей);
- 4) газообразная составляющая** (пар и газы).

Фазовая диаграмма воды



Тройная точка воды (точка , отражающая равновесие трех фаз - жидкости, льда и пара) в отсутствие воздуха находится при 0,0100^o С и 4,58 мм рт.ст. В присутствии воздуха три фазы находятся в равновесии при 1 атм и при 0^o С.



Кривые содержания незамерзшей воды в различных видах мерзлых грунтов в зависимости от отрицательной температуры:
 1 – кварцевый песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – глина, содержащая монтмориллонит (по Н.А.Цытовичу, 1973)

Галоклин

- Слой быстро изменяющейся солености на глубине 50-200 в Арктическом бассейне
- Реки приносят пресную воду, которая смешивается с океанской

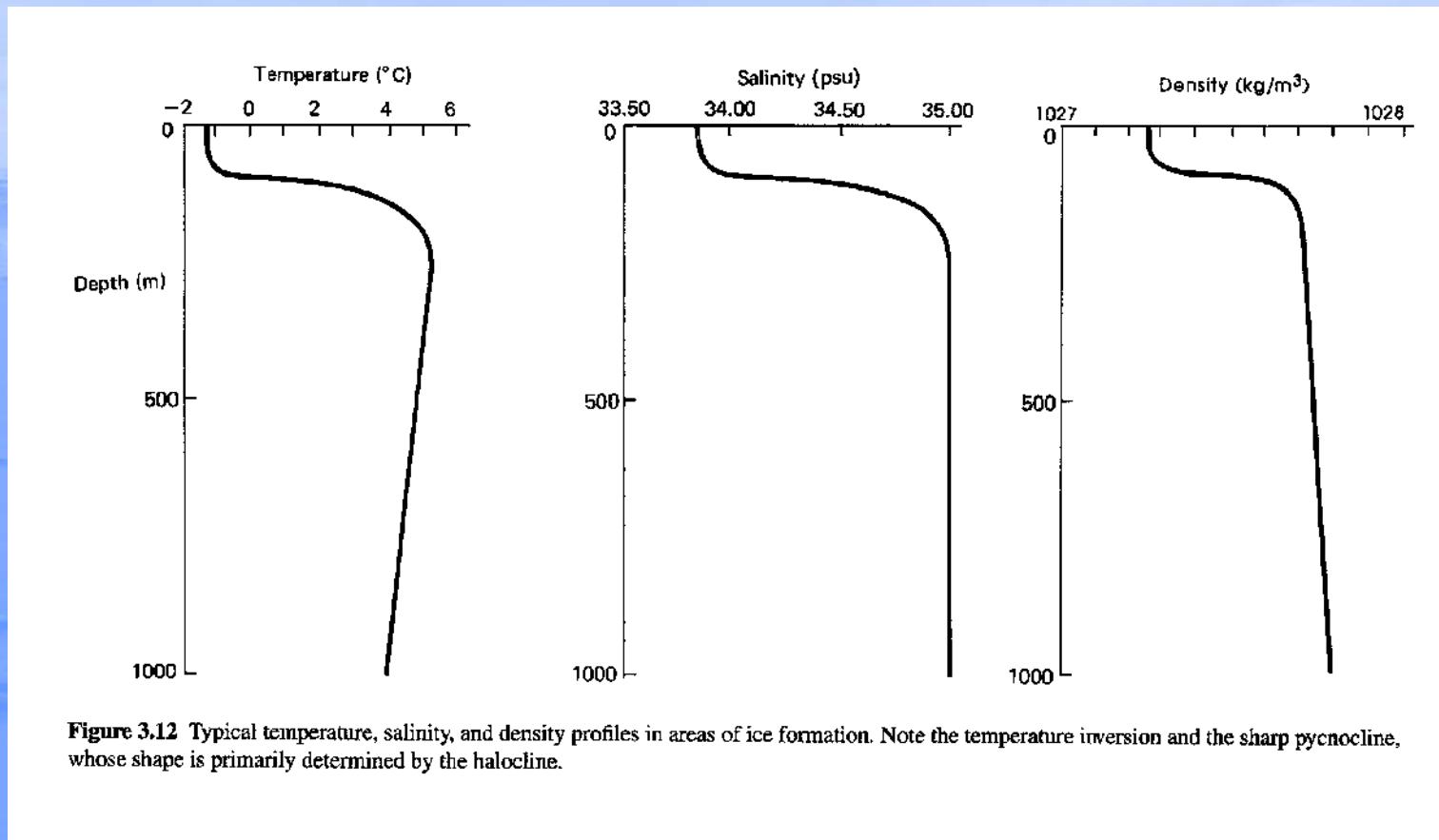


Figure 3.12 Typical temperature, salinity, and density profiles in areas of ice formation. Note the temperature inversion and the sharp pycnocline, whose shape is primarily determined by the halocline.

Near Boundary Sinking

- 1). Dense water forms over the continental shelf, due to surface cooling and salt rejection during ice formation. The resulting convection yields cold, salty water at the depth on the shelf

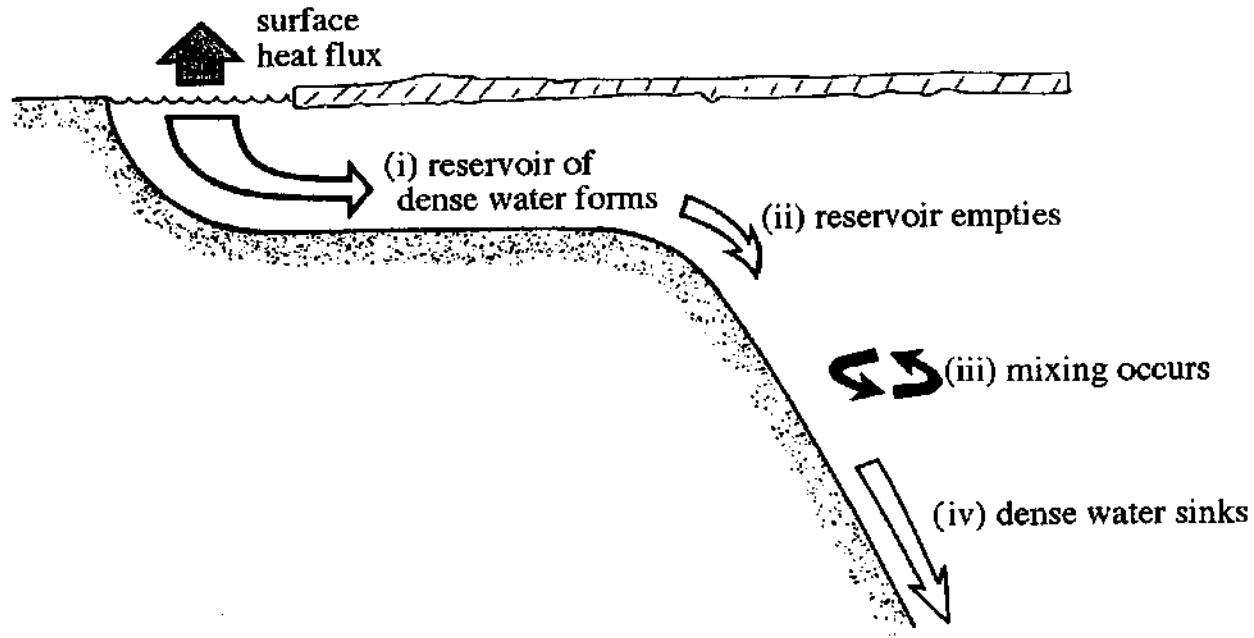
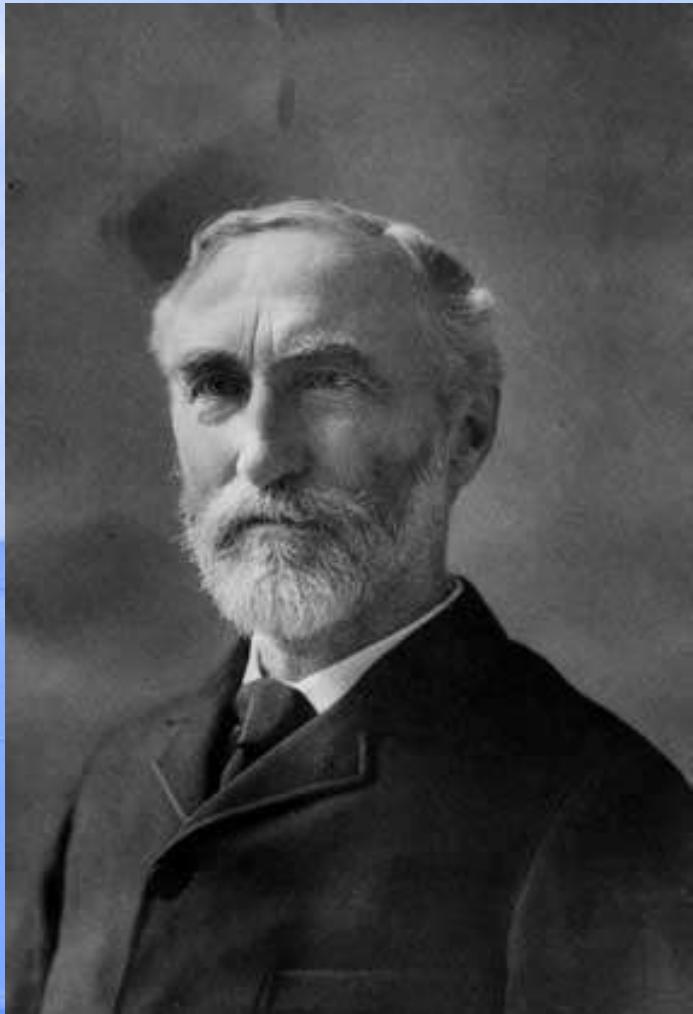


Figure 11.14 Idealized diagram representing deep ocean convection near a continental shelf. (i) A reservoir of dense water forms over the continental shelf. (ii) The reservoir empties and (iii) mixes with an off-shore water mass, (iv) producing a high-density mass of water that descends the slope of the shelf. (From Carmack, 1990.)

- 2). Horizontal density gradient parallel to the coast produces local circulations for the reservoir to empty
- 3). Mixing with an off-shore water mass increases the density (cabbeling)
- 4). Dense, salty water on the shelf descends the slope under a balance of Coriolis, gravity, and frictional forces. The thermobaric effect may also contribute to the sinking

Возможна ли остановка Гольфстрима и похолодание?



**Джозайя-Уиллард Гиббс
(Gibbs J. W.)**

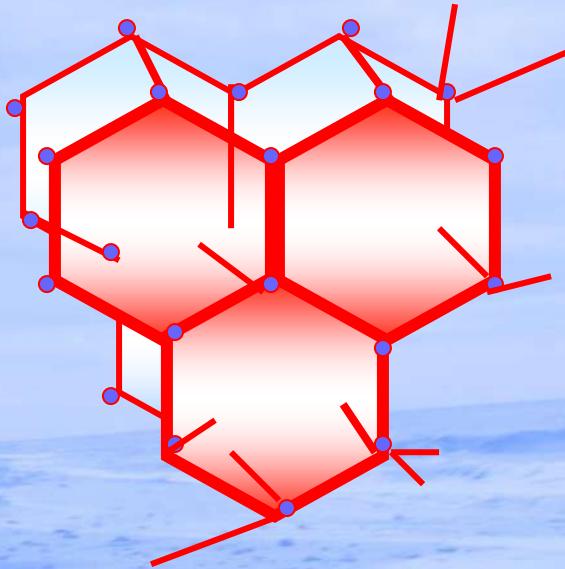
11.II.1839 - 28.IV.1903

Гиббс родился [11 февраля 1839 года](#) в городе [Нью-Хейвен \(Коннектикут\)](#), в семье профессора теологии, работавшего в Йельском университете. В дальнейшем научная жизнь Гиббса также была связана с этим университетом.

В [1858 году](#) Гиббс окончил Йельский университет, в [1863 году](#) получил там же степень доктора философии, а в [1871 году](#) — должность профессора.

Уиллард был задумчив и слаб здоровьем, что отдалило его от участия в шумной общественной жизни США. Он рано потерял родителей, унаследовав с двумя старшими сестрами дом и скромное состояние. Тихо живя вместе с сёстрами, Гиббс занимался домашним хозяйством и наукой. До конца жизни он оставался холостым.

Важность трудов Гиббса сразу же отметил Максвелл, но американская наука была слишком озабочена практическими вопросами, чтобы обращать внимание на его глубокие теоретические исследования. Он не оставил в ней крупного следа и даже не стал членом Американского физического общества. Его приложение термодинамики к физическим процессам породило статистическую механику, позже применённую в квантовой физике. Учёный скончался в своем доме в Нью-Хейвене [28 апреля 1903 года](#).



Рассмотрим уравнения Гиббса для каждой фазы (индексы означают “ice” - лед, “w” - пленка):

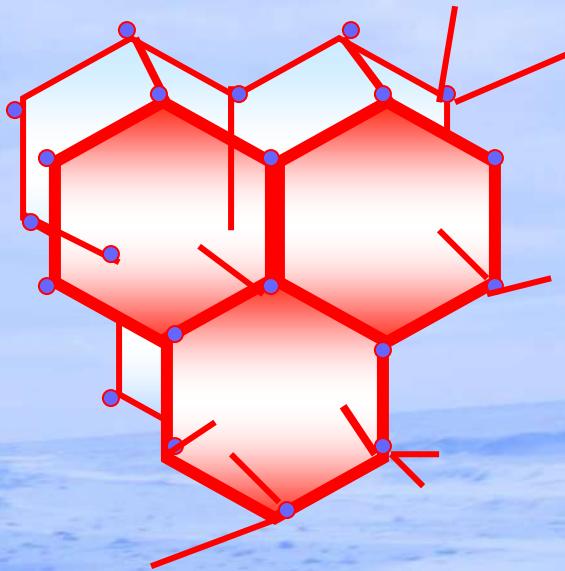
$$S_{ice}dT - v_{ice}dp_{ice} + d\mu_{ice} = 0$$

$$S_wdT - v_wdp_w + d\mu_w = 0$$

где S - удельная энтропия, v - удельный объем, μ - химический потенциал.

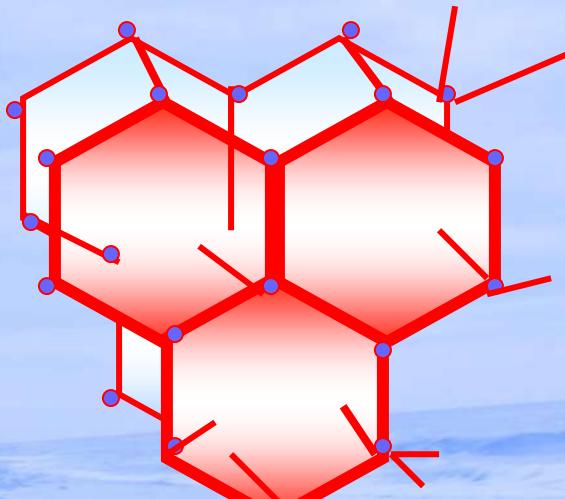
При условии $S_{ice} - S_w = Q/T$, где Q - мольная теплота фазового перехода, получаем:

$$Q \frac{dT}{T} + v_{ice}dp_{ice} - v_wdp_w + d(\mu_w - \mu_{ice}) = 0$$



Влияние давления на температуру фазового перехода описывает уравнение Клаузиуса – Клапейрона, где L – удельная теплота фазового перехода, Δv – изменение удельного объёма тела при фазовом переходе:

$$Q \frac{dT}{T} + (\nu_{ice} - \nu_w)dp = 0$$



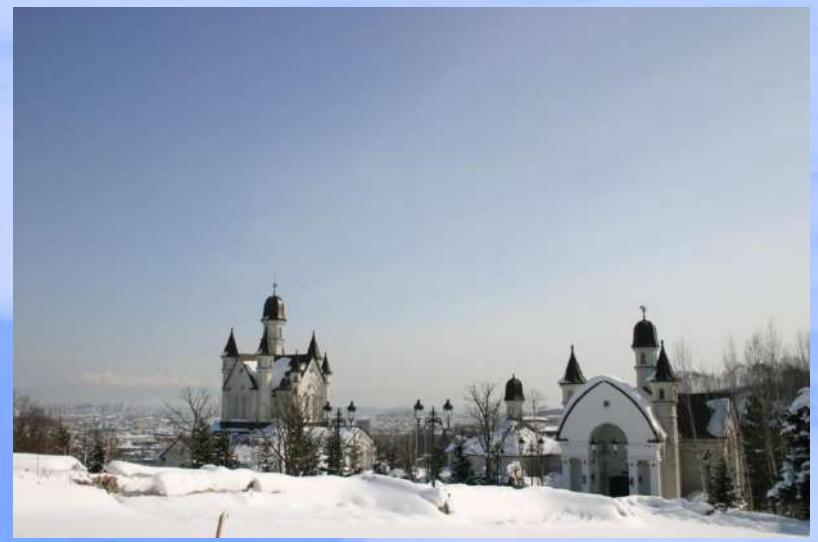
В другом предельном случае, когда возможен свободный отток влаги (т.е. $p = 0$), получаем формулу, иногда называемую формулой Скофилда, в соответствии с которой рост давлений морозного пучения P_l при промерзании происходит слабее почти на порядок :

$$\frac{v_{ice} - v_w}{v_{ice}} \approx 0.1$$

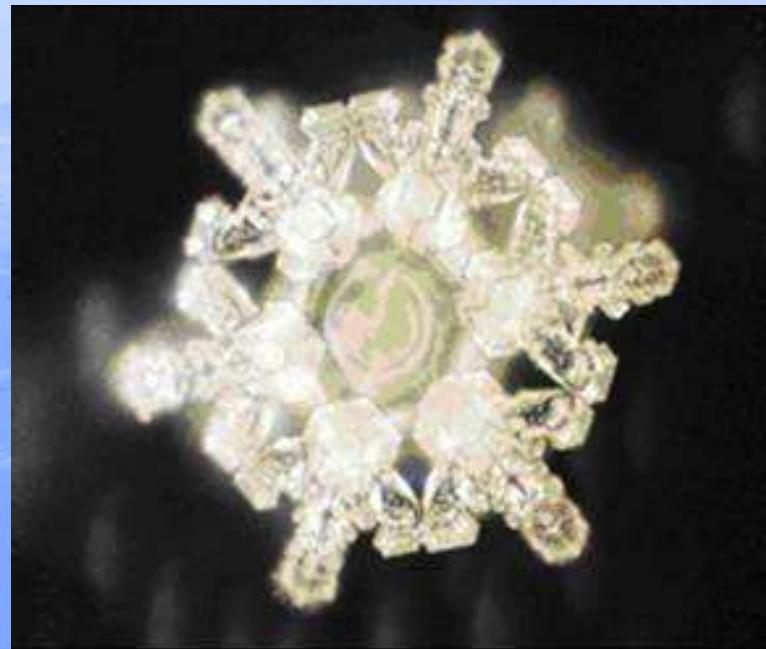
$$Q \frac{dT}{T} + v_{ice} dp_{ice} = 0$$

Формирование состава, криогенного строения и свойств мерзлых пород

Кристаллы льда, справа – музей снега в Японии

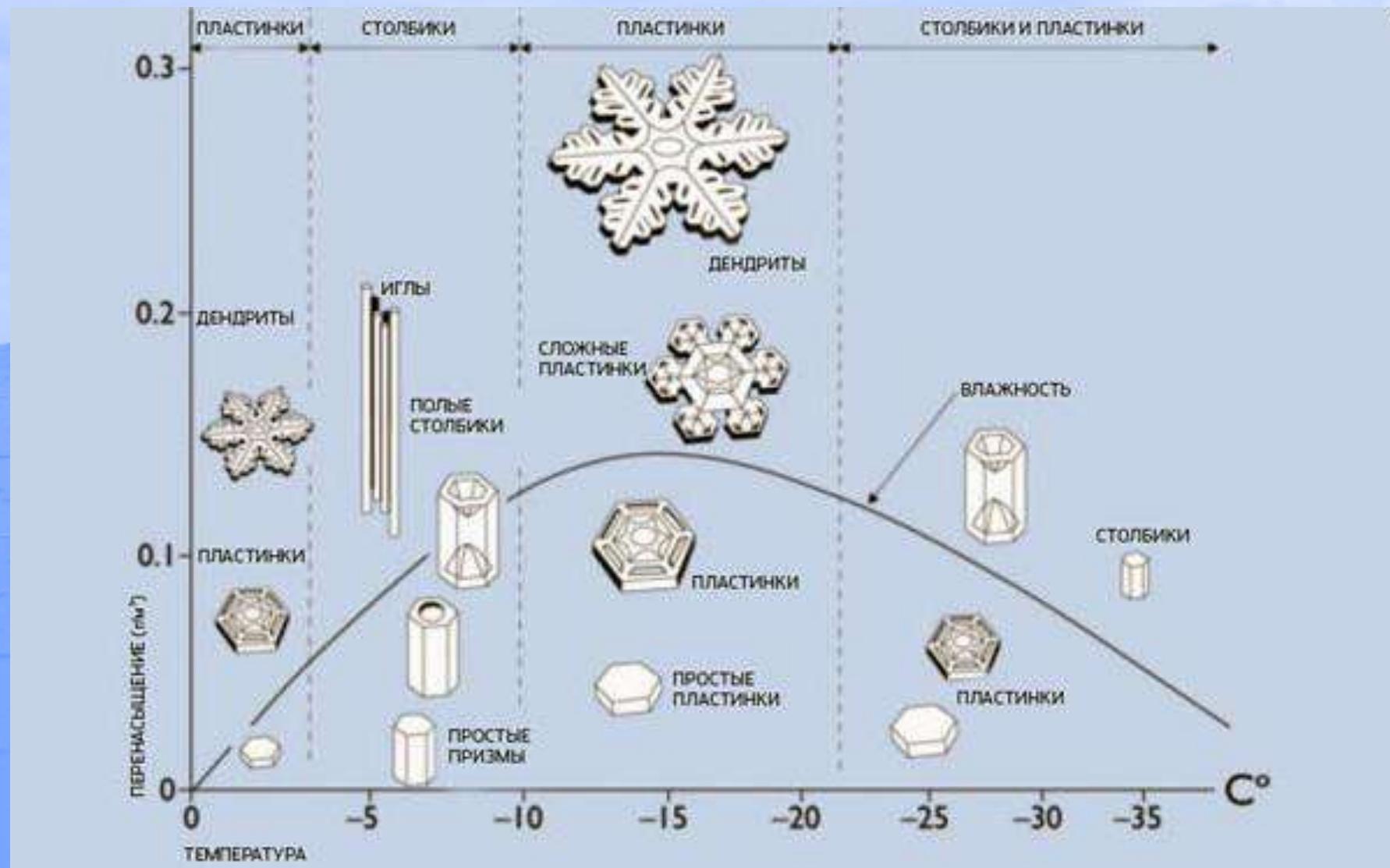


Кристаллическое строение определяет и характер таяния.
Области внутреннего таяния, так называемые «цветы
Тиндаля»





«В области, лежащей ещё дальше к северу от земли скифов, — говорит Геродот— как передают, нельзя ничего видеть, и туда невозможно проникнуть из-за летающих перьев. И действительно, земля и воздух там полны перьев, а это-то и мешает зрению».

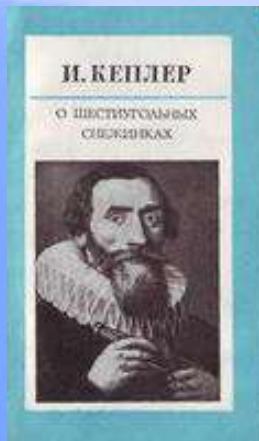


Первым изучать снежинки начал известный астроном **Иоганн Кеплер**. В 1611 году он выпустил трактат «О шестиугольных снежинках», в котором в основном разбирал геометрические аспекты их строения.

Декарт Рене (1596, Лаэ (Турень)—1650, Стокгольм) французский философ и математик. Происходил из старинного дворянского рода. Образование получил в иезуитской школе Ла Флеш в Анжу. В начале Тридцатилетней войны служил в армии, которую оставил в 1621; после нескольких лет путешествий переселился в Нидерланды (1629), где провёл двадцать лет в уединённых научных занятиях. **Рене Декарт детально описал некоторые формы снежных кристаллов.** Следует заметить, что все наблюдения Декарта были сделаны невооруженным глазом.

Декартом описаны некоторые редко встречающиеся формы кристаллов, например 12-лучевые снежинки.

Следующего прорыва пришлось ждать больше двух веков. На 15ти летие мама подарила своему сыну, юному фермеру из штата Вермонт **Уилсону Бентли**, микроскоп. И тот решил смотреть в него на снежинки. 15 января 1885 года он получил первый снимок снежинки, приладив фотоаппарат к микроскопу и снимая ее на фоне черной бумаги. К концу своей жизни он получил изображения 5381 снежинки. В 1920 году он получит должность в Национальной метеослужбе и грант в \$25 на свои исследования. Именно Бентли первым сказал, что **двух одинаковых снежинок никогда не видел.**





Николай Александрович Морозов

Снежинка

С серого неба, где туч покрывало
Низко спустилось над кровлей тюрьмы,
Тихо ко мне на рукав ты упала,
Вестница близкой зимы.
Где ты, снежинка, носилась по воле?
Кто тебя в край наш занес?
Что тебе надобно в царстве неволи,
В царстве страданий и слез?
Лучше б легла ты на снежной вершине
Дальней свободной страны,
Там тебе в дикой, безлюдной пустыне
Снились бы чудные сны.
Там ты смотрела б на синее море,
В солнечных грелась лучах
И не узнала б о муке и горе
В наших забытых стенах!
- Нет! не хотела я целые годы
В снежной лежать вышине,
Я принесла тебе весть со свободы,
Весть о далекой весне.
Пусть цепнеет в холодном недуге
Скованный север земли, -
Яркое солнце сияет на юге,
Пышно цветы расцвели.
Солнце согрело свободные страны,
Всё там приволье и свет,
И чередою валы океана
Шлют тебе братский привет!
Там я возникла в бушующем море,
В вечной стихийной борьбе,
И пролетела в небесном просторе
С весточкой этой к тебе.

Николай Александрович Морозов за 21 год пребывания в Шлиссельбургской крепости разработал ряд научных вопросов, главным образом в области химии и астрономии. Усилием воли он заставлял себя работать. Это позволило ему после выхода из тюрьмы опубликовать работы: "Периодические системы строения вещества" (1907), "Д. И. Менделеев и значение его периодической системы для химии будущего" (1908). Тогда же, во время заточения, было создано и большинство его стихотворений, в том числе восхитительное «Снежинка».

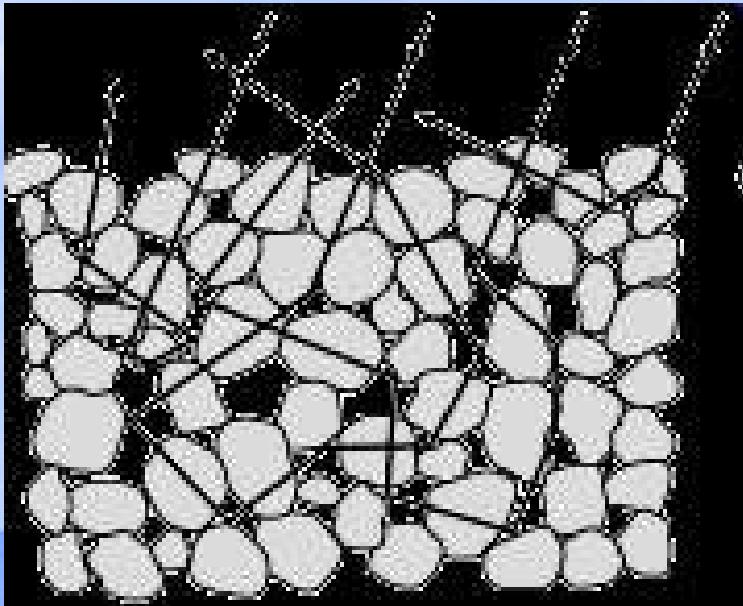
Полевые наблюдения позволили исследователю Национального центра Атмосферных исследований **Нэнси Найт** утверждать, что возникновение одинаковых снежинок возможно. Составив сравнительный каталог, Найт сделала вывод, что у снежинок наблюдается 100 признаков различия. Так образом, общее количество вариантов внешнего вида составляет $100!$ т.е. почти 10 в 158 -й степени.

Полученное число вдвое больше, чем количество атомов во Вселенной! Но это не значит, что совпадения совсем невозможны.

Неверно, что снег, сделанный с помощью снежных пушек на горнолыжных курортах, абсолютно идентичен натуральному. Настоящие снежинки образуются, когда водяные пары конденсируются на ледяном кристалле, минуя жидкую фазу. Снежные пушки распыляют жидкую воду в виде мелких капель, которые замерзают на холодном воздухе и падают на землю. У замёрзших капель нет ни граней, ни лучей, это просто маленькие бесформенные кусочки льда. Кататься на лыжах по ним не хуже, чем по натуральным снежным кристаллам, разве что хрустят они не так звонко.

В некоторых случаях снег может приобретать совершенно неожиданные оттенки. В арктических регионах можно увидеть красный снег: он не тает долгое время, поэтому между его кристаллами живут водоросли. В середине прошлого века в промышленных европейских городах, отапливаемых в основном углем, падал чёрный снег. Нам о чёрном снеге рассказывали жители современного Челябинска.

Свежему снегу в морозный день всегда сопутствует весёлый хруст под ногами. Это не что иное, как звук ломающихся кристаллов. Никто не способен расслышать, как ломается одна снежинка, но тысячи маленьких кристалликов — солидный оркестр. Чем ниже опускается столбик термометра, тем более твёрдыми и хрупкими становятся снежинки и тем выше становится тон хруста под ногами. Набравшись опыта, можно использовать это свойство снега, чтобы определять температуру на слух.



Видимый свет льдом практически не поглощается, но задерживает весь ультрафиолет и большую часть инфракрасного излучения. В этих областях спектра лёд выглядит абсолютно чёрным.

Белый свет, падающий на снег, не поглощается, а многократно преломляется в ледяных кристаллах и отражается от их граней. Поэтому **снег выглядит белым**.

Твердые атмосферные осадки



Снег – один из самых распространенных кристаллов на Земле



Ледяная крупа



Формы снежинок



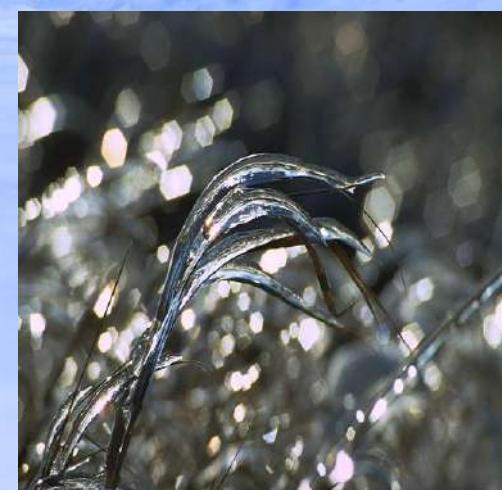
Иней



Град



Изморозь





Как правило, считается, что **иней** (*hoarfrost*, или просто *frost*, или *radiation frost*, или *pruina*) образуется из водяного пара, содержащегося в воздухе, на ветвях деревьев, листьях и других предметах обычно в тихую зимнюю погоду при падении температуры, при этом воздух должен содержать достаточно переохлажденной влаги.

Он отличается от **изморози** (*soft rime* или *rime deposits*), образующейся на охлажденных ниже 0 °C, обычно теплопроводных материалах (проводах, искусственных покрытиях, горных породах) из влажного воздуха с положительной температурой.

Впрочем, в российской и мировой метеорологической литературе эти термины иногда смешивают, ввиду близости этих процессов и результата — ледяных кристаллов на поверхности.

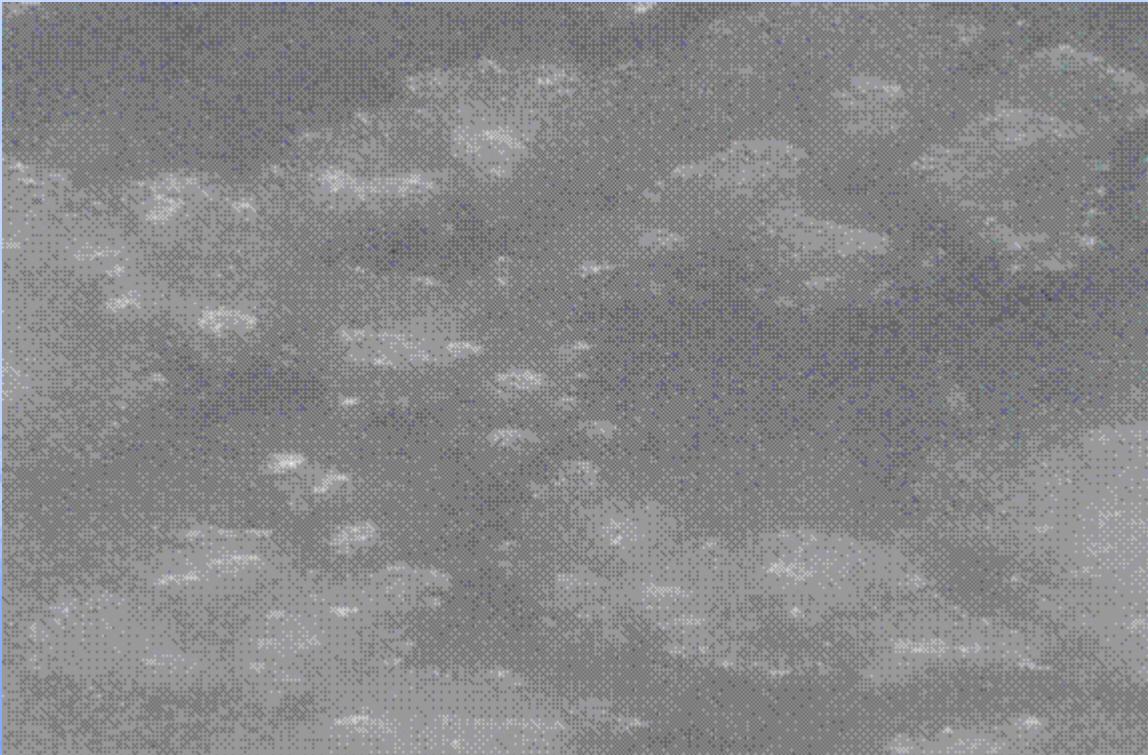
Начальные стадии льдов:

- ледяные иглы — небольшие кристаллы льда;
- ледяное сало — смерзающееся скопление ледяных игл, плавающее на поверхности моря;
- снежура — кашеобразная масса, образующаяся при сильном снегопаде на охлажденную воду;
- шуга — рыхлые белесоватые комки льда, образующиеся при смерзании ледяного сала или снежуры.

Молодые (ниласовые) льды:

- блинчатый лед — круглые ледяные образования диаметром до 3—4 м, толщиной в несколько сантиметров;
- нилас — тонкий (до 10 см) эластичный сплошной лед, изгибающийся на волне и разламывающийся ветром;
- серый лед, или молодик, толщиной от 10 до 30 см;
- белый лед, толщиной от 30 до 70 см, в неарктических морях является предельной возрастной стадией.

**Ледяное сало
– первая
стадия
замерзания
моря**





Шуга – комки льда, образующиеся при смерзании ледяного сала или снежуры.



**Молодой
тонкий лед –
нилас
толщиной до
10 см**



Торосы в
Арктике

Арктические льды поздних стадий:

- однолетний лед — к концу весны достигает толщины 1,5 м, в период летнего таяния обычно полностью не исчезает;
- двухлетний лед — достигает толщины 2 м;
- многолетний (паковый) лед толщиной от 2,5 м и более, поверхность обычно холмистая.

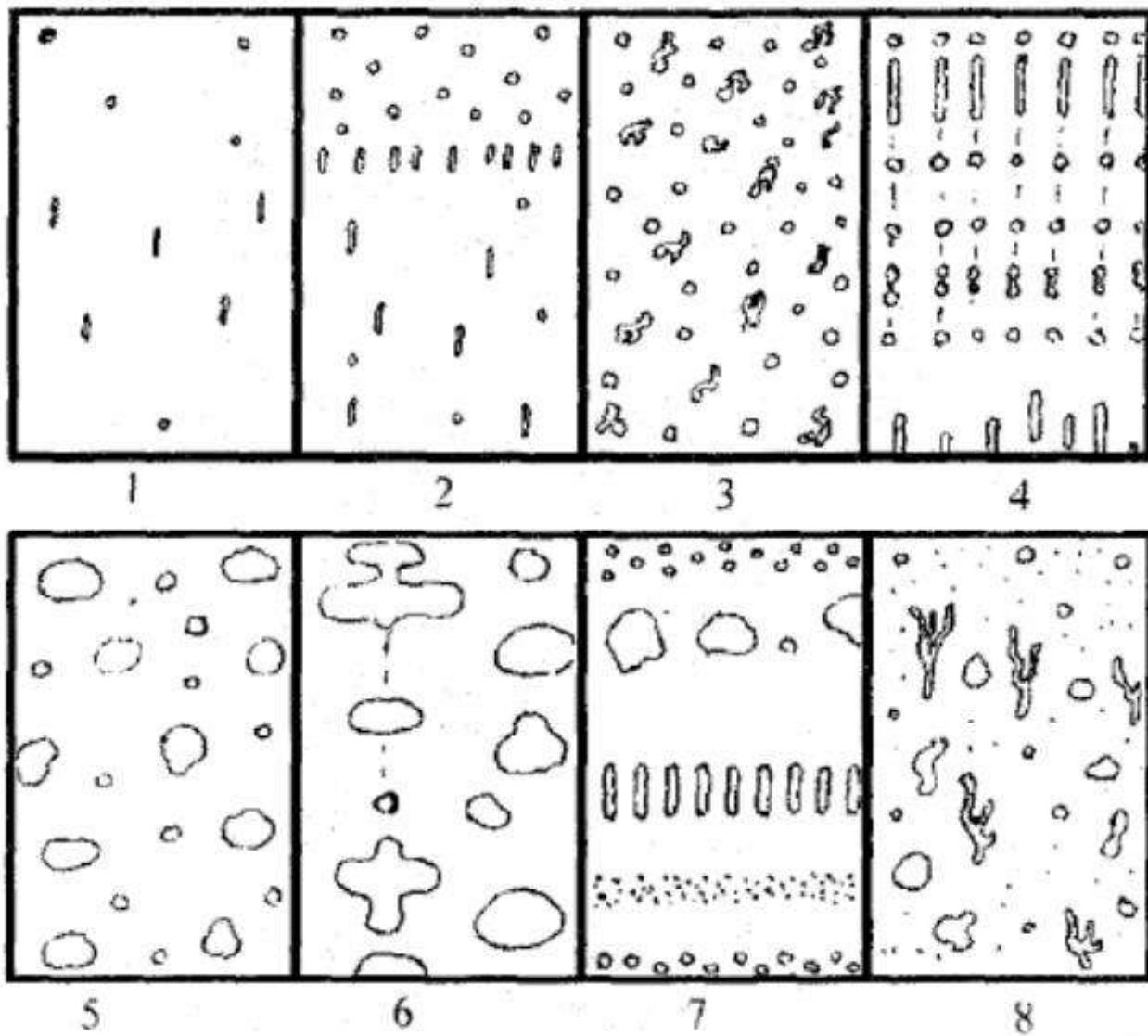
По динамическому признаку (подвижности) различают неподвижные и дрейфующие льды. Льды возрастных стадий могут находиться в том и другом состоянии, кроме льдов начальных стадий, которые встречаются лишь в состоянии дрейфа.

К числу неподвижных льдов относятся:

- припай — обширный ледяной покров, связанный с берегом, от которого может простираться на десятки и сотни миль;
- стамуха — сидящее на мелководье торосистое скопление льда.

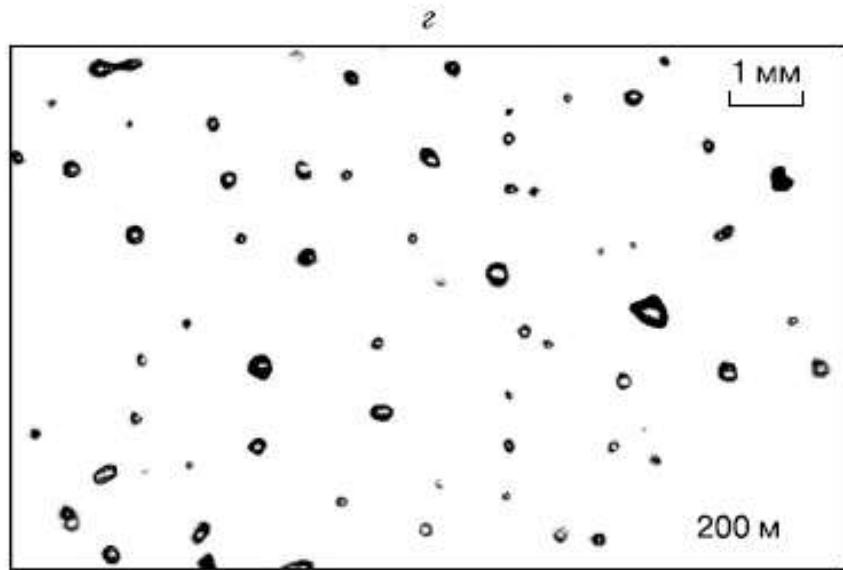
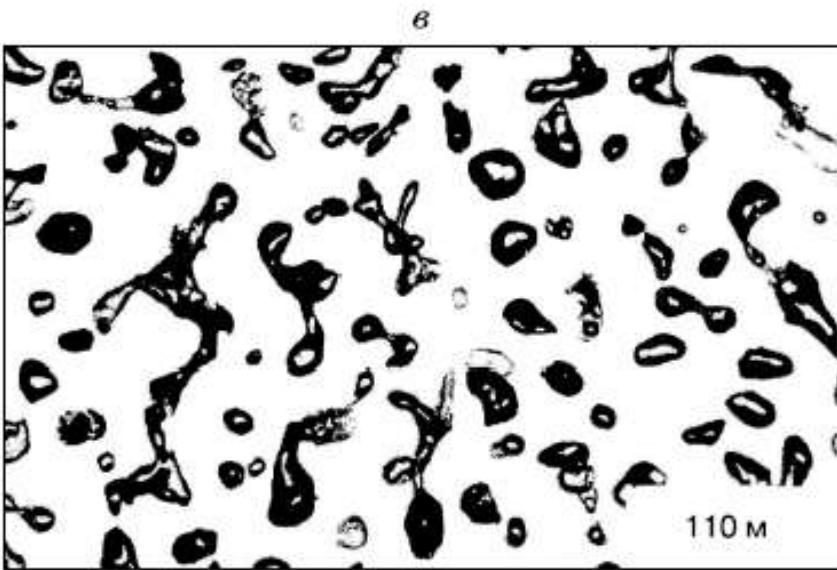
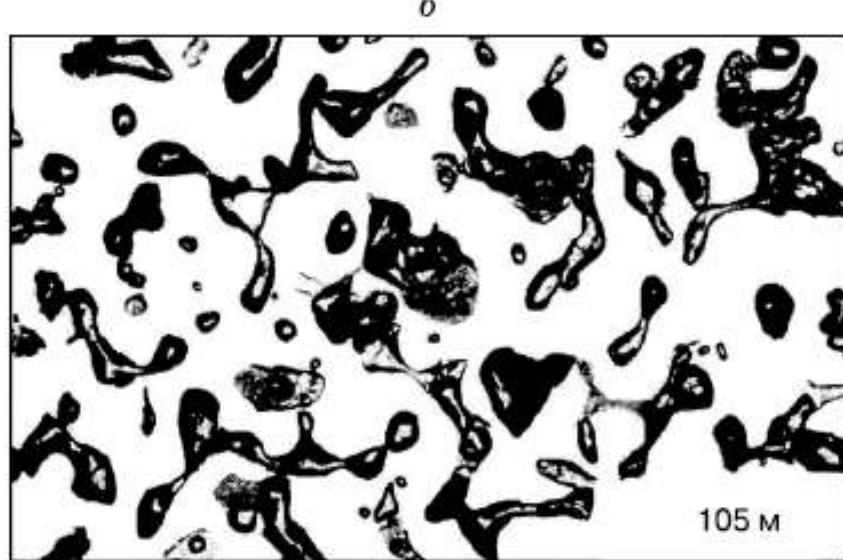
Основные формы дрейфующего льда:

- ледяные поля различных размеров (от 200 м до нескольких километров в поперечнике);



Типы текстуры пресного льда:

1 - монолитный; 2 - мелкопузыристый; 3 - среднепузыристый; 4 - с трубчатыми воздушными включениями;
5 - крупнопузыристый; 6 - крупнополостной; 7 - слоистый; 8 - с многообразной неупорядоченной текстурой

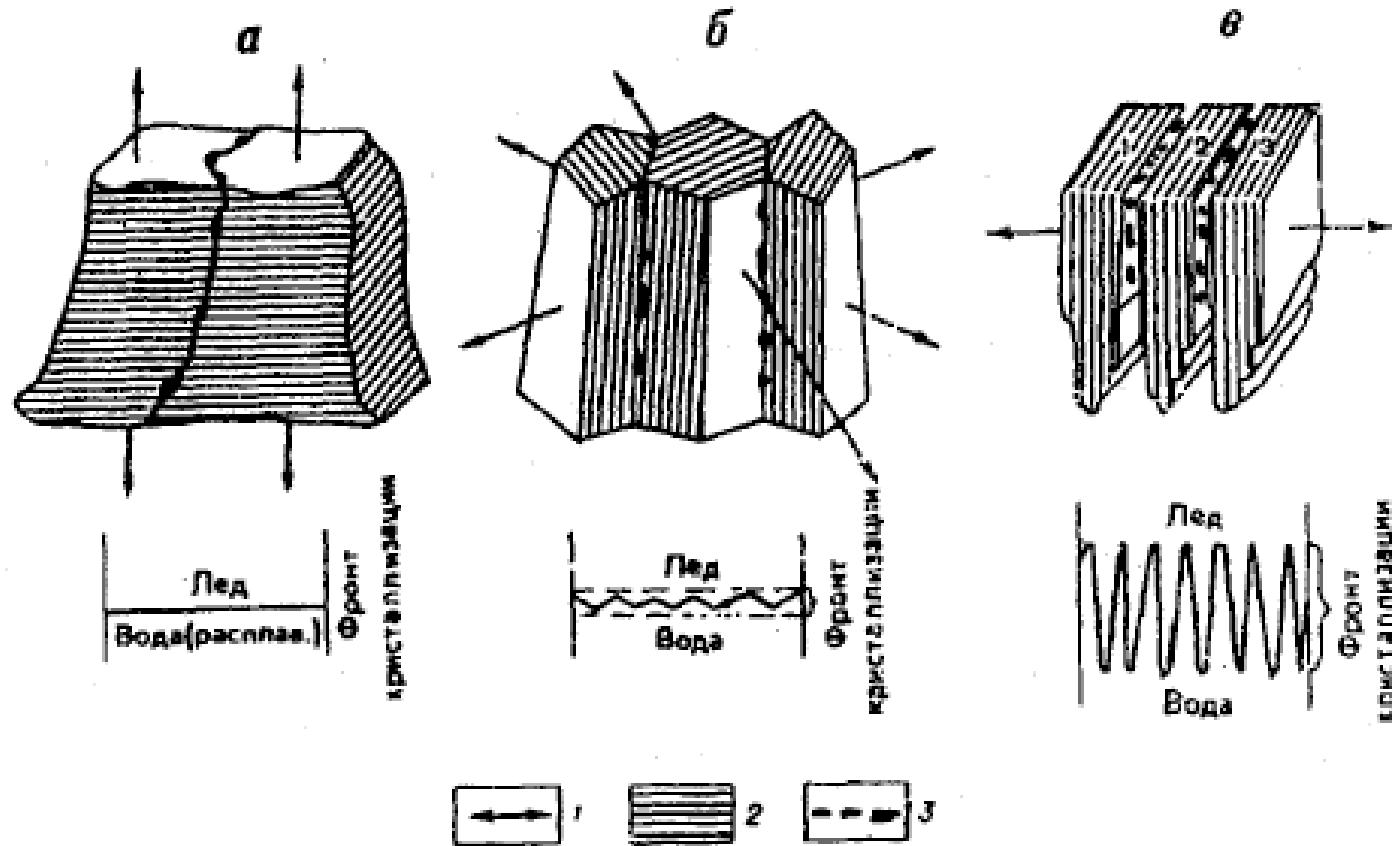


Поры и включения воздуха в ледяном керне со станции Восток

В.Я. Липенков

Градиент температуры

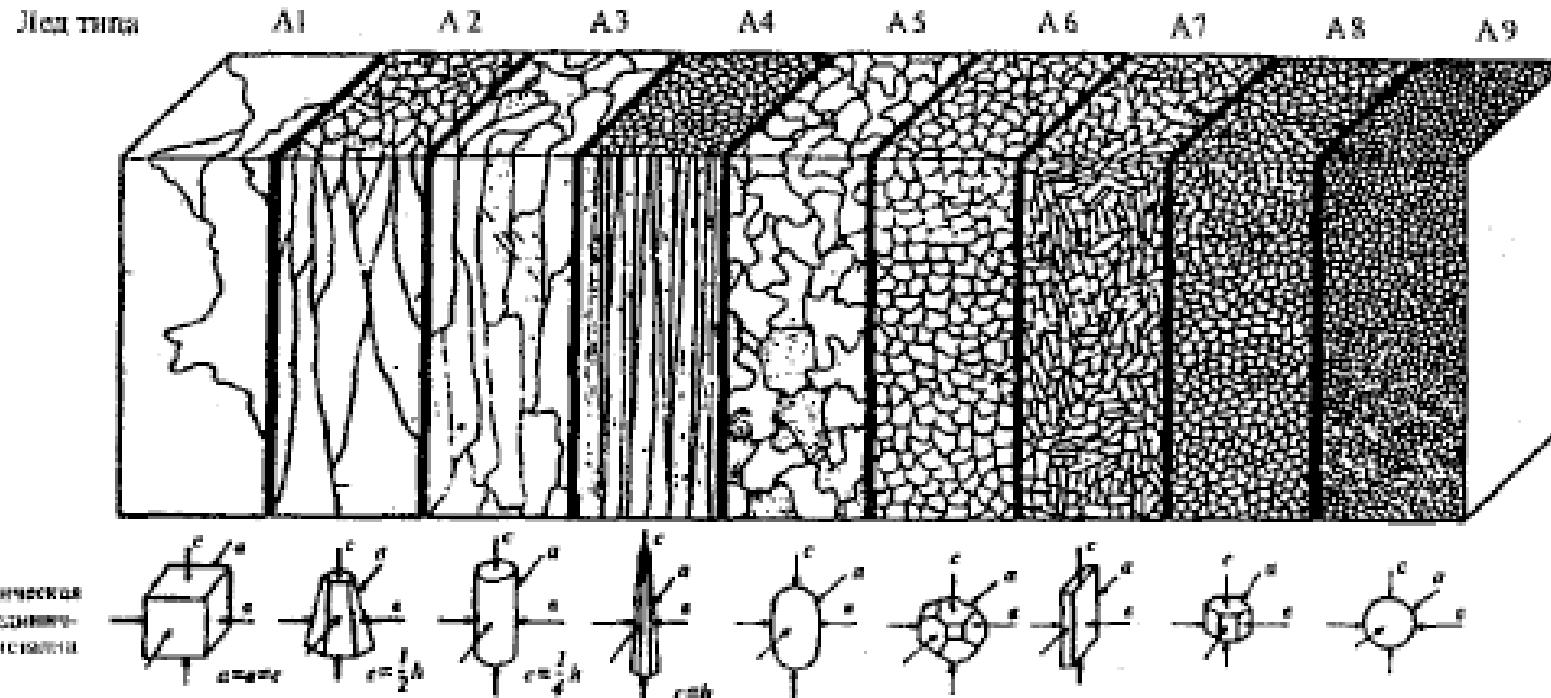
Температура воды близка к температуре воздуха



Основные типы развития кристаллов льда, формирующихся при статических условиях ледообразования:

а, б, в — типы кристаллов; 1, 2, 3 — кристаллические волокна; I — направление С-осей кристаллов; II — базисные пластинки в кристаллах; III — солевые включения

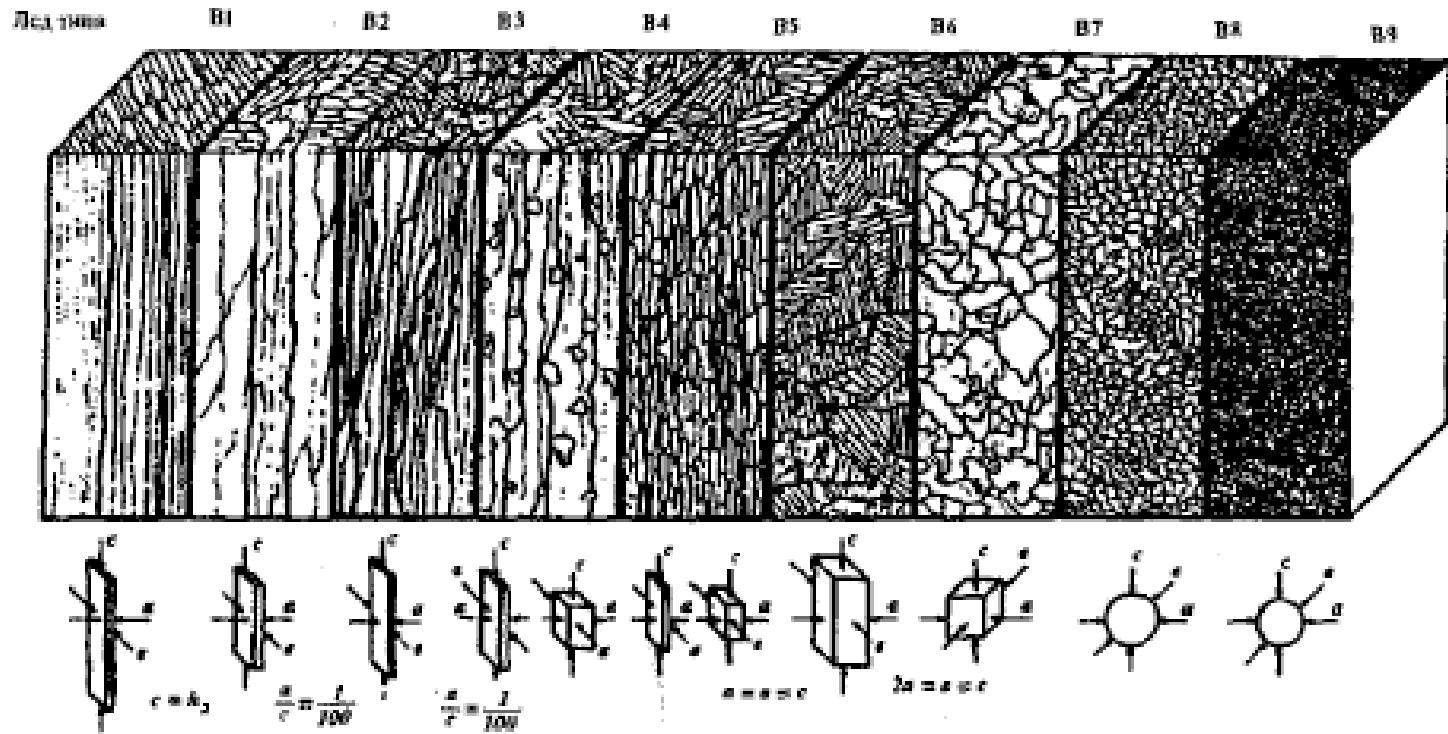
Типы пресноводных льдов



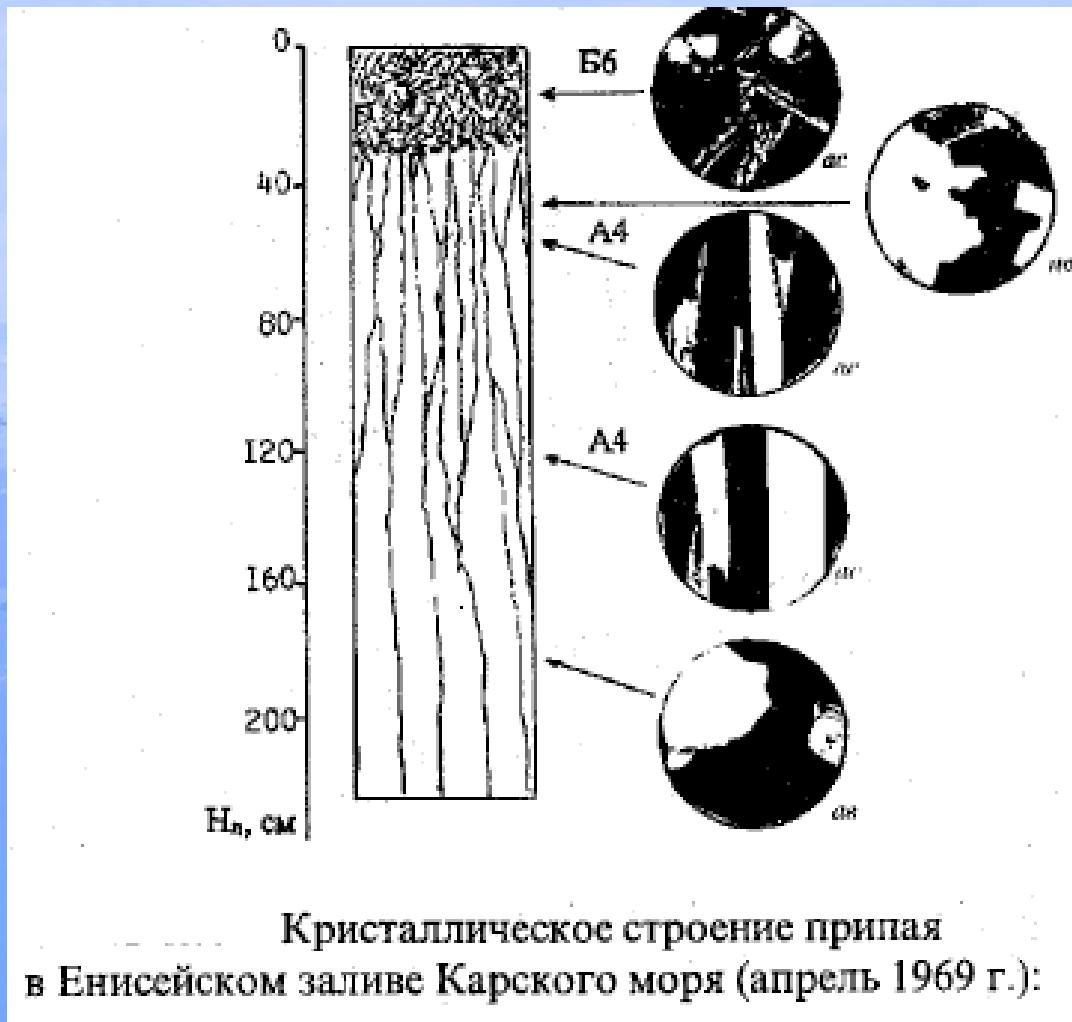
Тип льда — А1. Ледообразование происходит при устойчивой температурной стратификации в приледнике слое воды. Кристаллизация осуществляется при небольшом переохлаждении поверхностного слоя воды, что стимулирует развитие крупных скелетных кристаллов.

Тип льда — А9. Образуется в результате инфильтрационного ледообразования при смерзании снега пропитанного водой.

Типы морских льдов

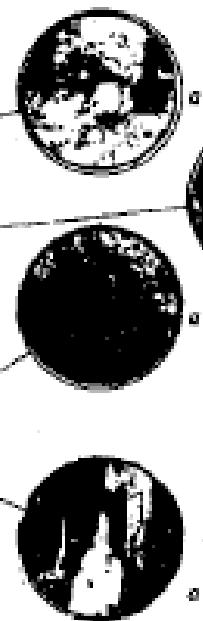
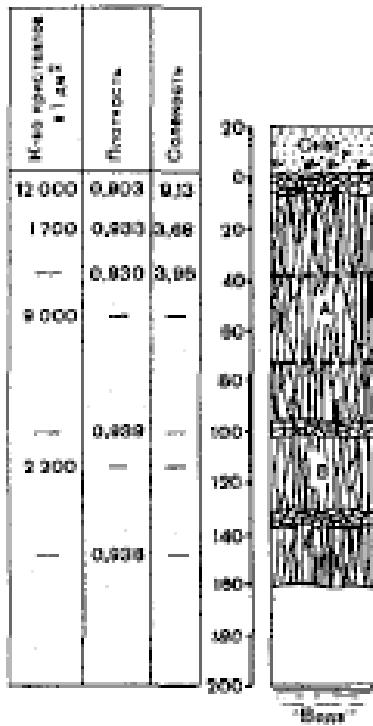


Типы морских льдов

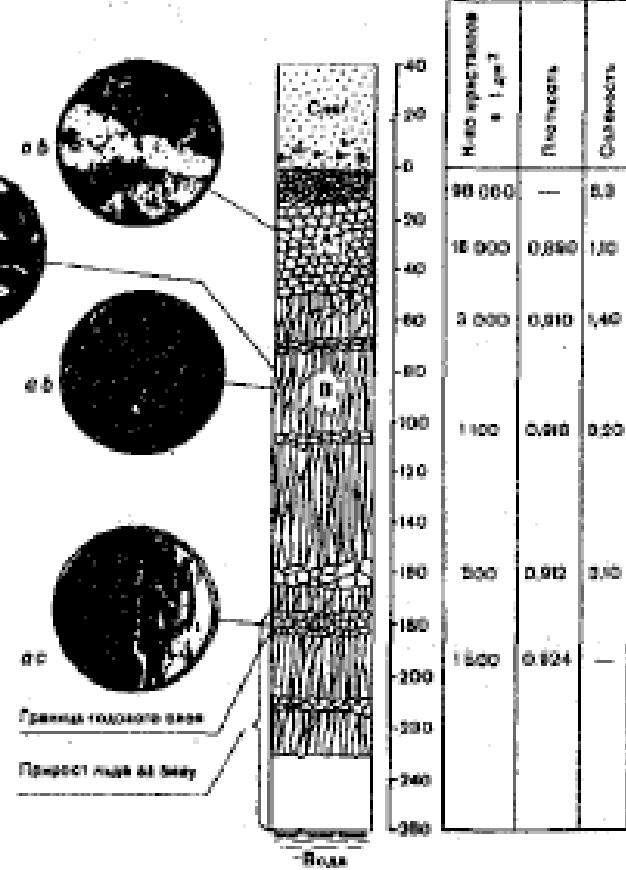


Типы морских льдов

однолетний лед



двулетний лед



Строение и основные физические свойства однолетнего и двухлетнего льда в районе дрейфующей станции «СП-4» (1955/56 г.):

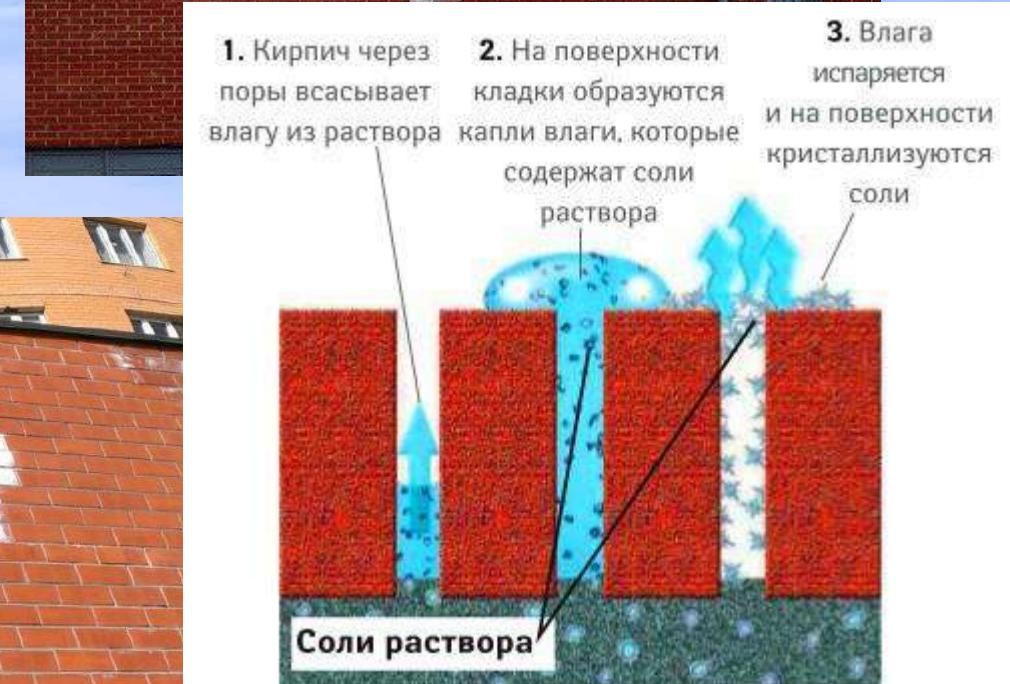


T °C	Состав и количество солей (г) на 1 кг морской воды						Соотношение фаз	
	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	NaCl	KCl	MgCl ₂	жидкая (на 100 0 г см еси)	твердая (чистый лед + соль на 1000 г смеси)
0.0	-	-	-	-			1000	-
-1.8	-	-	-	-			1000	-
-5.6	648.2	-	-	-			351.8	648.2
-7.6	78.0	0.16	-	-			273.6	726.4
-9.5	40.1	1.65	-	-			231.9	768.1
-10.6	21.8	0.47	-	-			209.6	790.4
-12.3	18.2	0.32	-	-			191.0	809.0
-15.0	21.1	-0.04	0.15	-			169.3	830.7
-17.0	16.7	-0.09	0.11	-			152.6	847.4
-22.6	32.8	-0.24	0.36	2.47			117.6	882.4
-24.2	27.3	-0.08	0.29	11.43			68.8	931.2
-26.0	15.5	-0.15	0.10	4.40			48.9	951.1
-28.0	6.7	-0.09	1.80	1.80			40.4	959.6
-30.8	5.5	-0.05	0.06	1.30			33.6	966.4
-32.2	1.2	-0.05	0.03	0.70			32.7	967.3
-34.2	3.7	-0.04	0.02	0.52	0.13		27.4	972.6
-35.5	1.2	-0.01	0.02	0.28	0.10		25.8	974.2

Эвтектические температуры водно-солевых систем: В водах суши, как правило, первыми выпадают карбонаты

Система	Температура кристаллизации, °C	Концентрация, % (по массе) безводной соли в растворе	Состав твёрдой фазы
$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-1,8...-1,9	-	Лёд + CaCO_3
$\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-2,3	-	Лёд + 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 + K_2SO_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 + $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

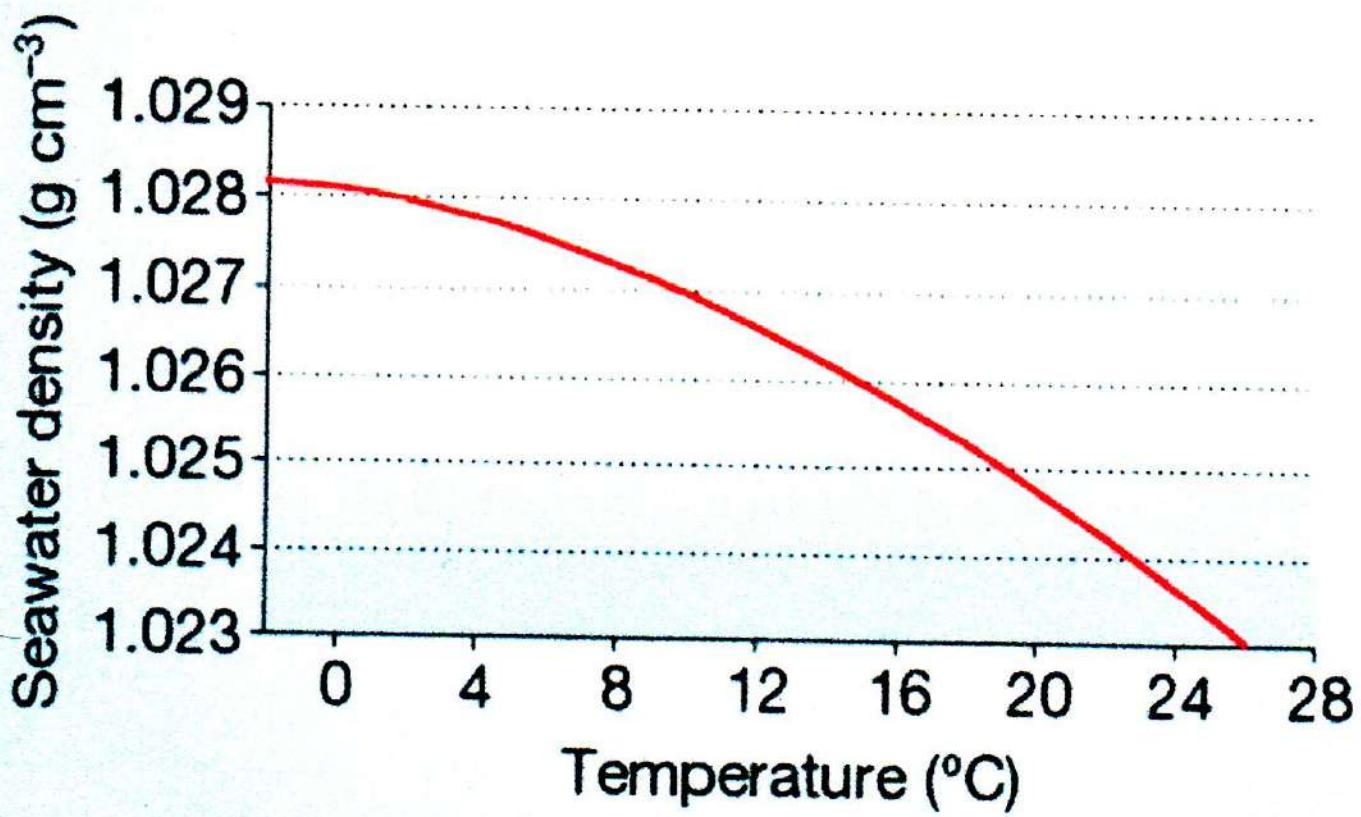
Высолы на стенах и деревьях



Высаливание - один из страшных для строительных материалов разрушающих процессов!



При -8.2°C из **рассола морской воды** кристаллизуется глауберова соль (мирабилит) - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, а при -22.9°C - NaCl . При температуре -36.8°C из рассола выпадает KCl , при -43.2°C - $\text{MgCl}_2 \times 12\text{H}_2\text{O}$ и при -54°C $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (Паундер, 1967). Выпадает также некоторое количество CaCO_3 . Наконец, при температуре -55°C замерзает весь раствор. При этом до температуры -17°C (и выше) основная масса солей - 99.65%, находится в растворе, за исключением глауберовой соли.





При этом кинетика процесса сложна, при быстром замерзании раствора электролит может попасть в состав льда (захват ионов, рассола).

Процесс захвата ионов солективный, с образованием электрических потенциалов (эффект Воркмана - Рейнольдса, предложенный для объяснения причины электризации при грозе).

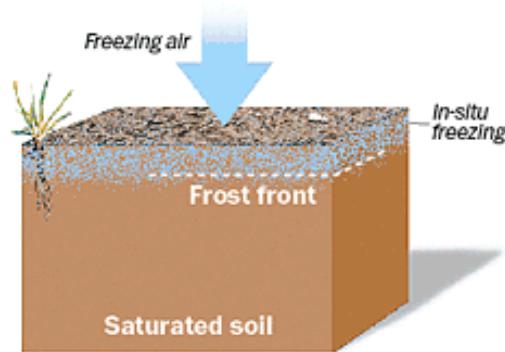
В результате захвата ионов быстро образующийся лед является более соленым, чем медленно образующийся (от 5.64% при -16 град. С до 10.16% при -40 град. С).

A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. The background is a dramatic, reddish-pink sky, likely from a sunset or sunrise. The lighting creates strong highlights and shadows on the ice's surface.

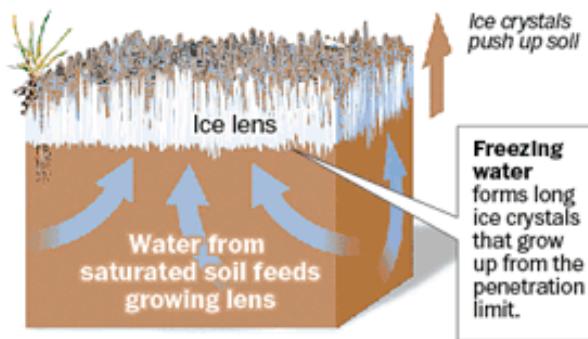
Общая геокриология

Миграция влаги

A heave begins with a hard freeze, which creates a **frost front** that penetrates the soil. The front causes **in-situ freezing** of water held between soil particles. As ice expands in the frozen ground, it increases soil volume by 9 percent.

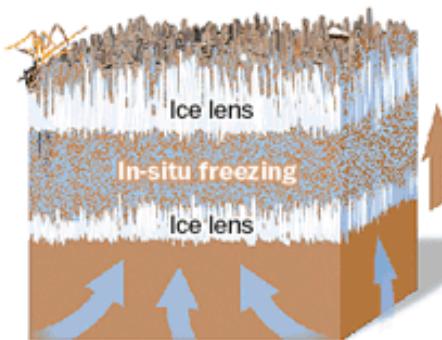


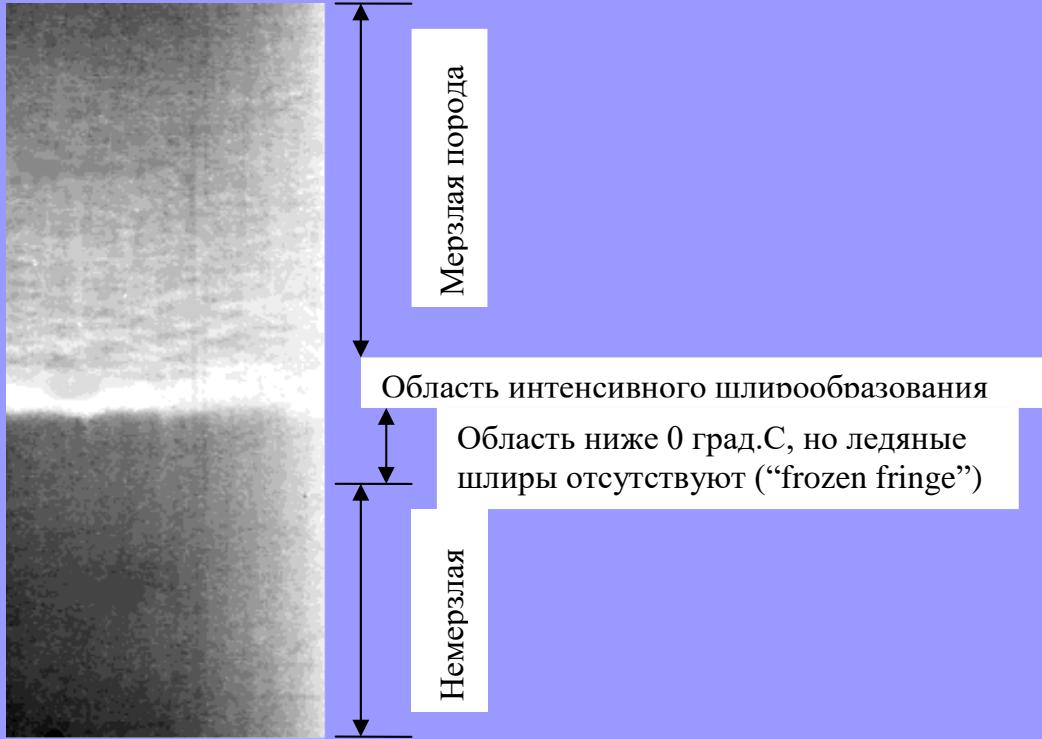
The heavy lifting begins when the frost front reaches a **penetration limit**. Fed by water from the saturated ground below, an **ice lens** forms and pushes upward, displacing and lifting the in-situ frozen soil.



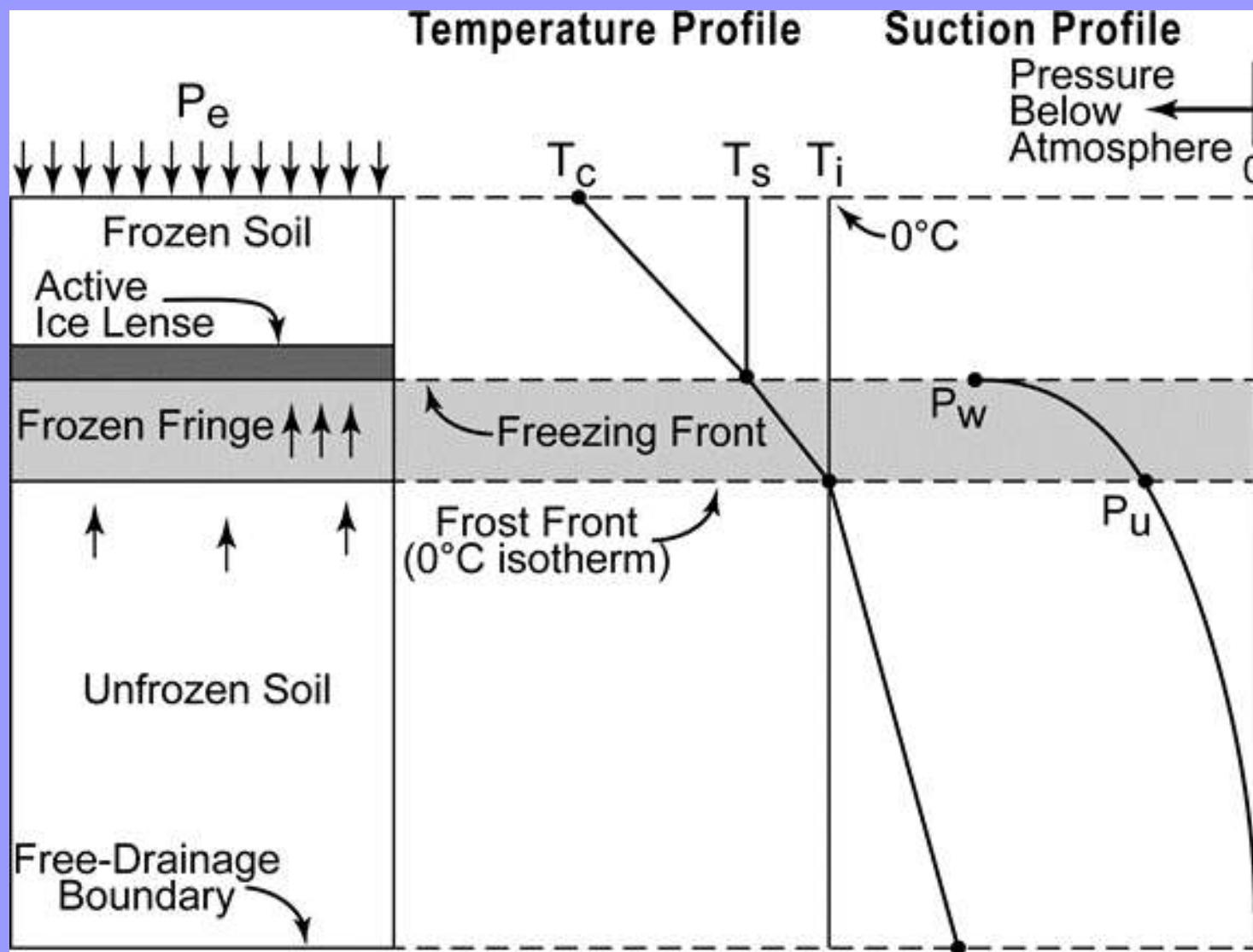
The lens stops growing when its water supply runs out, at which point the frost front continues downward until it reaches saturated soil again and forms **another ice lens**.

The process can continue to plunge deeper, threatening the stability of any structure it might undermine. District building codes require that foundations extend $2\frac{1}{2}$ feet into the ground to protect them from heaving frost.





Аллювиальный суглинок при промерзании при температуре около -6°C; строение переходной промерзающей области («зоны промерзания»); вертикальный размер образца 10 см. Фото С.Акагава

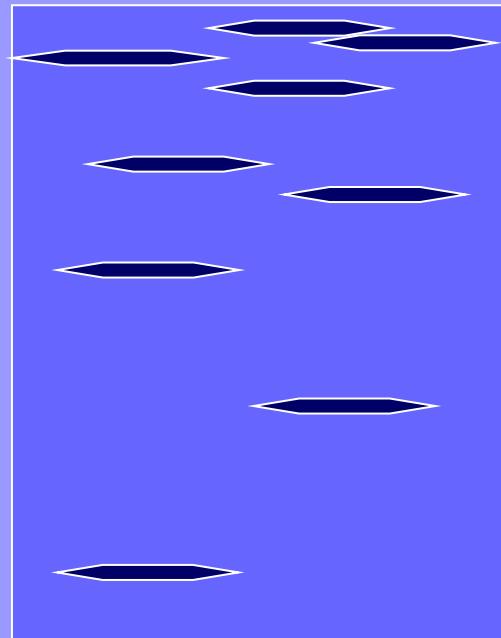


Температурный разрез (temperature profile), положение нулевой изотермы (frost front, 0° isotherm), фронта промерзания (freezing front) и профиля давления всасывания (suction pressure profile), которое ниже атмосферного (below atmosphere) при образовании ледяной линзы (active ice lense) (Konrad, 1999, Рис. 1, с изменениями). Стрелки в левой стороне рисунка показывают направление миграции воды: мёрзлый грунт (frozen soil), «мёрзлая кайма», или зона промерзания (frozen fringe), немёрзлый грунт (unfrozen soil), граница свободного дренажа (free-drainage boundary).



Происхождение слоистой
криогенной текстуры:
унаследованность текстуры

Слоистые криогенные текстуры: разряжение с глубиной





Слоистые
криогенные
текстуры:
строение
контакта с
жильным
льдом



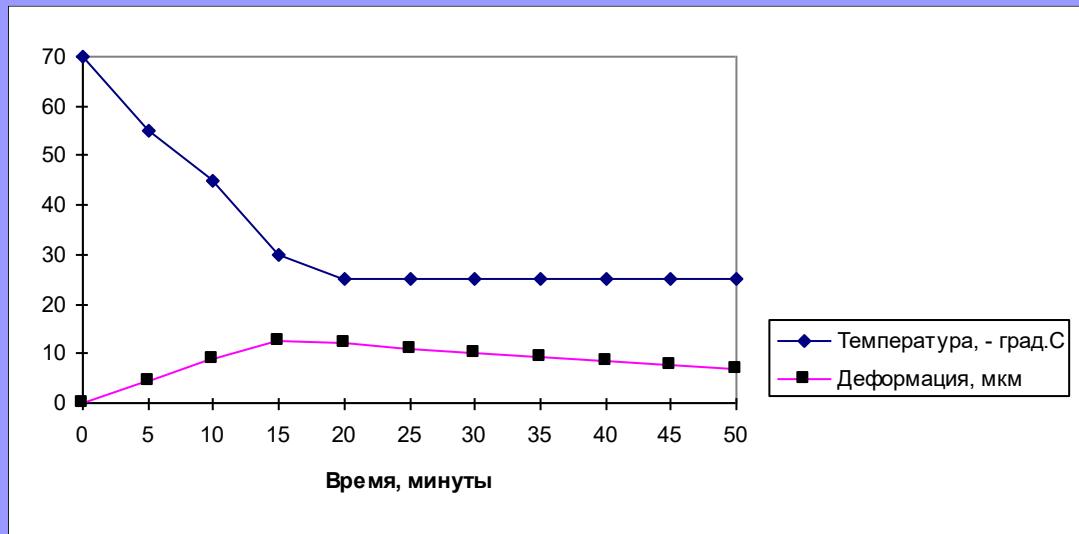
Слоистые
криогенные
текстуры: как
долго могут
растить
ледяные
включения?





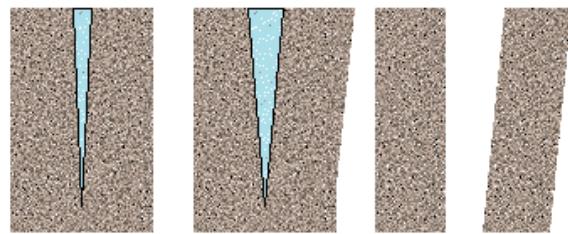
Усадка в
талой
зоне

Температурные деформации

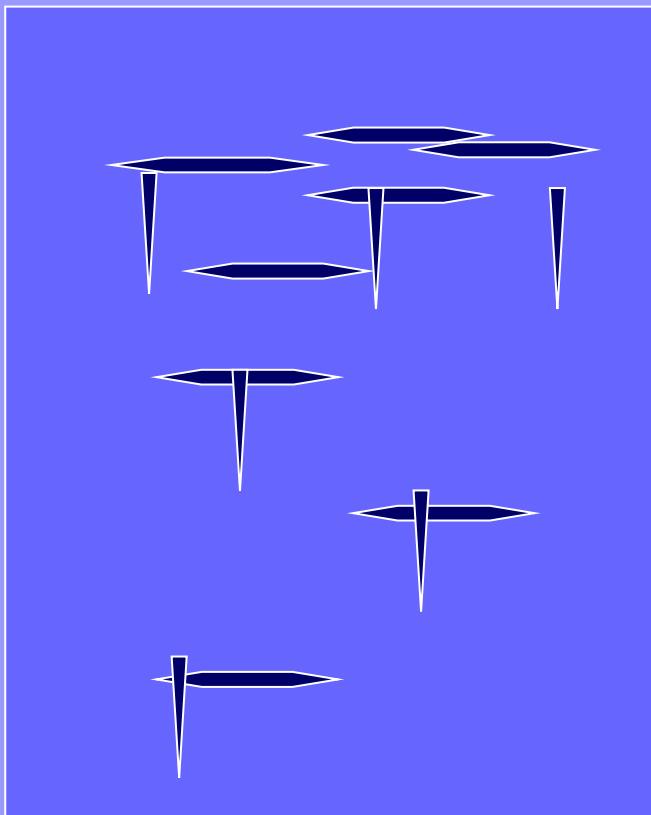


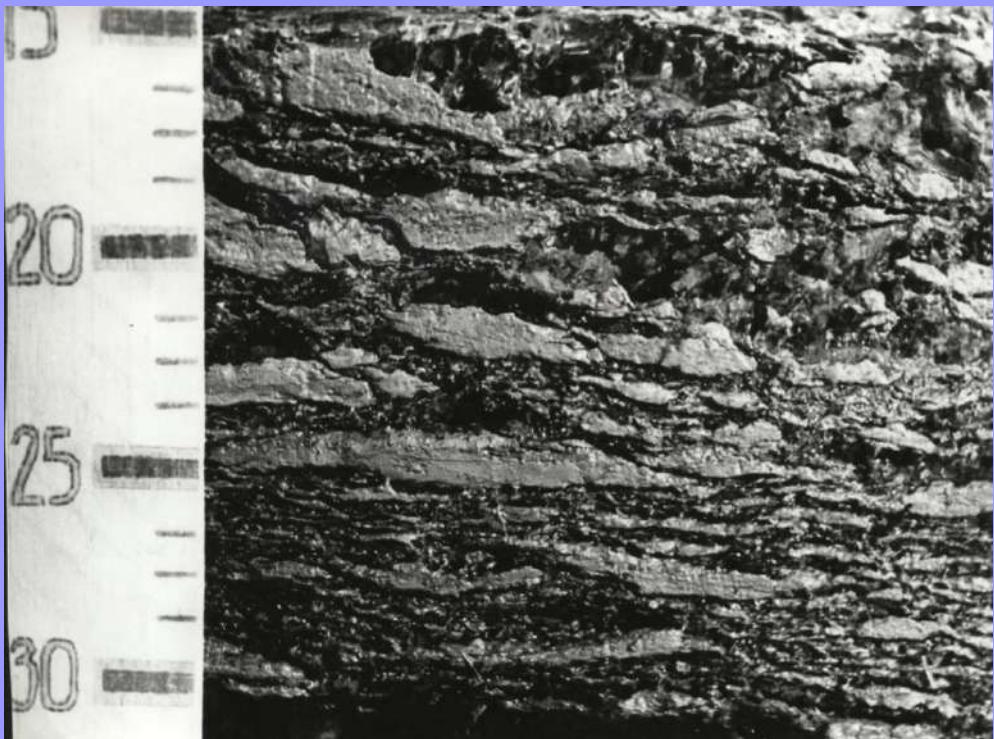
Температурные деформации образца мерзлого суглинка длиной 20 мм при повышении температуры

Frost Wedging



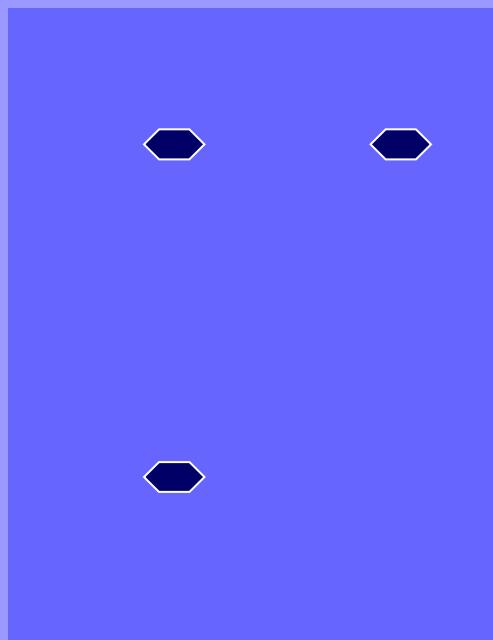
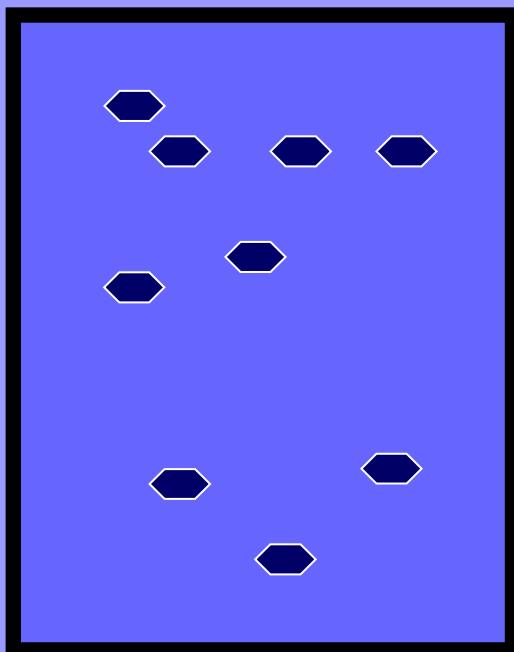
Происхождение
сетчатой текстуры



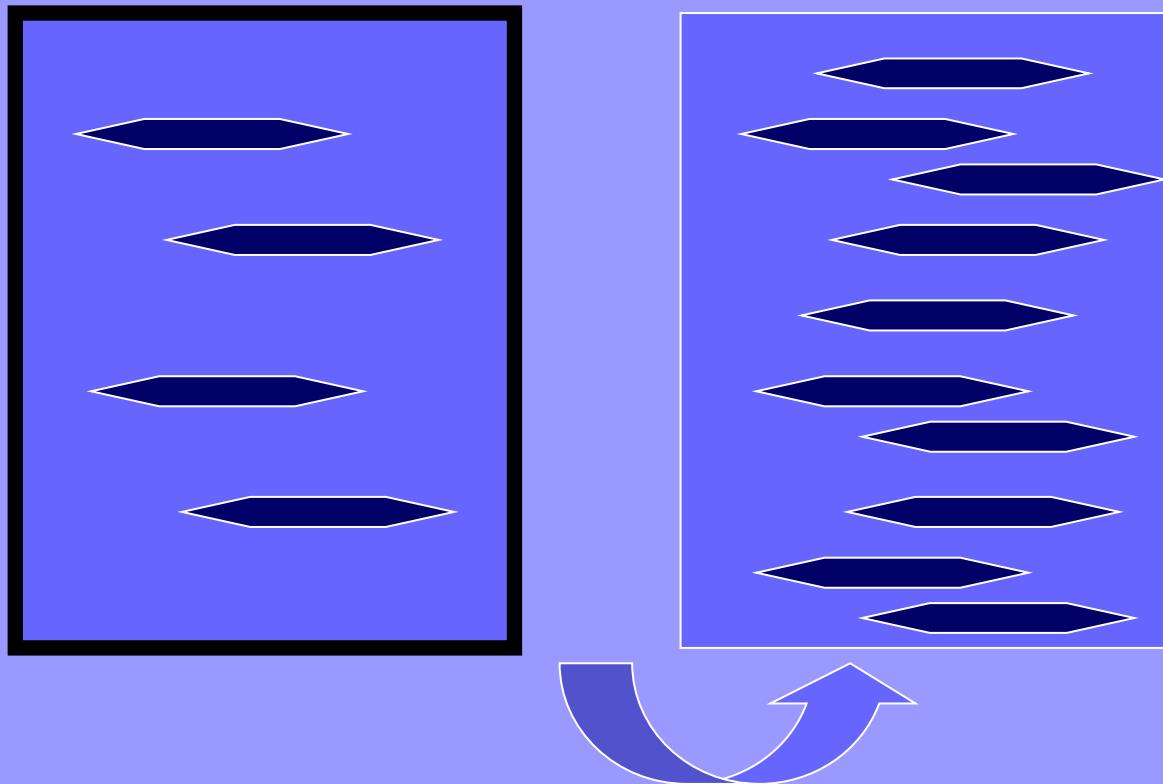


Криогенные
текстуры:
почему столько
льда?

Открытая и закрытая система: песок – поршневой эффект



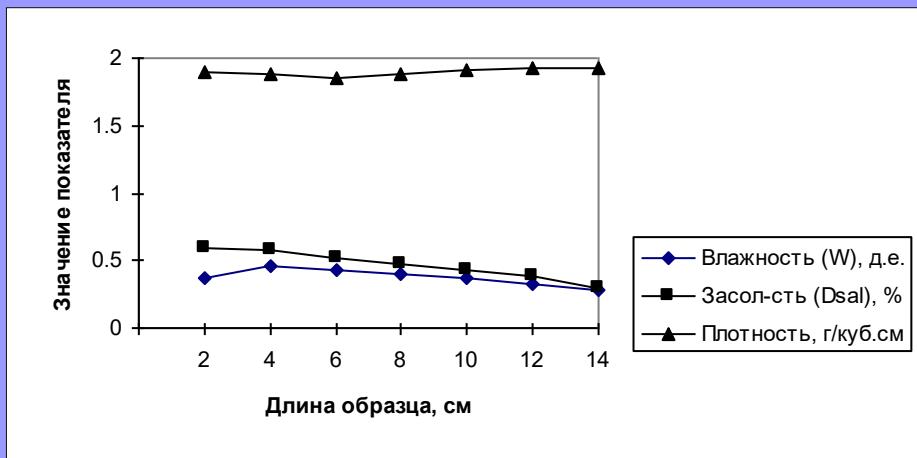
Открытая и закрытая система: глина – миграция влаги к фронту промерзания





4209 ON

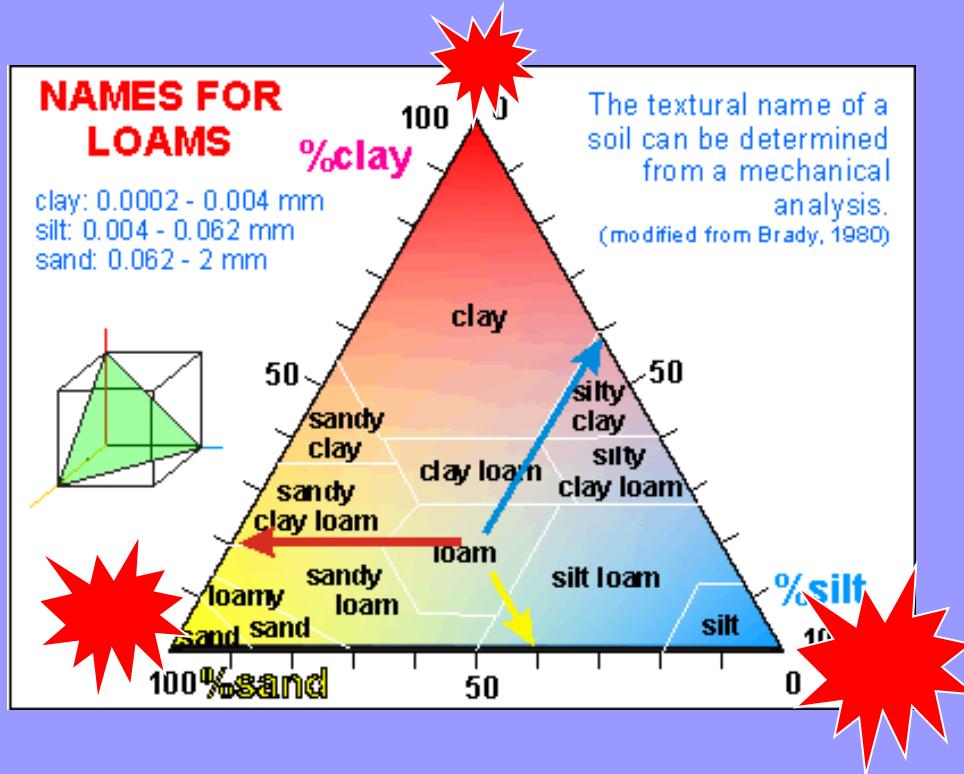
Соли двигаются вместе с водой



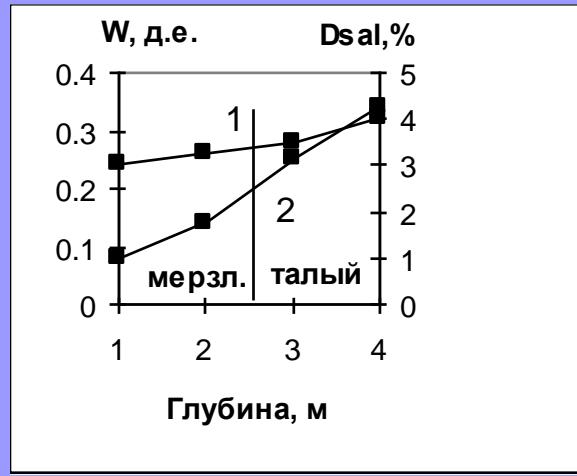
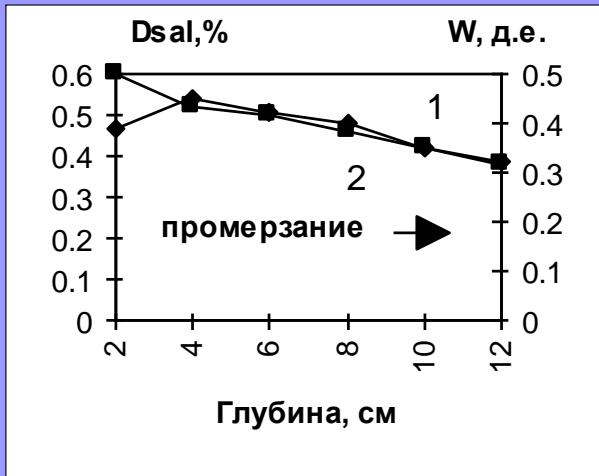
Распределение влажности, солей (засоление морской солью) и плотности по длине образца мерзлого суглинка, промерзшего сверху (на рисунке слева) в закрытой системе при -3.5°C при заданной начальной засоленности 0.5%

Влияние дисперсности на влагоперенос в глинистых породах:

Суглинок > супесь > глина

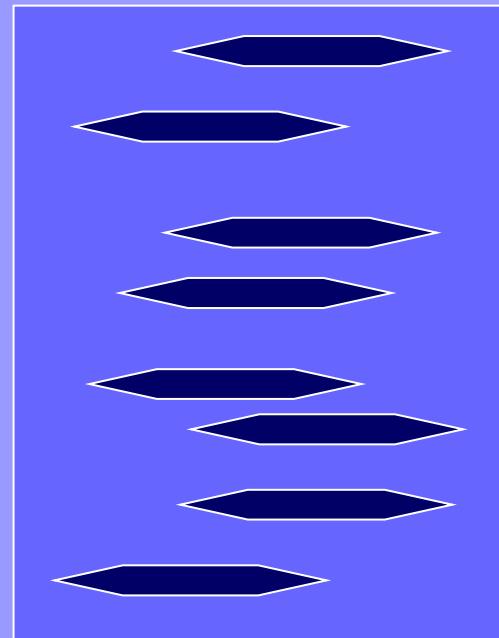
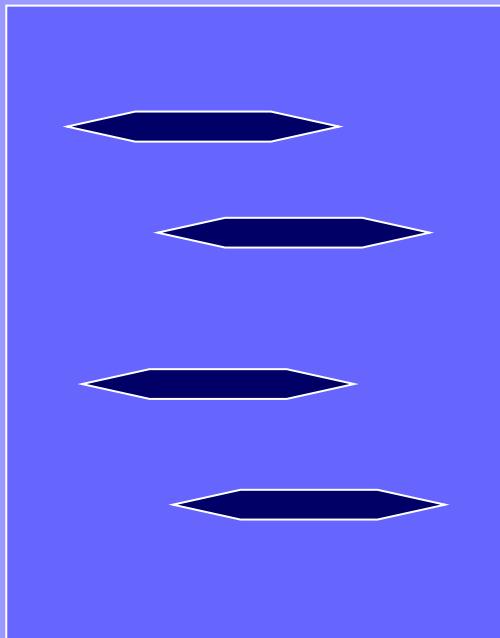


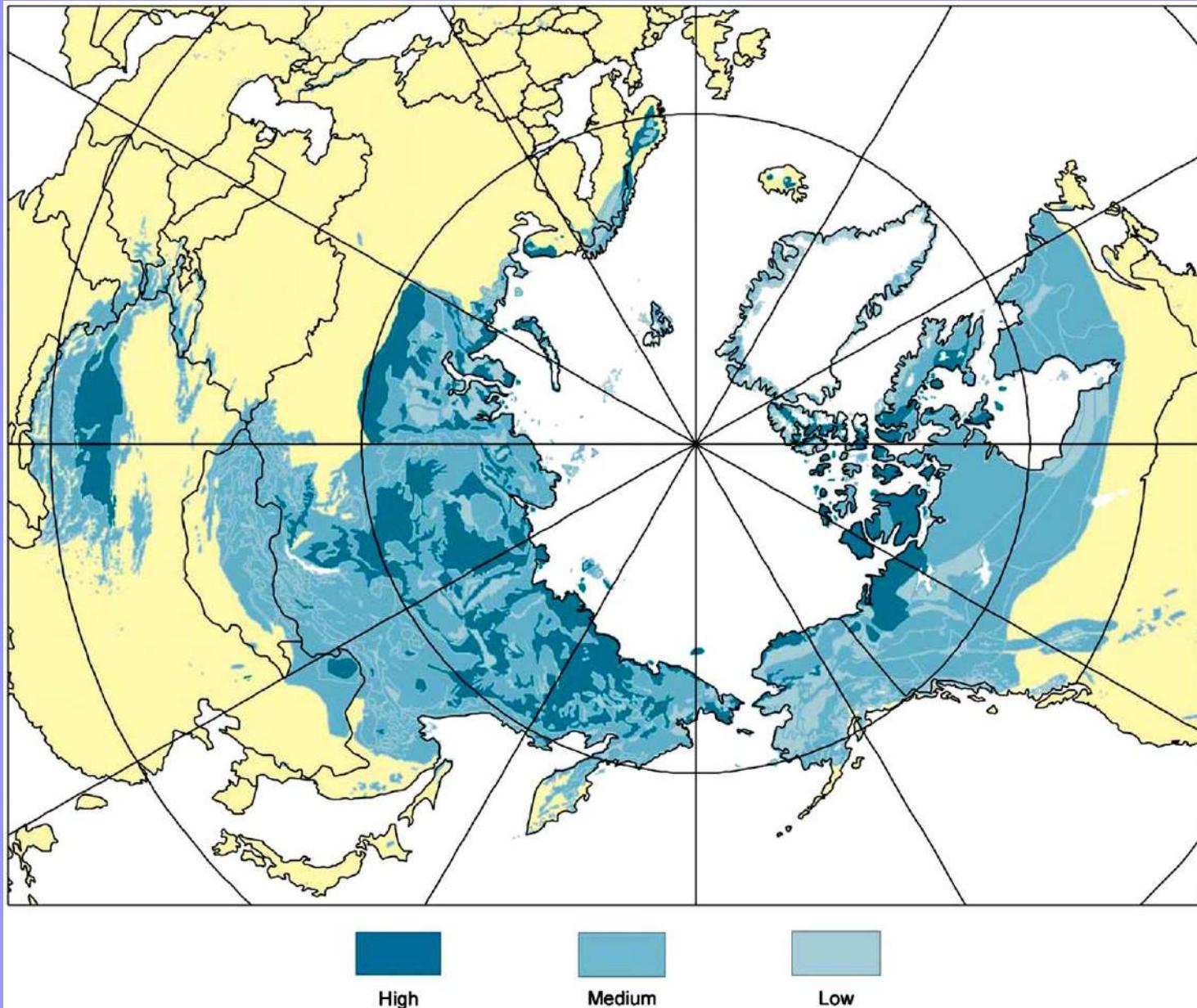
Особенности перераспределения воды и солей в глинистых и песчаных породах



Особенности промерзания засоленных грунтов различного состава: распределение влажности (W , кривая 1) и засоленности (D_{sal} , кривая 2) в мерзлом образце морского суглинка после одностороннего промерзания (а) и при новообразовании мерзлоты на песчаной морской косе в п.Амдерма (б)

Влияние влажности на криогенные текстуры



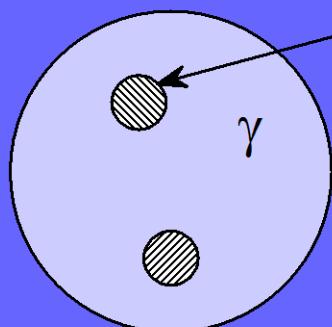


Льдистость мерзлых пород Северного полушария

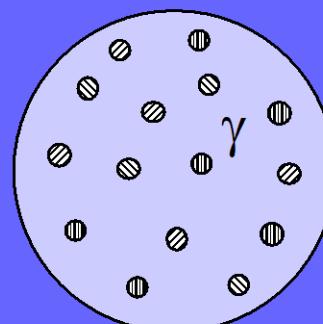
Влияние минерального состава на влагоперенос

Каолин > гидрослюды >
монтмориллонит

Влияние скорости промерзания на влагоперенос и размер кристаллов



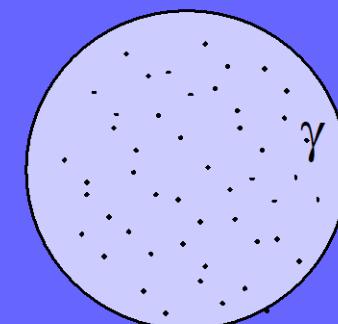
pearlite
colony



T moderately below T_E

Nucleation rate med .

Growth rate med.

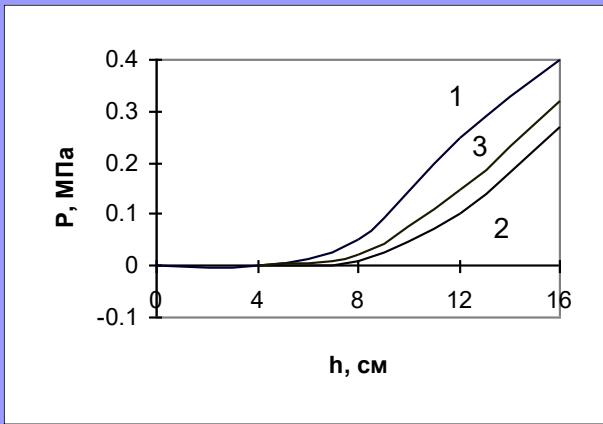


T just below T_E

Nucleation rate low

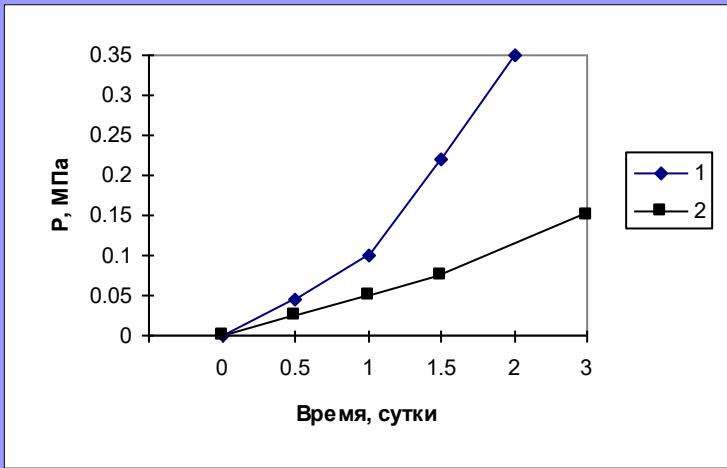
Growth rate high

Давления и напряжения при пучении



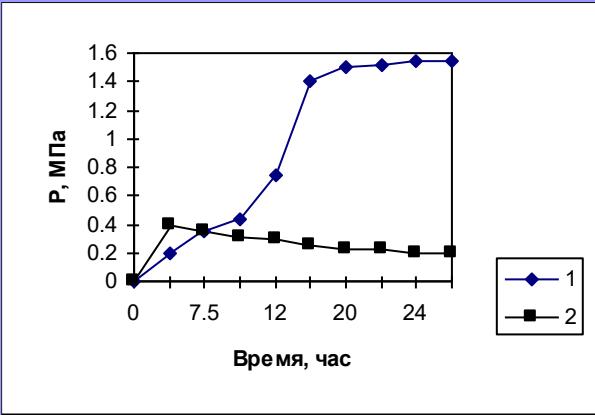
Напряжения пучения на датчике с жесткостью 800 МПа/м в различных промерзающих породах: 1 - каолин;
2 - суглинок; 3 - супесь

Открытая и закрытая система



Напряжения пучения в суглинке при -2°C : 1 - с подтоком влаги из нижележащего слоя песка; 2 - без подтока влаги (закрытая система). Жесткость датчика $K_d=1500$ МПа/м.

Односторонне и всестороннее промерзание

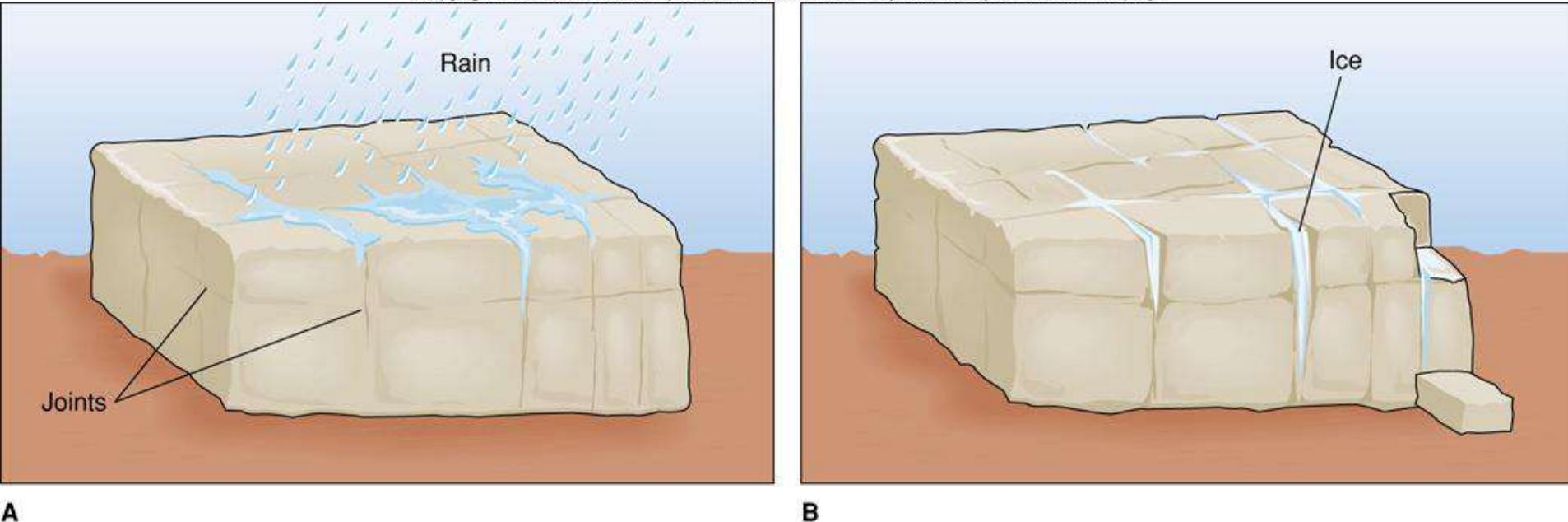


Напряжения пучения при промораживании при -5°C
пятисанитметрового образца суглинка: 1 -
одностороннее промерзание; 2 - всестороннее
промерзание. Жесткость датчика $K_g=1500 \text{ МПа/м}$.

Физическое выветривание

Frost-Wedging: water expands by 9% upon freezing – most significant where freeze-thaw cycle occurs often.

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Frost Heaving: cooler under rocks, freezes first, expands and lifts.

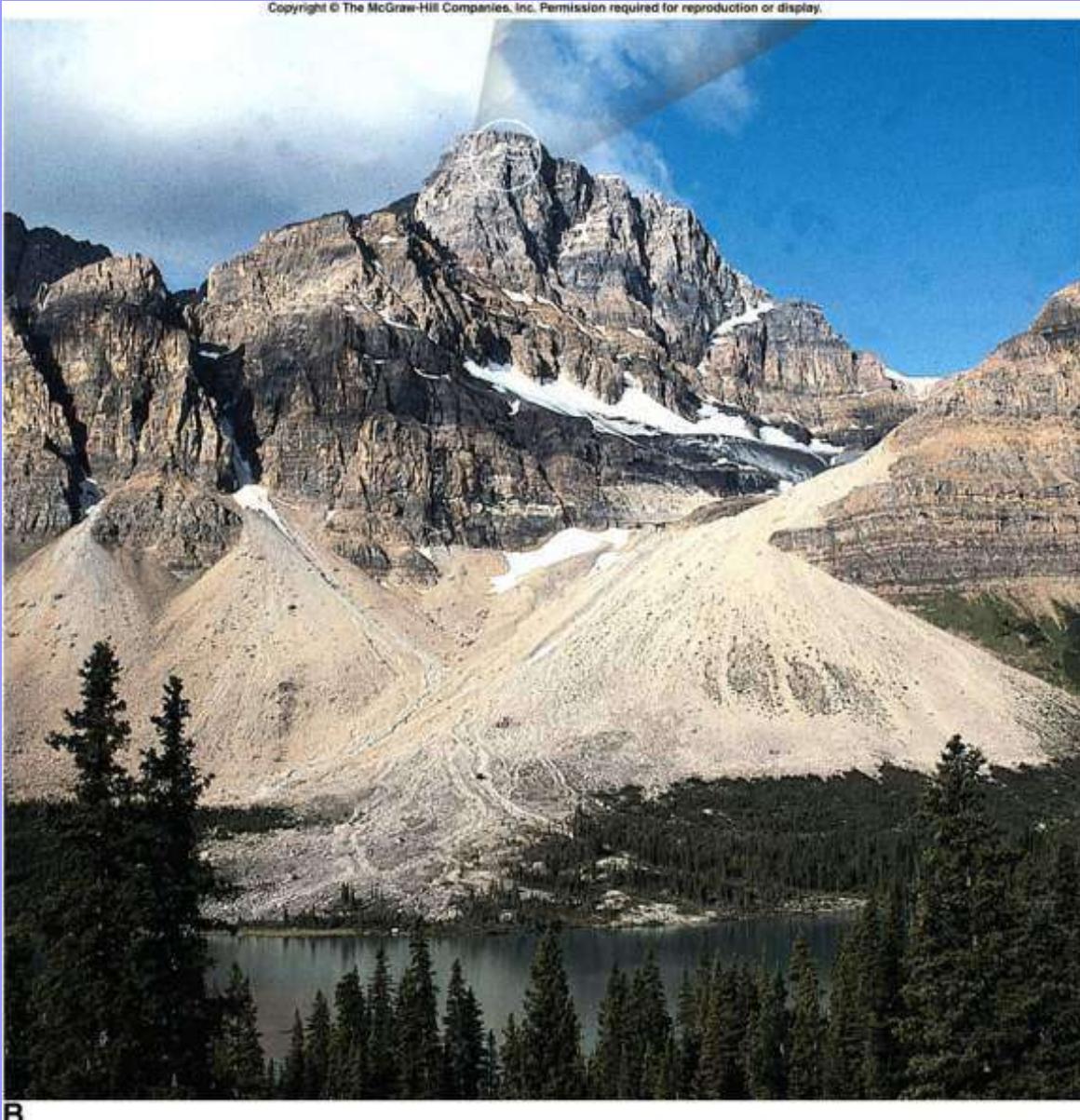
Циклы промерзания-оттаивания

Table 4.1. The frequency of some typical freeze-thaw cycles, variously defined, as recorded in different types of periglacial environments.

Location	Climatic Type	Ground Cycles	Cycles at 1.0–2.0 cm	Cycles at 5.0 cm	Cycles at 20 cm	Definition of Cycle
Resolute Bay, Canada, 74°N	High Arctic	23	n.d.	0	n.d.	-2 to 0 °C (28–32°F) (Cook and Raiche, 1962)
Mesters Vig, Greenland, 72°N	High Arctic	23	n.d.	18	n.d.	Amplitude ≥ 0 °C (Washburn, 1967)
Siberia (a) Kolyma, 67°N	Continental – tundra	50	n.d.	n.d.	2	Temperature transitions across 0 °C (Ushakova, 1986)
(b) Vilyusik, 63°N	Continental – taiga	94	n.d.	n.d.	2	
(c) Krasnoyarsk, 56°N	Continental – taiga/steppe	59	18	14	4	
Signy Island, 61°S	Low temperature range		19	4		+0.5 to -0.5 °C (Chambers, 1966)
Front Range, Colorado, 39°N	Alpine (3750m)	n.d.	9	n.d.	n.d.	>0 °C and <0 °C within 24 hours (Fahey, 1973)
	Subalpine(3000m)	n.d.	50	n.d.	n.d.	
Japanese Alps, 35°N	Alpine (2800m)	n.d.	88	n.d.	n.d.	-2 to +2 °C (Matsuoka, 1990)
Terra Nova Bay 74°S	Antarctica	42	n.d.	n.d.	n.d.	-4.0 °C (French and Guglielmin, 1999)

n.d., not determined.

Физическое выветривание



Temperature Changes:
differential expansion
(deserts,
mountains, &
forest fires).

Криогенное выветривание

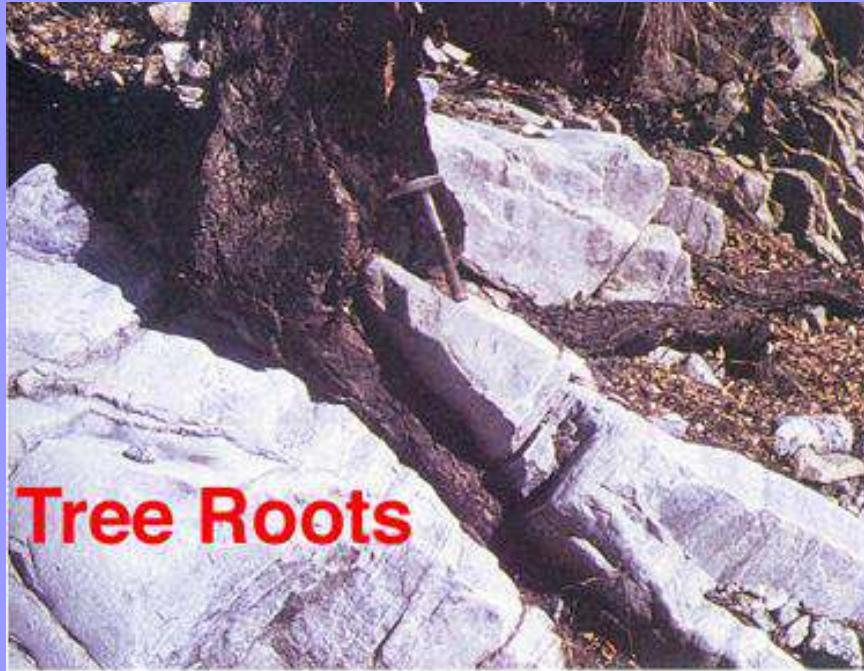
Table 4.7. Some experimental data that demonstrate the instability of quartz particles when subject to cryogenic weathering.

Condition of Experiment	Mineral	Content of Grain Size (%)				
		Diameter of Grain (mm)				
		0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001
1. Before experiment	Quartz	100	—	—	—	—
	Feldspar	100	—	—	—	—
	Calcite	100	—	—	—	—
	Biotite	100	—	—	—	—
2. Freezing-thawing water-saturated	—10°C to +15°C	Quartz	11	20	68	1
		Feldspar	7	44	48	1
		Calcite	6	1	20	30
		Biotite	98	—	1	—
3. Freezing-heating dry	—10 °C to + 50 °C	Quartz	98.5	1	0.5	—
		Feldspar	98	1.5	0.5	—
		Calcite	93.5	5	1	0.5
		Biotite	100	—	—	—
4. Wetting-drying in laboratory condition	+18 to +20°C	Quartz	100	—	—	—
		Feldspar	100	—	—	—
		Calcite	100	—	—	—
		Biotite	100	—	—	—

Source: Konishchev and Rogov (1993). Reproduced by permission of John Wiley & Sons Ltd.

Физическое выветривание

Precipitation of Crystals: salts precipitating from water in rock crevices/cracks. Forces the opening wider.



Tree Roots



**Salt
Crystals**

Root Systems: dominant in cold/dry climates.

Результат выветривания в холодном климате: лёссы

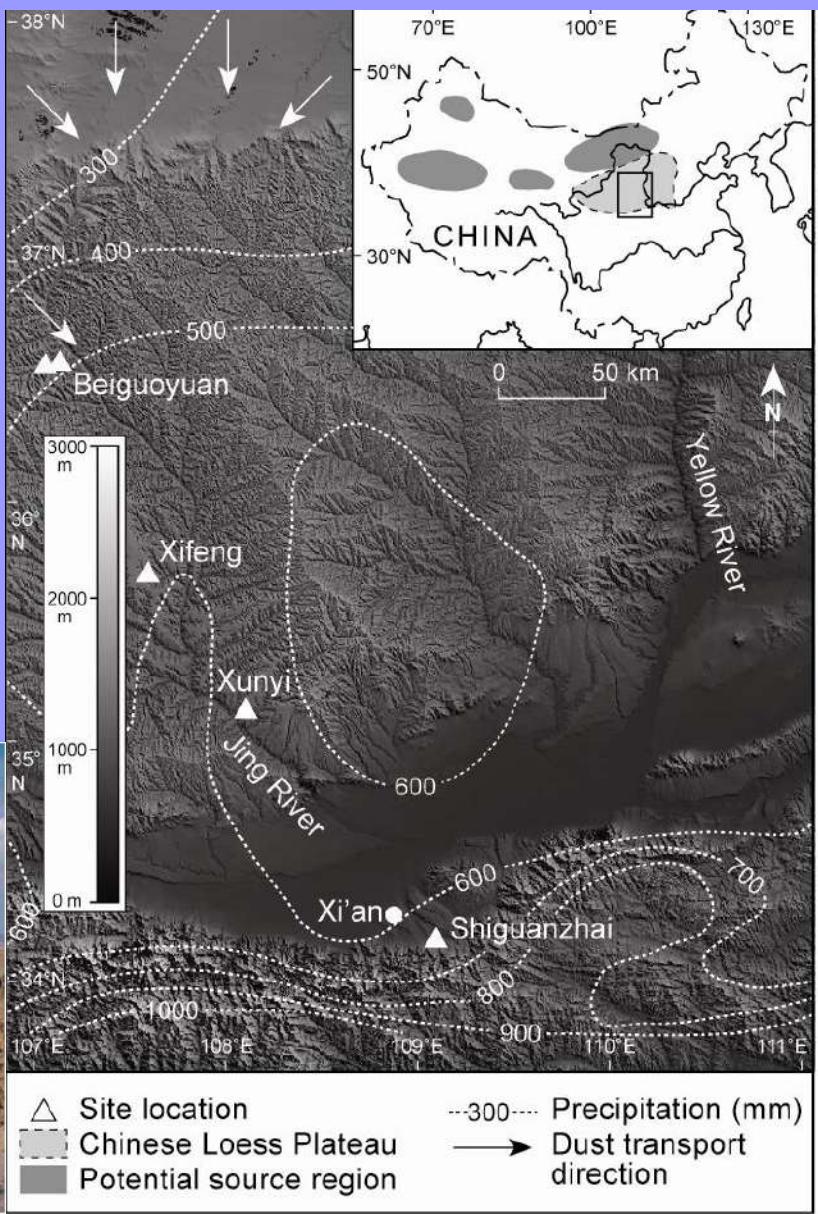


Лессы в Китае

- Chinese loess – wind blown silt
- Quartz, micas, feldspars, massive
- Up to 400m – Chinese Loess Plateau
- Miocene - Holocene
- Chinese loess considered key monsoon archive

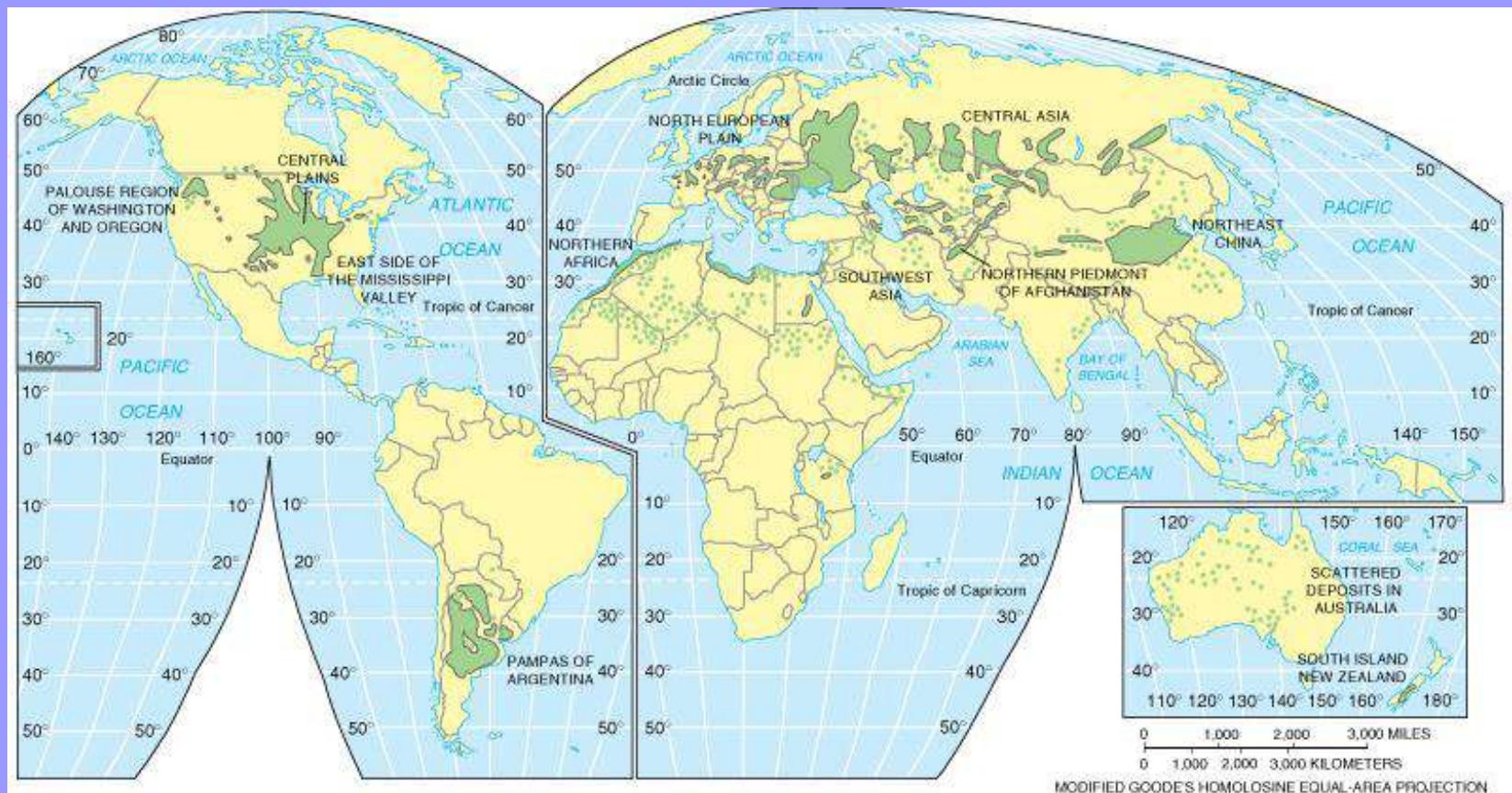


- 'Terrestrial equivalent of ocean sediments'



Распределение лессов на Земле:

In Europe and North America, loess is thought to be derived mainly from glacial and periglacial sources. The vast deposits of loess in China, covering more than 300,000 km², are thought to be derived from desert rather than glacial sources.

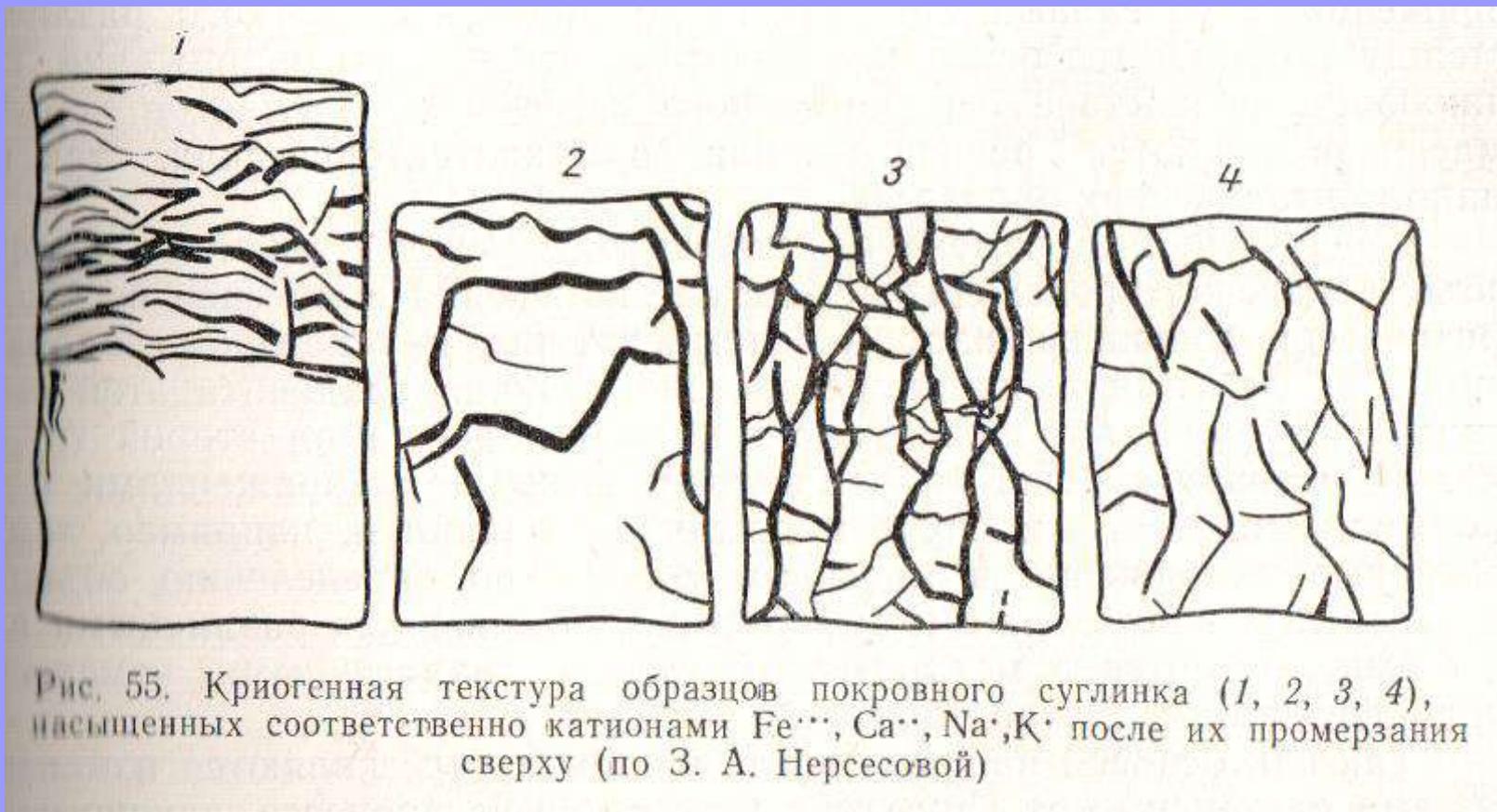


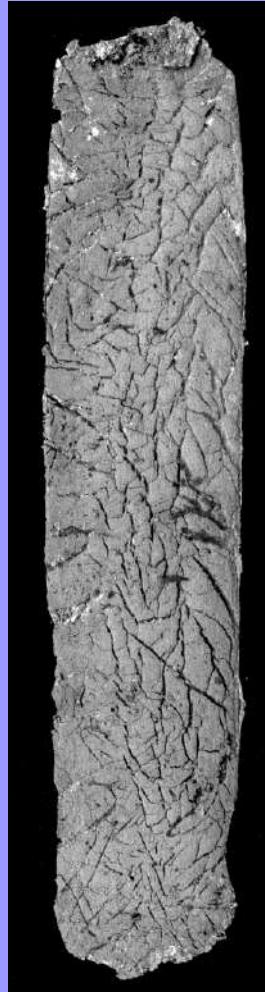
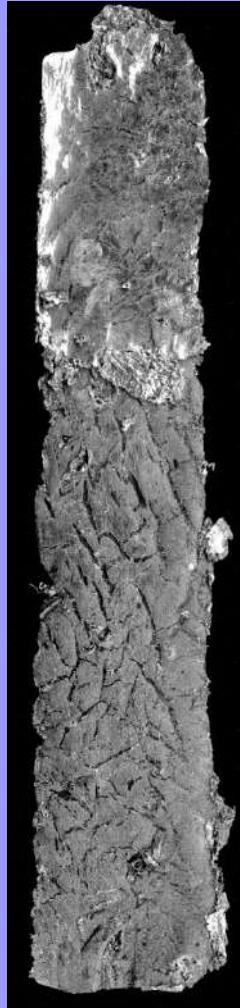
Удивительный состав аллювиальных отложений на Ямале

Грунт	Наименование по В.В.Охотину по ГОСТу	Гранулометрический состав, %										Плотность частич, г/см ³	W _p %	W _f %	I _p	Возраст	Место отбора, описание
		1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	0.001-0.0005	<0.0005							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Супесь (Еркутаях)	Супесь тяжелая пылеватая — — супесь	-	-	-	25	63	5	7	-	2.66	22	27	5	III ²⁻³	На трассе проектируемой железной дороги, из отложений 3-й морской террасы,		
Супесь (п.Бованенково)	Супесь легкая пылеватая — — супесь	-	-	2	7	68	13	8	2	2.75	30	35	5	IY	Аллювий вблизи пос.Бованенково,		

Гранулометрический состав лессов следующий: фракция более 0,25 мм - 0-1 %; 0,25-0,05мм - 2-20 %; 0,05-0,01 мм - 50-75 %; 0,01-0,005мм - 3-15 %; менее 0,005мм - 9-20 %. Число пластичности лессов от 2 до 9. Типичные лессы отличаются от прочих лесовых пород характерными особенностями: преобладающей светло-палевой окраской; супесчаным, легко- или среднесуглинистым составом с преобладанием элементарных пылеватых зерен (типичные однородные алевриты); пористостью общей 40-50 % и более, активной 15-20 %; выраженной макропористостью; воздушно-сухим состоянием; просадочностью от собственного веса при замачивании..

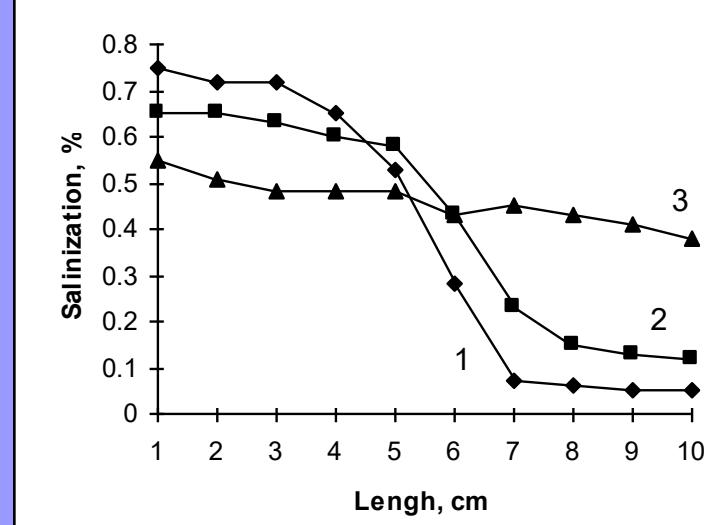
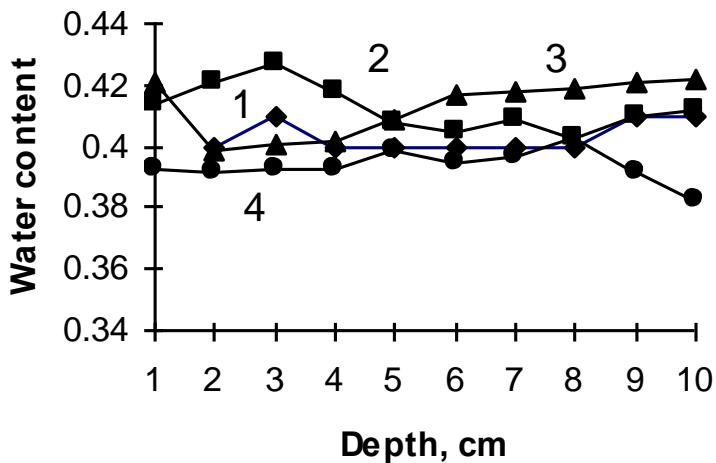
Промерзание с различными катионами





Миграция в
мерзлых породах

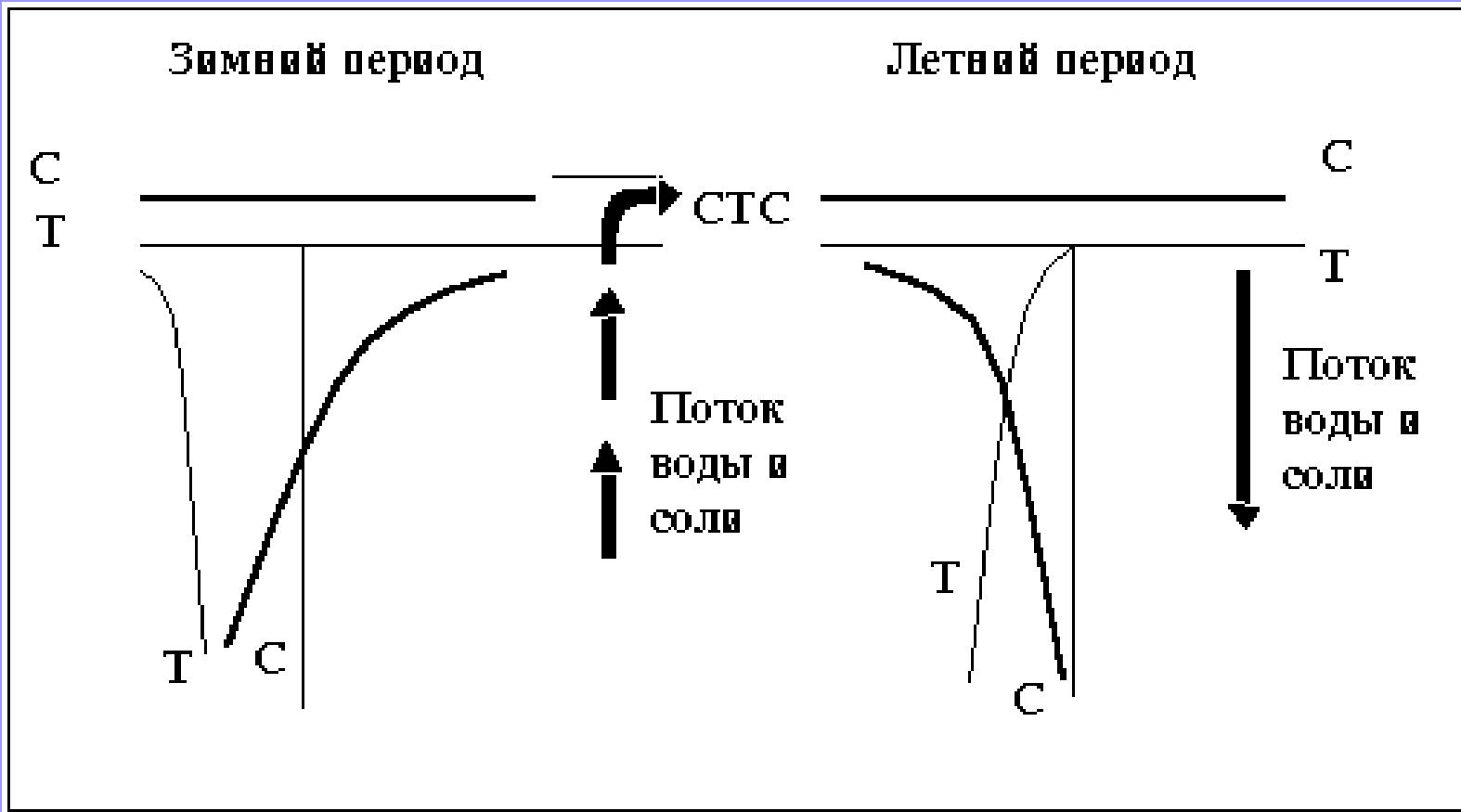
Изменения содержания солей и влаги во времени в мерзлых породах

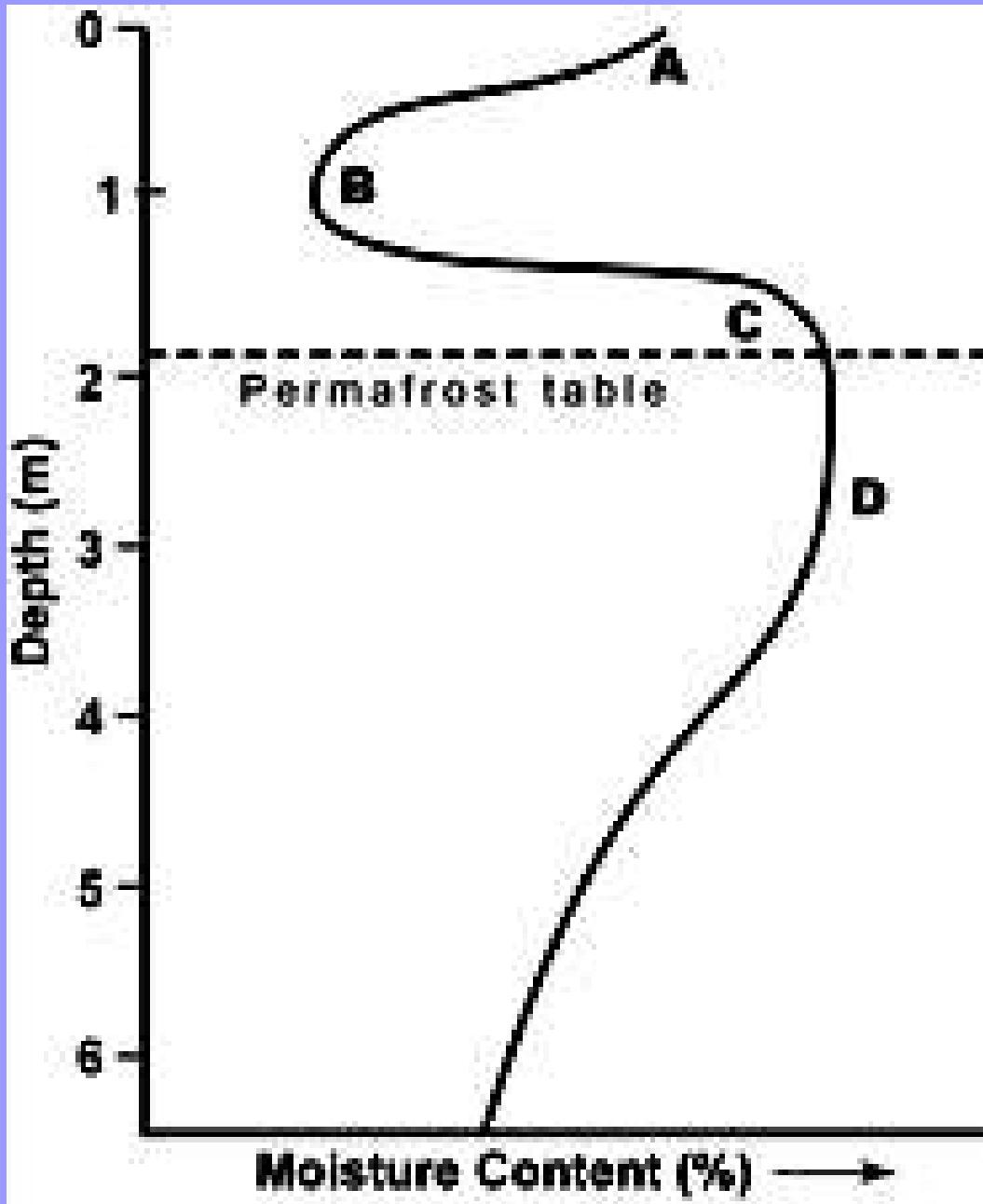


Water content distribution in the marine silt: 1 – initial; under influence of temperature gradient (on the left -2.7°C , on the right -2.2°C) after: 2 - 1 year; 3 - 3 years 9 months; 4 - 11 years

Salinization distribution in the marine silt at the temperature 3°C : 1 - initial; 2 – after 7 months; 3 – after 11 years of experiment

Сезонная миграция в мерзлых породах





Распределение влажности (льдистости) в слое сезонного оттаивания и верхнем горизонте многолетнемерзлой толщи

Мерзлота: постоянство и изменения



Классификация типов сезонного промерзания и протаивания В.А.Кудрявцева

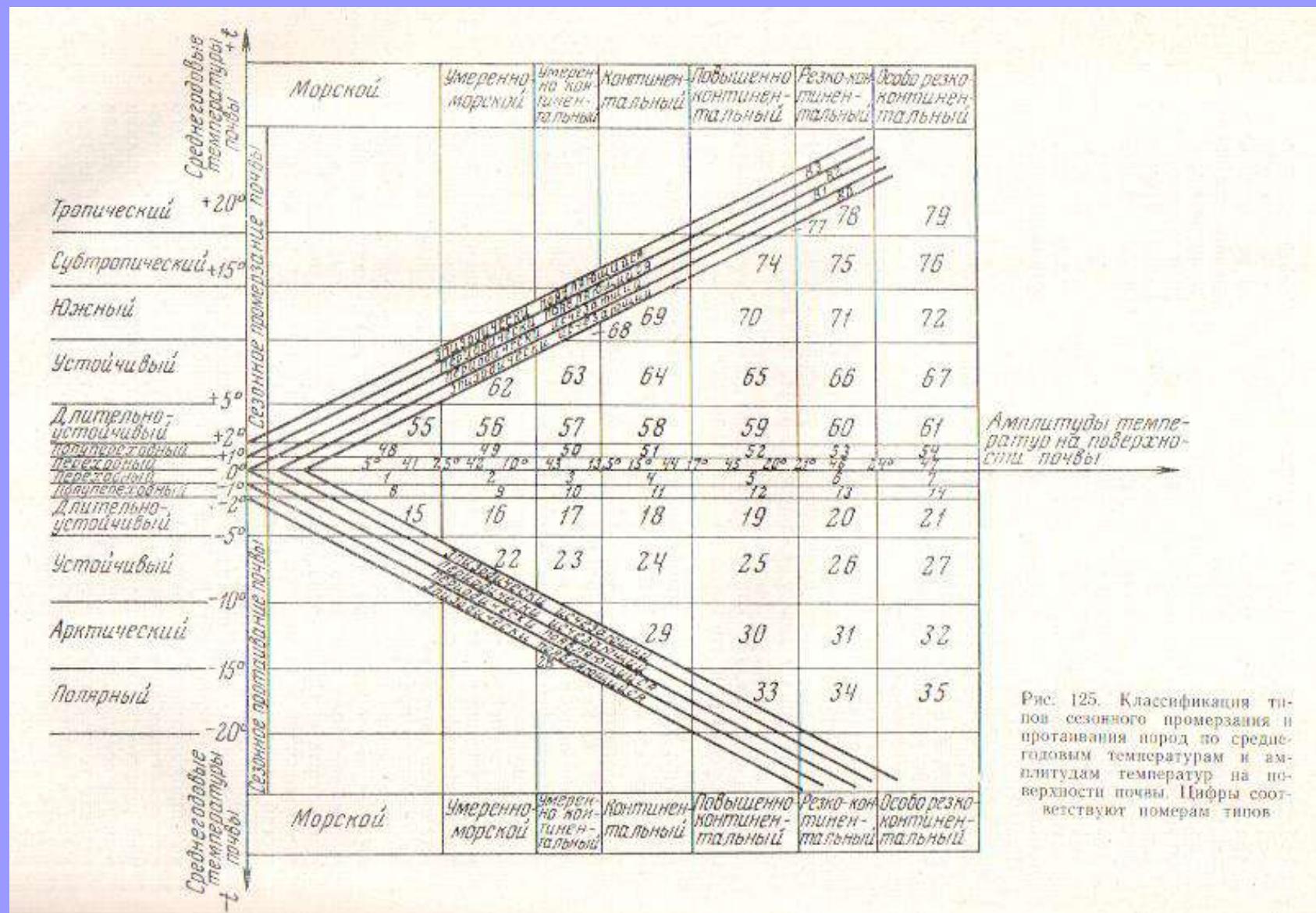


Рис. 125. Классификация типов сезонного промерзания и протаивания пород по среднегодовым температурам и амплитудам температур на поверхности почвы. Цифры соответствуют номерам типов

Промерзание СТС: распределение влажности



SOIL STRUCTURE

O-horizon: leaf litter,
organic material

A-horizon: plough zone,
rich in organic matter

B-horizon: zone of
accumulation

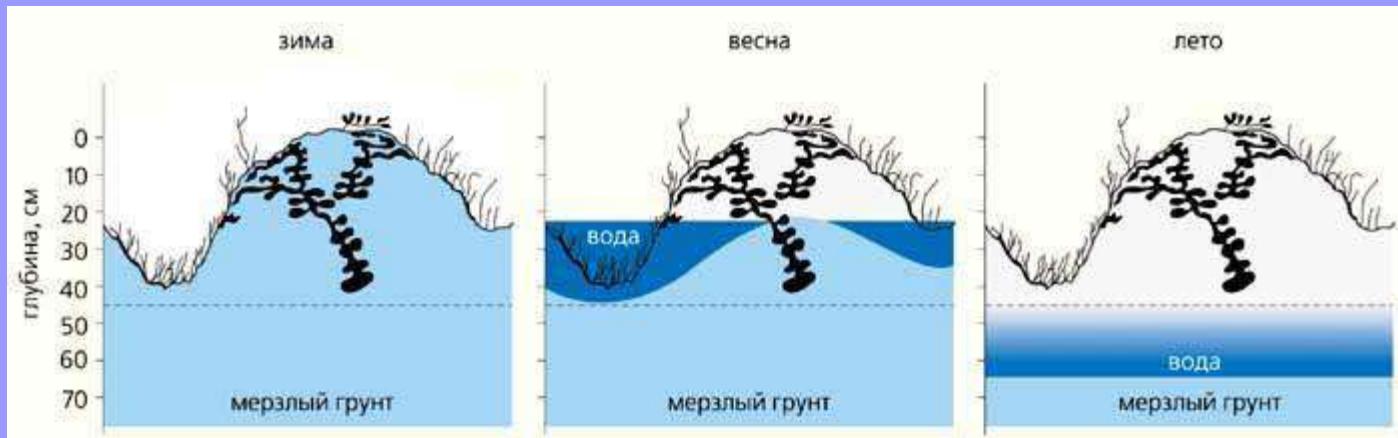
C-horizon: weathering soil;
little organic material or life

R-horizon: unweathered
parent material



BBC

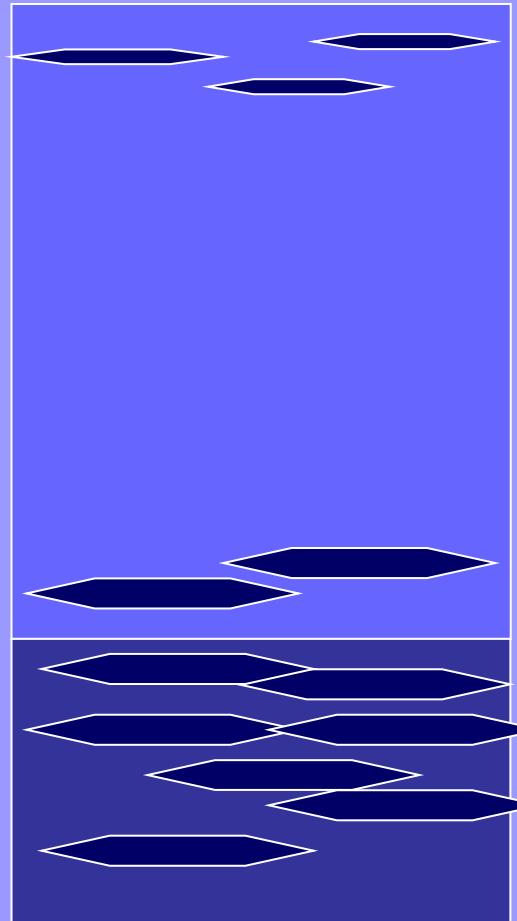
Промерзание СТС: неравномерность в плане



СТС и льдистый горизонт в кровле мерзлоты

СТС - сезонноталый слой

ММП -
многолетнемерзлые
породы



СТС и переходный слой

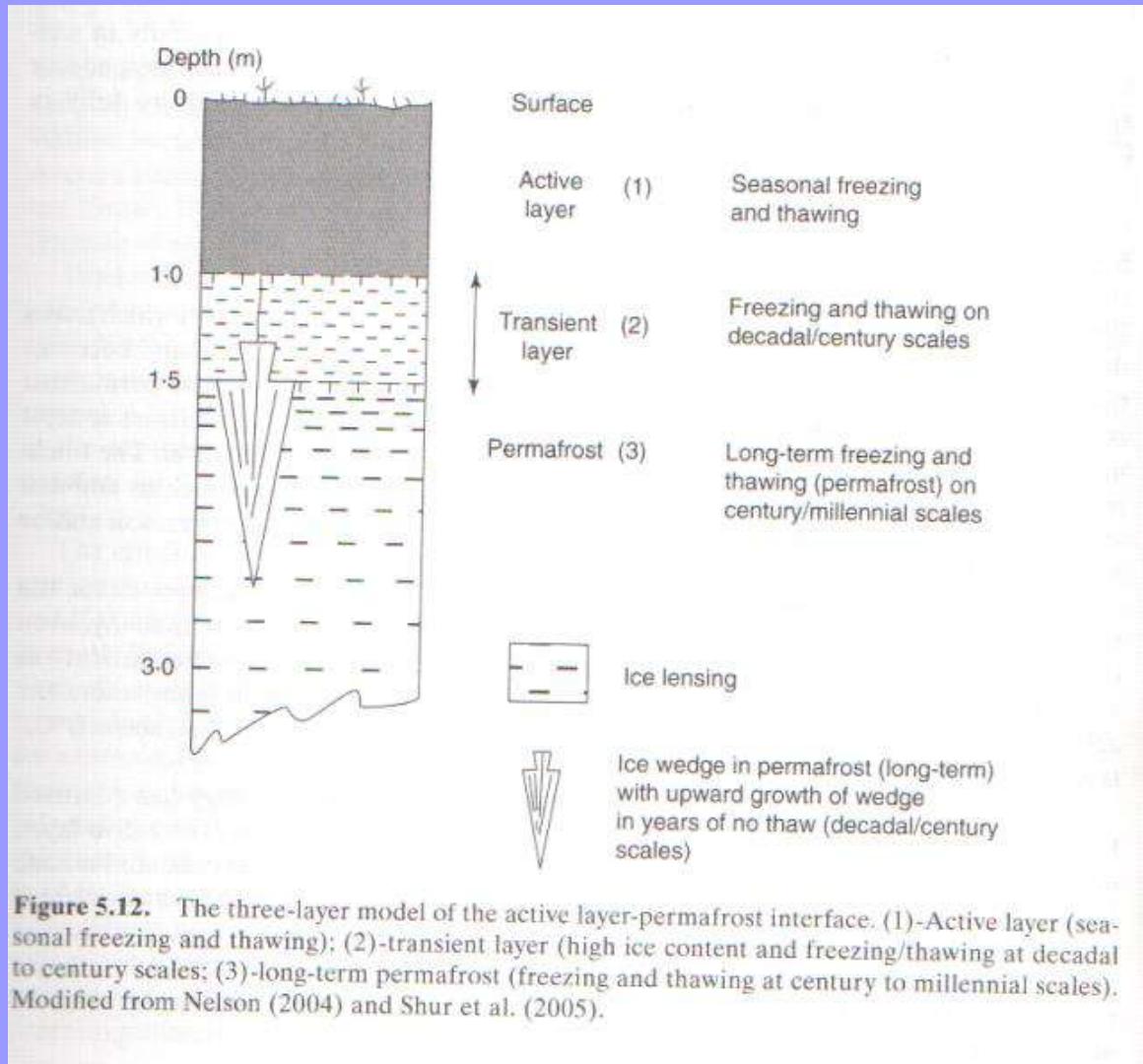


Figure 5.12. The three-layer model of the active layer-permafrost interface. (1)-Active layer (seasonal freezing and thawing); (2)-transient layer (high ice content and freezing/thawing at decadal to century scales; (3)-long-term permafrost (freezing and thawing at century to millennial scales). Modified from Nelson (2004) and Shur et al. (2005).



Бугор пучения

Пример воздействия промерзания

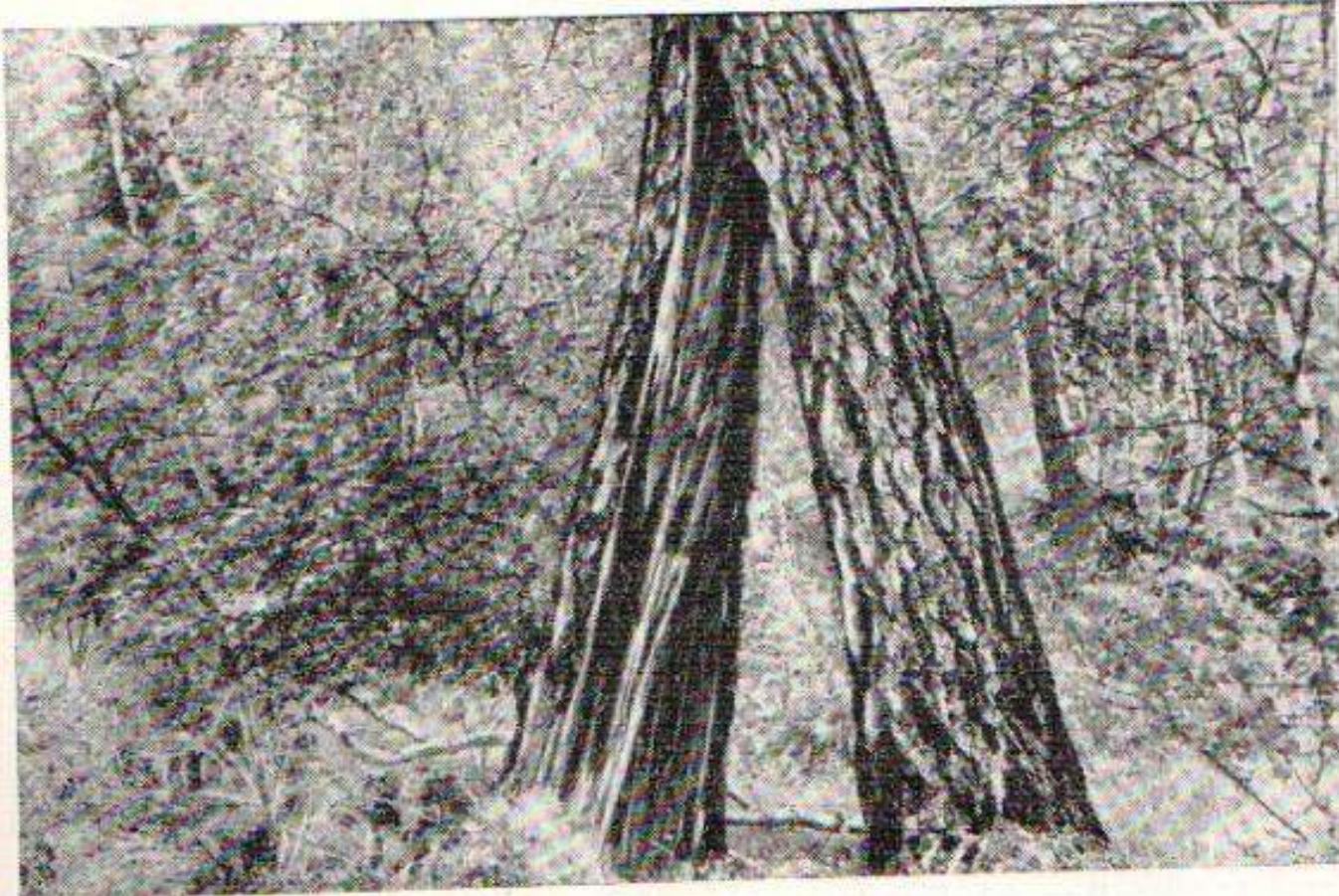


Рис. 85. Лиственница, разорванная снизу растущей линзой льда, распирающей почву. Фото А. П. Тыртикова

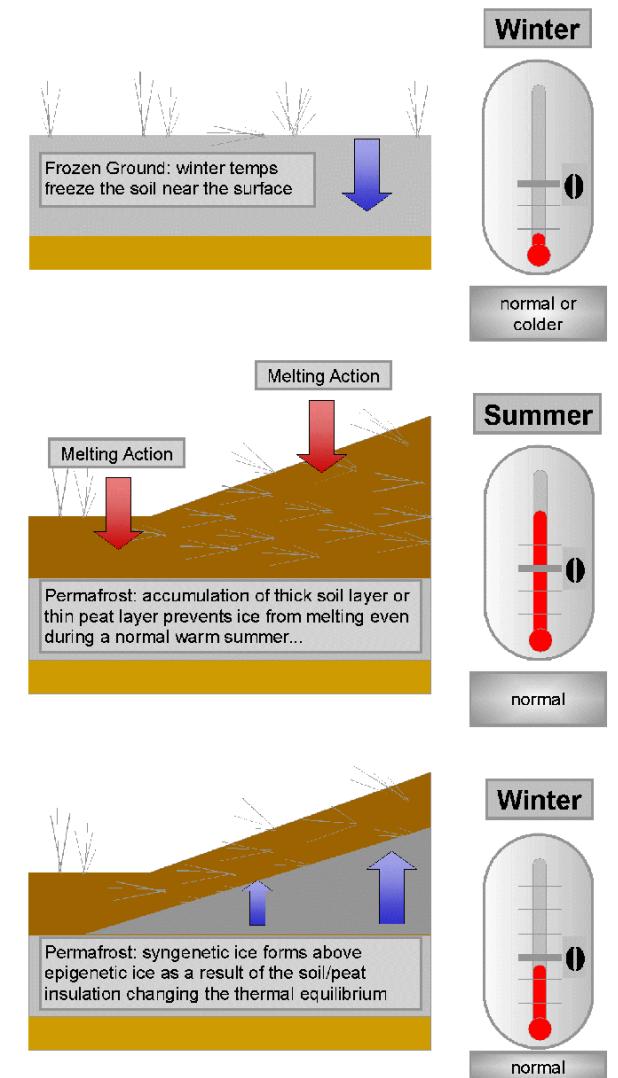
Разрушение покрытия дорог



Осадка при оттаивании: образование байджерахов



Syngenetic Permafrost (Bottom Up)



Сингенез и Эпигенез

Сингенез

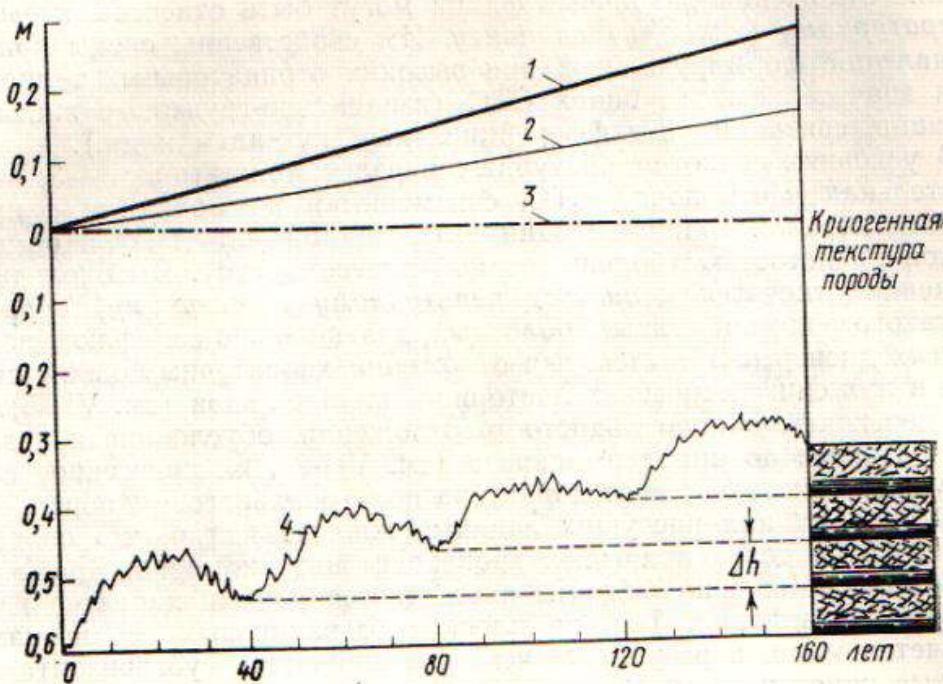


Рис. 156. Схема сингенетического накопления и промерзания осадков при периодических изменениях глубин сезонного оттаивания (период колебания 40 лет, скорость накопления осадков 1 мм в год): 1 — суммарное изменение уровня земной поверхности вследствие накопления осадков и сегрегационного льдообразования; 2 — изменение уровня земли за счет осадконакопления; 3 — начальный уровень земной поверхности; 4 — глубина сезонного оттаивания, отсчитывающаяся от изменяющегося уровня земной поверхности; Δh — мощность слоя, накапливающегося за 40 лет (по А. И. Попову, 1967, с дополнениями)

Сингенез

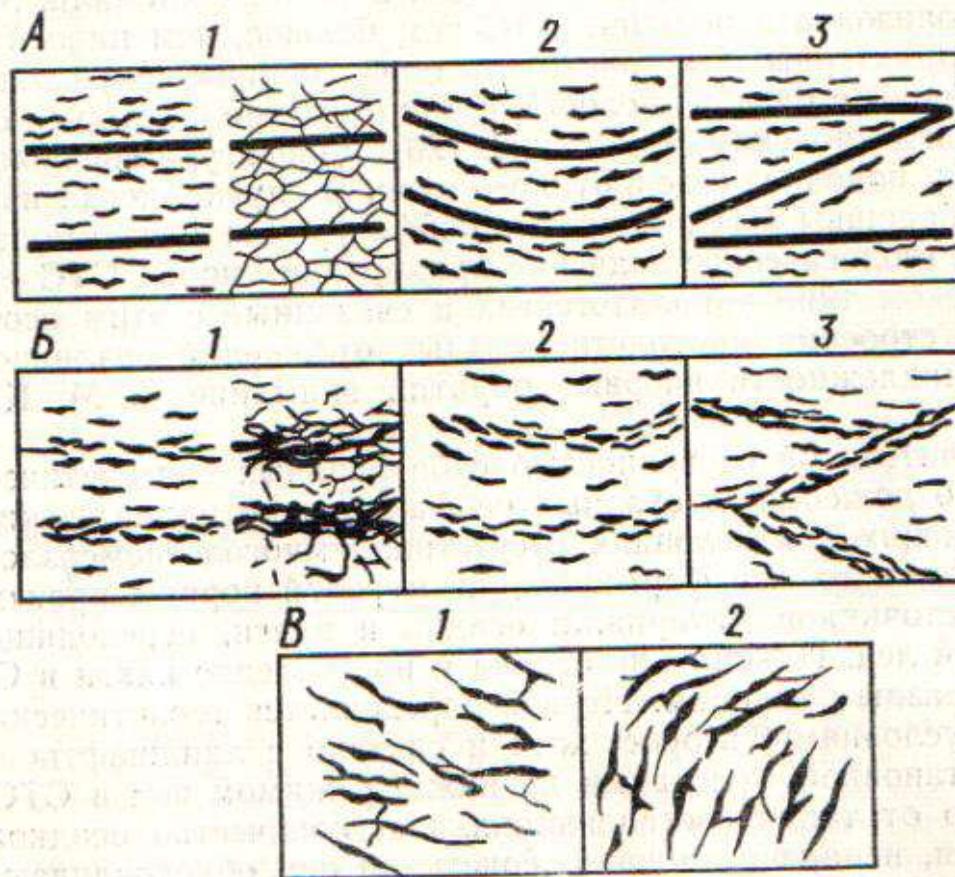


Рис. 155. Основные (руководящие) виды криотекстур, образующиеся при сингенетическом промерзании отложений сезонноталого слоя снизу (A, B) и водных осадков (B); A — слоистые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые); B — поясковые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые); В — решетчатые и сетчатые (1 — косые, 2 — вертикальные)

Эпигенез

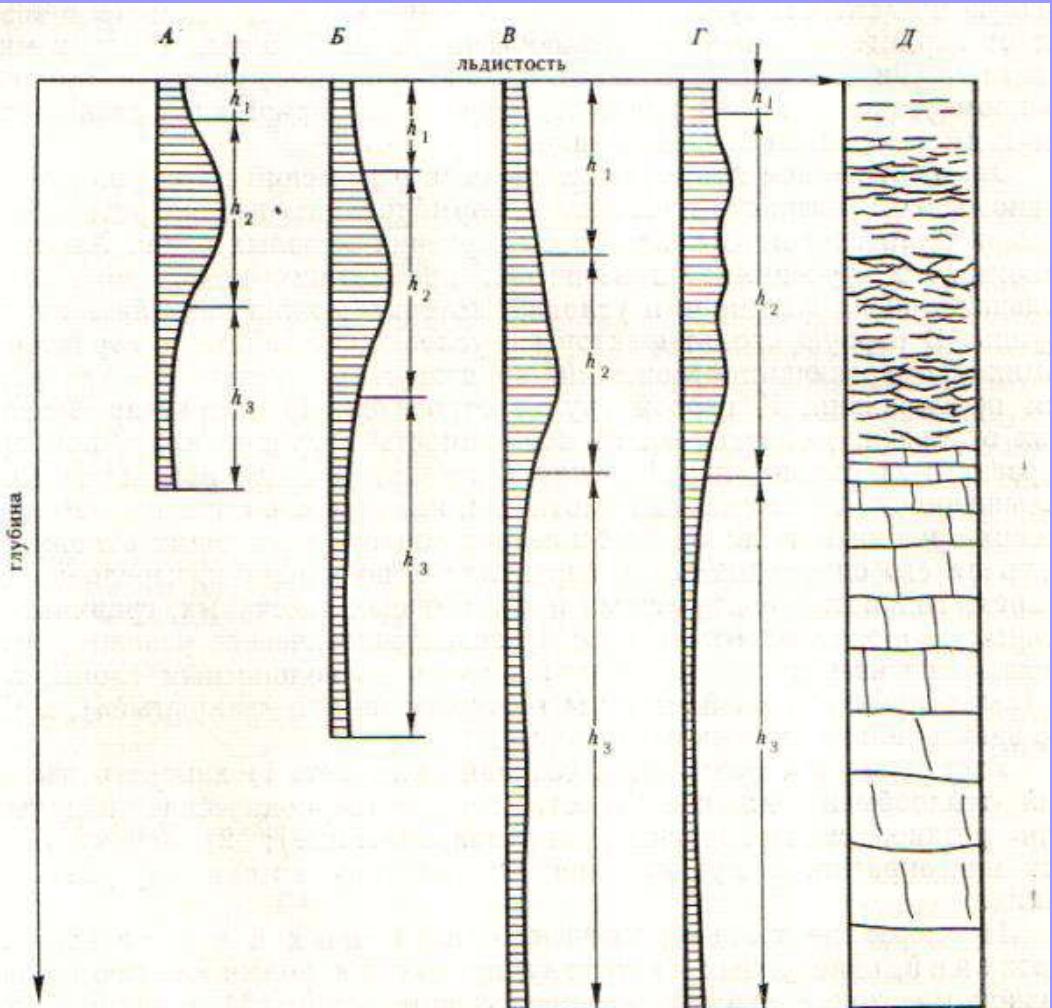


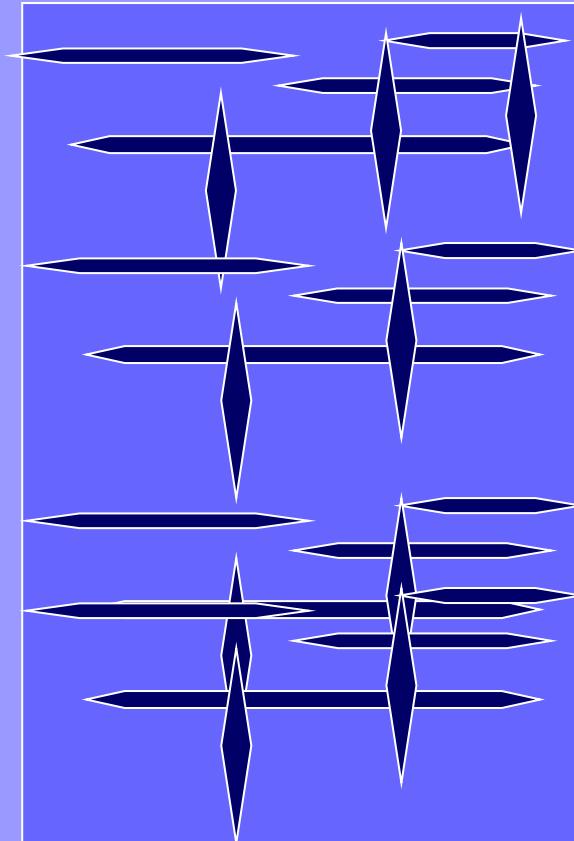
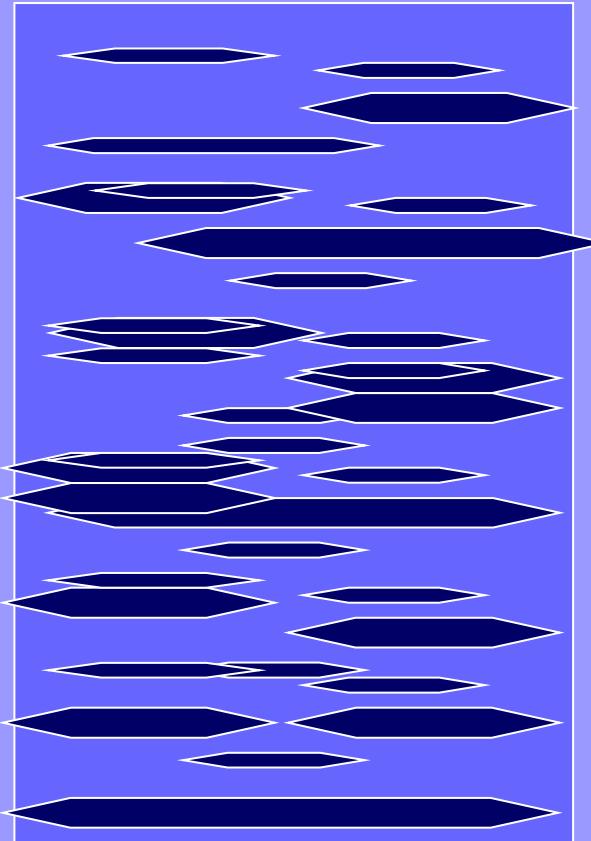
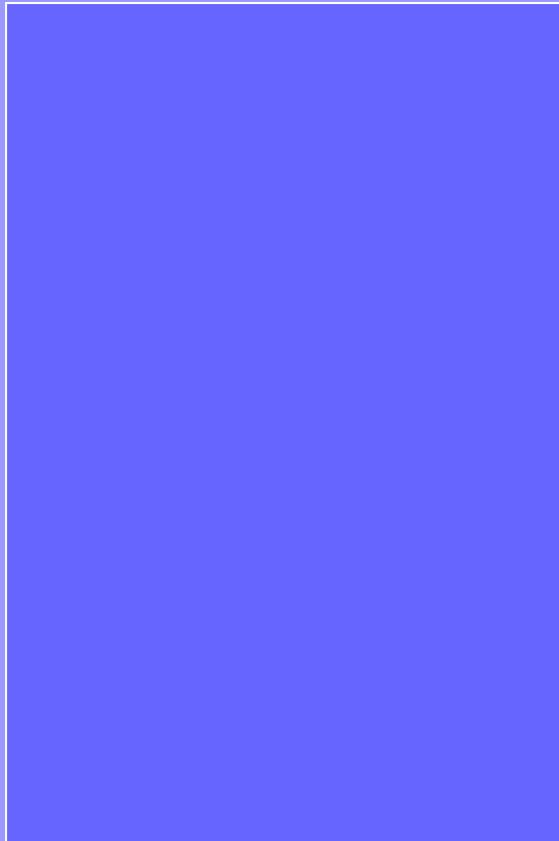
Рис. 159. Схема распределения льдистости в однородной толще дисперсных многолетнемерзлых отложений в зависимости от длины периода колебаний температур на поверхности Земли (T): А — для колебаний с T_1 ; Б — то же с T_2 ; В — то же с T_3 при ($T_1 < T_2 < T_3$); Г — при наложении колебаний с указанными периодами; Д — схема криогенного строения; h_1 — слой с льдистостью, примерно равной начальной влажности; h_2 — слои с льдистостью больше начальной влажности; h_3 — слои с льдистостью меньше начальной влажности

Основные криогенные текстуры мерзлых дисперсных отложений

массивная

слоистая

сетчатая



Физические свойства мерзлых пород

Геофизические свойства мерзлых пород

- Ice has dramatically different physical properties than liquid water

Physical Property	Ice	Water
Heat Capacity (J/kgK)	2100	4180
Thermal Conductivity (W/mk)	2.24	0.56
P-wave Velocity (km/s)	3-4	1.5
Electrical Resistivity (Ohm*m)	$10^4\text{-}10^8$	$10^1\text{-}10^2$
Dielectric Constant	3	81

- Result: there is a dramatic change in the physical properties of the ground when it is frozen

Относительная диэлектрическая проницаемость среды ϵ

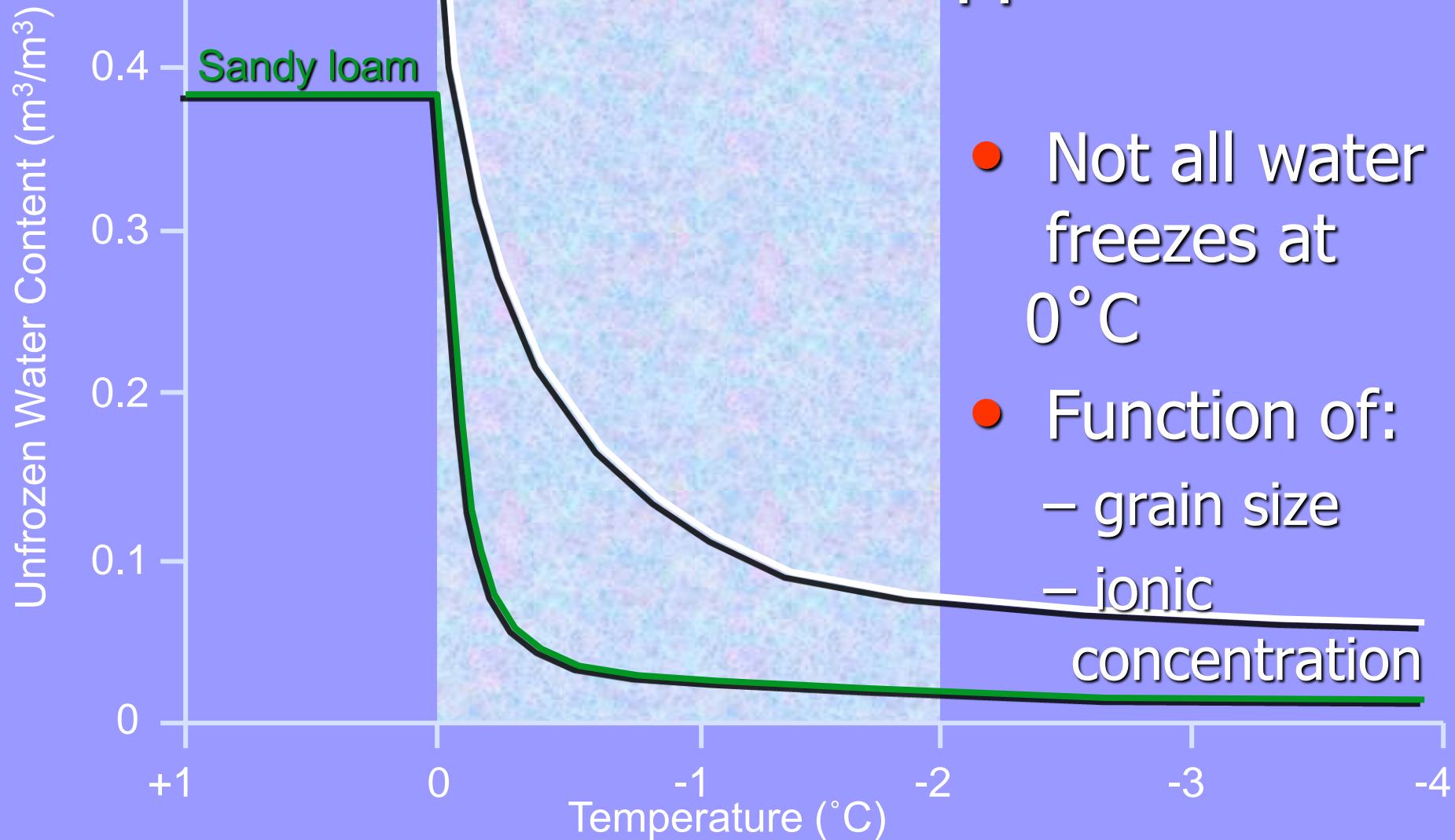
— безразмерная физическая величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды.

Связана с эффектом поляризации диэлектриков под действием электрического поля (и с характеризующей этот эффект величиной диэлектрической восприимчивости среды).

Величина ϵ показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха и большинства других газов в нормальных условиях близка к единице (в силу их низкой плотности). Для большинства твёрдых или жидких диэлектриков относительная диэлектрическая проницаемость лежит в диапазоне от 2 до 8 (для статического поля). Диэлектрическая постоянная воды в статическом поле достаточно высока — около 80.

Незамерзшая вода



Геофизические свойства мерзлых пород

- Electrical conductivity (resistivity)
- Dielectric constant
- Seismic velocity

Not So Important Geophysical Properties

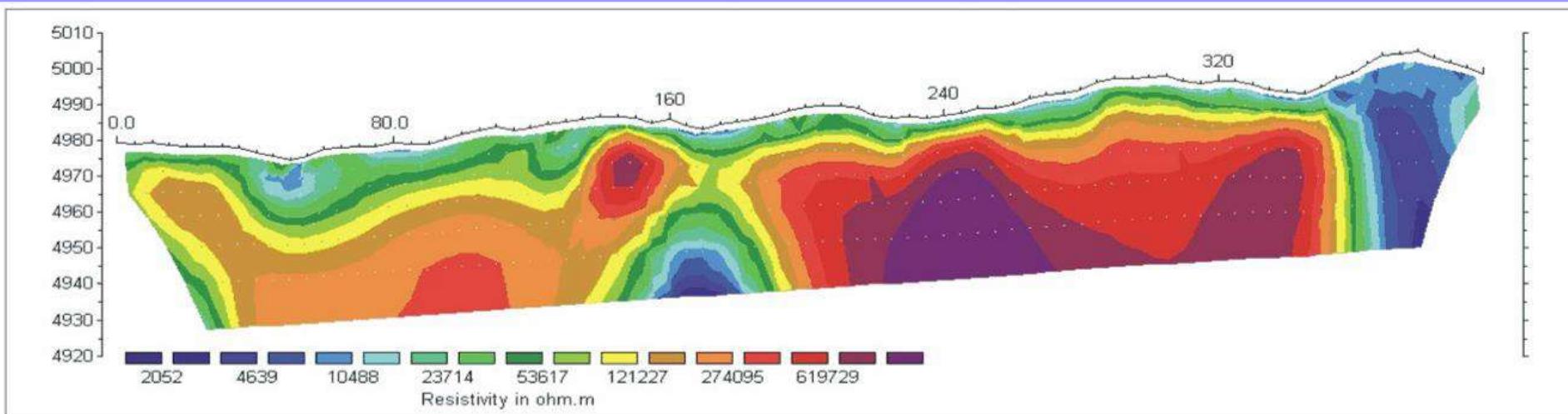
- Density
- Magnetism
- Другие

Электрические свойства

Material	Resistivity (Ohm*m)
Clays	1-100
Surface water	20-100
Gravel (saturated)	100
Gravel (dry)	1400
Sandstones	1-10 ⁸
Permafrost	10 ³ ->10 ⁴
Glacier ice (<0°C)	10 ⁴ -10 ⁵ (temperature dependent)
Glacier ice (~0°C)	10 ⁶ -10 ⁸

Электрическое сопротивление

- Thermal transition very easily detected
- Massive ice easily detected
- Frozen fringe is generally smaller than resolution



Электрическое сопротивление

- Difficult to get charge into/through frozen ground
 - capacitively-coupled systems offer promise
- Extreme contrasts are difficult to model
- Electrical resistivity of soil is temperature dependent



EM Методы

(low frequency, field methods)

- EM methods experience good penetration in permafrost but poor resolution due to the high resistivity
- EM 31 (induction) shown to be efficient and effective for PF delineation
 - Susceptible to seasonal effects (e.g. active layer, wet snow)
- LF EM 32 suffers from a lack of transmitters in the Arctic
- VLF EM 16 depth of penetration too great

EM Свойства – Диэлектрическая постоянная

Material	Dielectric Constant	Velocity (m/ns)	Resolution
Water	81	0.03	excellent
Unfrozen soil	10-30	0.06-0.1	good
Frozen soil	8	0.1	fair
Ice	3	0.17	poor

Радар

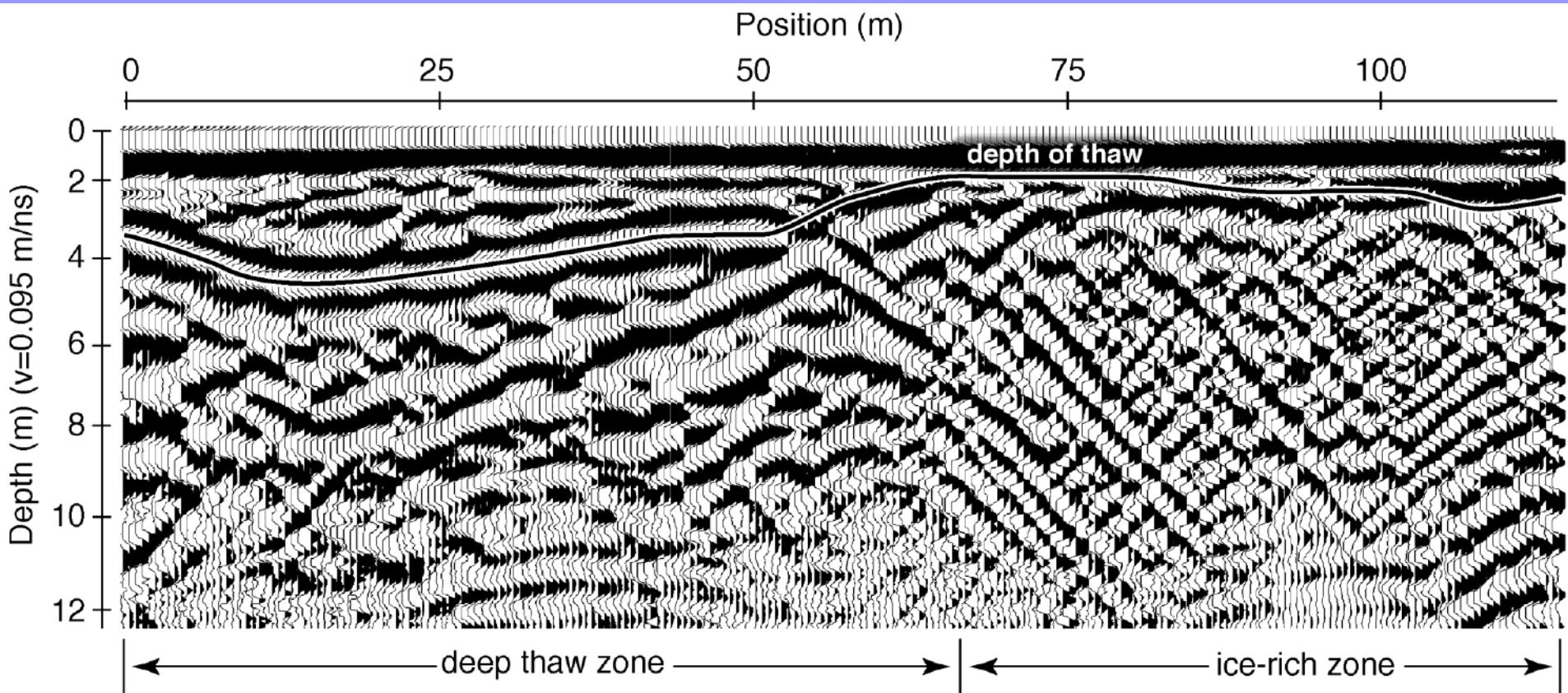
(high frequency, reflection method)

- Depth of penetration ~ 30 м
- Resolution \sim sub-meter
- Single offset profiling mode
- Detects:
 - Thermal interfaces
 - Sedimentary interfaces
 - Water content interfaces
(ice and liquid water)



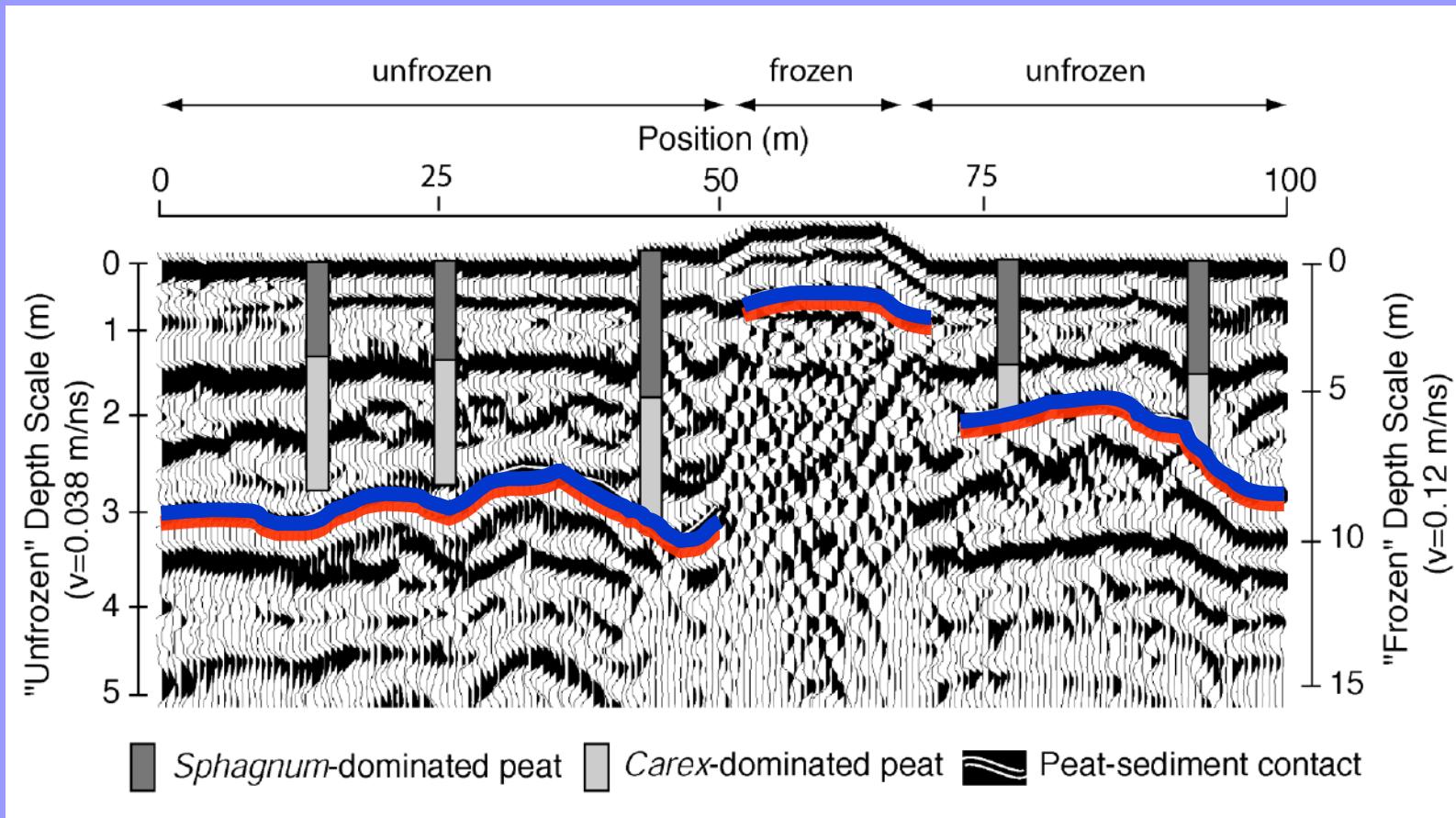
Данные радара

- Thermal interfaces can cut across sedimentary



Данные радара

- Dramatic velocity variations can effect continuity of reflections



Сейсмические свойства

Material	P-wave velocity (m/s)
Dry Sand	200-1000
Water	1430-1530
Saturated sand	1500-2000
Ice*	3000-4000
Frozen soil*	1500-4900

*strongly temperature dependent

Сейсморазведка

- Frozen active layer enables good geophone coupling
- Velocity more dependent on ice content and temperature than stratigraphic changes



Верификация геофизических данных

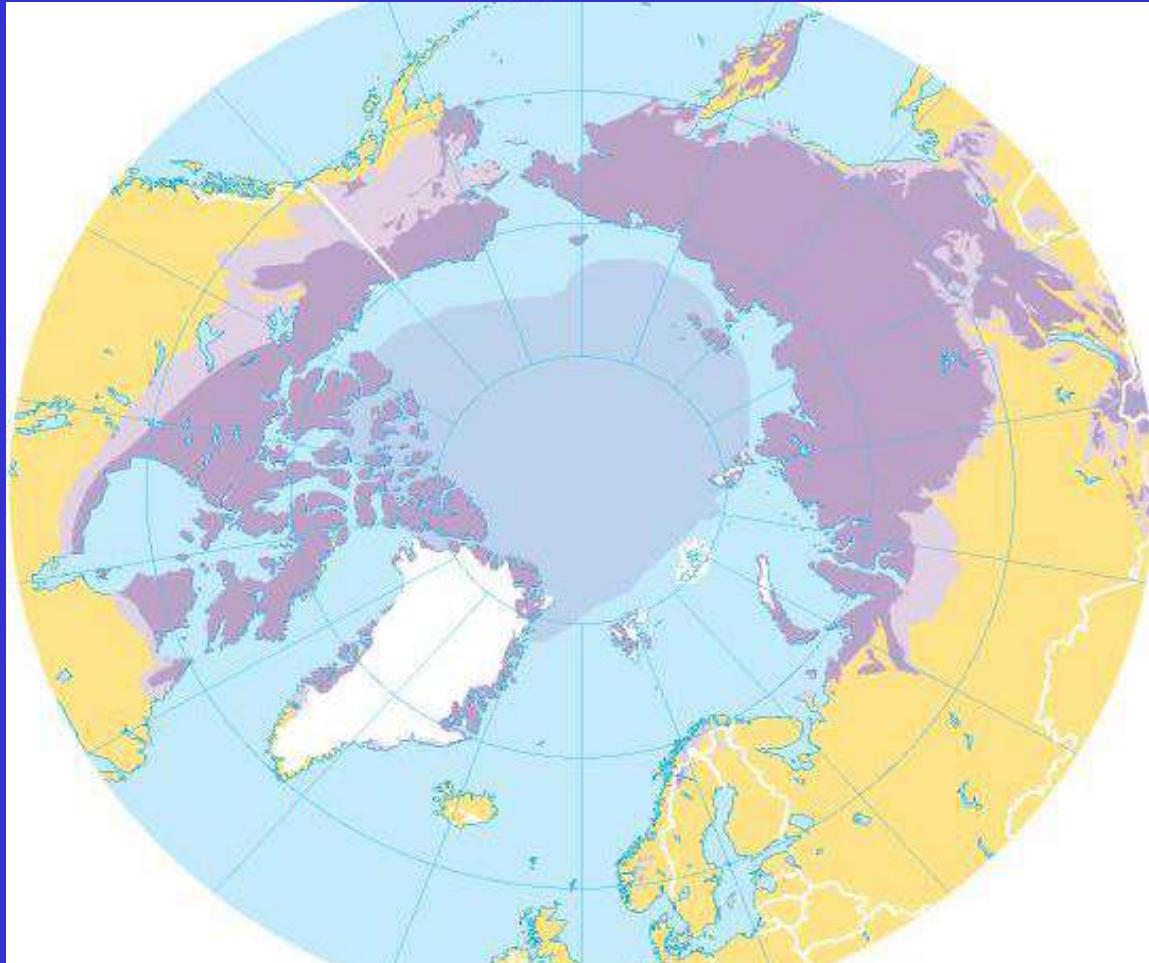
Subsurface verification (i.e. drilling) is always required to constrain geophysical models and interpretation



A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. In the background, the sky is a deep, saturated red, likely from a sunset or sunrise. The overall scene conveys a sense of cold and natural beauty.

Общая геокриология

ГАЗЫ И БИОГЕННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД



Область вечной мерзлоты в Северном полушарии

Вечная мерзлота

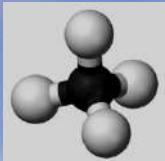


мерзлая
порода

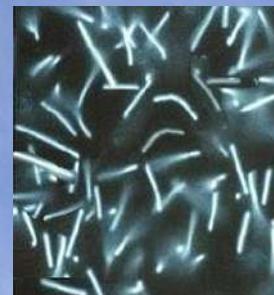
лед

лед

Вечная мерзлота, широко распространенная в России, состоит из мерзлых пород и льда, а ее возраст достигает нескольких миллионов лет



Биогенный путь



Абиогенный путь



Образование



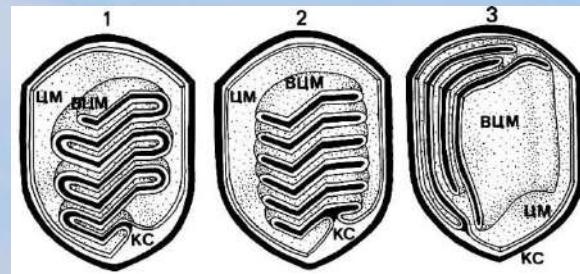
Метан (CH_4)



Разрушение

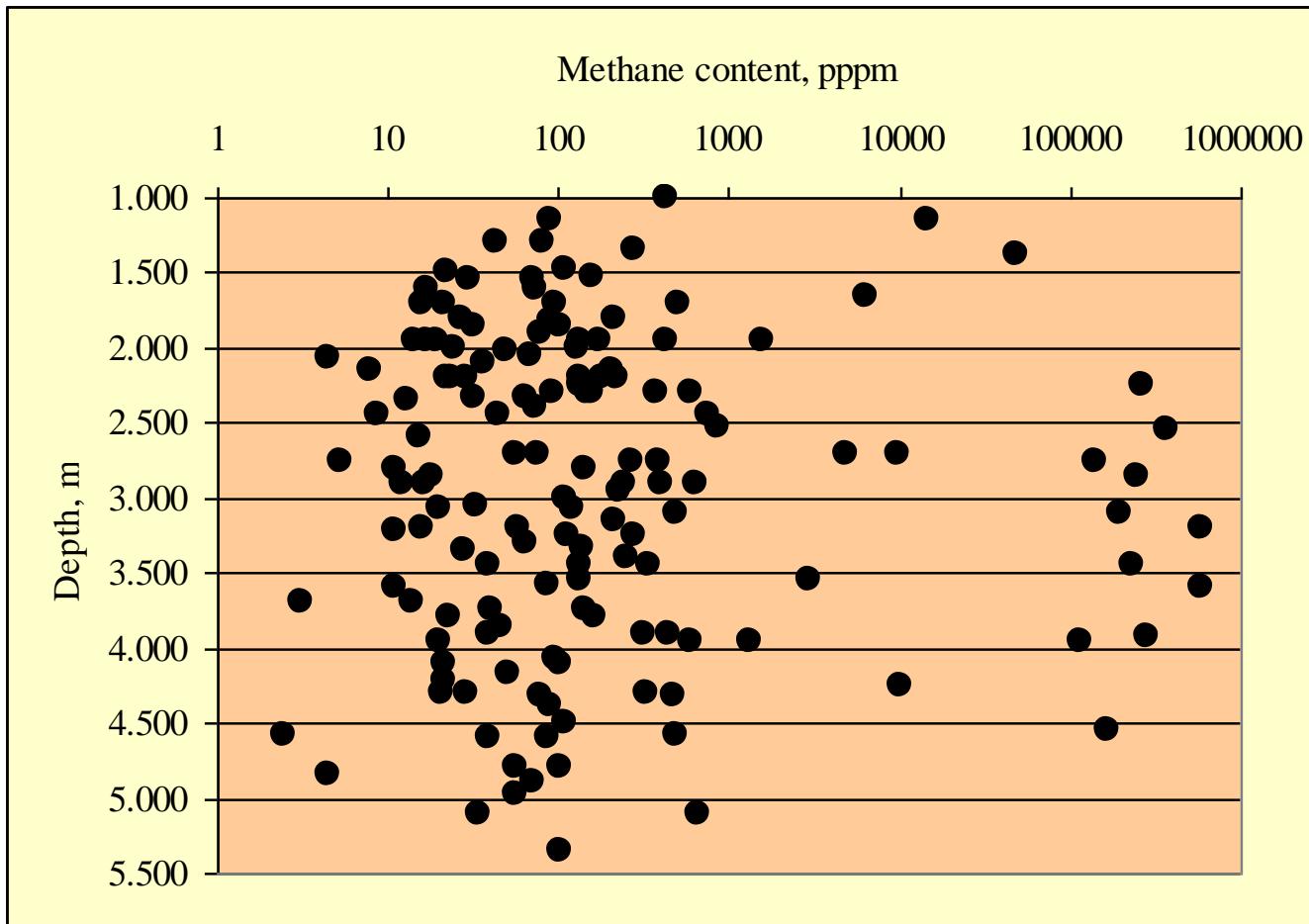


Фотохимическое



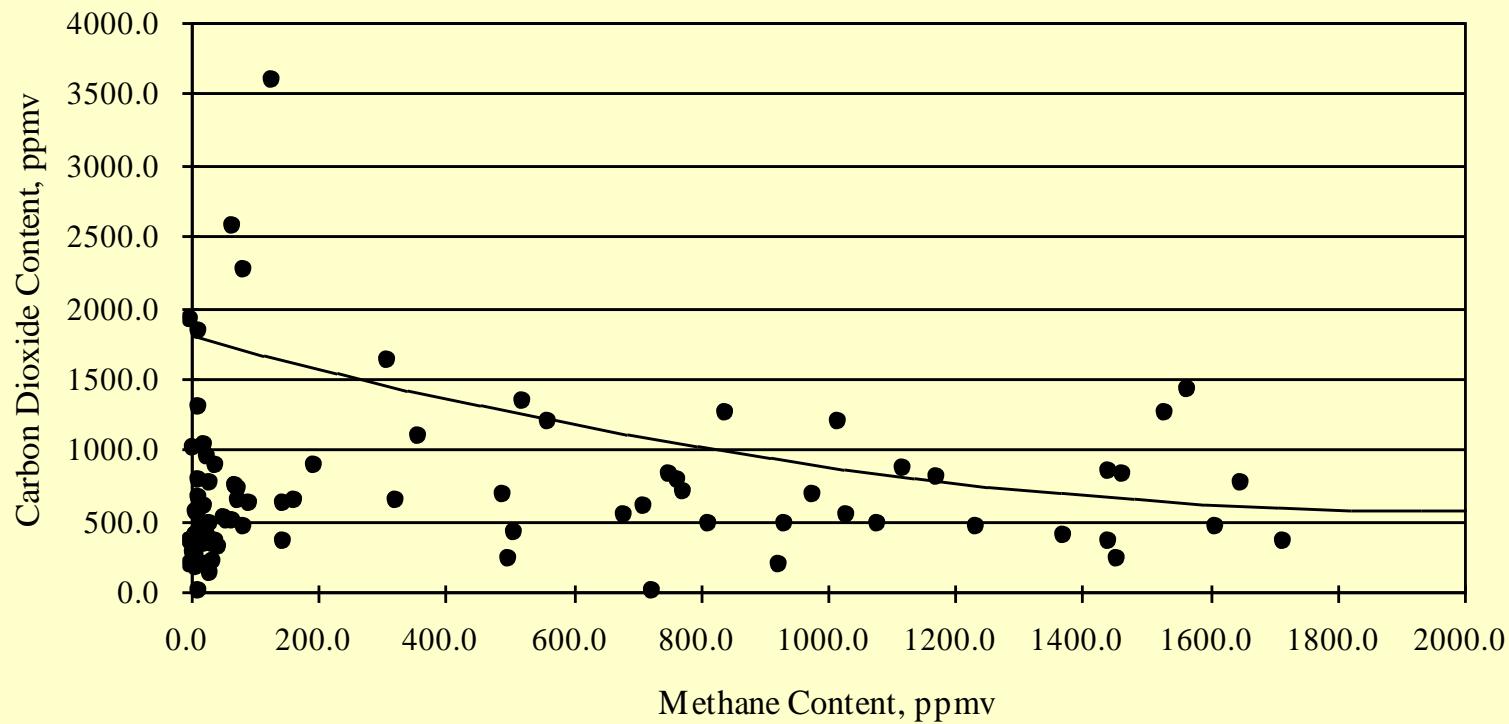
Биологическое

Исследования биогенных газов: содержание метана с глубиной в мерзлых отложениях Якутии

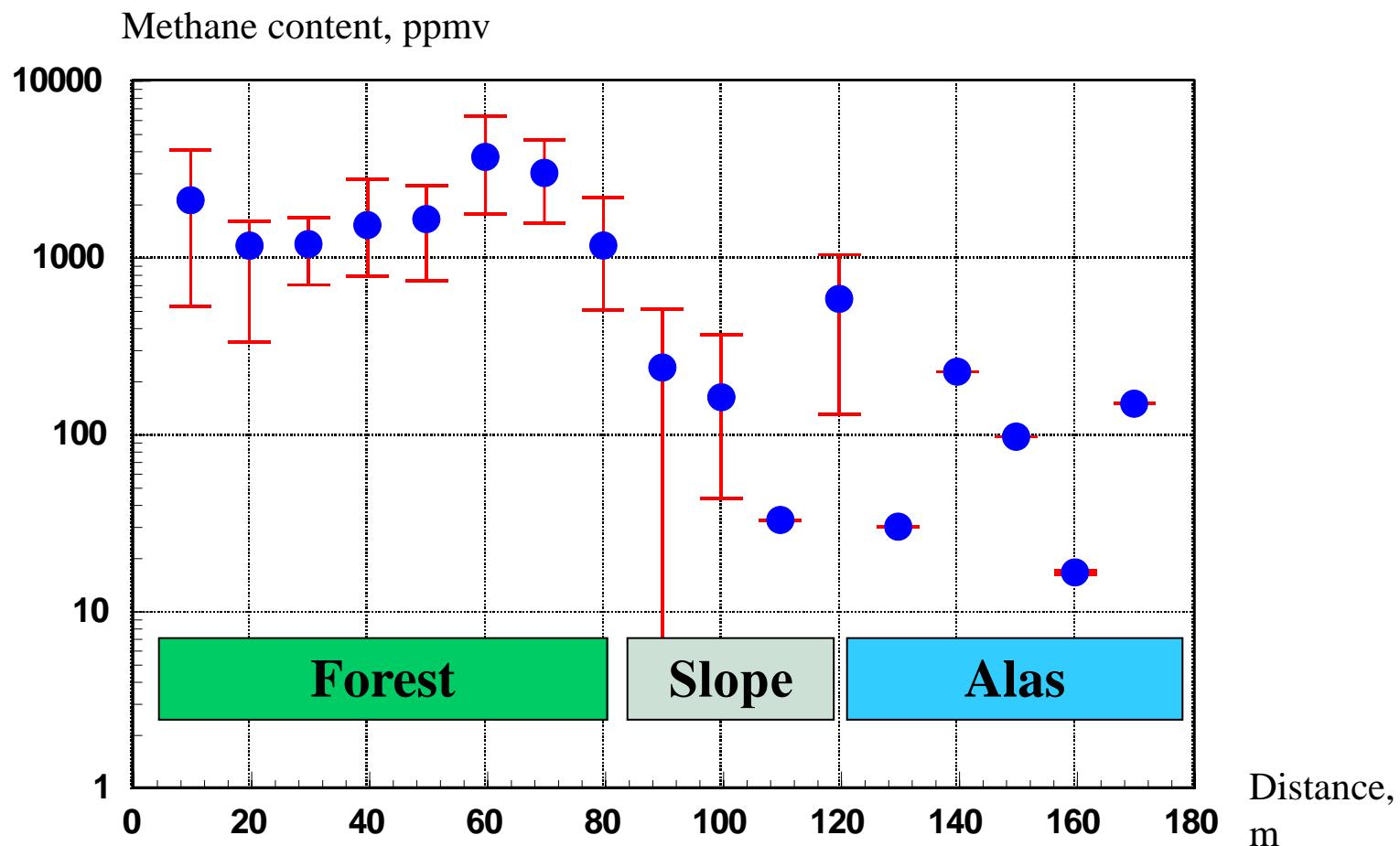


Исследования биогенных газов: соотношение метана и углекислого газа в мерзлых отложениях Якутии

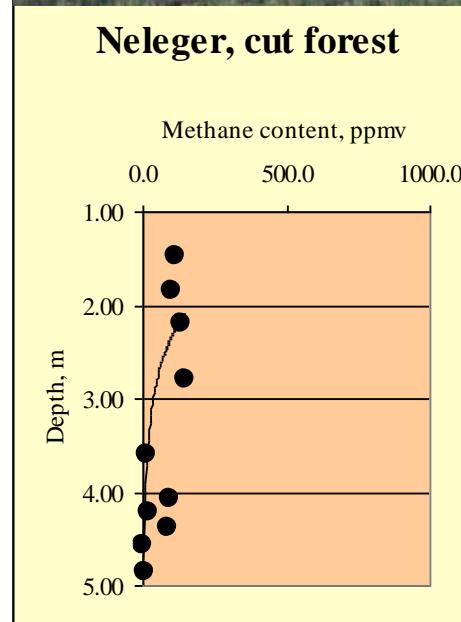
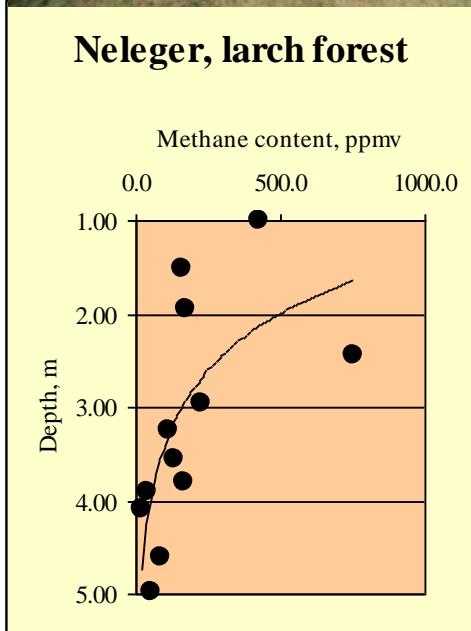
Methane Content and Carbon Dioxide Content Relationship



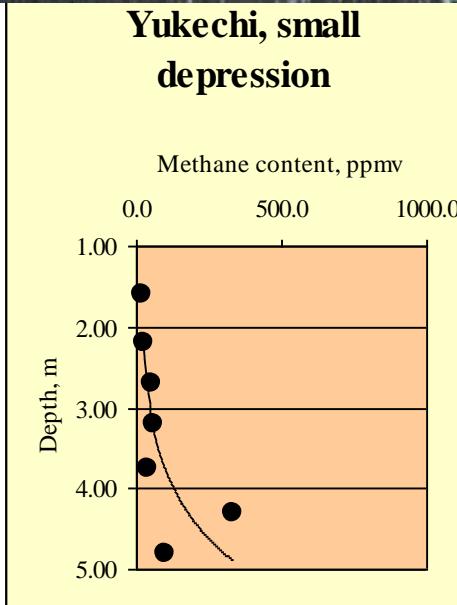
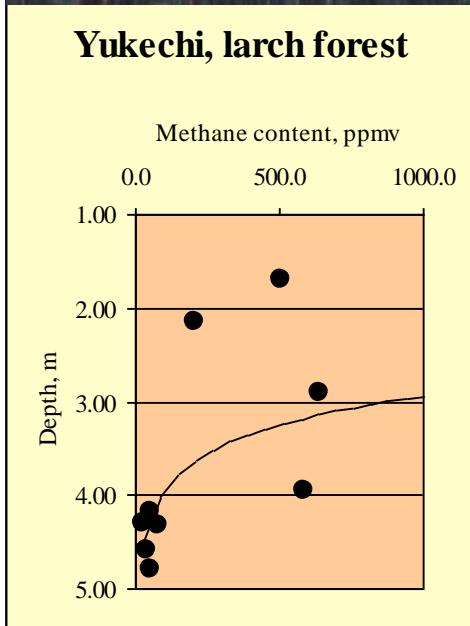
Содержание метана в мерзлых отложениях Якутии по простианию



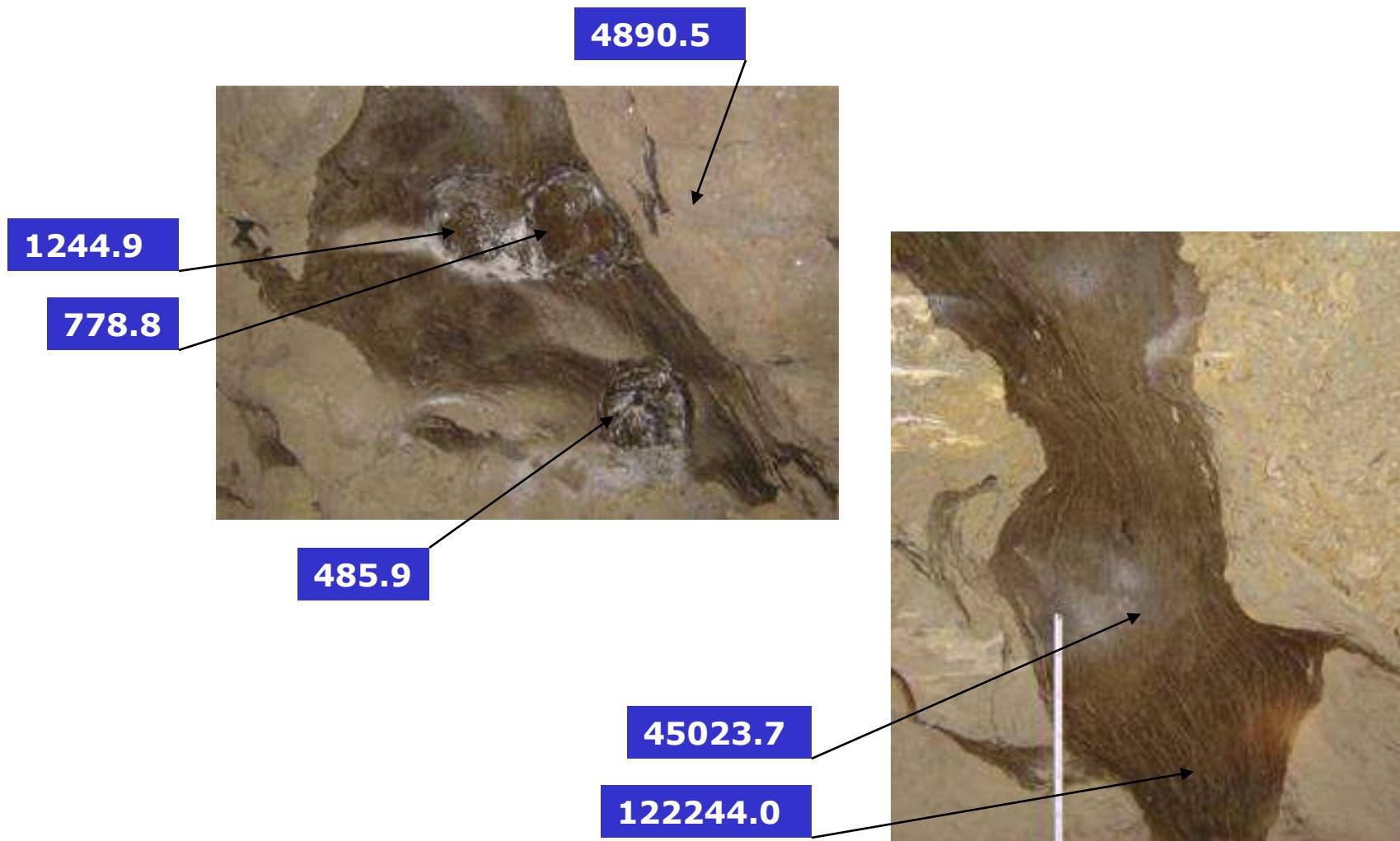
Содержание метана в древней мерзлоте и после частичного оттаивания на вырубке



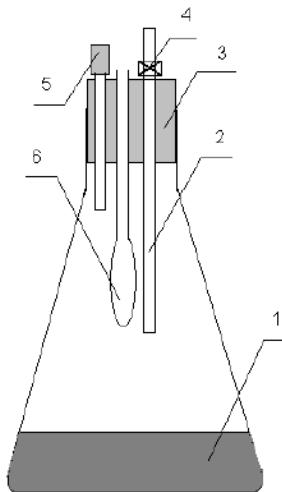
Содержание метана в древней мерзлоте и после частичного оттаивания на вырубке (2)



Содержание метана в мерзлых породах и льдах на Аляске, концентрация в ppm

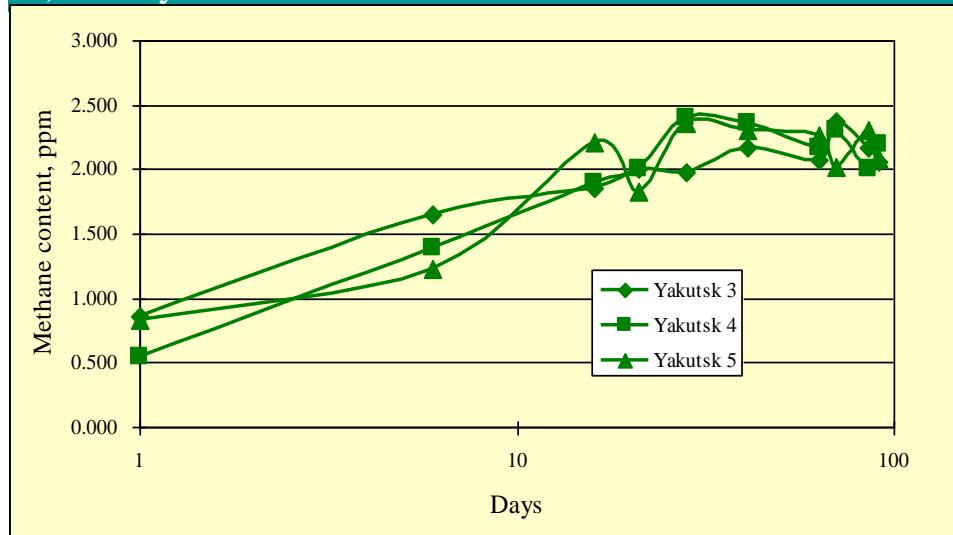


Эмиссия метана в мерзлых породах в эксперименте

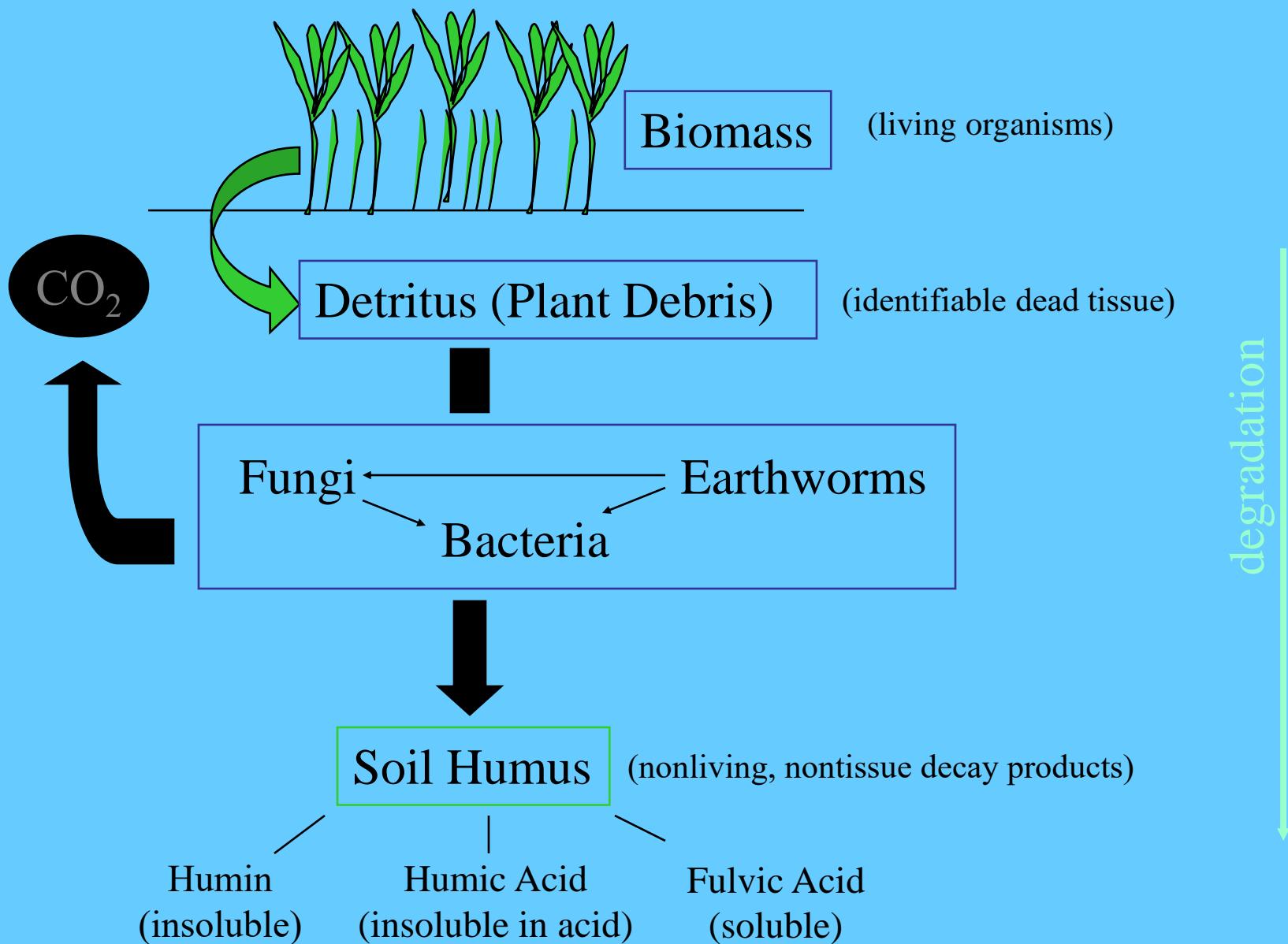


Days of experiment	Samples/Methane content, ppmv		
	Tomakomai	Alaska	Yakutsk
1	1.43	0.90	1.23
2	1.18	1.54	-
23	2.06	1.98	-
70	2.05	2.12	1.98
209	2.07	2.02	2.29*)
230	2.01	2.02	-

*)148 days



Органическое вещество



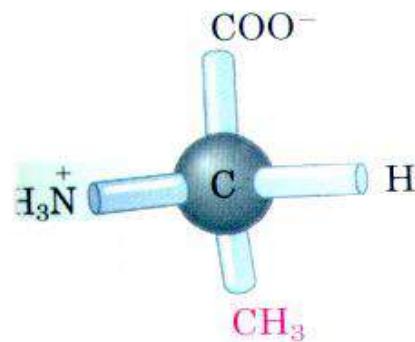
Гуминовые вещества - одна из наиболее сложных для изучения групп природных соединений.

- гетерогенность и гетерополидисперсность гуминовых веществ;
- высокая вариабельность (стохастический характер) структурных параметров и свойств;
- диалектическая противоположность ряда свойств и функций.

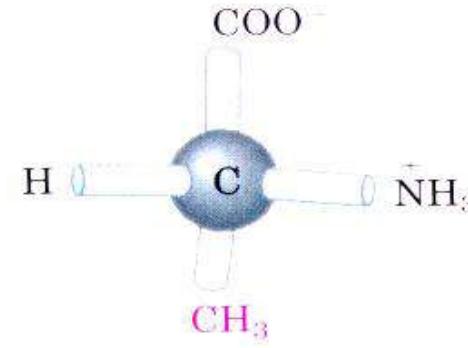
C:N Соотношение

- Humus ratio about 58% C, 5% N
- Why is the C:N ratio important?
 - Microorganisms need C and N in fixed ratios, because C and N are used to synthesize proteins, nucleic acids, etc.
 - Bacterial cell C:N is 5:1 to 8:1. Since about 50% of the C in an organic material is converted to CO₂, they need *roughly* a C:N of 10:1 to 16:1 in the residue they consume.
 - Fungi need a C:N of about 40:1 in their diet

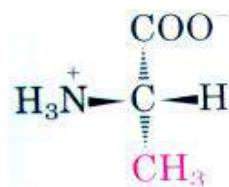
Аминокислоты, входящие в состав белков, являются L-аминокислотами



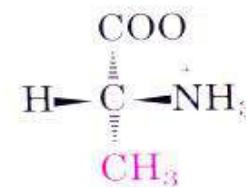
L-аланин



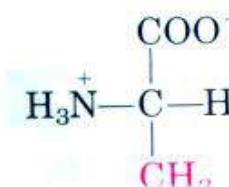
D-аланин



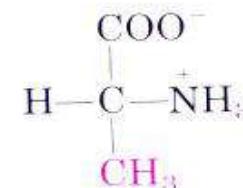
L-аланин



D-аланин

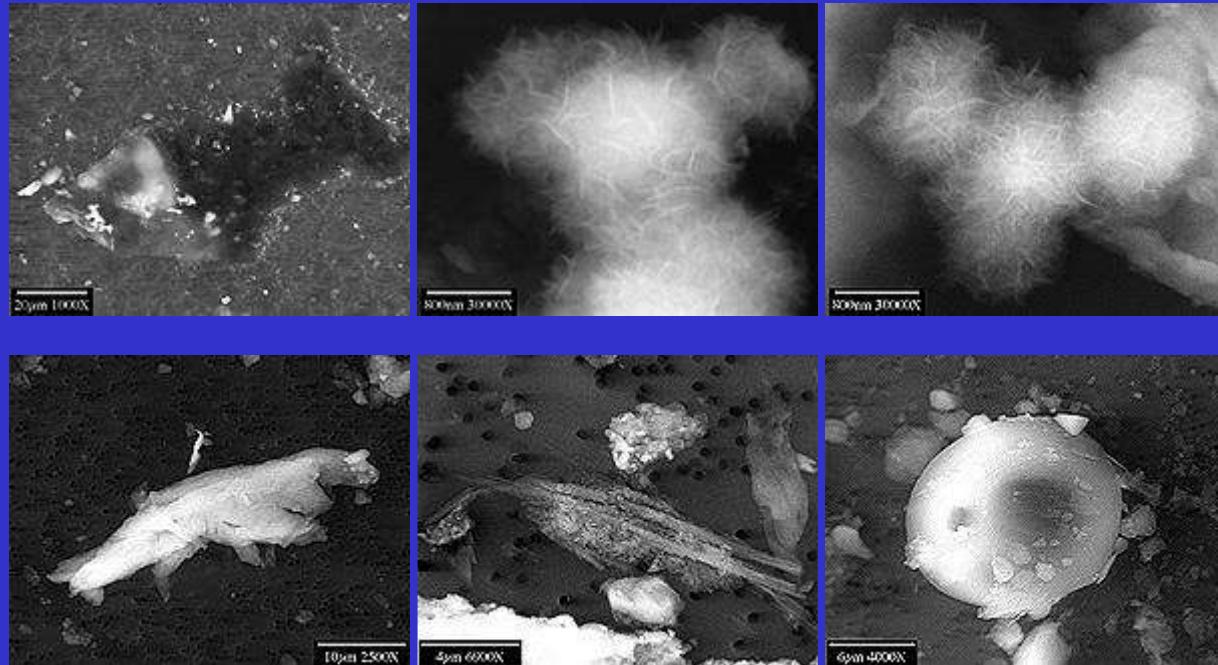


L-аланин



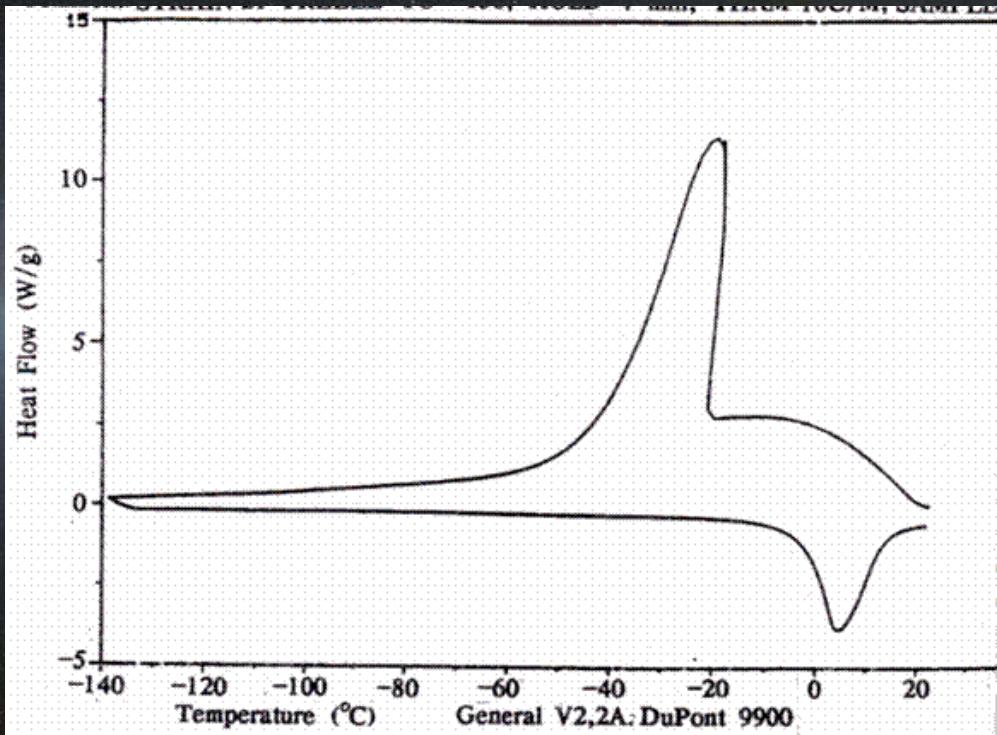
D-аланин

Во льду есть жизнь: микроорганизмы, найденные во льду Антарктиды



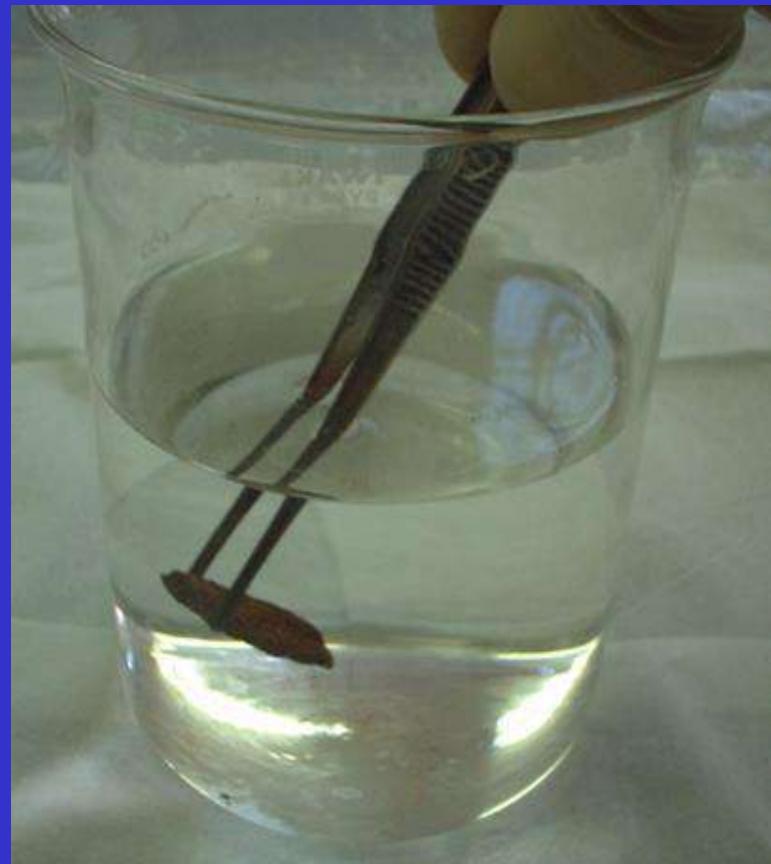
Заслуга выдающегося открытия в 70-х годах живых микроорганизмов, вмороженных в древний Антартический лед, принадлежит российским ученым из Института Микробиологии АН СССР (С.С.Абызов и другие)

Температуры вечной мерзлоты
недостаточно низки (около -3 то -7°C)
чтобы вода в клетке перешла в лед



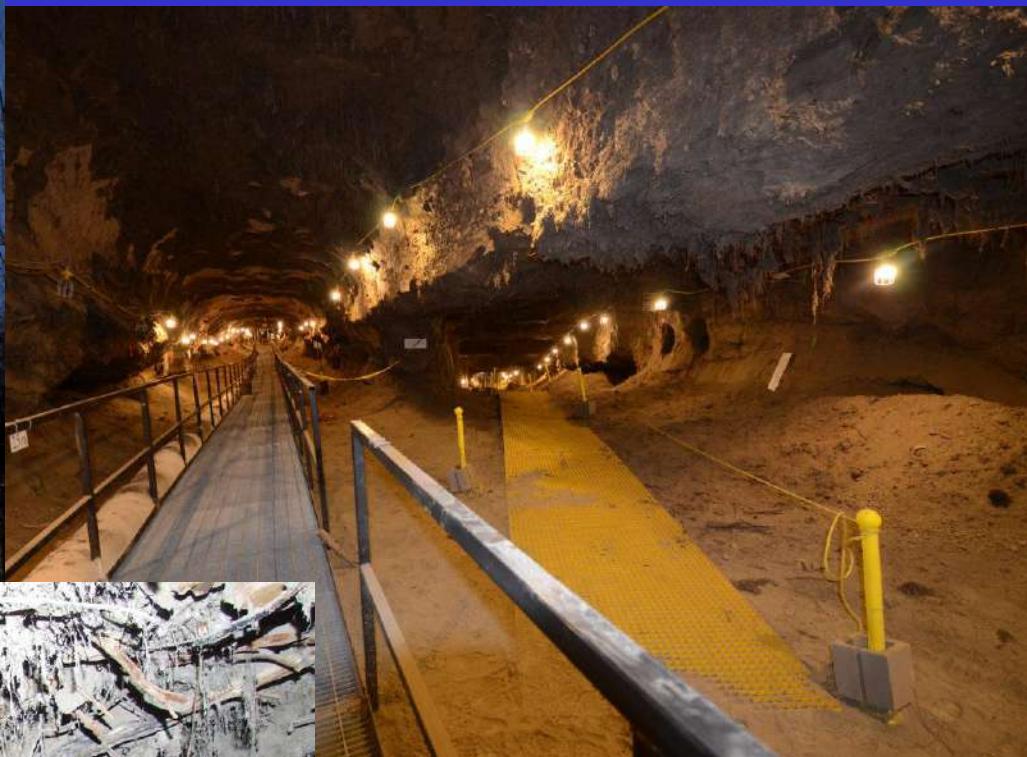
Freezing of bacterial culture, from McGrath, Wagener and Gilichinsky, 1994

Важна техника отбора образцов, обеспечивающая чистоту



**Отбор образцов в подземелье Института Мерзлотоведения
им.П.И.Мельникова в Якутске: плесень на стенках подземелья**





Споры гриба Penicillium из вечной мерзлоты

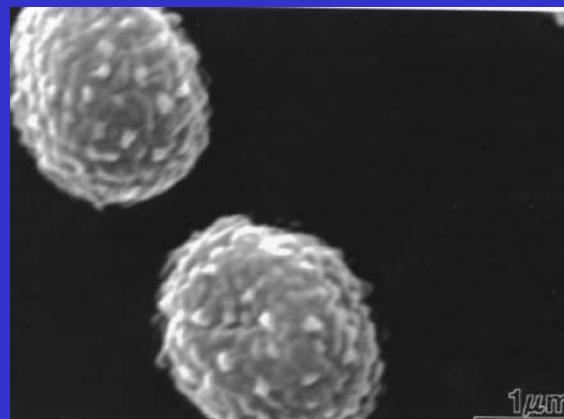
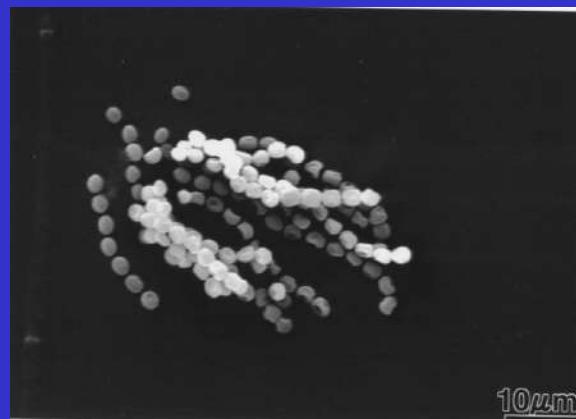
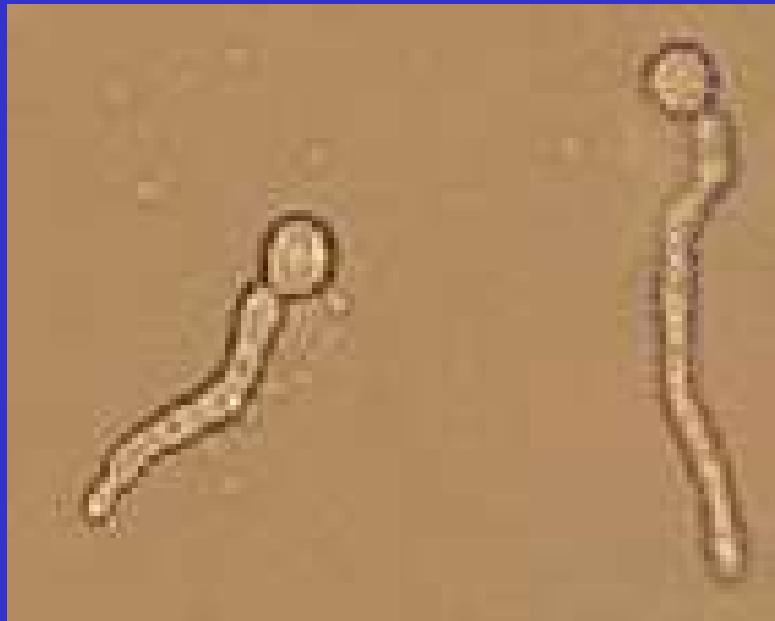


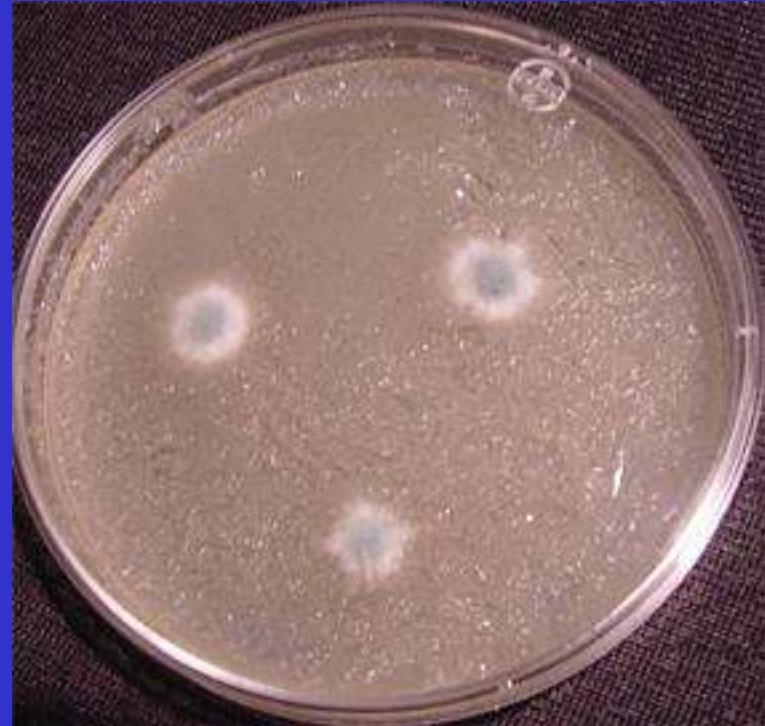
Фото с помощью электронного микроскопа

Микроорганизмы не только не замерзают, но и способны к росту

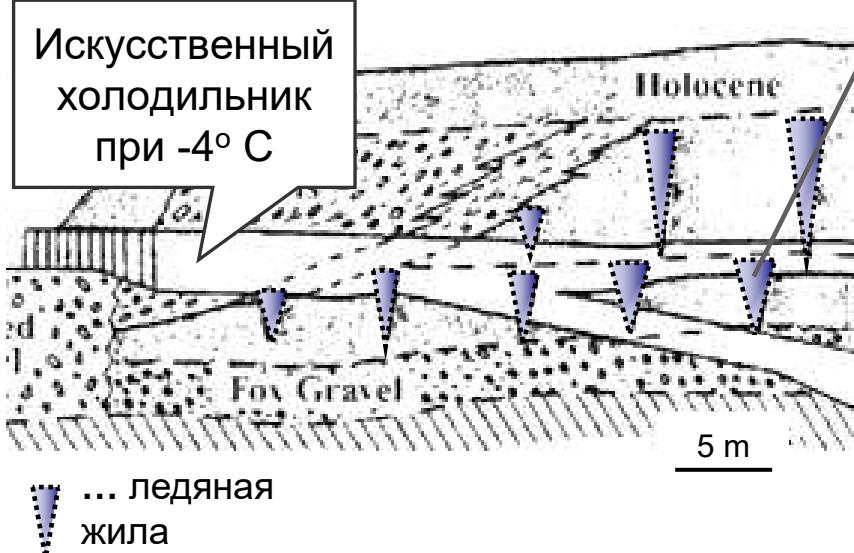


При температуре -5°C споры гриба *Penicillium* после двух месяцев инкубации прорастают

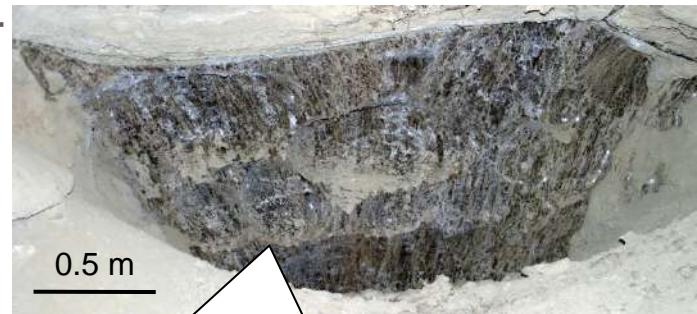
Микроорганизмы при отрицательной температуре не замерзают: на фото их рост при температуре -5°C в питательной среде: слева – переохлажденной; справа – в замороженном состоянии



Ледяная жила в подземном тоннеле Фокс



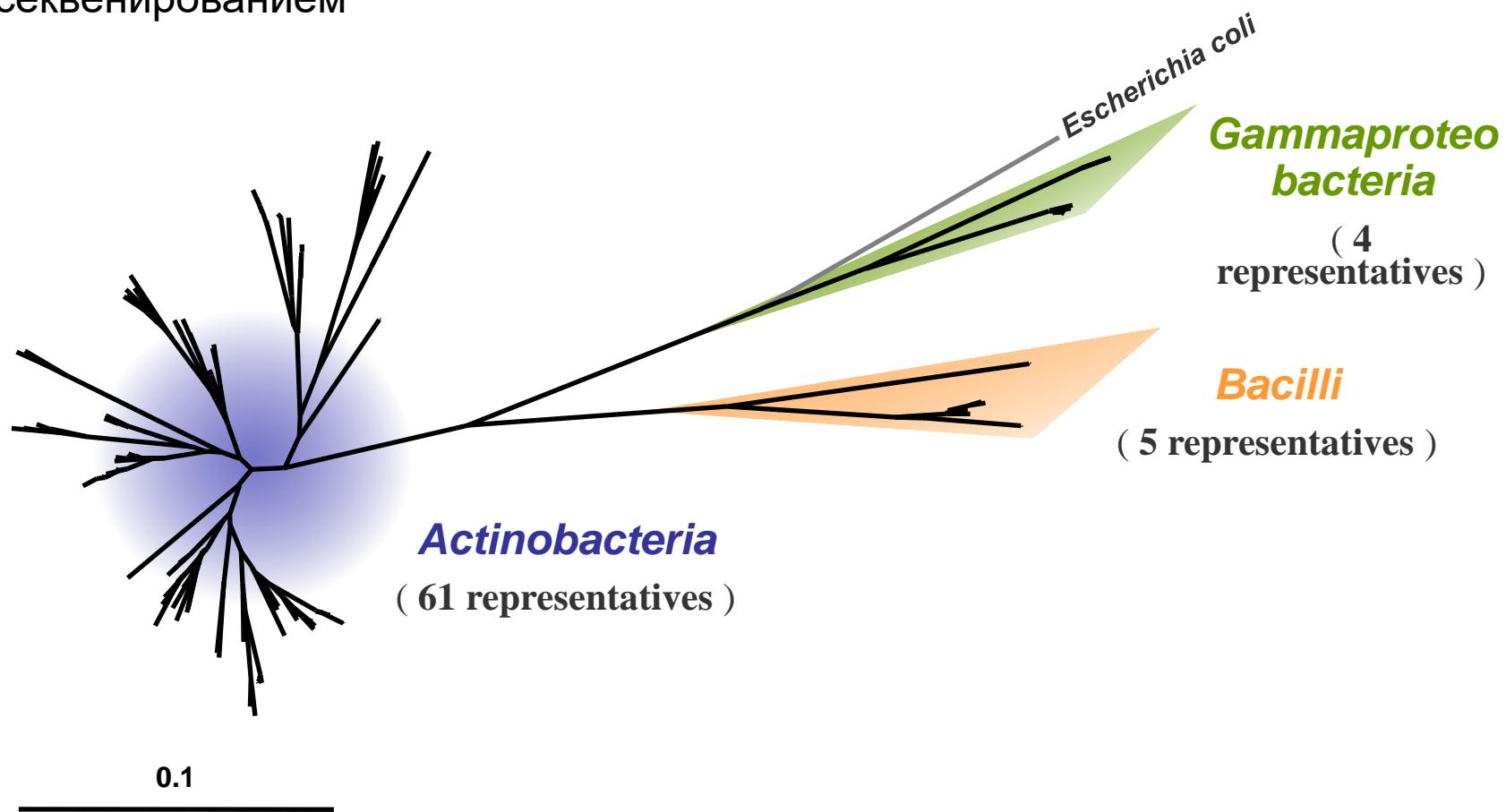
Обнажение ледяной жилы



- Форма и строение льда показывают, что жилы никогда не оттаивали, т.е.
 - отложения были постоянно мерзлыми
 - микроорганизмы были изолированы

Филогенетический анализ изолятов

- 10^3 to 10^6 CFU / ml of оттаявшего льда
- 301 штаммов было получено
- 70 штаммов было охарактеризовано 16S rDNA секвенированием

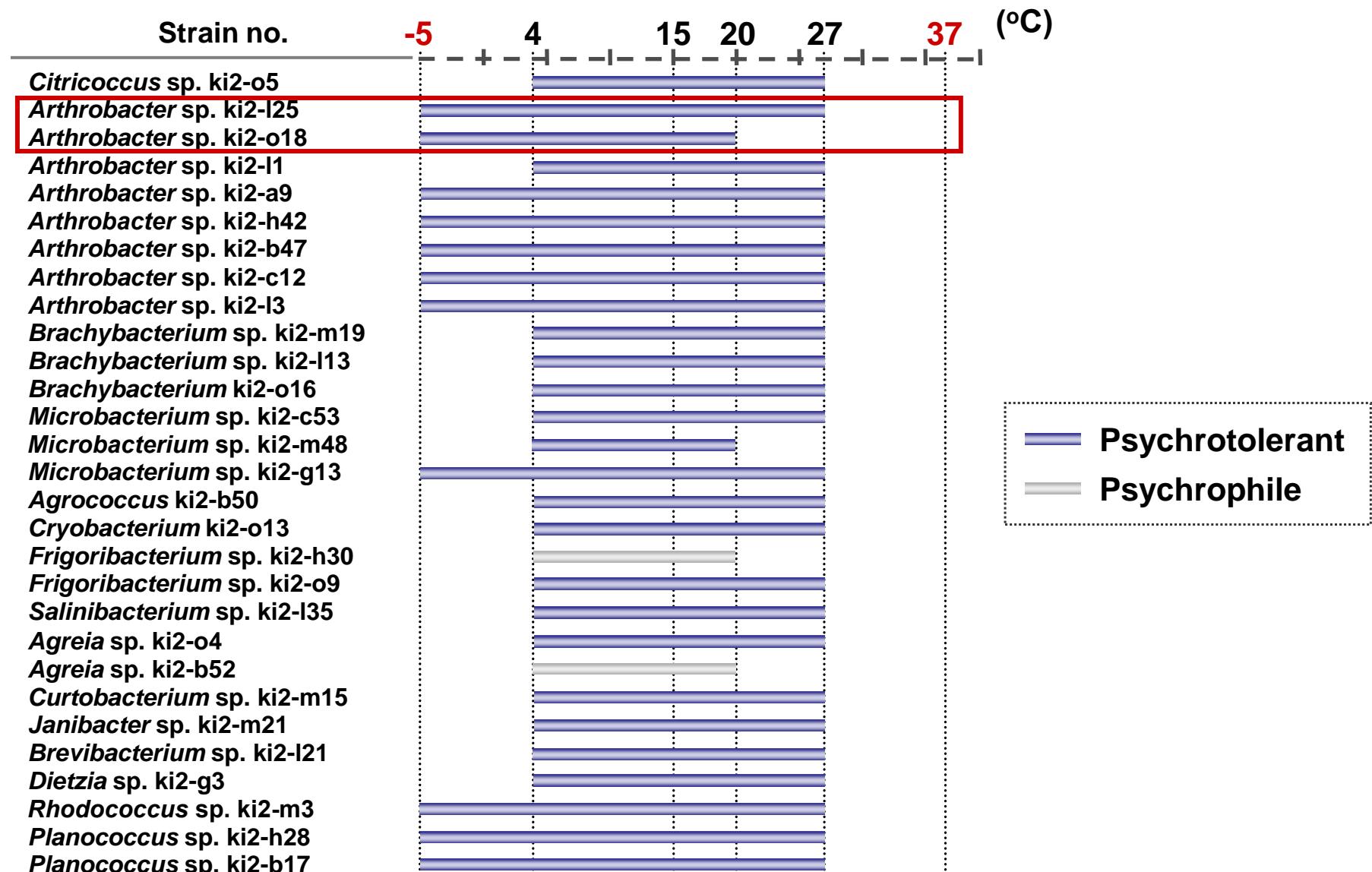


Новые виды?

- less than 97% similarity with those in database (partial 16S rDNA sequences)

No.	Closest species (Accession no.)	Similarity
ki2-o11	<i>Arthrobacter ramosus</i> (AM039435)	96.5%
ki2-j34	<i>Arthrobacter woluwensis</i> (X93353)	96.8%
ki2-m9	<i>Agrococcus jenensis</i> (AJ717350)	95.5%
ki2-j21	<i>Agreia</i> sp. 37-4 (AF513393)	96.7%
ki2-j22	<i>Frigoribacterium</i> sp. GWS-SE-H243 (AY332185)	96.9%
ki2-h51	<i>Salinibacterium</i> sp. 7320 (AM111058)	95.4%
ki2-j18	<i>Frigoribacterium</i> aff. <i>faeni</i> A-1/C-an/E (AJ297441)	96.5%
ki2-m15	<i>Curtobacterium</i> sp. B20 (AF128869)	94.6%
ki2-h47	<i>Brevibacterium</i> sp. SK8E11 (DQ153944)	96.2%
ki2-m17	<i>Rhodococcus fascians</i> (AJ011329)	95.7%
ki2-g6	<i>Rhodococcus</i> sp. P27-27 (DQ060384)	95.5%
ki2-l37	<i>Luteococcus peritonei</i> (AJ132334)	94.8%
ki2-l20	<i>Nocardoides jensenii</i> (AF005006)	96.4%
ki2-j4	<i>Aeromicrobium</i> sp. Gsoil 098 (AB245394)	95.9%
ki2-l2	<i>Aeromicrobium panaciterrae</i> (AB245387)	96.7%

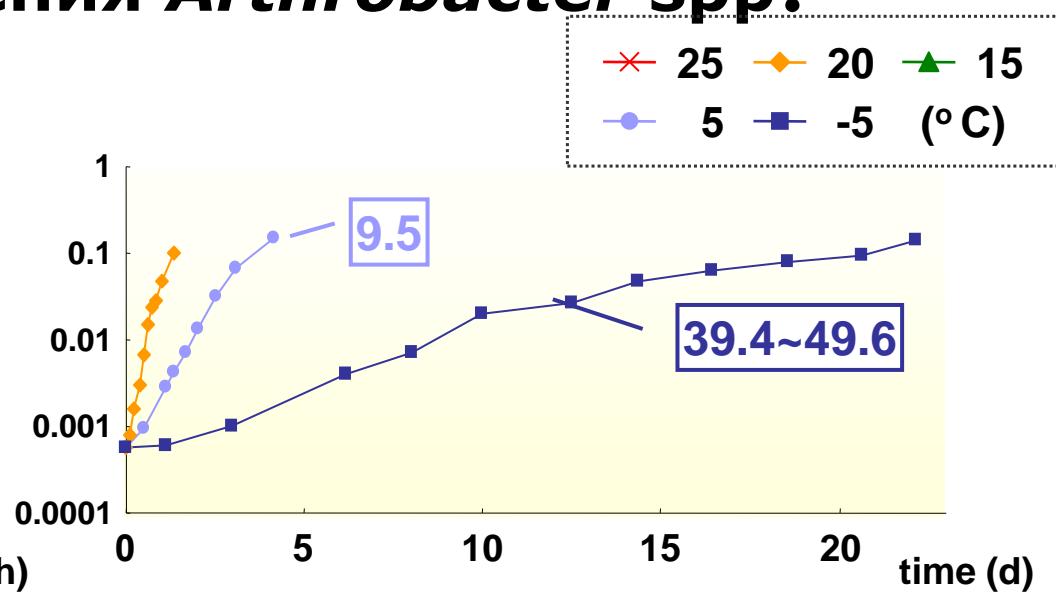
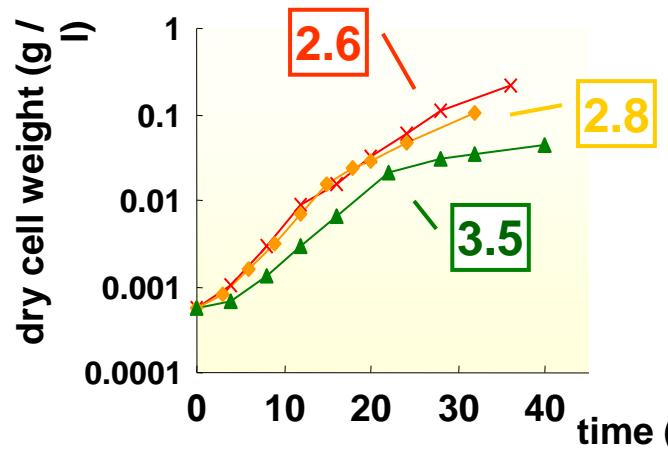
Температурная чувствительность изолятов



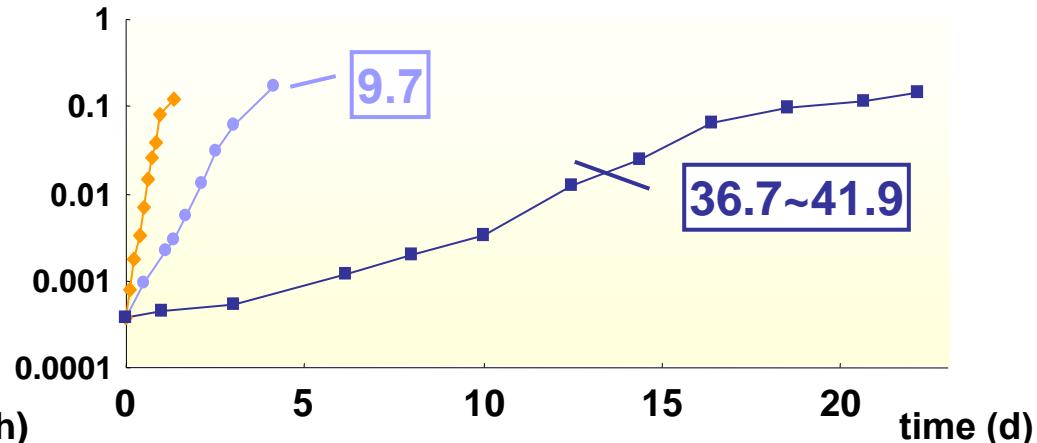
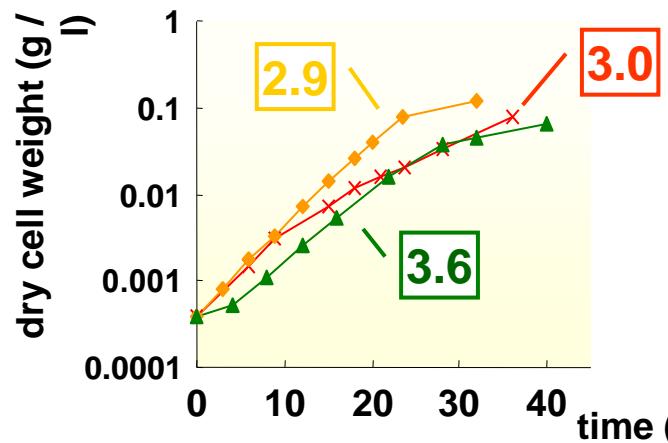
Рост определялся по диаметру колонии на среде LB agar от 5 дней до 3 месяцев

Время удвоения *Arthrobacter* spp.

■ *Arthrobacter* sp. ki2-o18



■ *Arthrobacter* sp. ki2-l25

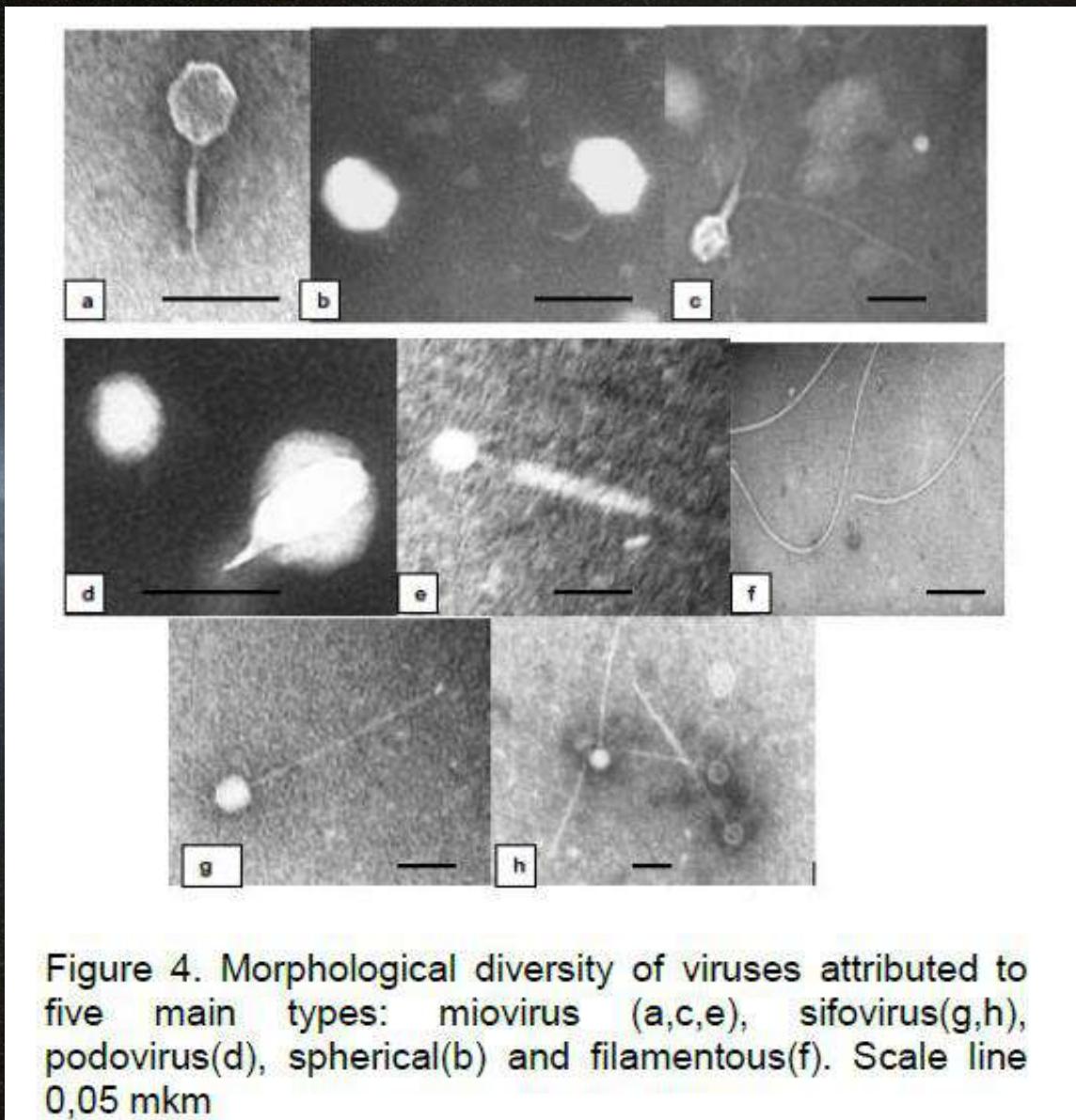


shaking incubation at 150 rpm^{-1} in LB medium

Изоляты грибов и их чувствительность

Strain	Closest species (Accession no.) (Similarity)			
I2Fp75	<i>Phaeococcomyces nigricans</i> (AJ276065) (99.0%)			
I2F7	<i>Leucosporidium antarcticum</i> (AF44529) (100%)			
I2F2	<i>Geomycetes</i> sp. FFI 30 (AJ608960) (99.3%)			
I2F3	<i>Geomycetes</i> sp. FFI 30 (AJ608960) (99.2%)			
I2F10	<i>Geomycetes</i> sp. FFI 30 (AJ608960) (99.8%)			
		-5° C (3 months)	20° C (7 days)	27° C (7 days)
				1 cm

Найдены различные вирусы в повторно-жильном льду возрастом около 25000 лет

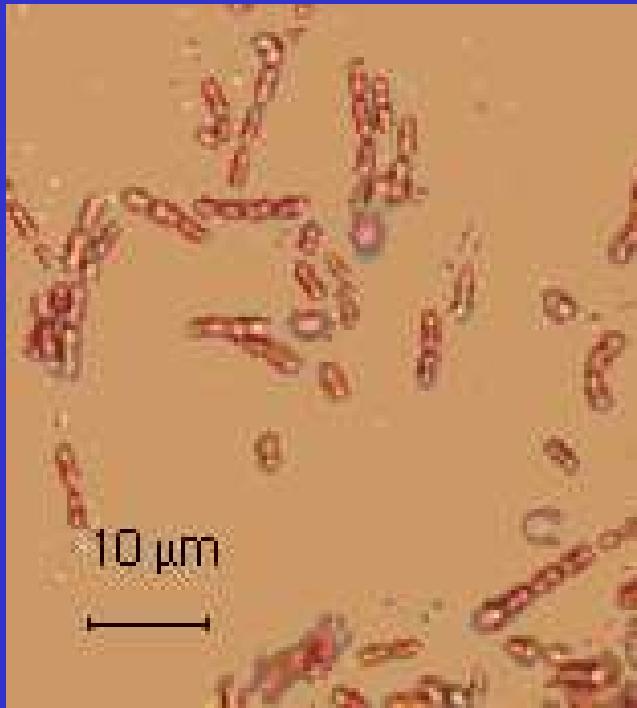


В поисках древнейших мерзлых отложений



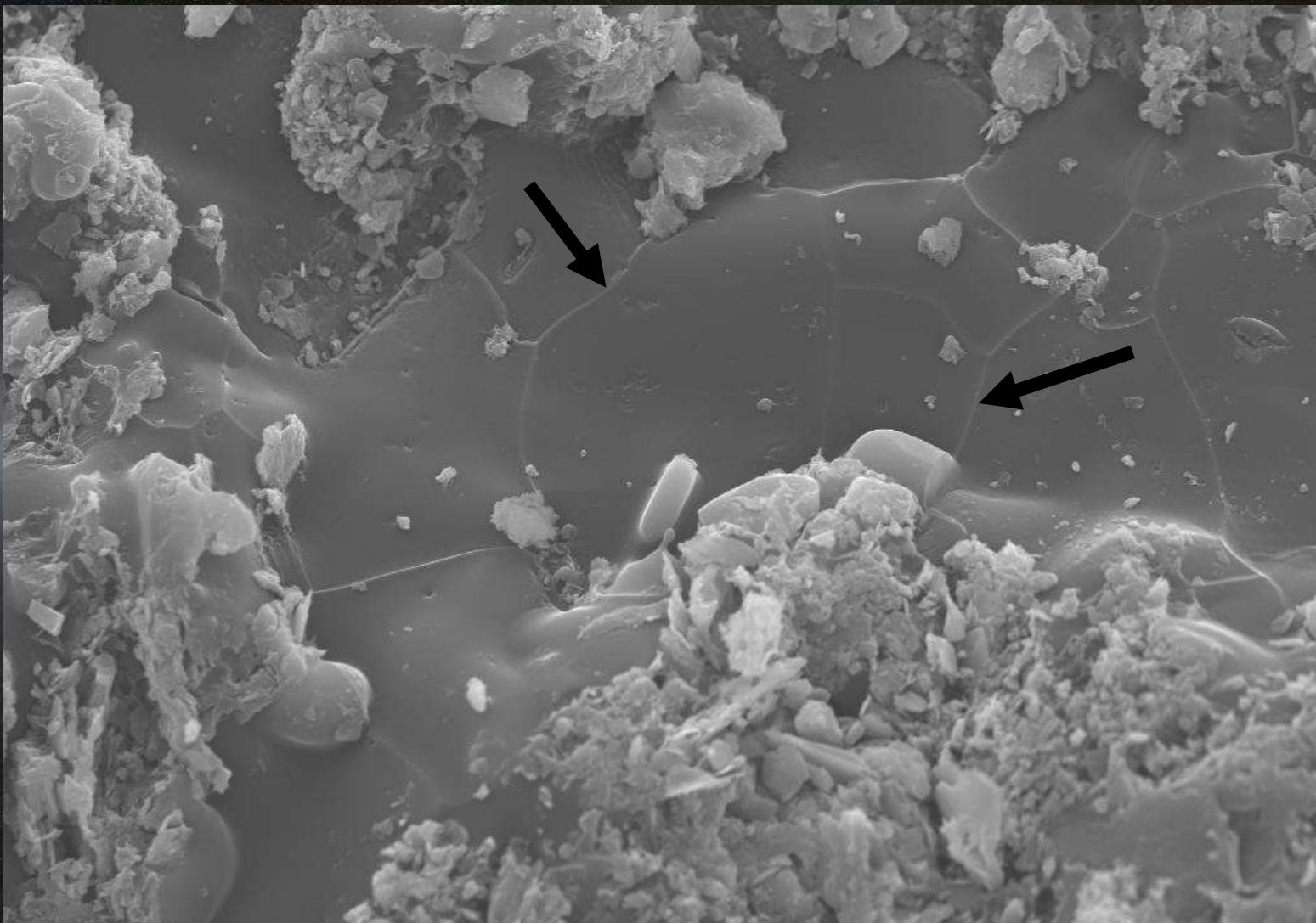
На фото обнажение Мамонтова гора в Якутии; возраст мерзлых пород, возможно, около 3 миллионов лет

Бактерия из древней мерзлоты



Выделенный штамм *Bacillus*; слева - окрашивание по Граму, справа – рост при температуре -5 градусов в течение 5 месяцев

Бактерия находится внутри ледяного кристалла
(стрелками показаны границы кристаллов)



10µm

Mag = 2.17 K X
EHT = 30.00 kV

I Probe = 100 pA
WD = 8 mm

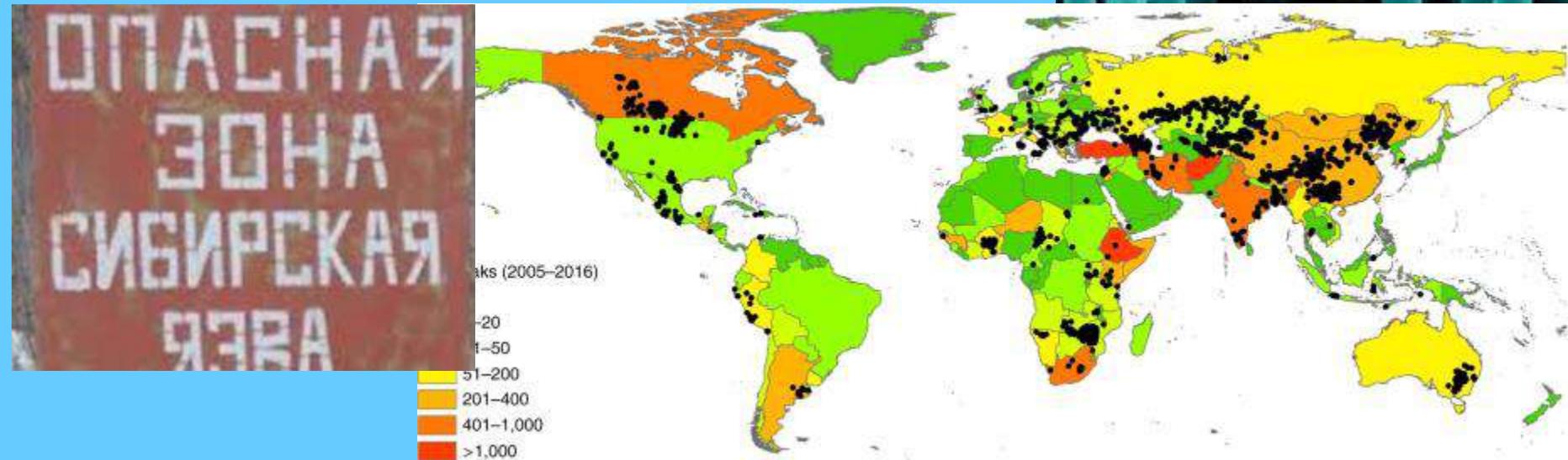
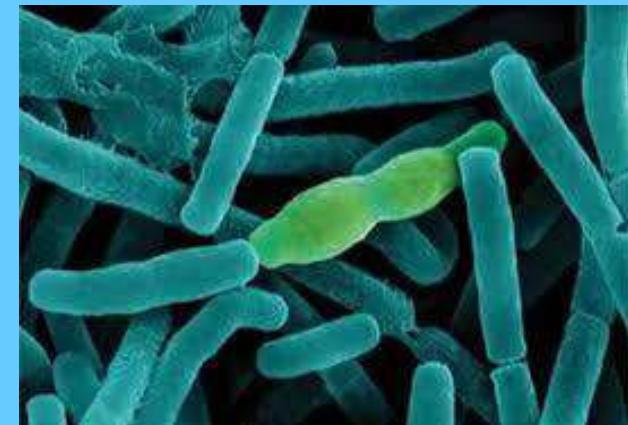
Signal A = SE1
File Name = 1-18.tif

Date : 3 Feb 2010
Time : 10:32:57

ВОЗБУДИТЕЛЬ СИБИРСКОЙ ЯЗВЫ -

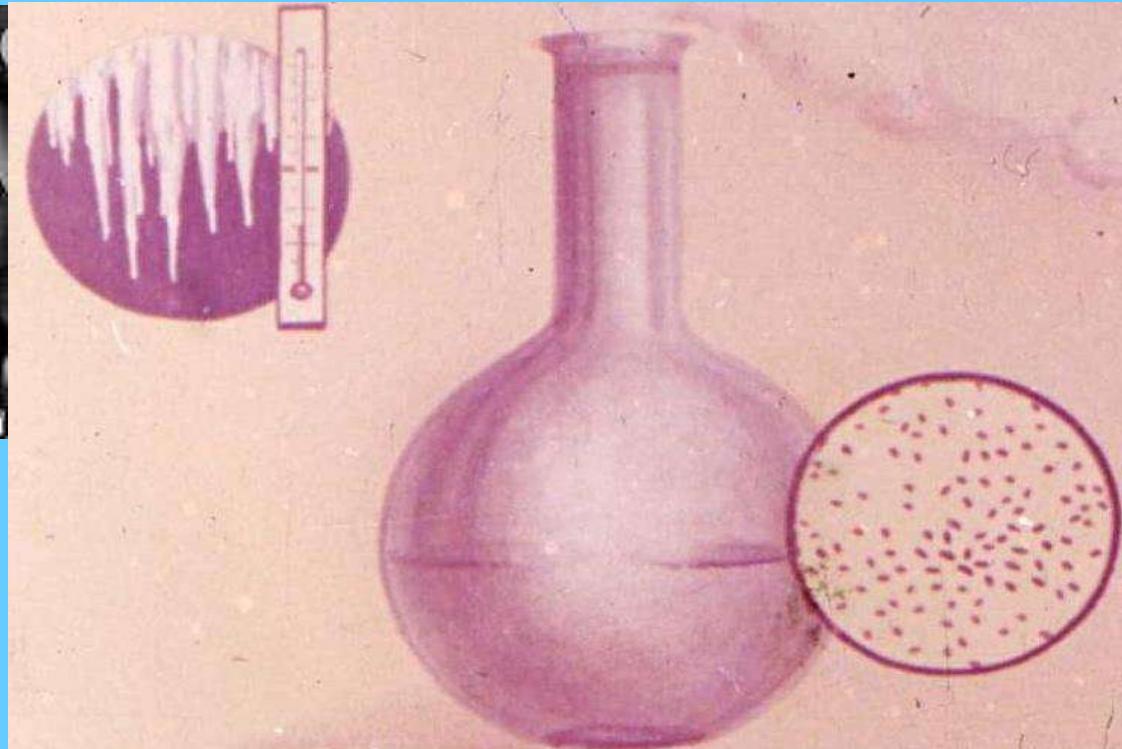
Bacillus anthracis, род *Bacillus*

- **Сибирская язва** - острое инфекционное заболевание сельскохозяйственных и диких животных. Смертность около 90%.



При кипячении сибиреязвенные споры *Bacillus anthracis* погибают только через 20 мин, легко переносят высушивание, холод, замораживание, гниение

Bacillus cereus F из Якутии выдерживает замораживание, кипячение более 2-х часов, возможно, автоклавирование (+120°C и 1 атм), спирт 60%, а его возраст многие тысячи лет



A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. The background is a dramatic, reddish-pink sky, likely from a sunset or sunrise. The lighting creates strong highlights on the ice's surface.

Общая геокриология

Криогенные (мерзлотные) процессы





КРИОГЕННЫХ



ТОЛЩ



Что влияет на развитие процессов?

- Рельеф и тектоника
- Состав и строение горных пород
- Гидрология и гидрогеология
- Климат
- Растительность
- История развития и время

Морозное пучение

- Водонасыщение пород
- Возможность движения влаги
- Условия замерзания
- Время и масштаб







Cross section of a seasonal frost mound in the North Fork Pass, Dempster Highway. © S.A.Harris.



**Морозное пучение, малые формы - бугры.
Миграционные бугры пучения называются также
«пальса» (из финского языка)**



Морозное пучение, малые формы (менее 2 м) –
бугры пучения

cryogenic **earth hummocks** at Hosvgul, south of Lake
Baikal, Mongolia. © S.A.Harris.



Морозное пучение, малые формы (менее 2 м) –
вместо ледяного (льдистого) ядра может быть
тонкодисперсный материал - туфуры

Thufurs in southern Iceland.





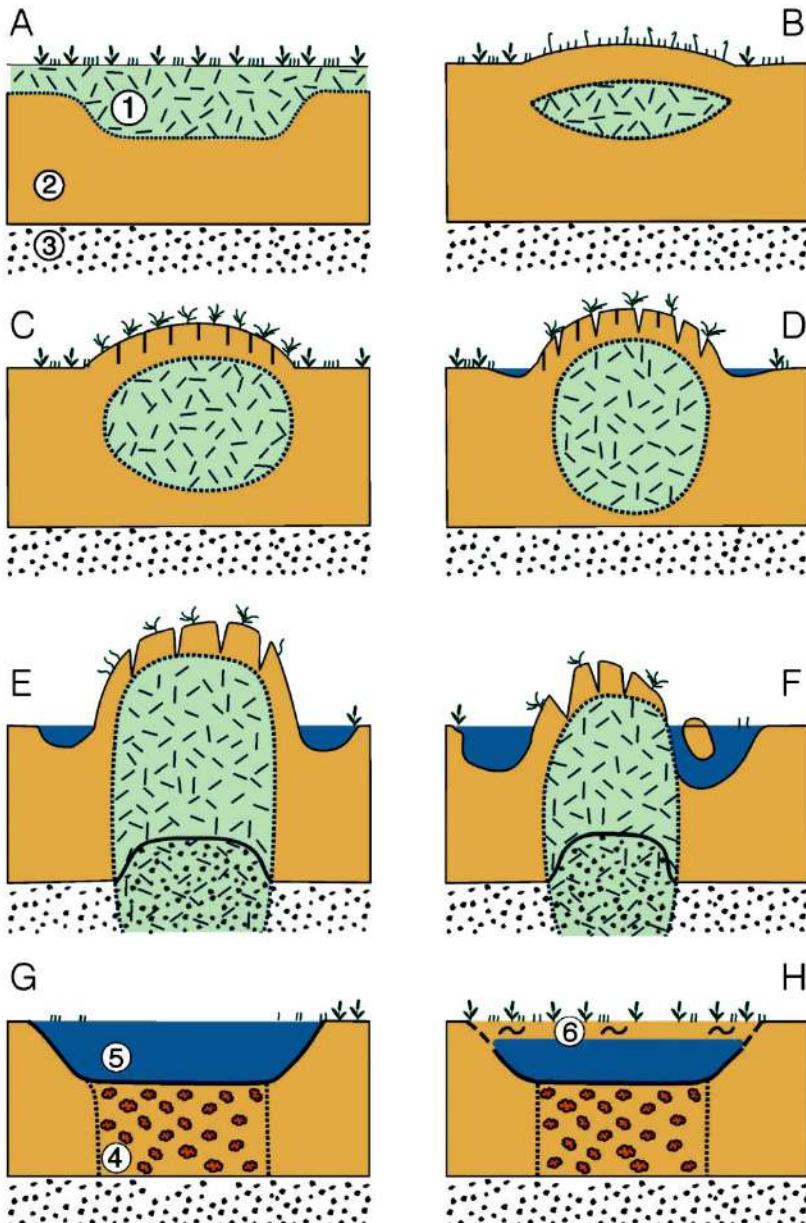
**Рис. 3. Миграционные многолетнемерзлые бугры
пучения на северном пределе ареала — в 15 км
севернее озера Лама на плато Пutorана (п-ов
Таймыр, фото Т.Ю. Репкиной)**



Рис. 14. Ледогрунтовое ядро в разрезе 7-метрового многослойного торфяного бугра в долине реки Турумакит (фото Т.Ю. Решетной)



Рис. 12. Разрез верхней части 7-метрового многолетнемерзлого торфяного бугра в долине реки Турумакит. Радиоуглеродная дата для контакта



Образование пальс

A, the beginning of the thaw season; B, the end of the first thaw season; C, embryonic palsa; D, young palsa; E, mature palsa; F, old collapsing palsa surrounded by a large water body; G, fully thawed palsa giving a circular pond on the mire (5). The thawed peat is decomposed (4). H, new peat (6) formation starts in the pond (Seppälä, 1982; 1986; 1988). Reproduced from Seppälä (2006).



Рис. 19. Трещины в торфе, перекрывающем миграционный торфяной бугор пучения высотой 7 м в долине реки Турумакит (фото Т.Ю. Репкиной)

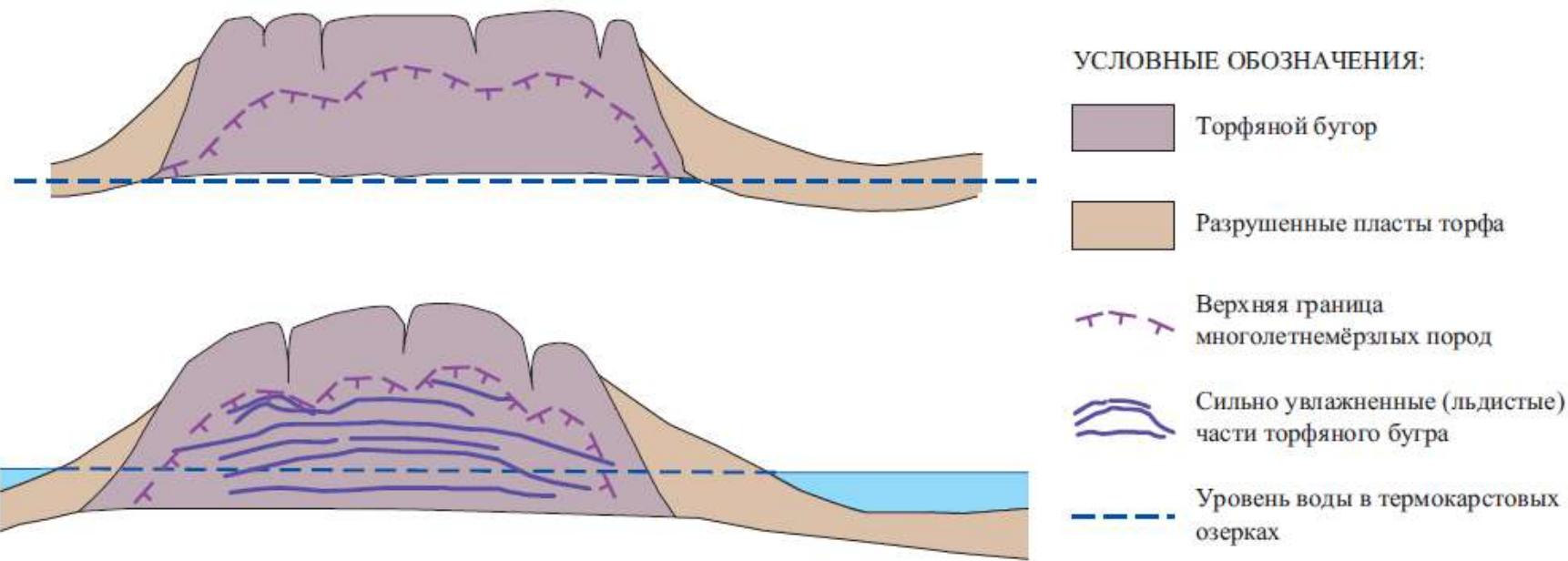
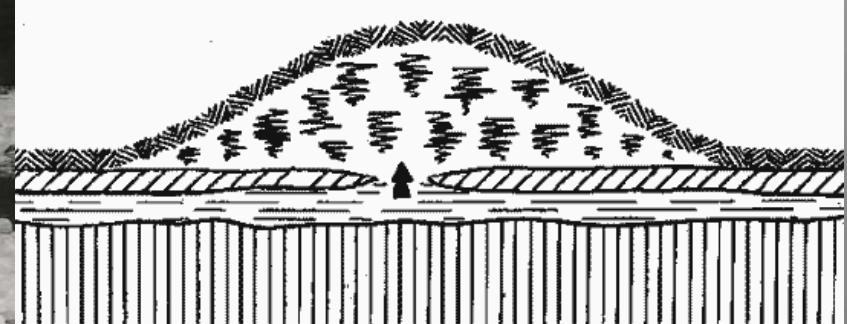
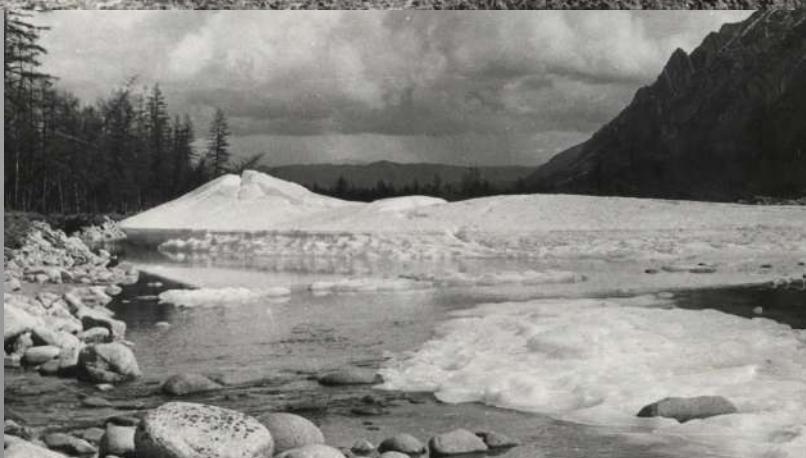


Рис. 22. Схематический разрез торфяного бугра с плоской (а) и с выпуклой (б) вершинами по В.И. Орлову [18]



Рис. 23. Сезонный техногенный бугор пучения близ г. Норильска летом 2004 г.: а — 19 июня, б — 7 июля (фото Е. Перминовой)

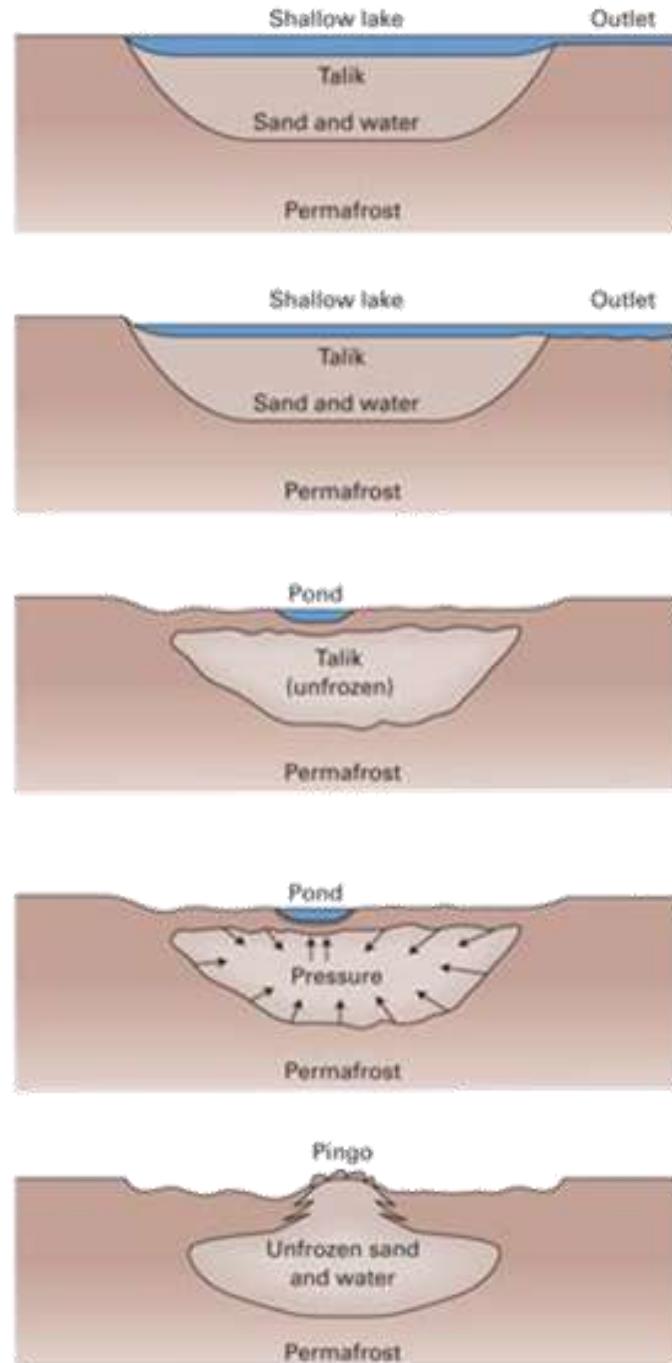
Морозное пучение, большие формы – гидролакколиты, булгунняхи, пingo (все - синонимы). Сибирь



Пинго

If the lake is infilled with sediment and vegetation, or drained by drainage capture the insulation of the ground surface will increase and permafrost will advance from the sides and bottom of the talik - forcing water up into a zone of refreezing.

Hydrostatic (Mackay, 1979a) or **closed system** pingos





Пинго

“Cold is powerful. It freezes subsurface water, which can force frozen ground upward to form cone-shaped mounds with cores of ice—pingos—on Canada’s Tuktoyaktuk Peninsula.”

Photograph by Bernhard Edmaier

Морозное пучение, булгуннях (пинго), Сибирь

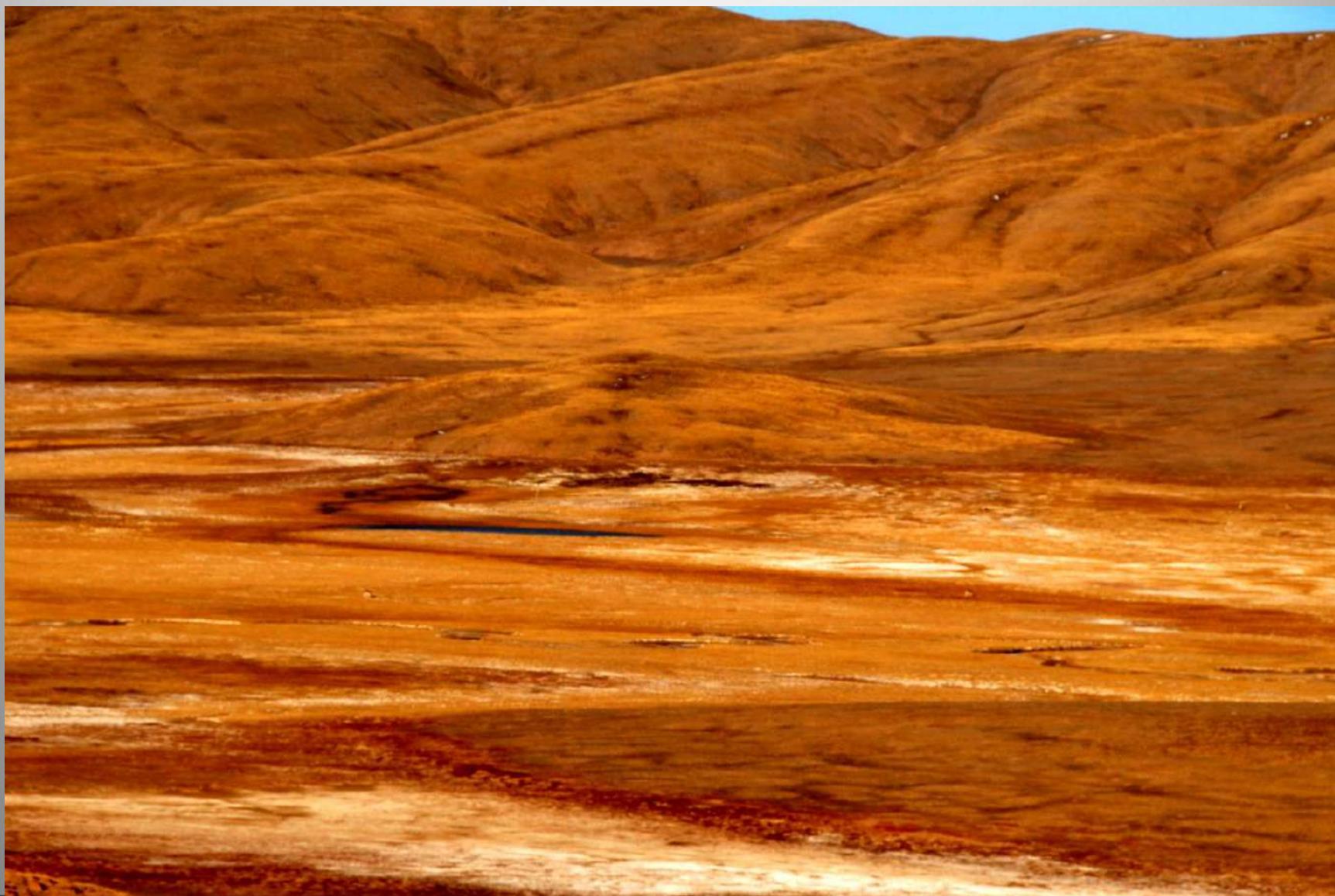


Морозное пучение, булгуннях (пинго), Канада



Булгуннях (пинго)

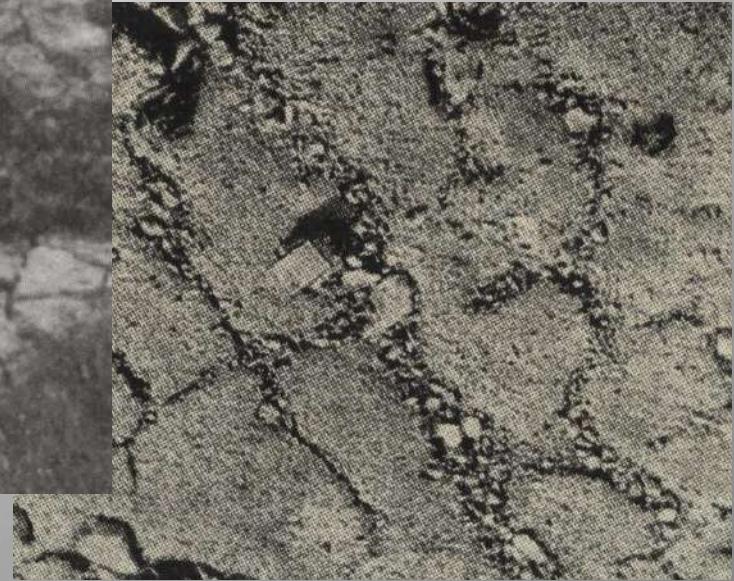
A hydraulic pingo about 200 m in diameter at Harigqiong (37° 1'N, 97° 34'E) on the Qinghai-Tibet Plateau at 4330 m elevation. Note the salts on the surface of the soils around the pingo. © S.A.Harris.



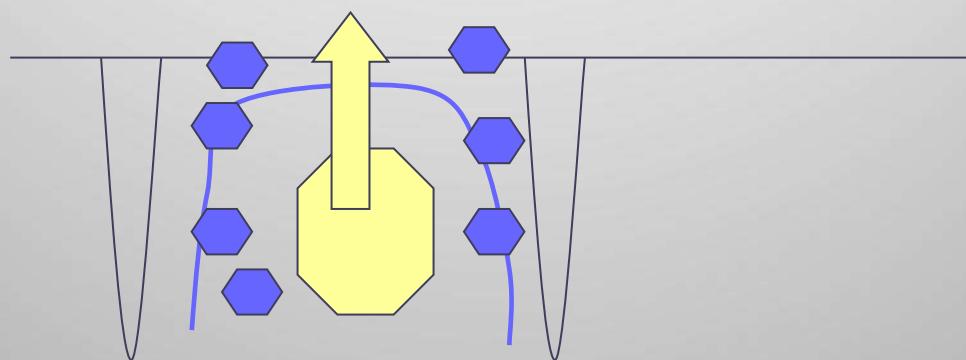
Структурные почвы

- Водонасыщение пород
- Материал верхнего слоя пород
- Условия замерзания
- Время и масштаб

Структурные почвы – пятна-медальоны, Сибирь



Развитие пятен-медальонов





Структурные почвы: сортированные круги

Thermal gradients across the active layer can drive pore water circulation that develops into discrete cells defined by zones of upwelling and downwelling.

This process results in an actively convecting core of fine sediment and accumulation of coarse particles that are difficult to “subduct” at the downwelling zones.



Пятна-медальоны

(«морозные фурункулы») Frost Boils

Sorting and circulation

- Fines in center (don't step there!)
- Stones around the margin

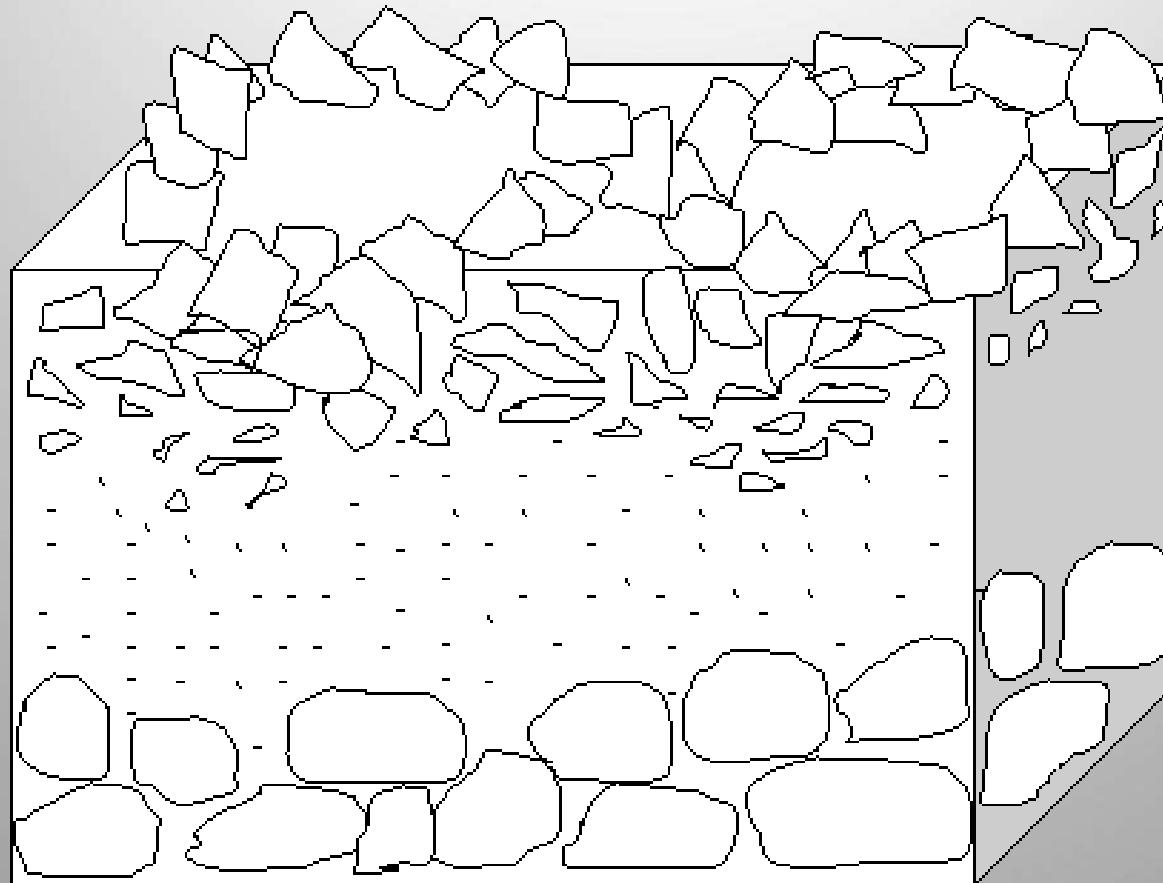


«Могильные камни» - Tombstones

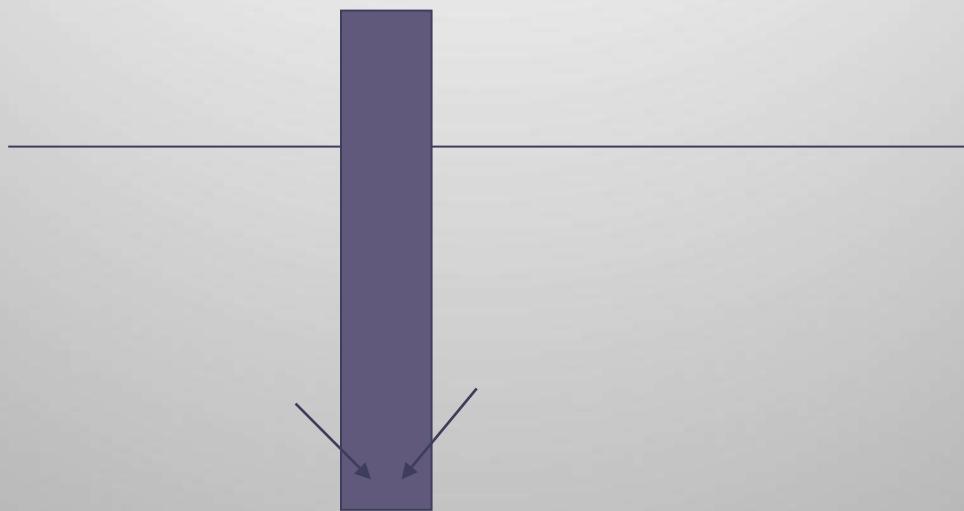
Frost heave can lever tabular rock up into disconcerting positions...



Морозное выпучивание



Выпучивание свай



Структурные почвы – каменные полосы, поля, потоки (курумы), Сибирь



Структурные почвы – курумы, Сибирь



Структурные почвы – каменные кольца, Сибирь



Структурные почвы – каменные кольца, Шпицберген



В Hallett, Svalbard, NGS

Ледяные жилы и полигональные формы: Сибирь

- Механические свойства пород
- Поверхностные воды
- Температурный режим зимой
- История и время

Ледяные жилы и полигональные формы: Сибирь





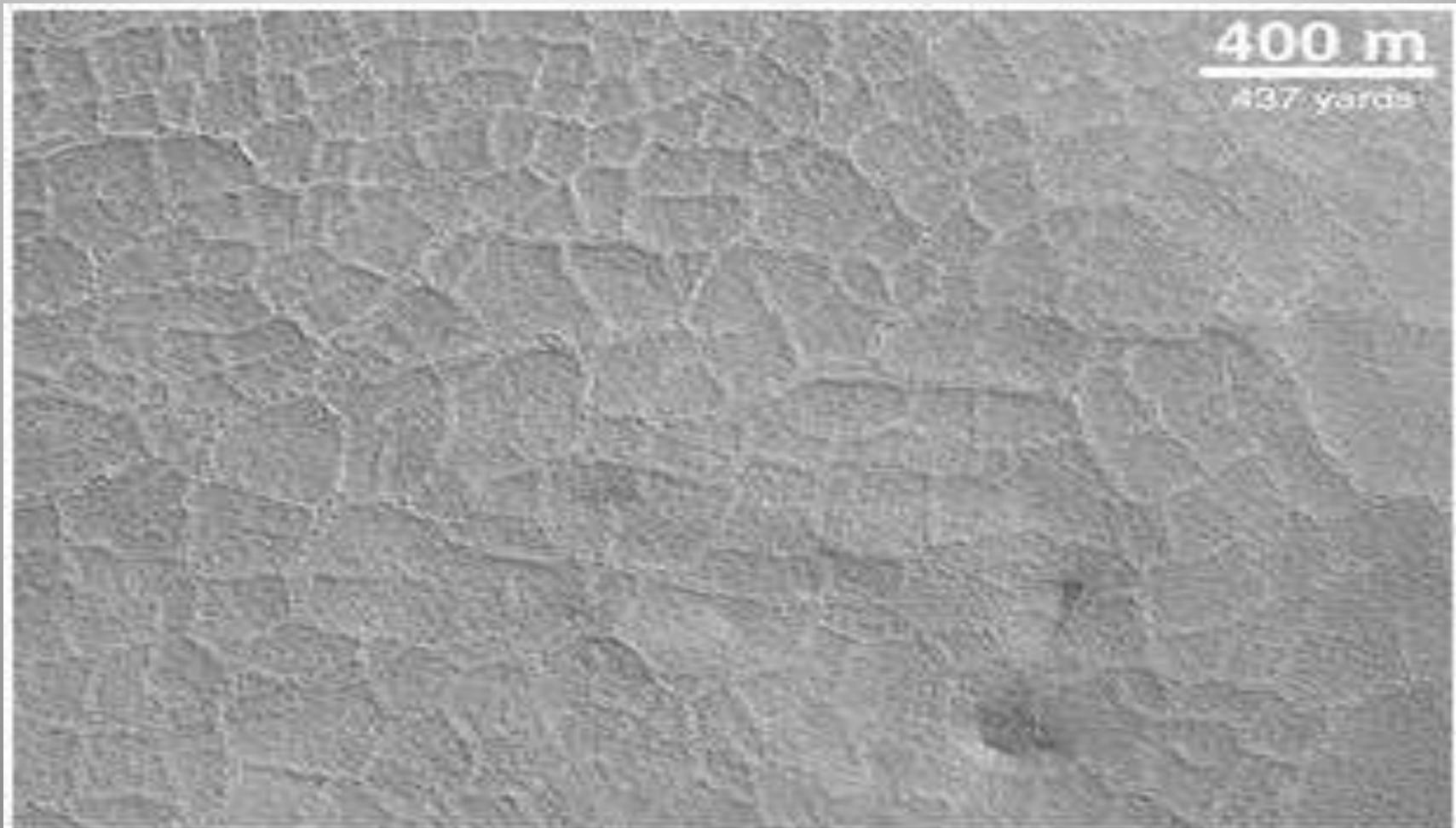
“Ice wedges penetrate deep into frozen soil, chiseling tundra into room-size polygons—a signature texture of permafrost landscapes. Climate change may be marking the Canadian Arctic, too, as meltwater erodes the edges of some polygons and deepens pools in their centers.”

Photograph by Bernhard Edmaier

Полигоны на Марсе

Каждый полигон размером с футбольное поле

(http://www.msss.com/mars_images/moc/7_19_99_fifthMars/07_npols)



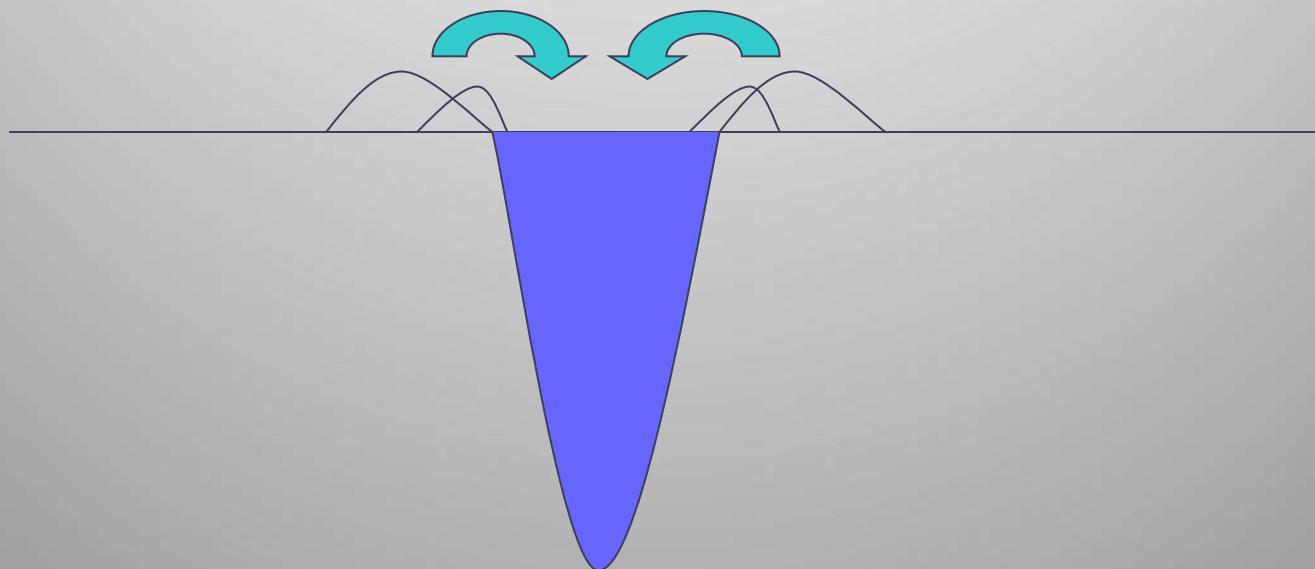
MOC2-150

Malin Space Science Systems/NASA

Ледяные жилы и полигональные формы: Сибирь



Рост ледяных жил и образование валиков





«Плечики» - “Shoulders” (upfolding of host)

«пояски» - “belts” (banding in ice) of the left upper side
of an ice-wedge.



Полигоны с низким центром - Low centre polygons
with raised marginal ridges and a lower centre at
Prudhoe Bay, Alaska. © S. A. Harris

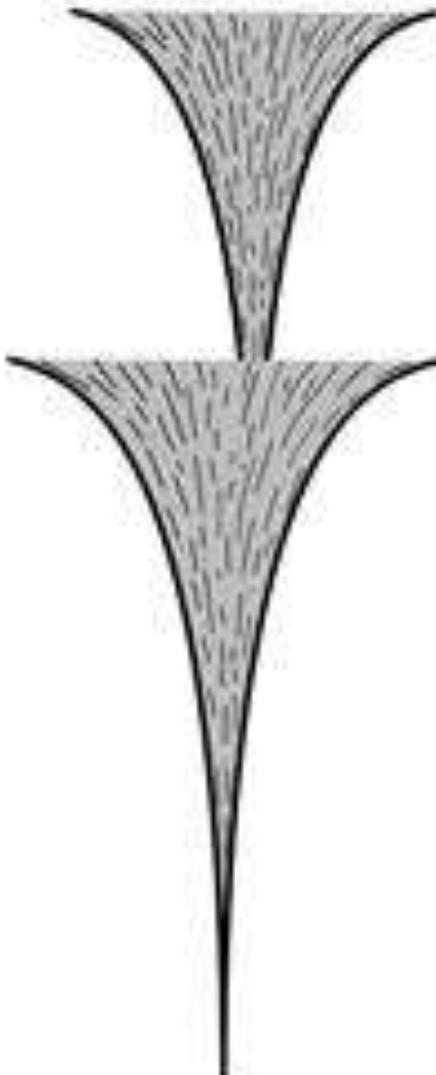
**Epigenetic
Permafrost:
No Deposition**

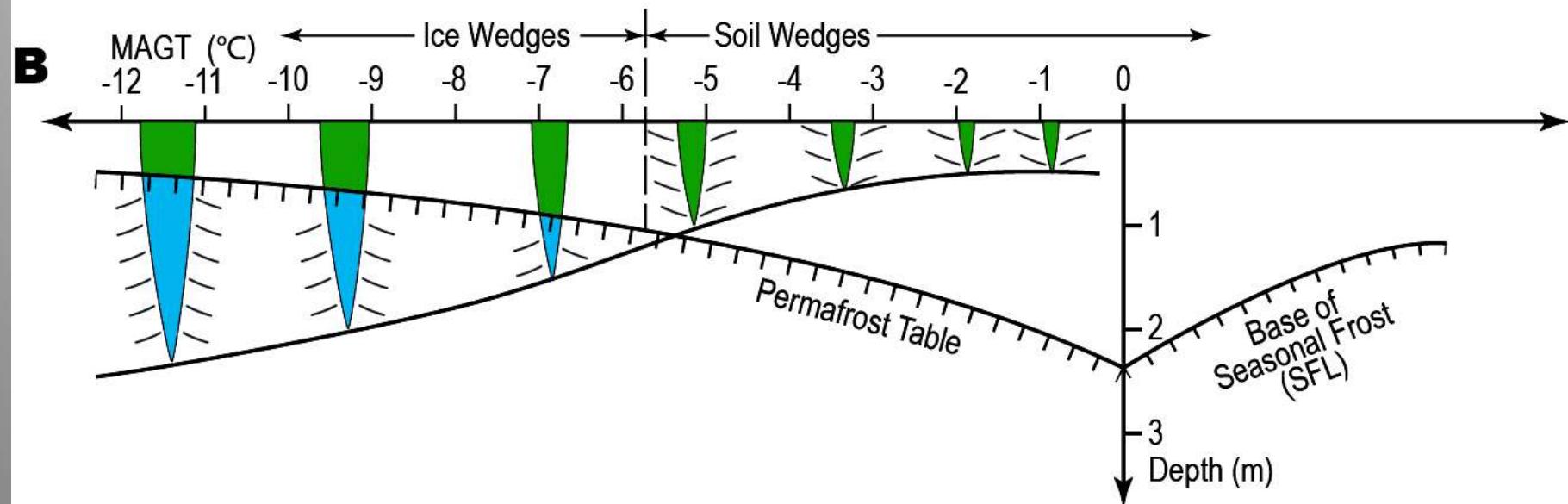
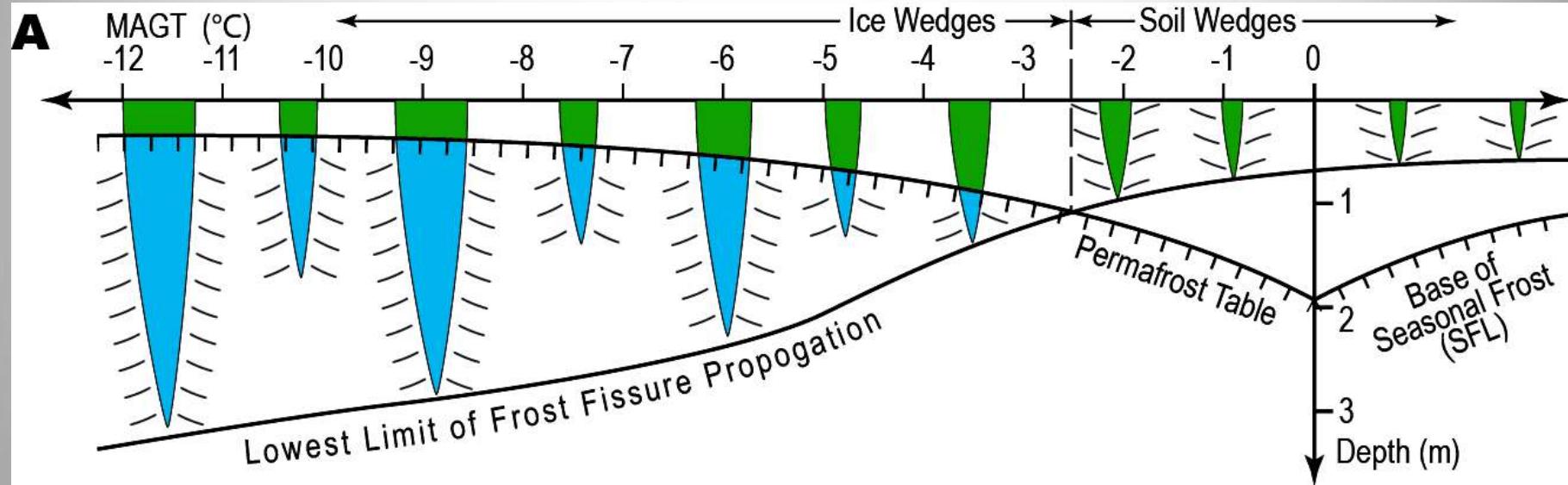


**Syngenetic
Permafrost:
Continual
Deposition**



**Syngenetic\\
Epigenetic
Permafrost:
Multi-Stage Ice Wedge**







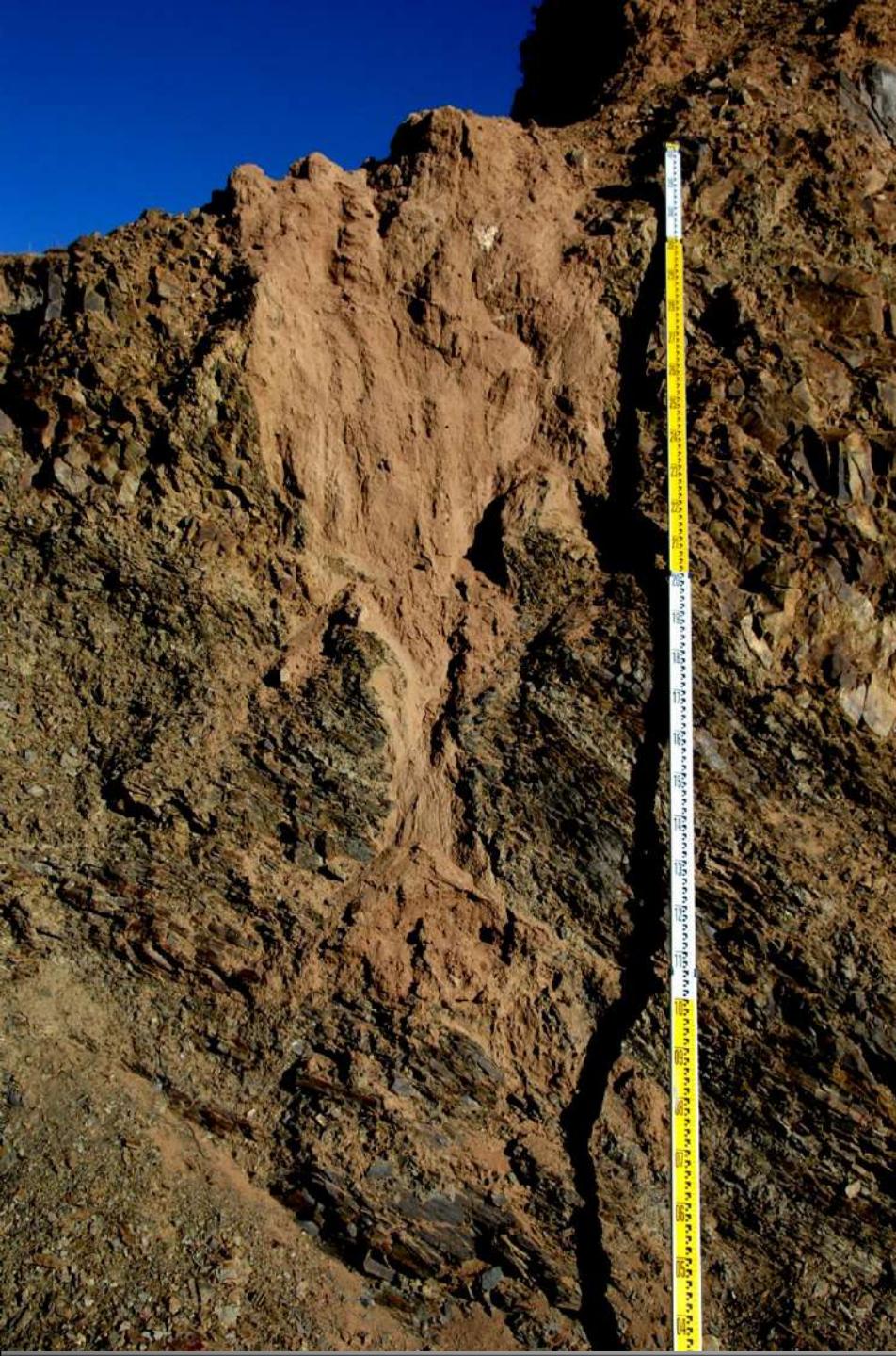
Жилы сезонно-мерзлого слоя

Soil wedges with a seasonal (winter) ice infilling in Sibe



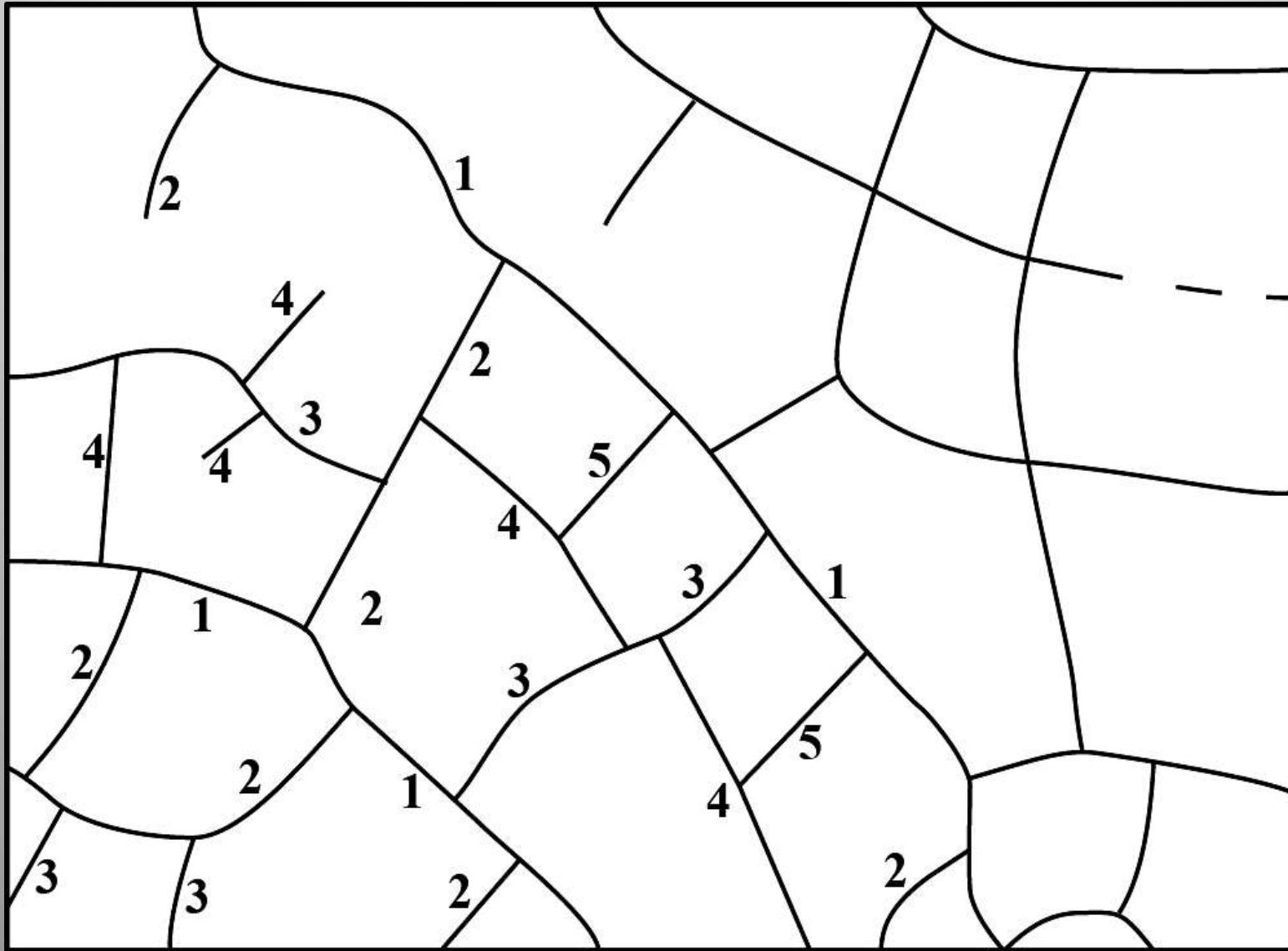
Песчаные жилы

Details of a Pleistocene sand tessellon west of Laramie, showing the intersecting sand sheets filling the former contraction cracks. © S. A. Harris.



Лессовые жилы

Loess tessellon in bedrock at 4226 m in the village of Yellow River, Sichuan Province, China. There is a small soil wedge filled with younger loess in the top. © S. A. Harris..



Различные генерации трещин - Typical arrangement of first, second and higher order ice-wedges.



Polygons around and over a peat bog in Tamur,
western Siberia

Ледяные жилы: Сибирь



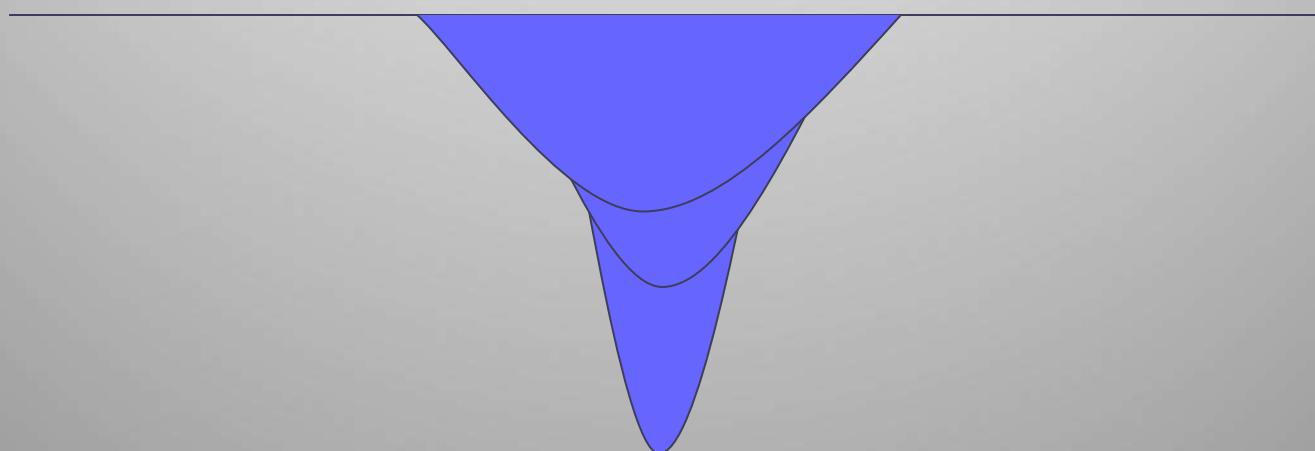
Ледяные жилы: Сибирь



Ледяные жилы: Сибирь

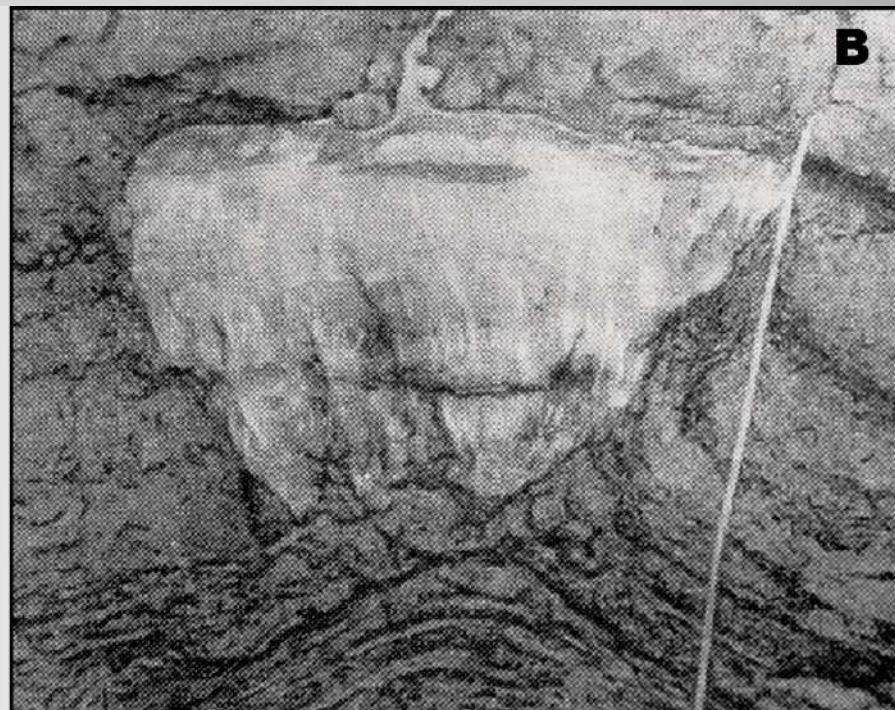


Рост и развитие ледяных жил



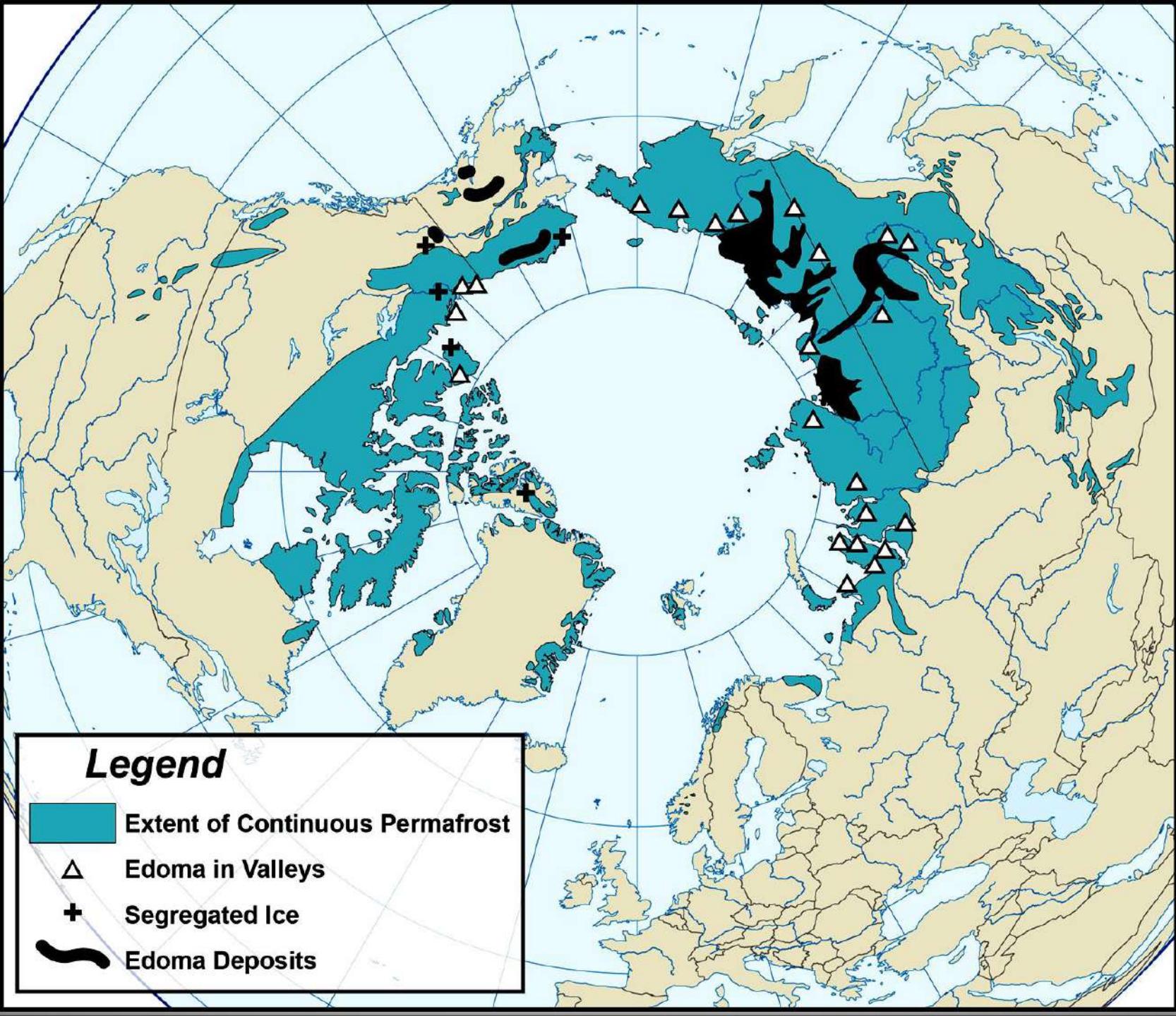
«Всплытие» в повторно-жильных льдах.

Ice-wedge structures featuring vertical flow. A. The ice complex exposed in a 20 m cliff on Big Lyakhovsky Island (M. Grigoriev, with permission). B. An ice-wedge (0.8 m high) on the Yana River terrace showing deformation of the underlying beds (Kostyaev, 1965).



Мощные повторно-жильные льды (ледовый комплекс) : Сибирь

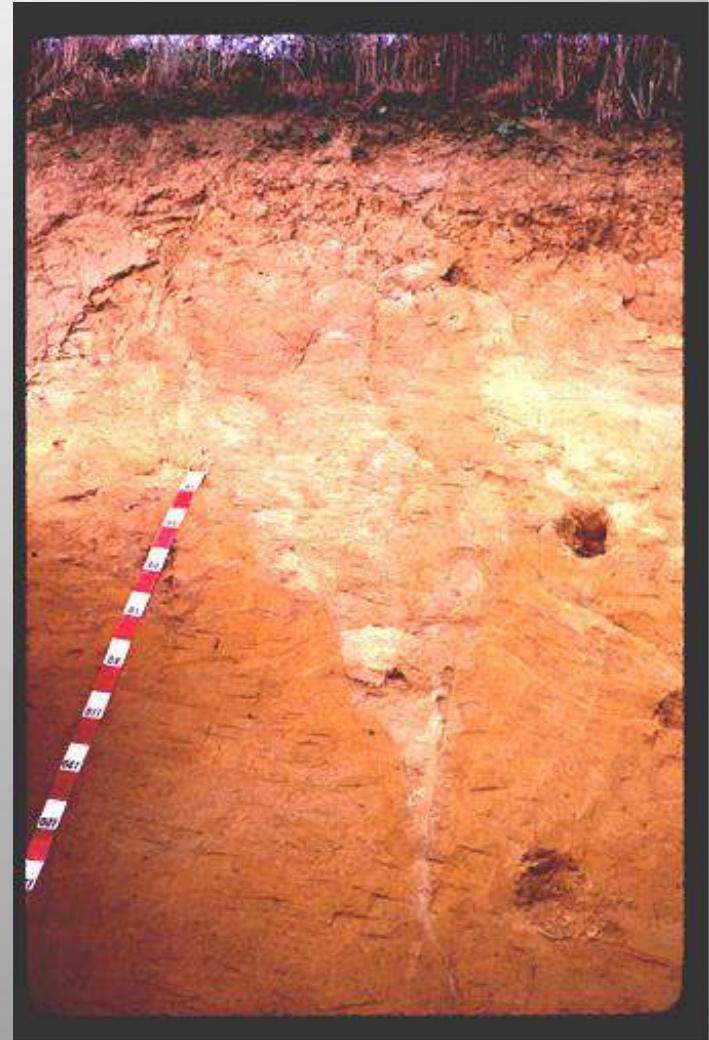




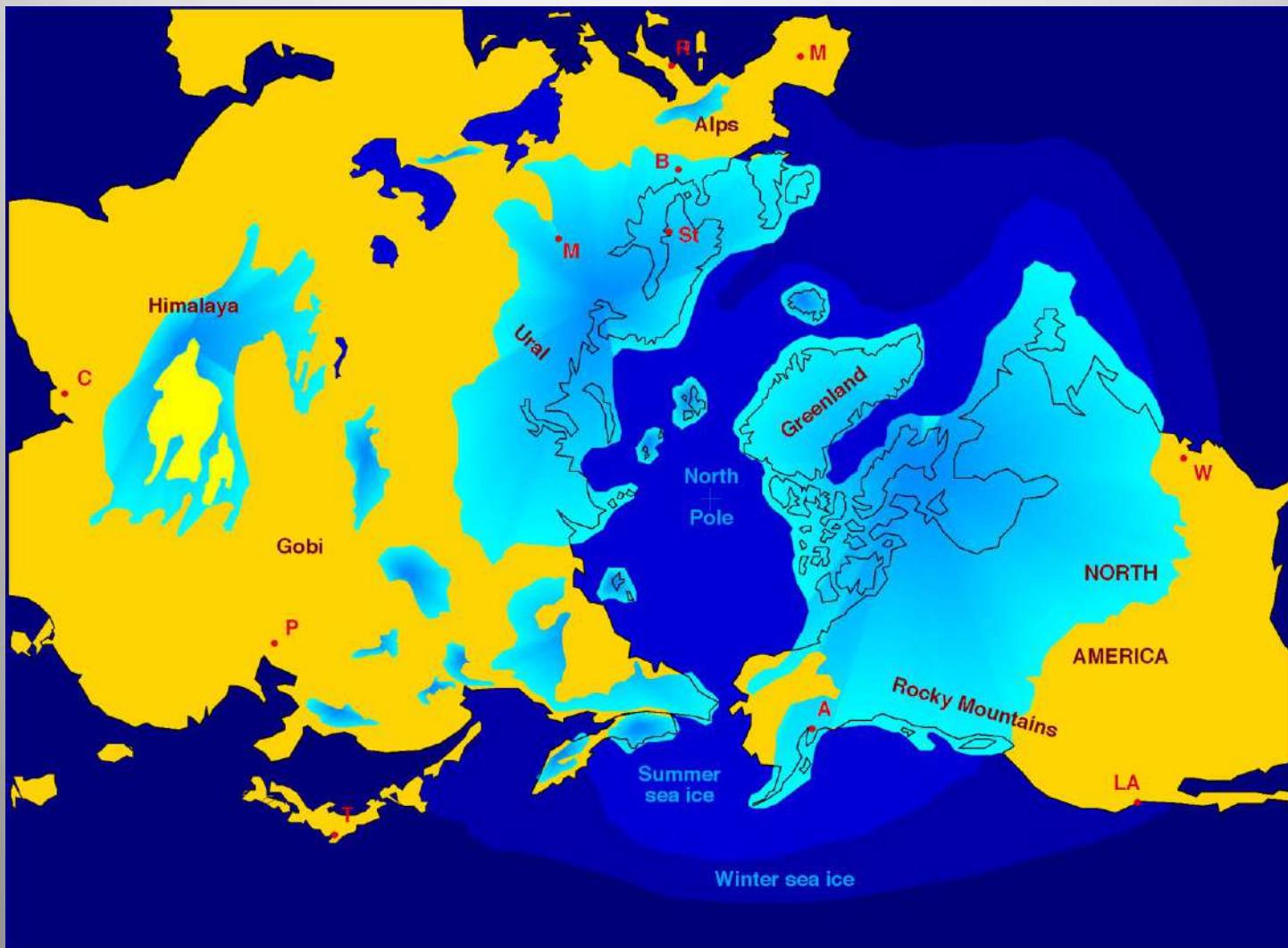
Legend

- Extent of Continuous Permafrost
- △ Edoma in Valleys
- + Segregated Ice
- ━ Edoma Deposits

Псевдоморфозы (касты) Ice-wedge casts



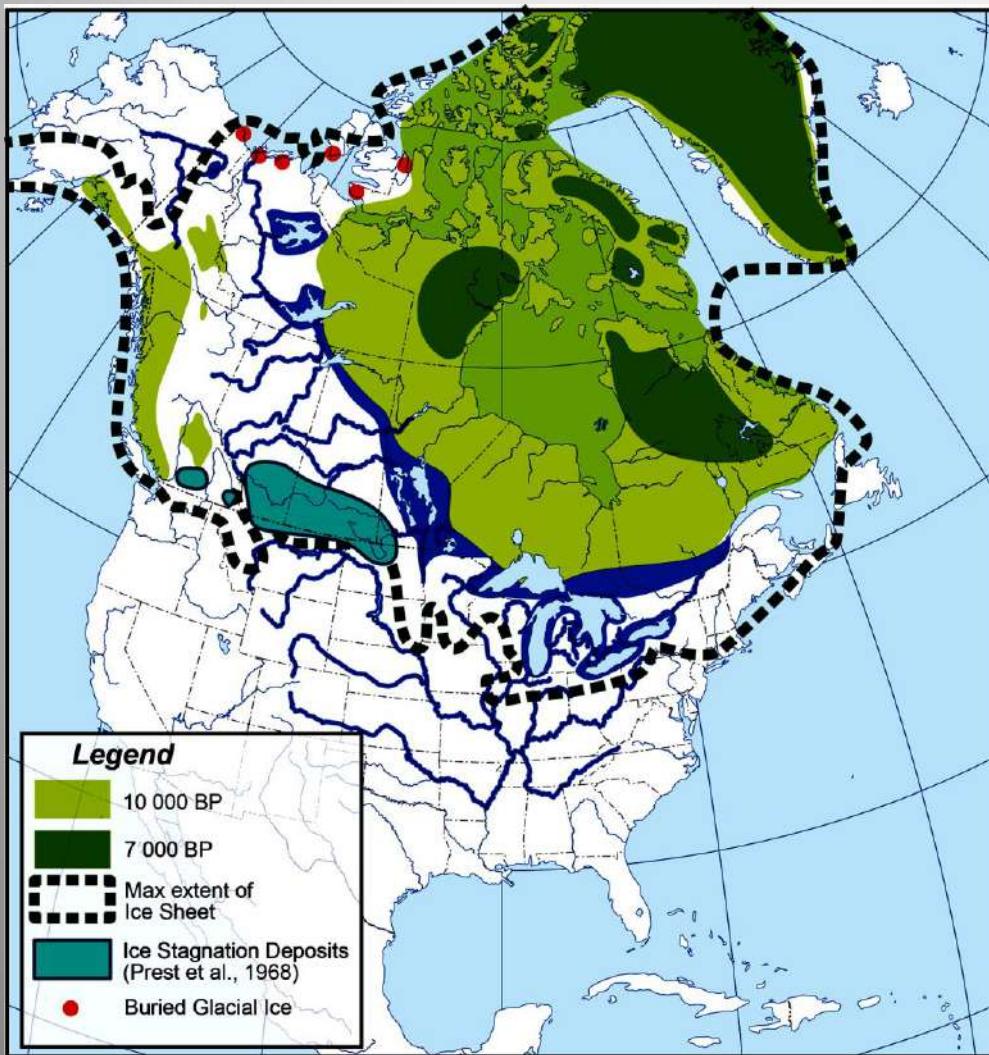
Ледяной покров в плейстоцене



Northern Hemisphere glaciation during the Last Glacial Maximum. The creation of 3 to 4 km (1.9 to 2.5 mi) thick ice sheets equate to a global sea level drop of about 120 m (390 ft).

Захороненные льды

Distribution of buried glacier ice and ice stagnation deposits in relation to the ice margins and two retreat stages of the former Laurentide Ice Sheet in North America.)



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% (Mackay, 1971)

Основные концепции происхождения пластовых льдов

Пластовые льды: Сибирь







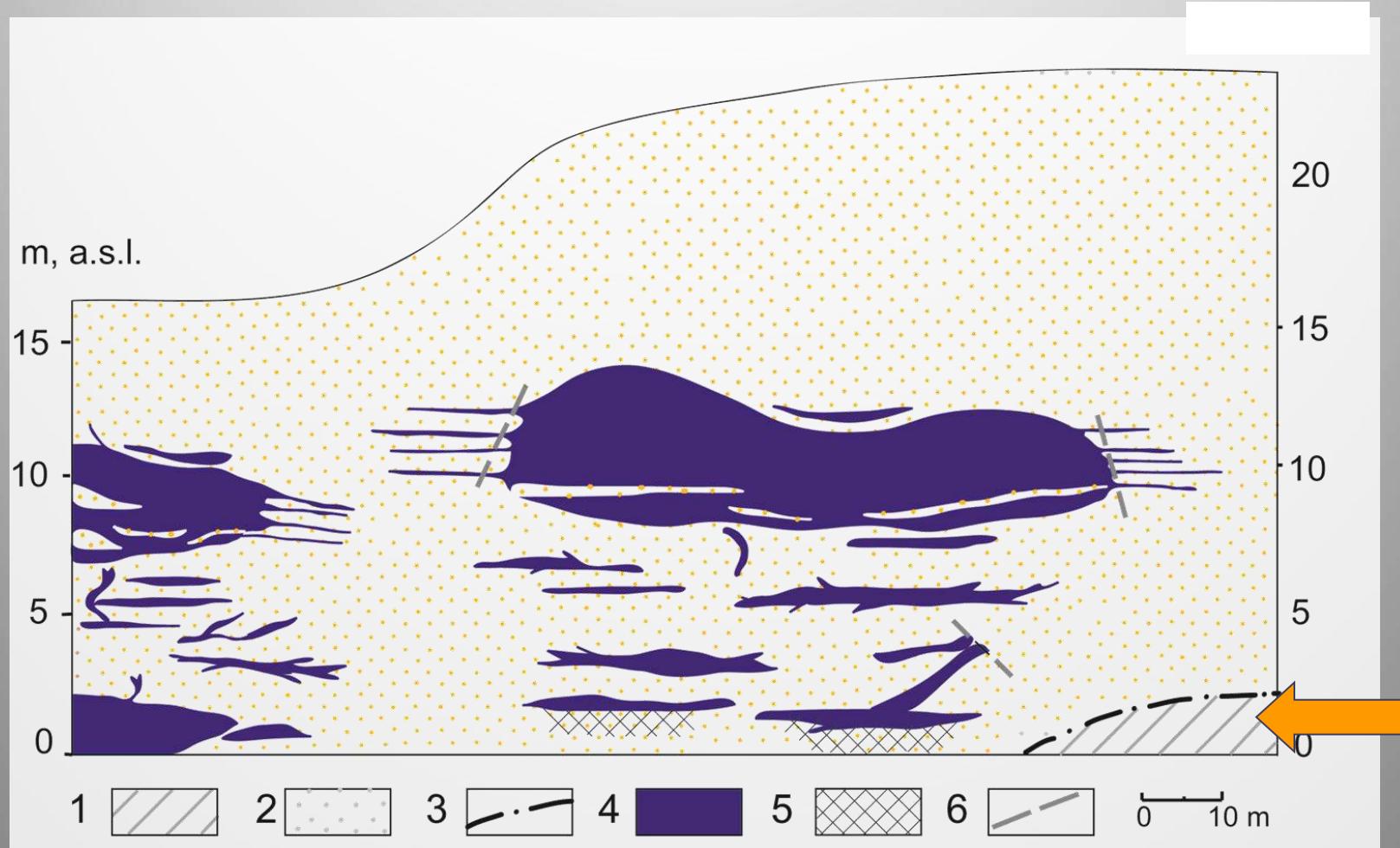


База данных «Пластовые льды» (Streletskaya et al., 2001)
<http://www.geogr.msu.ru/cafedra/cryo/nauchd/napr/ice/>

Строение и состав отложений и пластовых льдов ключевых участков

Западное побережье Байдарацкой губы

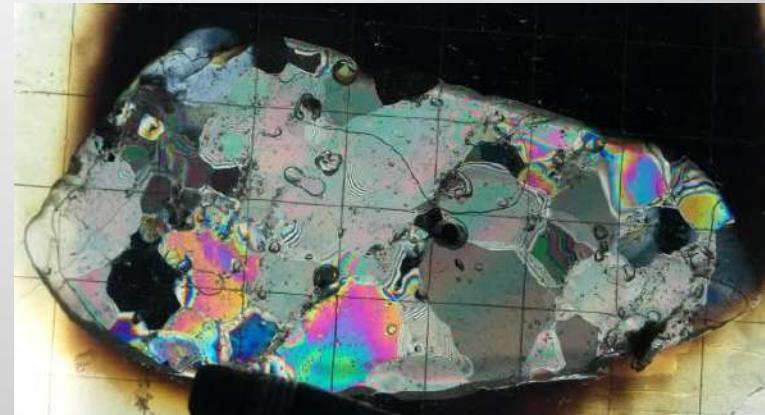
Состав и строение отложений, вмещающих пластовые льды



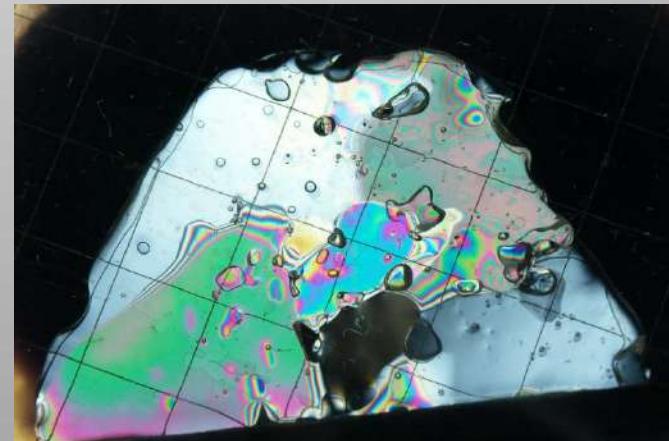
Западный Ямал, пос. Харасавэй

Строение, химический и изотопный состав пластовых льдов

Строение льда



Стекловидный лёд с редкими грунтовыми прослойками

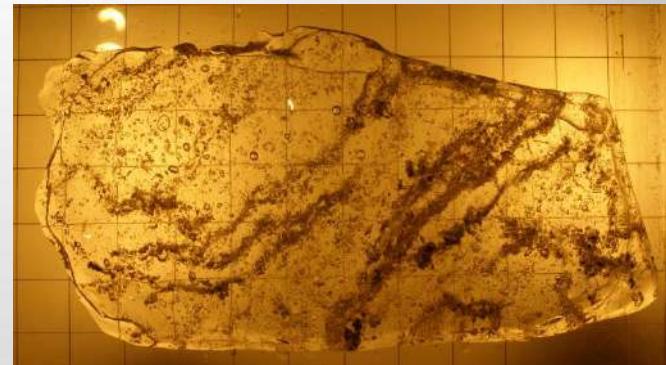


Пузырчатый лёд

Строение пластовых льдов



Слоистый лёд



Слоистый деформированный лёд
(шаг сетки 1см)



Пузырчатый лёд

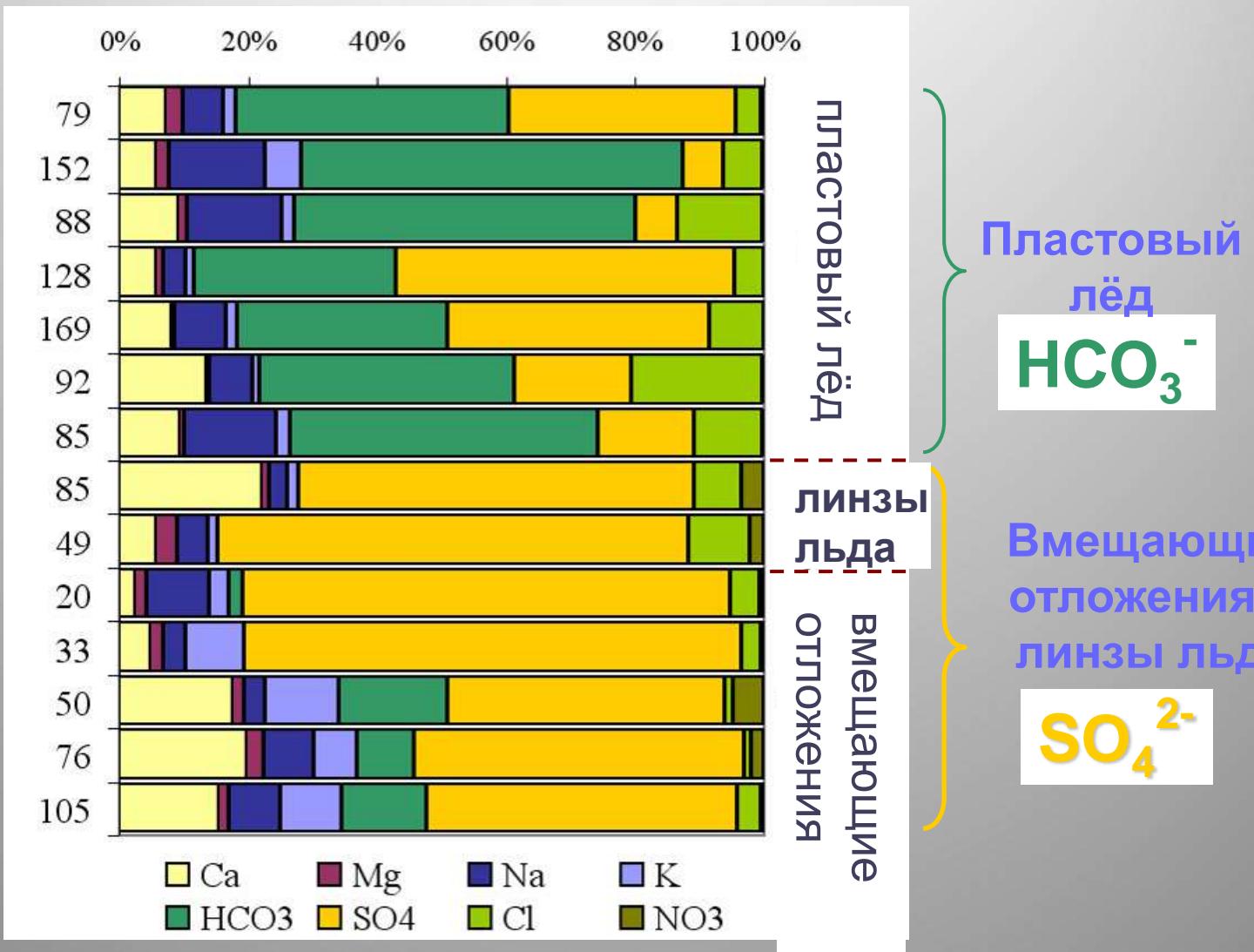


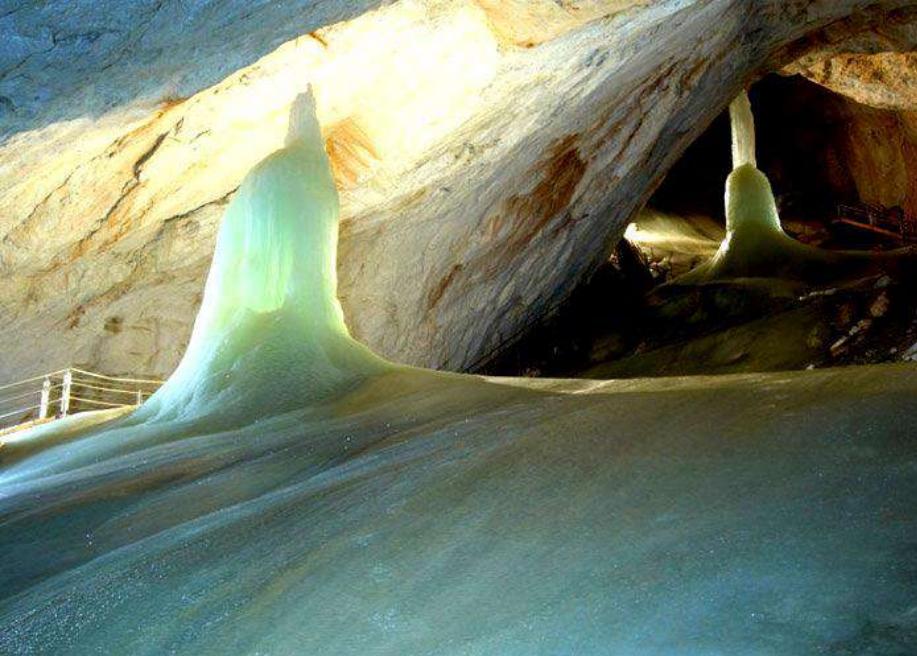
Стекловидный лёд с
глинистыми прослойками

Складки в пластовых льдах



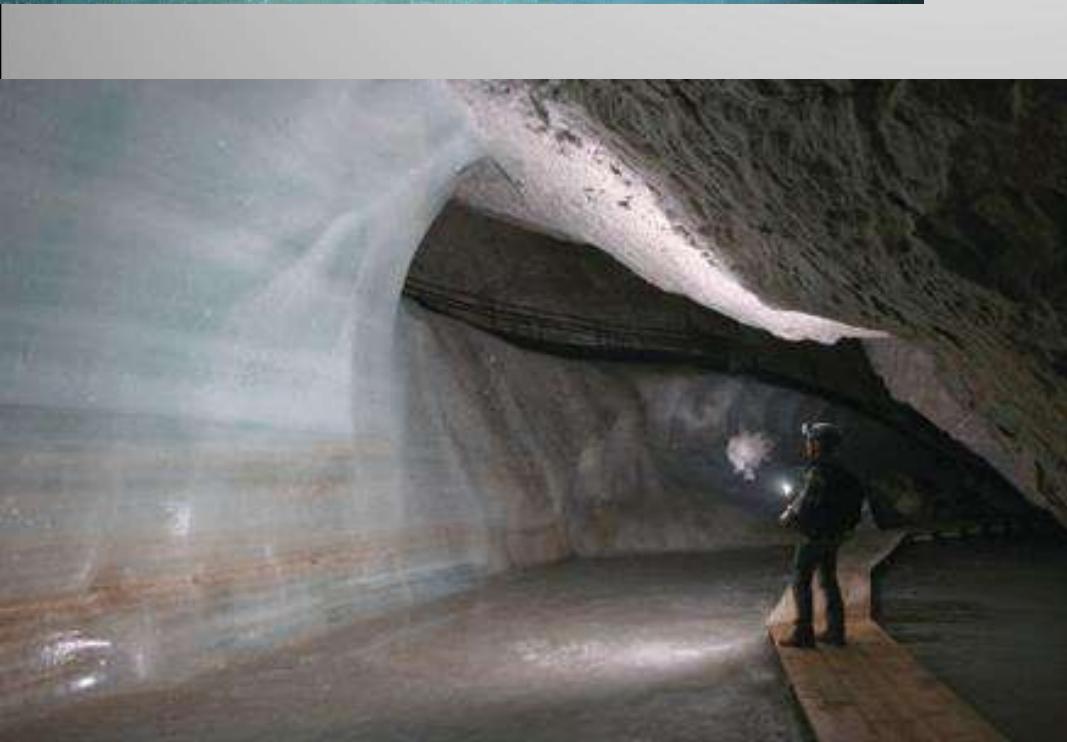
Химический состав пластовых льдов и водной вытяжки из вмещающих отложений (2006)





Ледяные образования
в пещерах:

Ледяные сталагмиты
(вверху) и слоистый
лед



Banded ice coating the
walls of Werfen Cave,
Austria

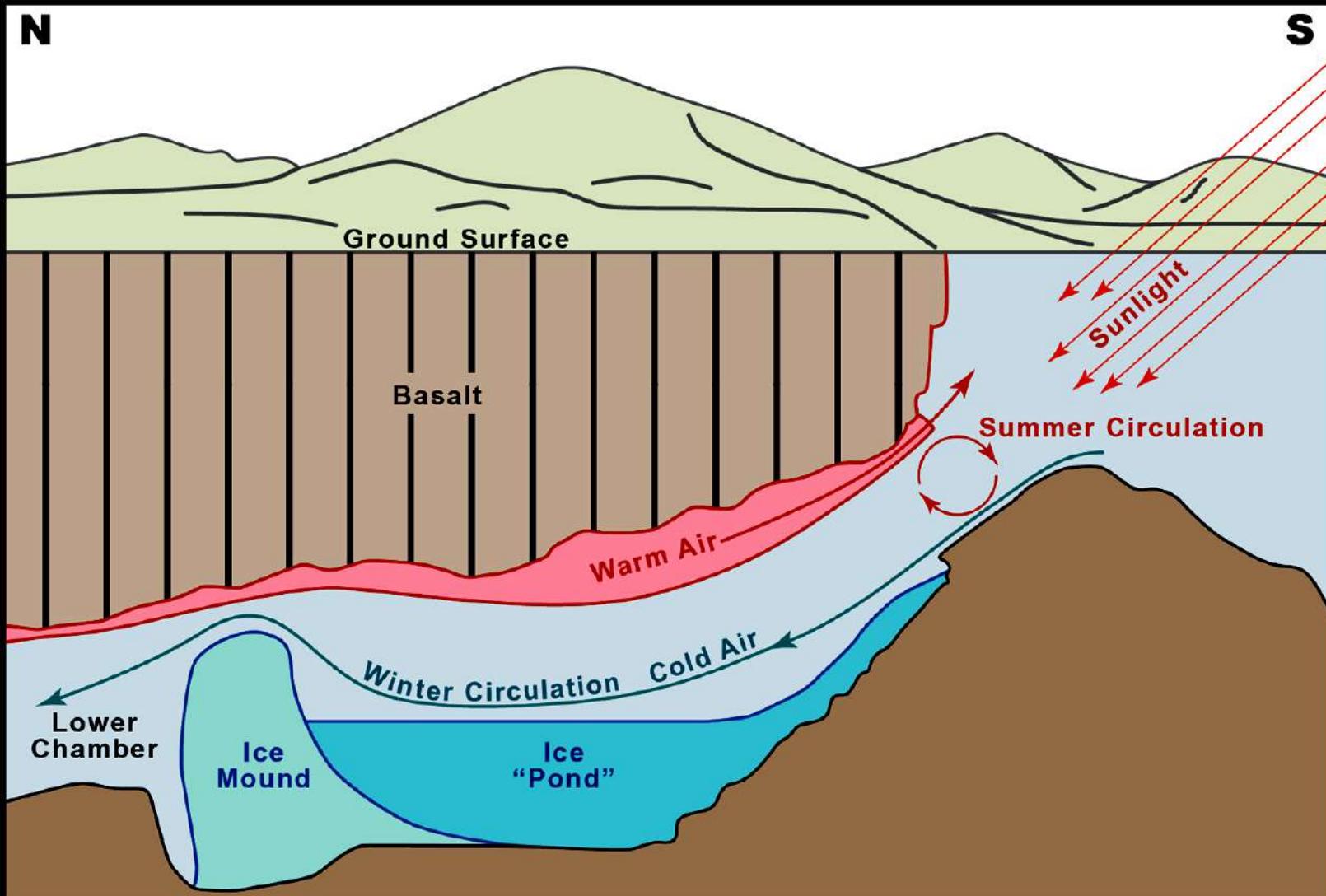
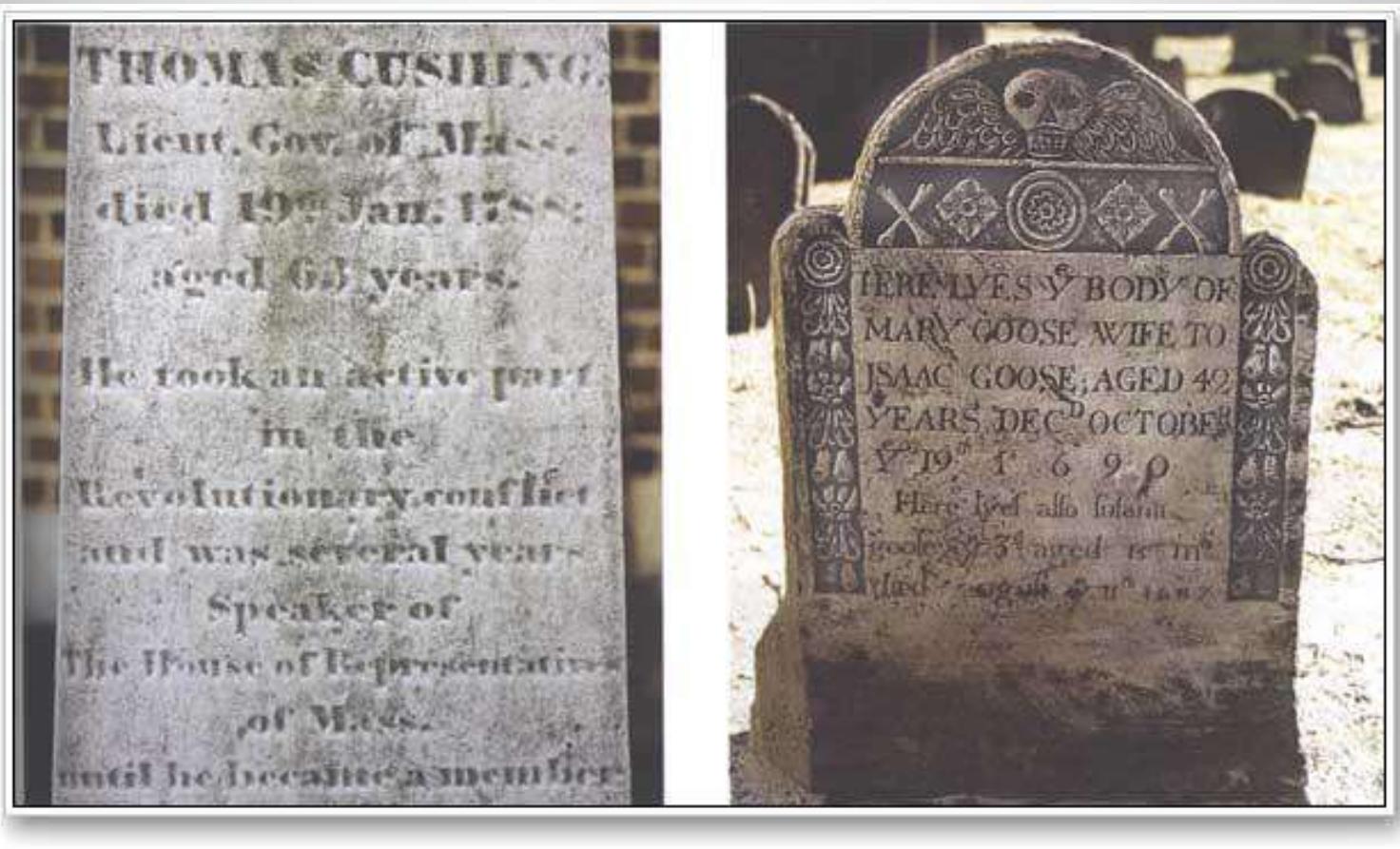


Diagram showing the pattern of air movement and ice accumulation in Candelaria Ice Cave, New Mexico
(modified from Dickfoss et al., 1995).

Морозное выветривание



These weathered tombstones are from a burying ground in Boston, Massachusetts. The marker on the left, carved in marble, has been strongly weathered, weakening the lettering. The marker on the right, made of slate, is much more resistant to erosion.

Морозное (криогенное) выветривание

Konishchev (1998, p. 591) developed a *cryogenic weathering index (CWI)* calculated as follows:

$$\text{CWI} = \frac{Q_1 / F_1}{Q_2 / F_2}$$

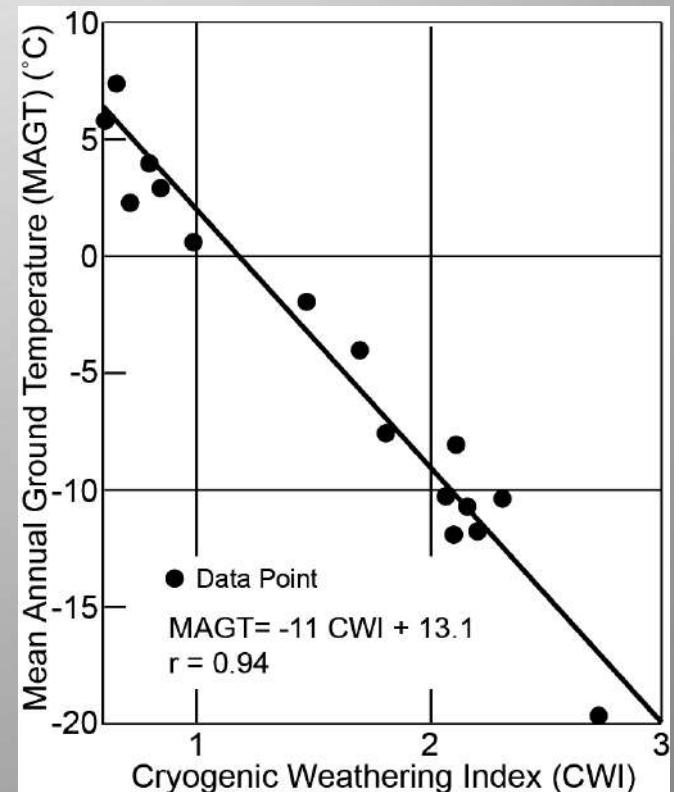
Where:

Q_1 is the quartz content (%) in the 0.05 to 0.01 mm fraction.

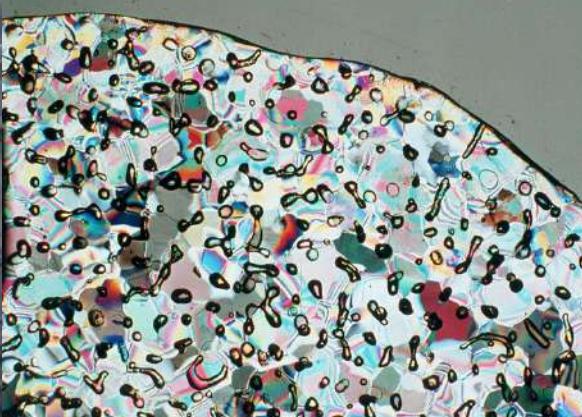
F_1 is the feldspar content (%) in the 0.05 to 0.01 mm fraction.

Q_2 is the quartz content (%) in the 0.1 to 0.05 mm fraction.

F_2 is the feldspar content (%) in the 0.1 to 0.05 mm fraction.



Ледниковый лед (глетчерный)



a alamy stock photo

EDOPIR
www.alamy.com

Лед водоемов – речной, морской (конжеляционный)



Термокарст

- Содержание льда в горных породах
- Поверхностные воды
- Тепловой режим
- Растительность и ее изменение
- История и время

Термокарст: Сибирь



Stages of thermokarst process



Былар



Дюедя



Тымпы



Алас

Термокарст: Сибирь





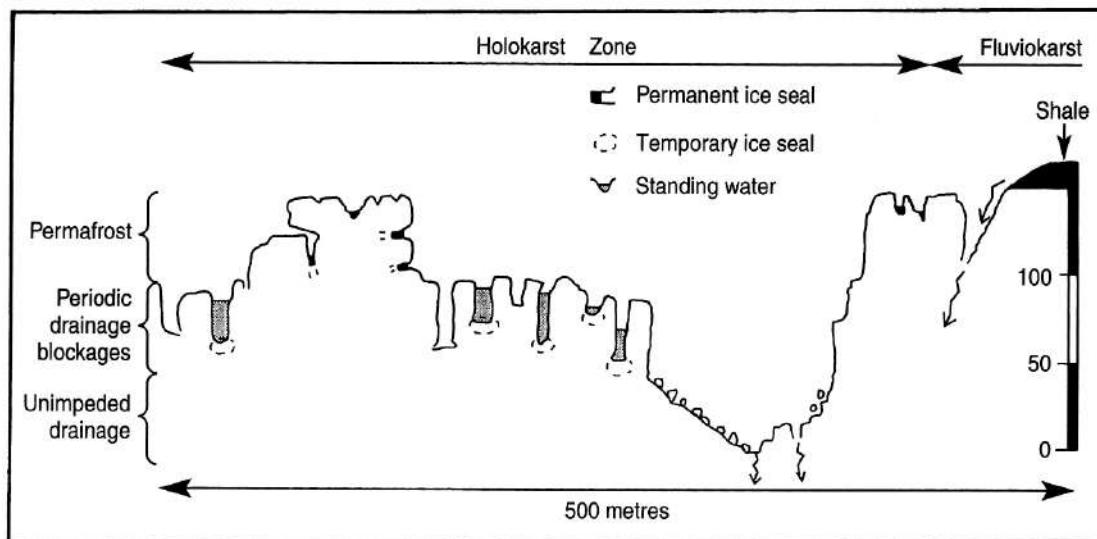
Четковидное
русло реки



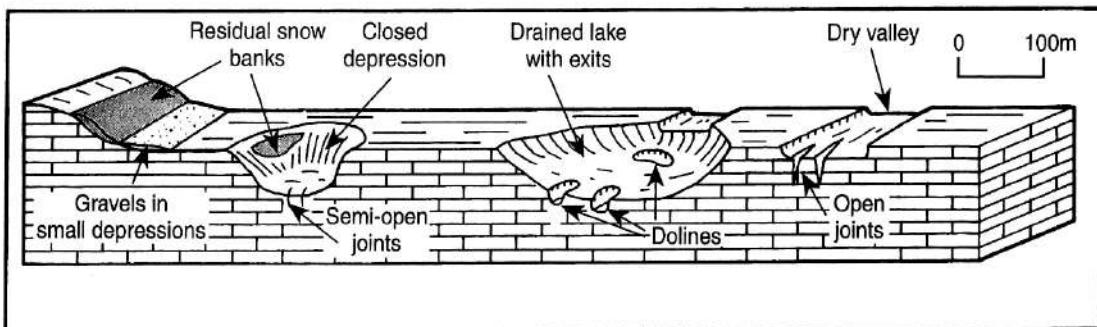
Photograph by Bernhard Edmaier

Карст в криолитозоне

(a)

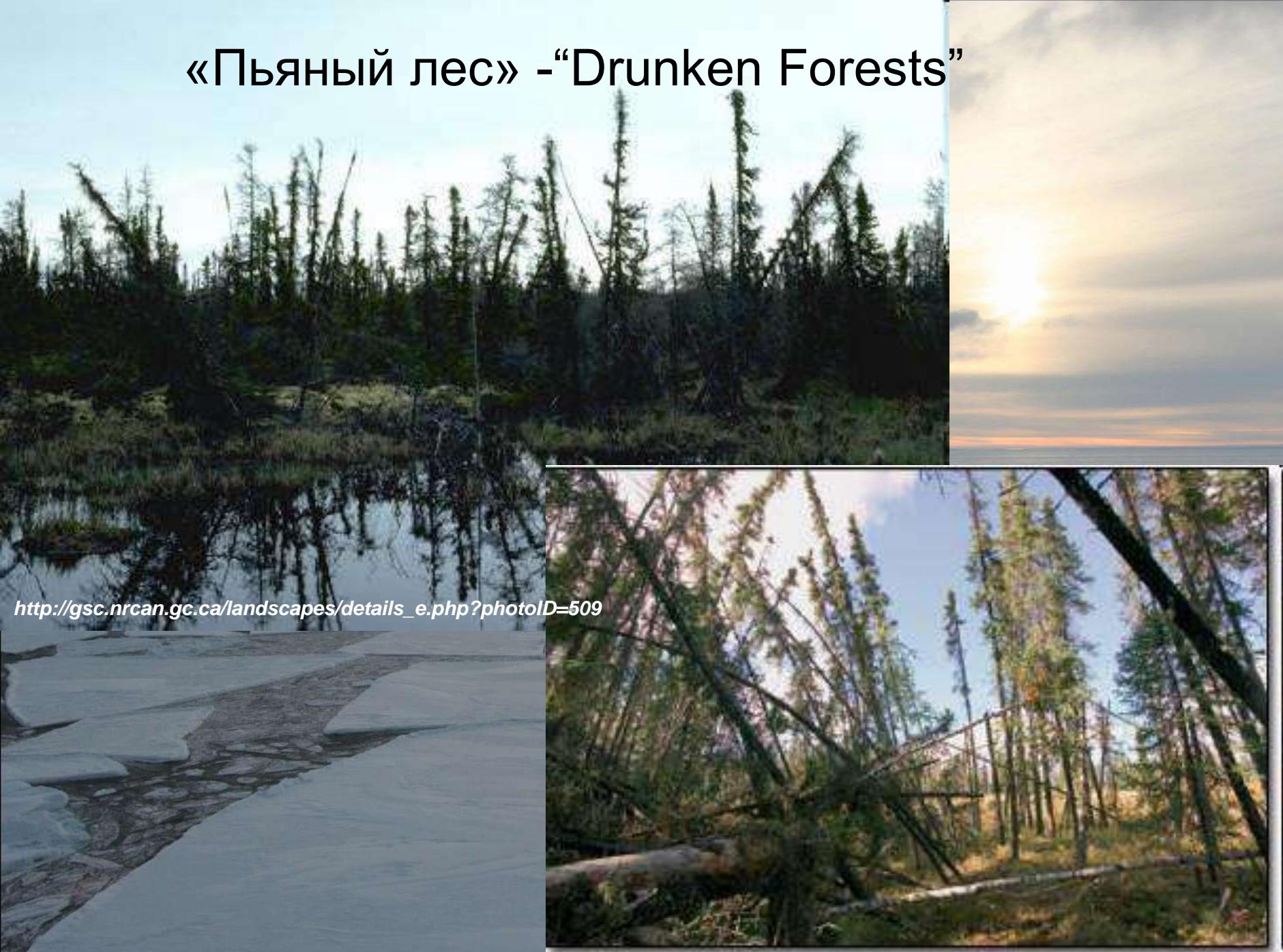


(b)



Karst features (a) in Nahanni, Northwest Territories (after Ford, 1987)), and the Great Bear Lake region (after van Everdingen, 1981), and (b) Akpatok Island, Northwest Territories (from Lauriol and Gray, 1990).

«Пьяный лес» -“Drunken Forests”



http://gsc.nrcan.gc.ca/landscapes/details_e.php?photoID=509

<http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=172095>

Байджерахи:



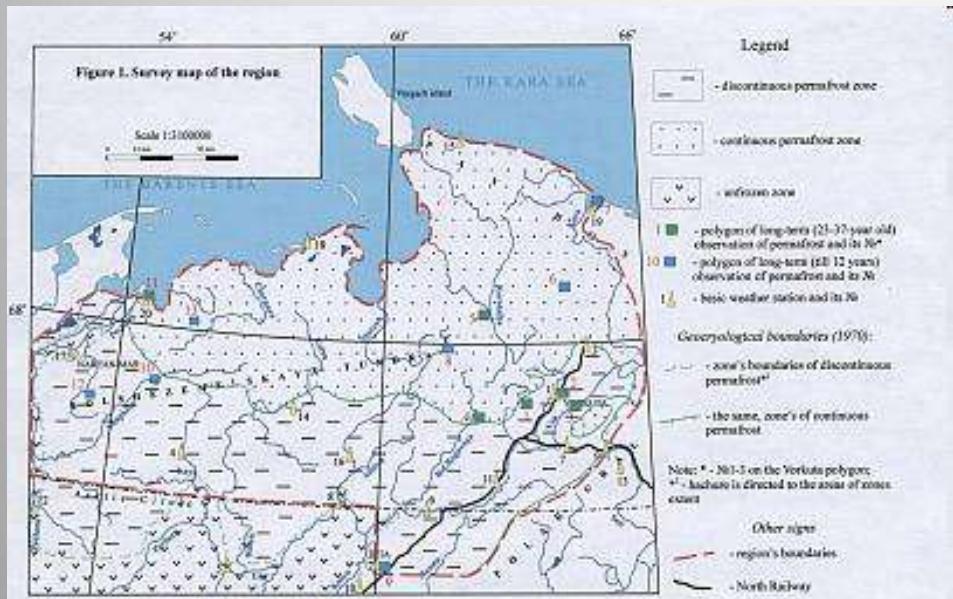
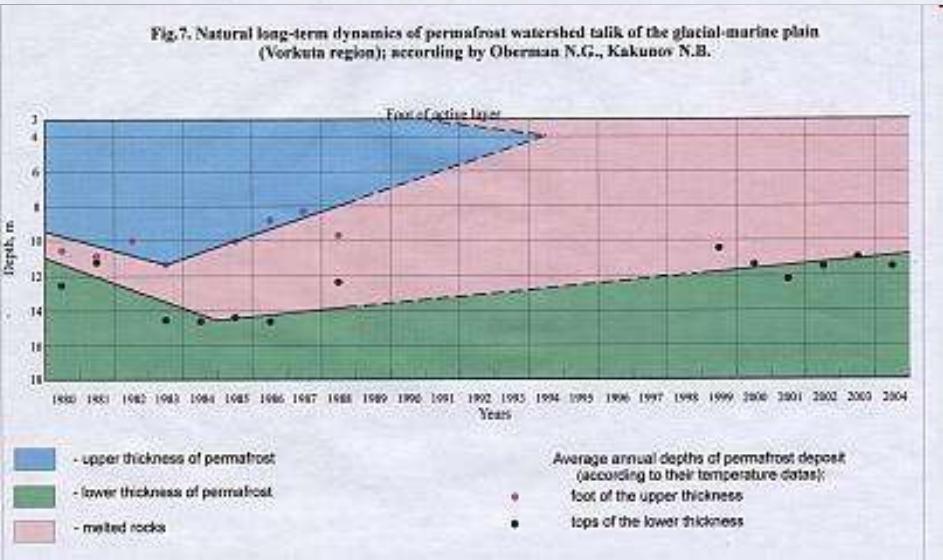
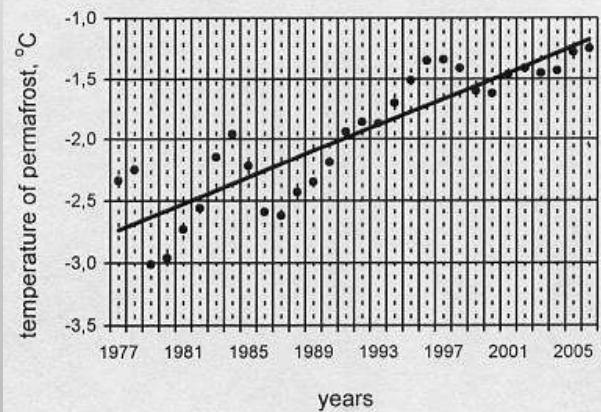


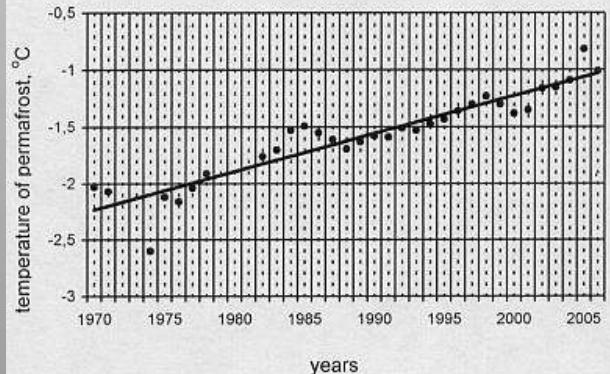
Fig.7. Natural long-term dynamics of permafrost watershed talik of the glacial-marine plain (Vorkuta region); according by Oberman N.G., Kakunov N.B.



Polygon 1. Borehole ZS-124



Polygon 1. Borehole ZS-14/227







Vorkuta is situated in the southern part of cryolithozone in the Eastern Plain, within the zone of discontinuous and non-anchored permafrost distribution. Engineering techniques of building on the icy peaty loams in such conditions are very complicated even nowadays. However the house have been built some 40 yrs ago without ventilated cellars or any mean of permafrost basement preservation. Results are multiple cracks due to unequal subsidence of the quarter of the house. Engineering solution of the problem was to strengthen the building on the whole by reducing the area of windows which are the zones of weakness. To make subsidence rates lower the subsiding part of the building was connected with metal rods around the perimeter.





Слева - участок Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, подверженный деформации из-за неравномерной просадки и пучения грунта.

Справа - Деформация здания заброшенной воинской части в низовье Енисея за счет неравномерного вытаивания подземного льда. Фото Д.С. Дроздова.





Joe Moore, State Soil Scientist (retired) USDA-NRCS



Деформации на взлётно-посадочной полосе аэропорта Инутика. Фото правительства Канады 2013 года



Всплытие трубопроводов



Деформации трубопроводов



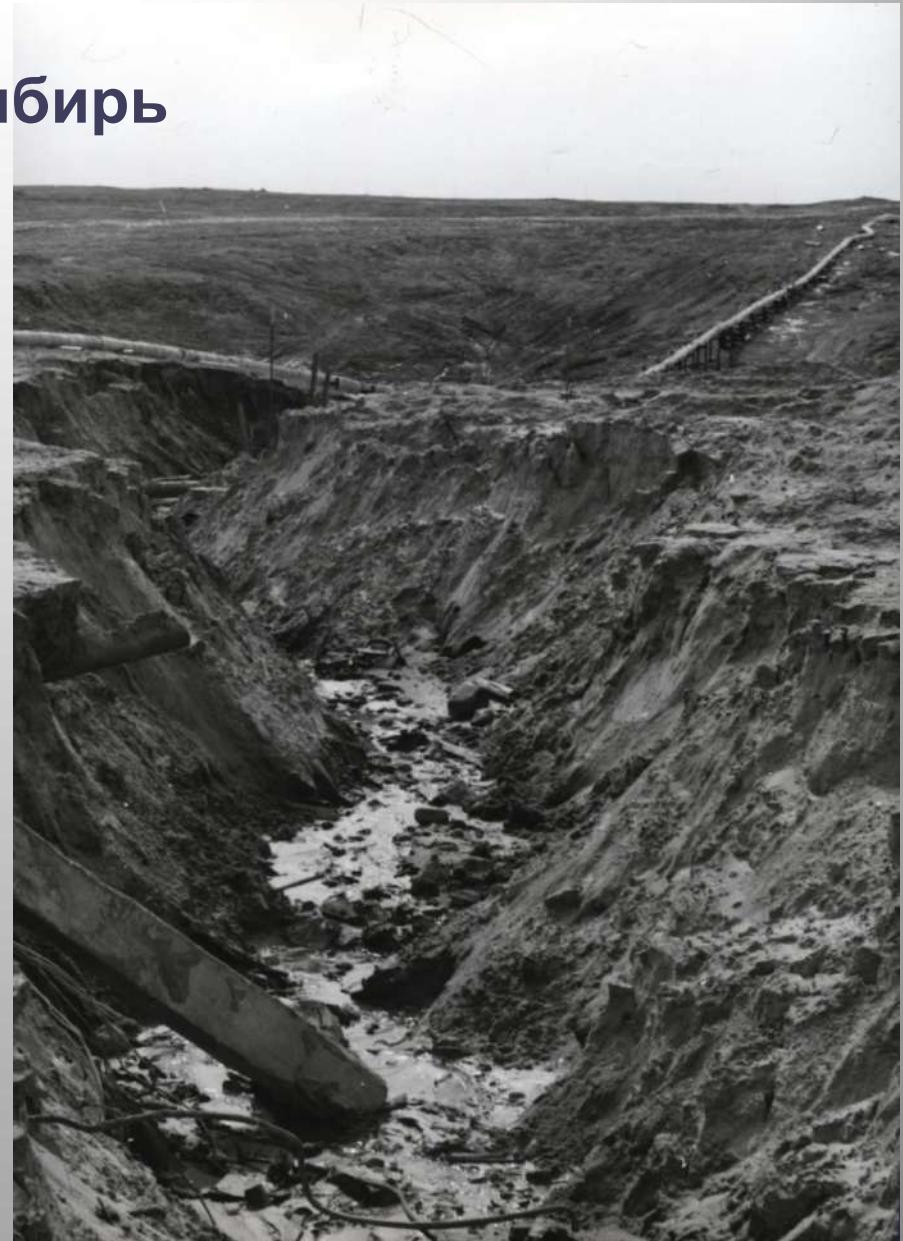
Деформации трубопроводов



Рис. 14. Обрушившаяся в результате ослабления фундамента секция здания в поселке Черский. Фото В.Е. Романовского.

Деформации зданий (п.Черский)

Термоэрозия: Сибирь



Термоабразия: Сибирь



Baydara Bay, Yugorsky (western) coast: 3 m height proposed site



Склоно́вые проце́ссы в криолито́зоне

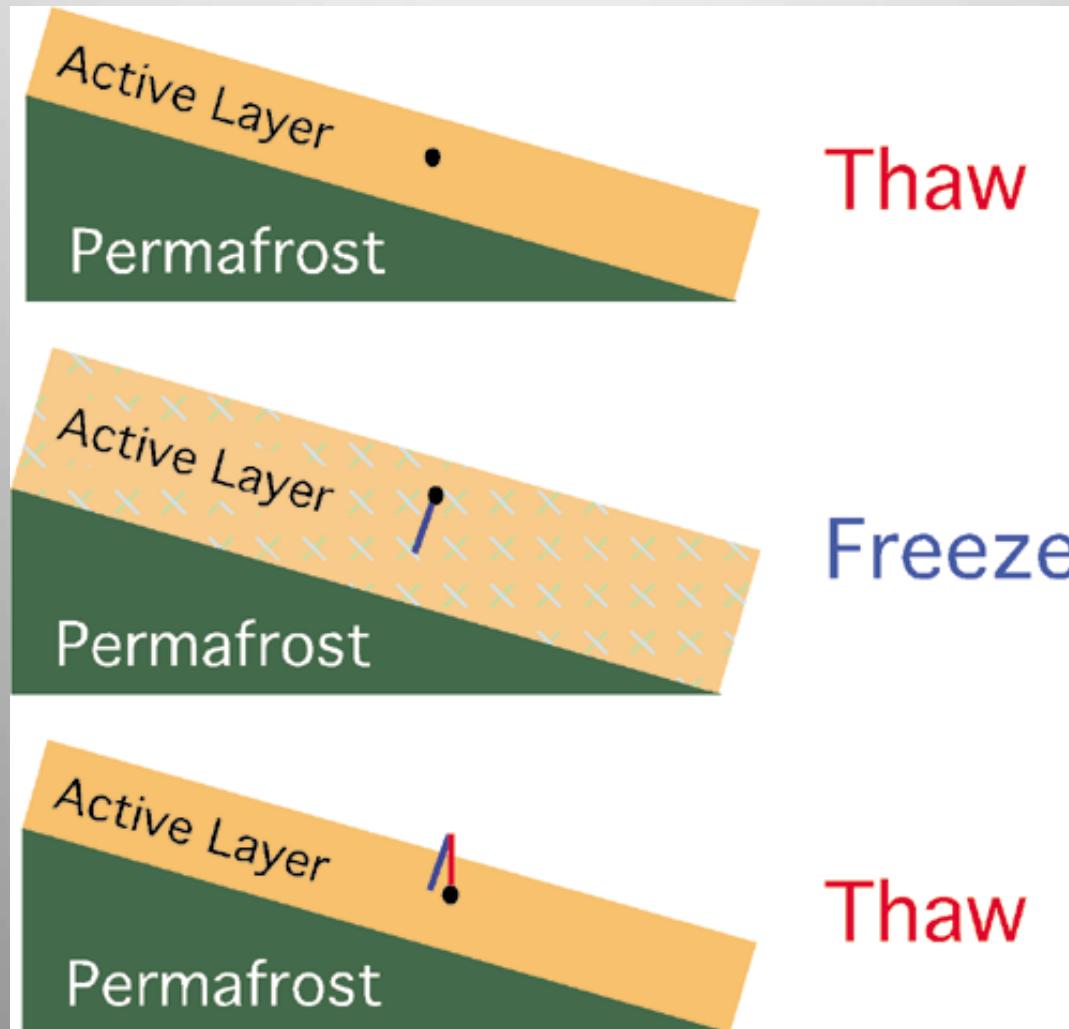
В холодных регионах **криогенный крип** (*cryogenic creep*) может являться следствием деформации пород в результате промерзания, движения порового льда и незамерзшей воды.

Иногда обнаруживаются признаки **термогенного крипа** (*thermal creep*) — движения в результате изменения температуры — отложений, подвергаемых суточному нагреву и охлаждению.

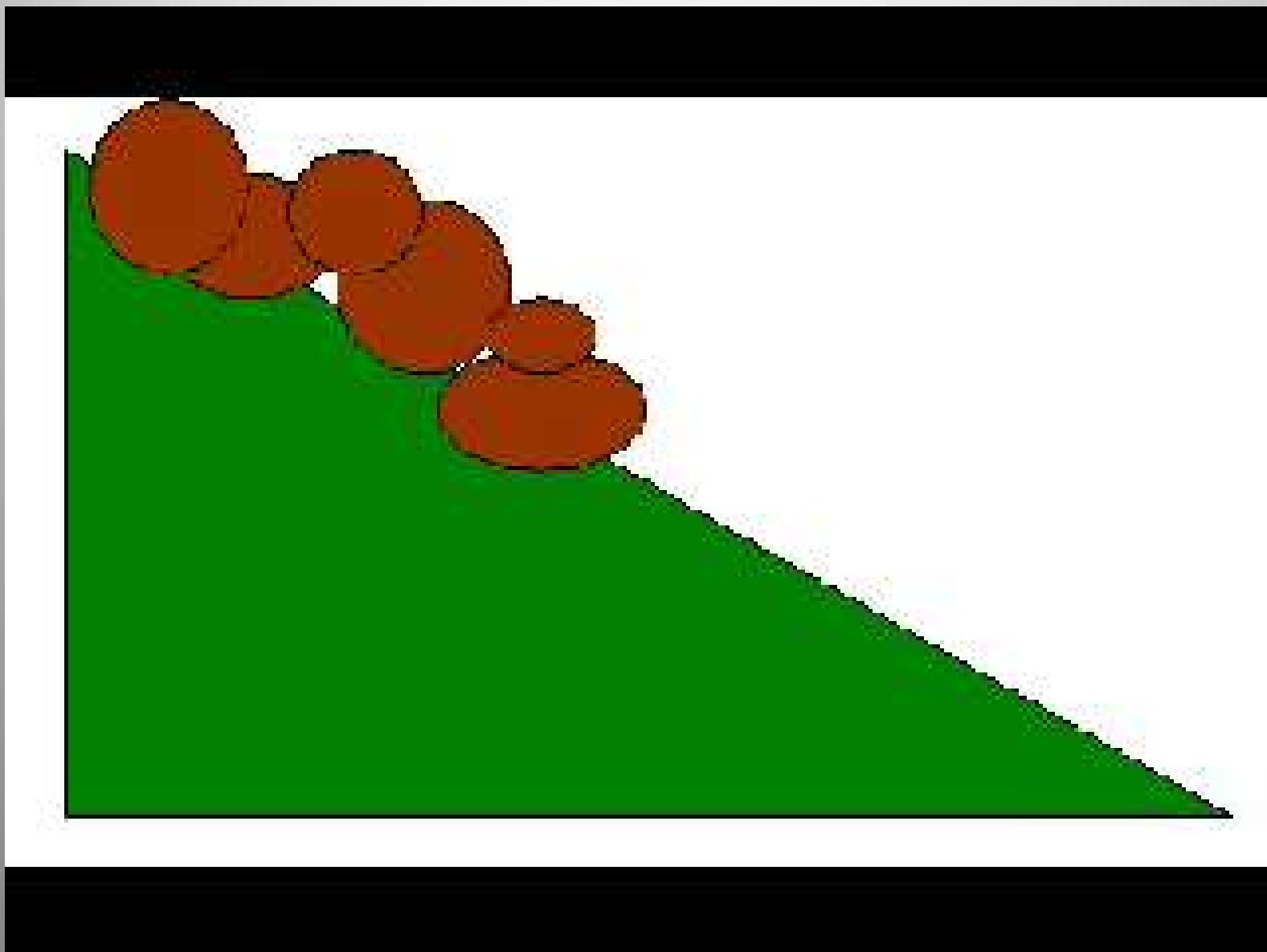
Можно выделять, по аналогии с термогенным крипом, также и **гидрогенный крип** (*hydro creep*), возникающий при изменении влажности отложений и соответственных изменений их объёма.

Промерзание может привести к двум основным типам криогенного крипа. Криогенный крип включает как **морозный крип** (*frost creep*), так и **крип за счёт игольчатого льда** (*needle ice creep*). Крип за счёт игольчатого льда эффективен на поверхности во влажном морском климате из-за сезонного промерзания и многочисленных суточных циклов промерзания-оттаивания. Морозное пучение — причина морозного крипа, обусловленная образованием ледяных линз 1 м в слое сезонного промерзания и протаивания.

Морозный крип, или (десерпция) (медленное сползание из-за изменения объёма пород, в том числе из-за промерзания-оттаивания (frost creep))



Крип



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

Склоно́вые процессы:
Солифлю́кция (лат. *solum* — почва и *fluctio* —
истечение) — течение по склону талой породы,
перенасыщенной водой, по кровле
водонепроницаемых пород





“High above the treeline in Swiss National Park, icy soil warms in the summer sun, slipping over layers of earth like icing dripping down the side of a cake.”

Photograph by Bernhard Edmaier

In geology, **solifluction**, also known as **soil fluction**, is a type of mass wasting where waterlogged sediment – as a rule, after thawing - moves slowly downslope, over impermeable material – normally permafrost. Where the underlying ground is permanently frozen (permafrost) the process is often also called **gelifluction**. Solifluction can occur on slopes as shallow as 0.5 degrees at a rate of between 0.5 and 15 cm per year.

Downhill creep is a similar process which is not dependent upon cycles of freezing.





Рис. 8.4. Гелифлюкция (светлый цвет) по мёрзлым отложениям на высоте 4700 м над уровнем моря на северных склонах Куньлунь Шань (Kunlun Shan), Китай. © S. A. Harris

Проводится различие между **медленной гелифлюкцией** (<1 м/год) и **быстрой гелифлюкцией** (> 1 м/год), а также солифлюкцией.

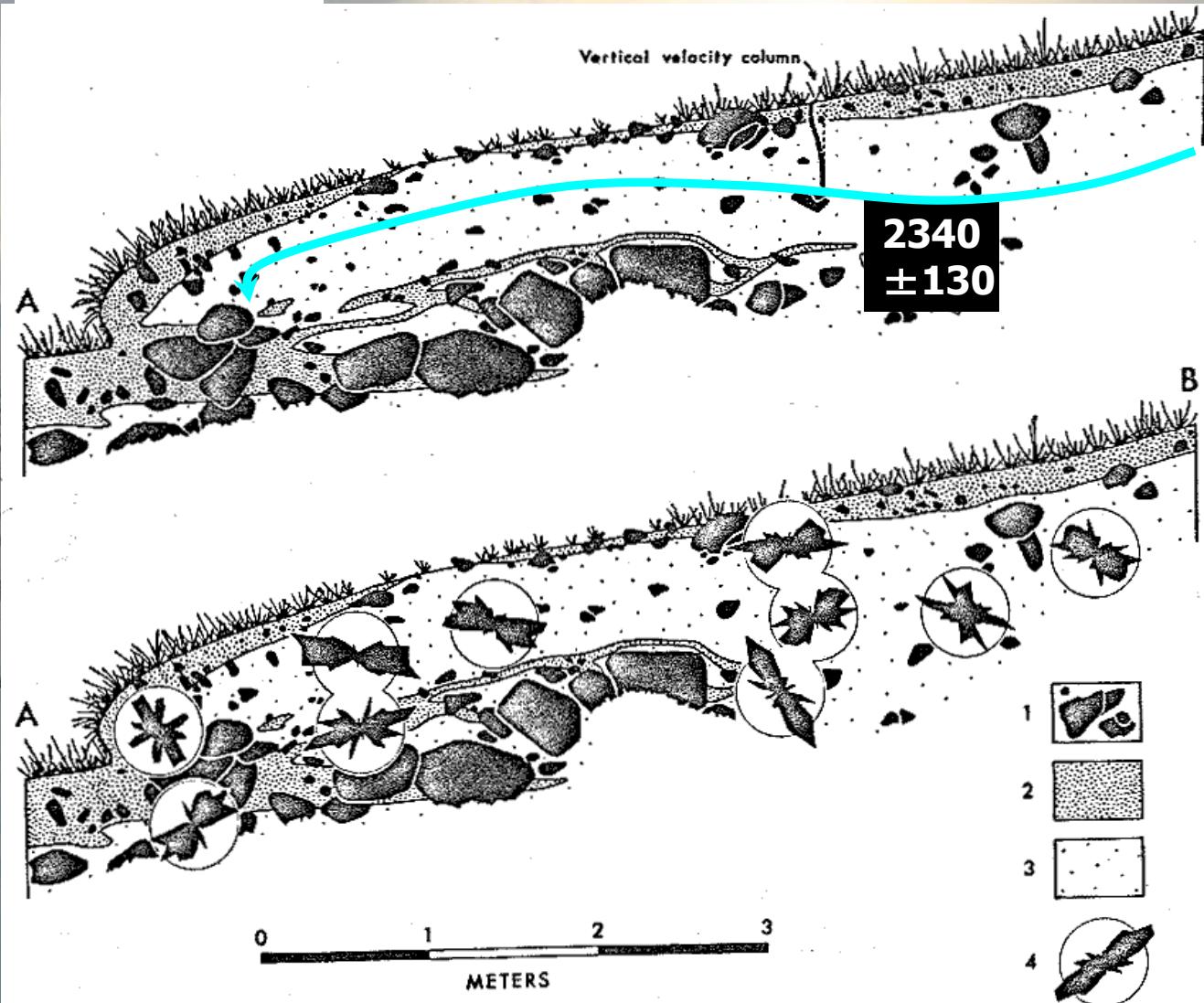


Рис. 8.5. Быстрая гелифлюкция в льдистых пылеватых отложениях, рассекающая тундровую растительность на полуострове Ямал. Она обычно развивается на склонах с углом 5–20° с активным слоем 0,4–1,0 м. © А. Губарьков

Гелифлюкция Gelifluction

Lobes form where well-drained boulders trap finer sediment.

Roll down hill like caterpillar track



Солифлюкционные террасы Solifluction Lobes



Kyrgyzstan



Рис. 8.11. Большой камень примёрз к подстилающей вечной мерзлоте и препятствует течению поверхностного активного слоя. © S. A. Harris

Там, где крупный валун примерзает к подстилающей вечной мерзлоте, он действует как барьер, временно препятствующий гелифлюкции. Поэтому такие валуны называются *тормозящими валунами (braking blocks)*.



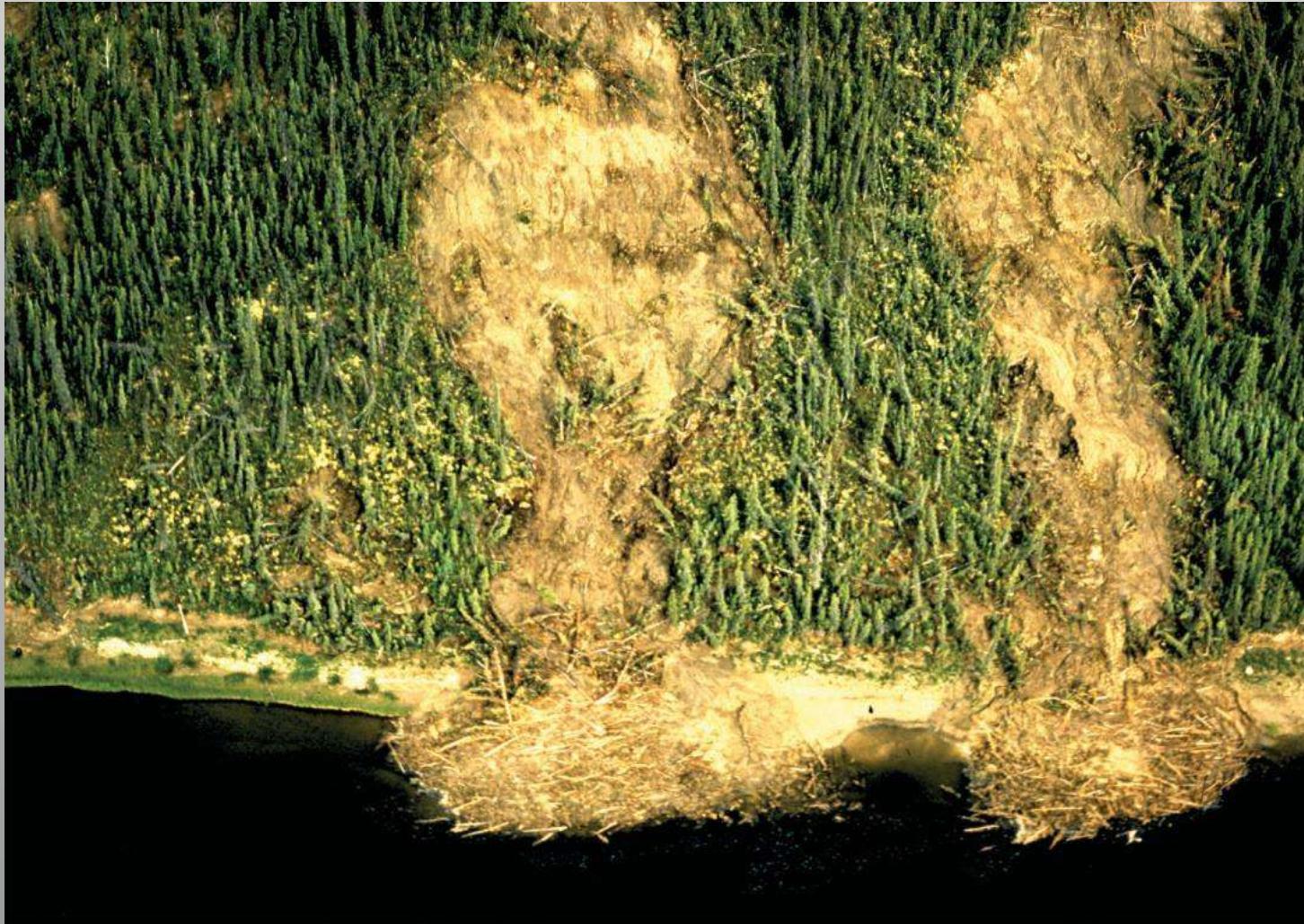
В тех случаях, когда крупные блоки породы находятся в активном слое, испытывающем промерзание, пучение, а также гелифлюкцию, они имеют тенденцию двигаться вниз, выталкивая отложения впереди себя. Эти **пащащие валуны (*ploughing blocks*)** оставляют углубление на поверхности позади них и имеют груду отложений спереди.



Пашущие валуны (*ploughing blocks*) следует отличать от так называемых **движущихся камней (*sailing stones*)**, наблюдающихся, например, в Долине Смерти в США и других местах. Движущиеся камни медленно двигаются по глинистой поверхности высохшего озера, оставляя длинные следы. Долгое время их движение не находило объяснения, порождая множество суеверий.



Рис. 8.18. Грязевой поток (mudflow) в Центральной Якутии, Россия, где они встречаются на склонах от 15–30 °. © А. Брушков



Спливы активного слоя (active layer detachment slides) вдоль озера Клуан, Юкон

Криогенные оползни (скольжения - landslides) - смещение протаявших пород сезонно-талого слоя (СТС) по границе раздела мёрзлое-талое;



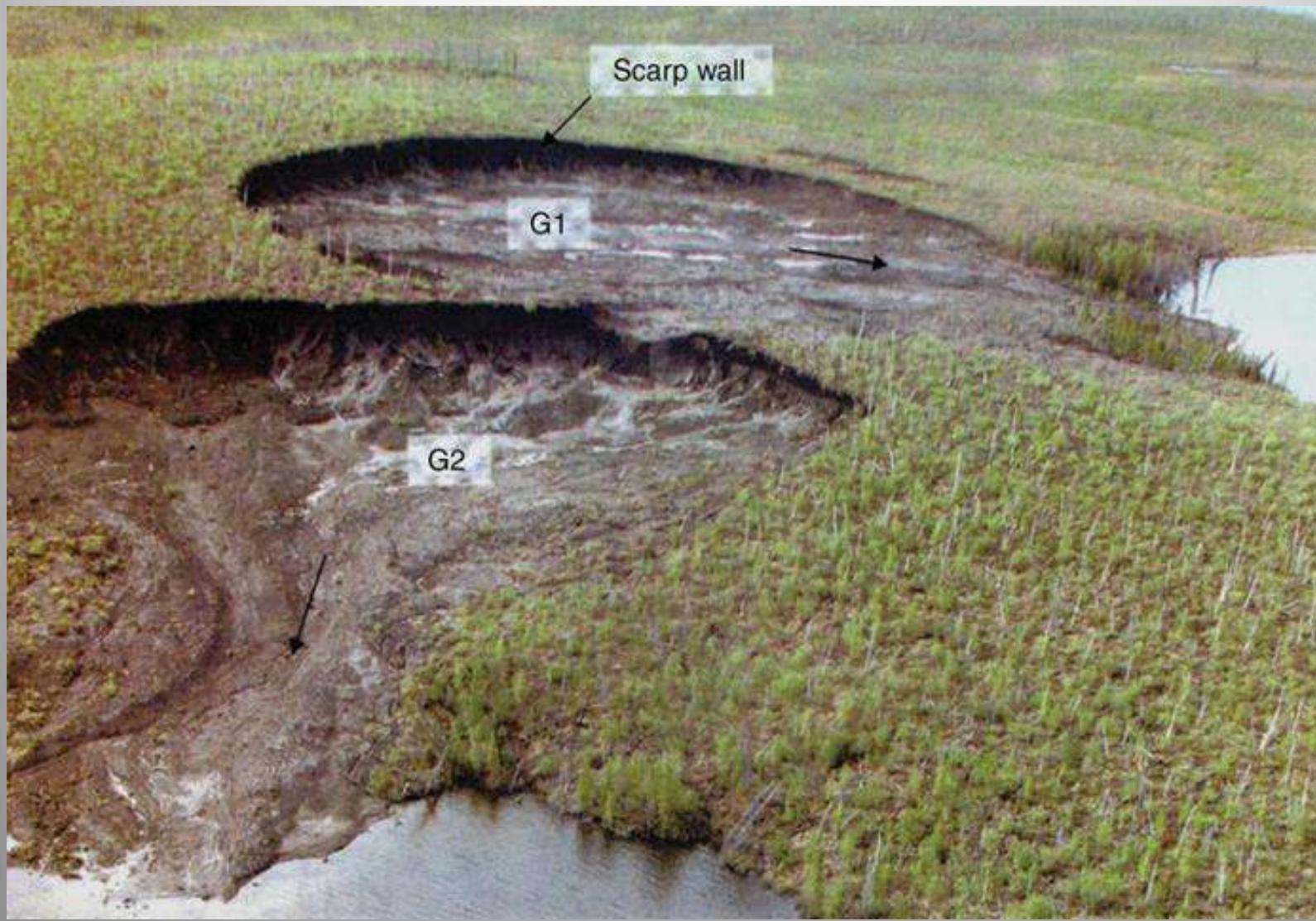


Криогенный оползень.

Если в оползне имеется более одной плоскости движения, то его также называют **оплывиной** (*slump*).



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



Ретрогрессивные оплывины оттаивания вдоль долины реки Маккензи

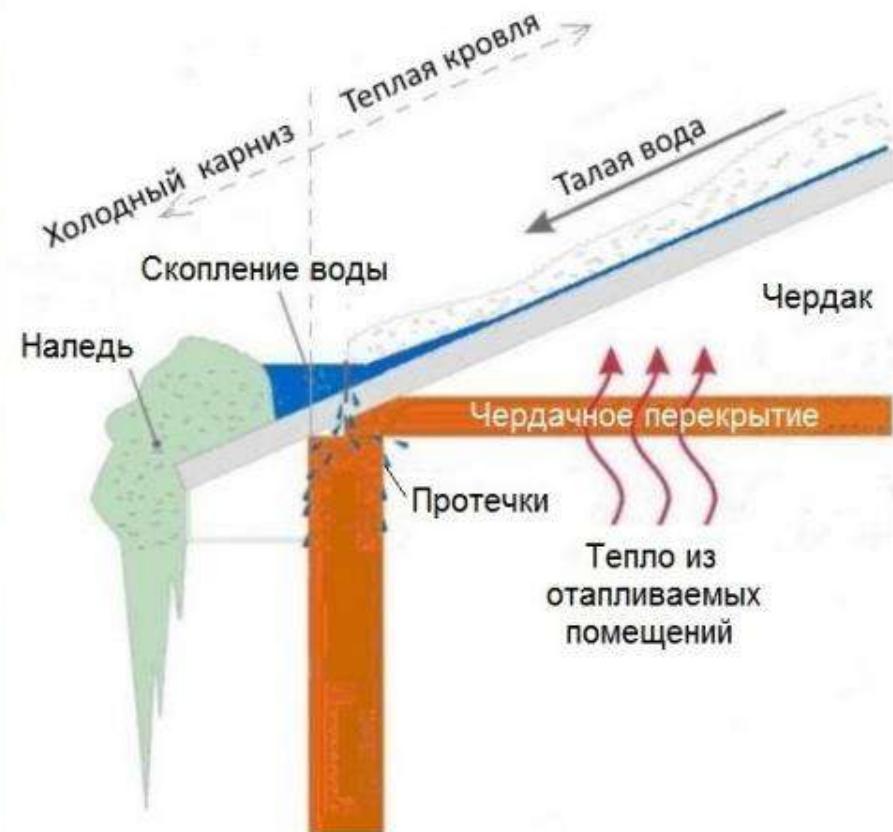
Наледи: Сибирь



Протечки крыши из-за наледи на карнизе



Схема образования зимних протечек



https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Ffacadomia.ru%2Fupload%2F4b2%2Froof_leakages_1.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Ffacadomia.ru%2Farticles%2Fkonstruktsii-i-materialy%2Fways-of-dealing-with-ice-on-the-eaves-and-roof-leaks%2F&tbnid=k8bsN9hhM9IVSM&vet=12ahUKEwidzcPsuYDoAhVCf6wKHbVMDV4QMygAegUIARDKAQ..i&docid=8T2FBXW_GOAYZM&w=1024&h=509&q=%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0%20%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%B8&ved=2ahUKEwidzcPsuYDoAhVCf6wKHbVMDV4QMygAegUIARDKAQ

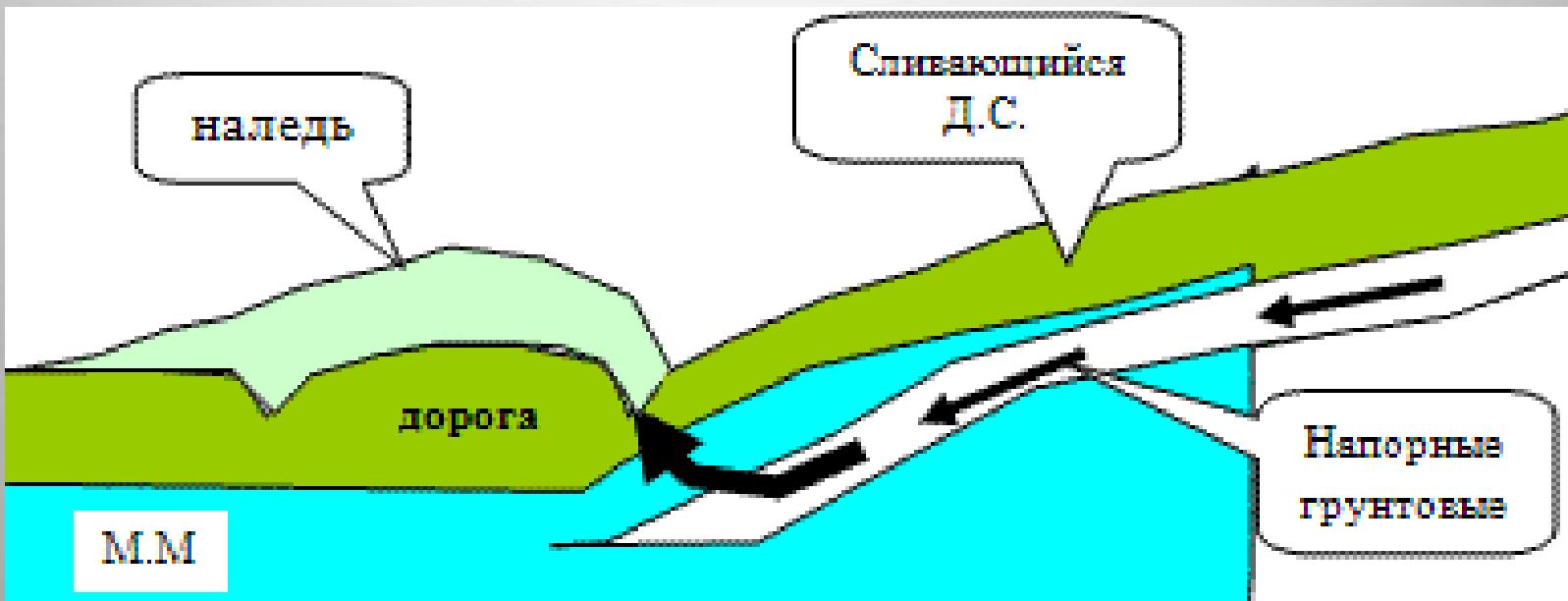
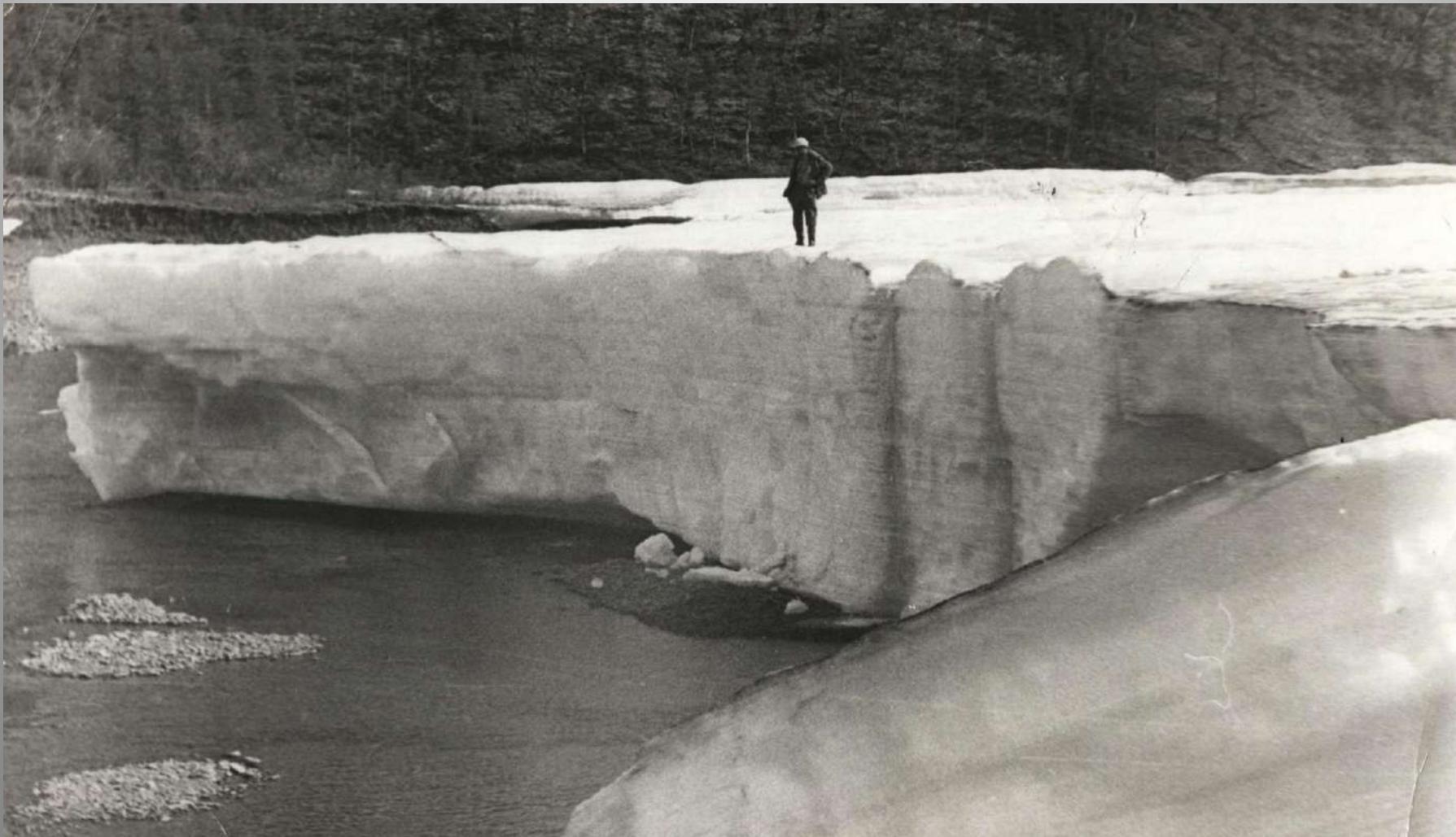


Схема образования наледи на дорогах

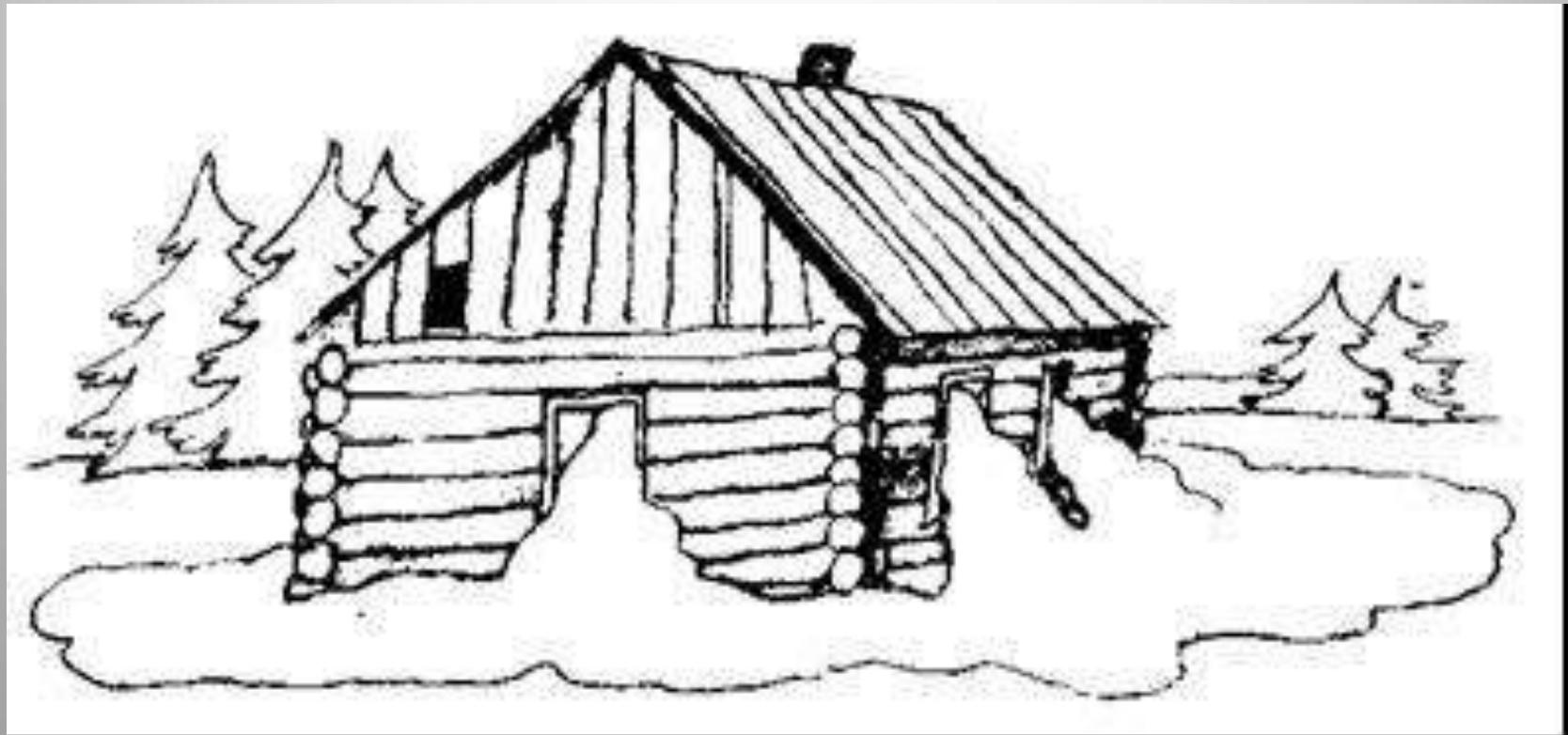
<http://www.buildcalc.ru/Learning/BasesAndFoundations/Open.aspx?id=Chapter12&part=9>

Наледи: Сибирь

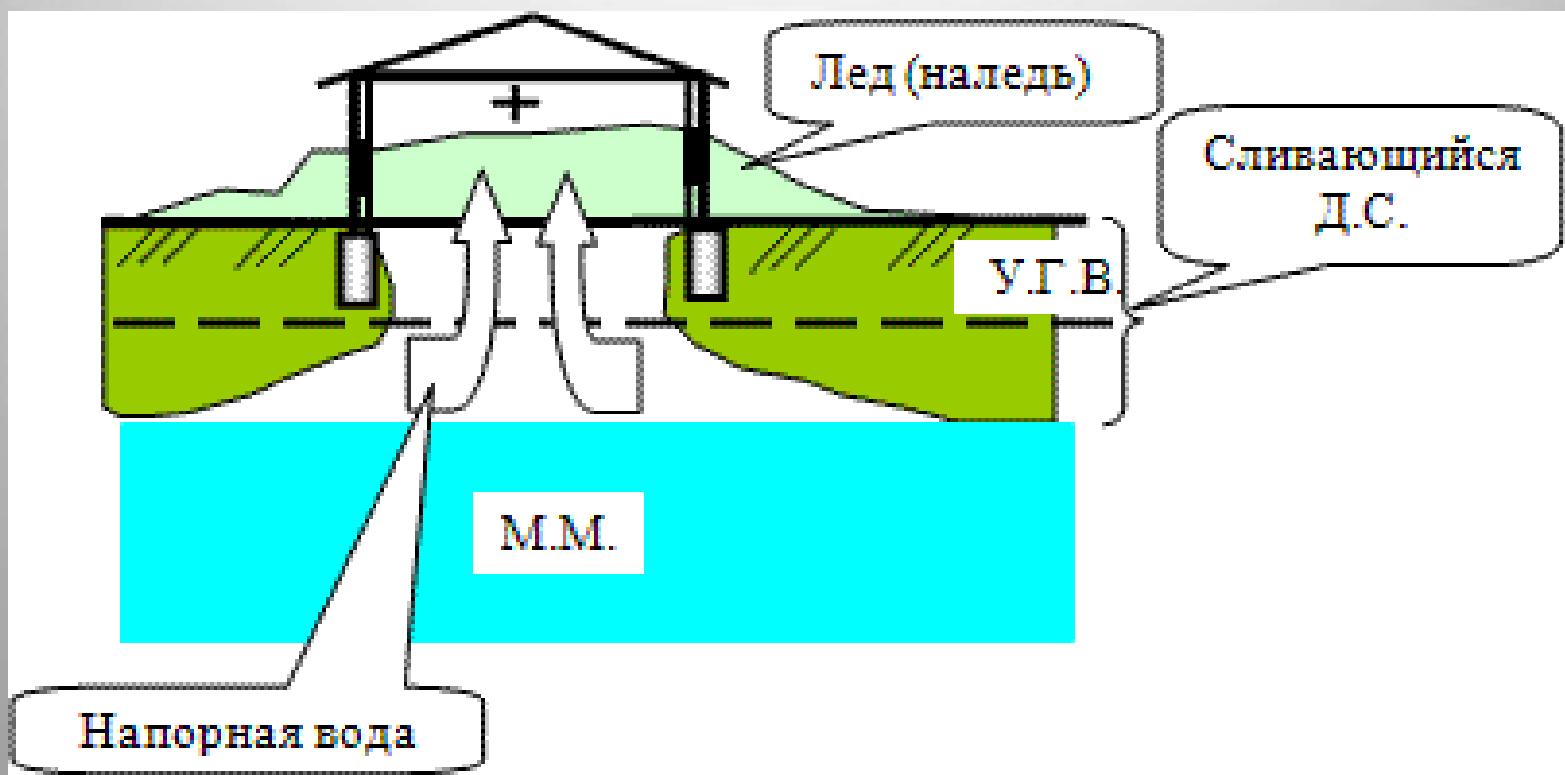




© Peter West Carey Photography peterwestcarey.com

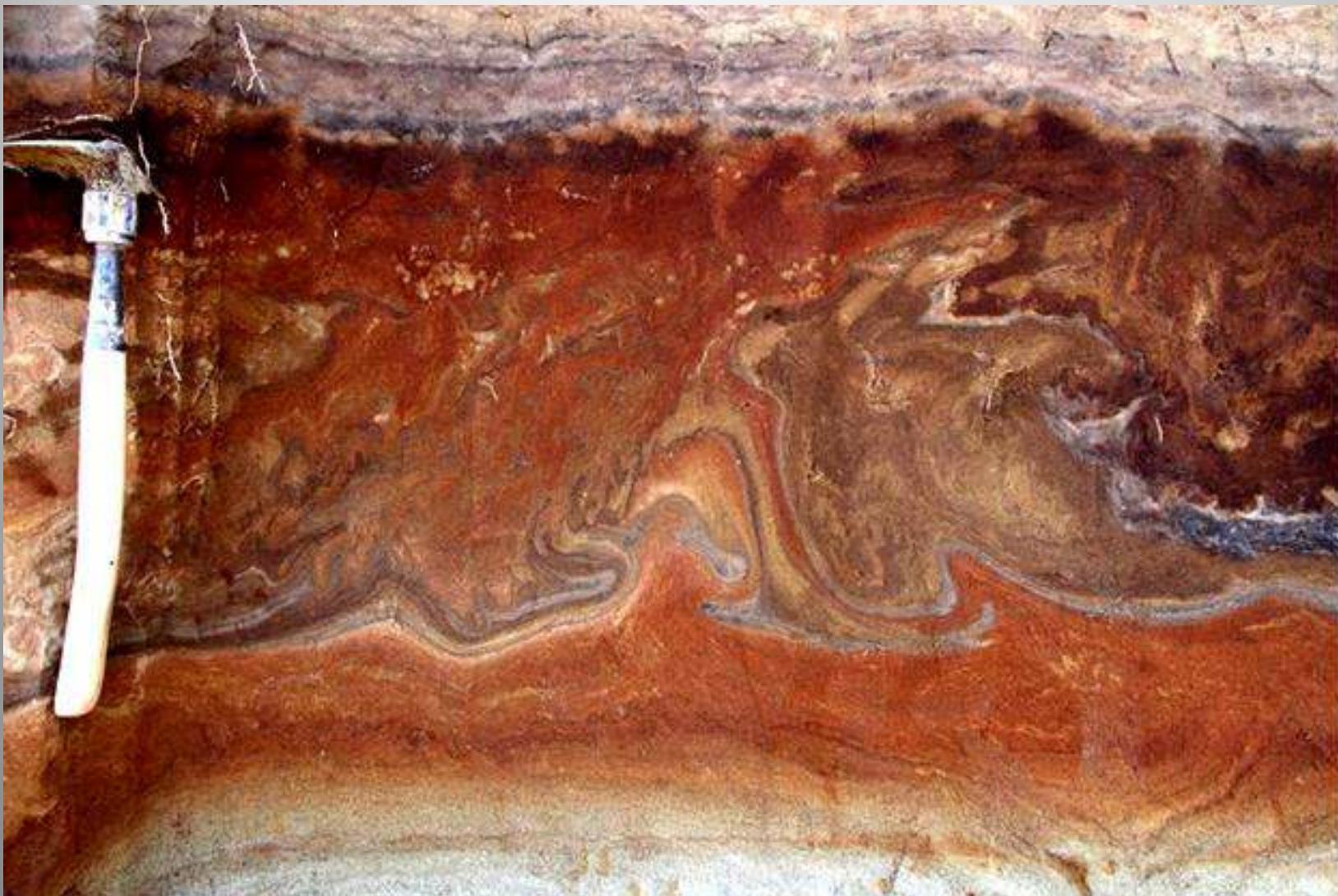


Наледь «затопила» дом





Криотурбации



Криотурбации



Load-casting (Figure 2.22) is associated with thawing (Mortenson, 1932; Kuenen, 1958), and has been demonstrated in small-scale experiments by Jahn and Cerwinski (1965) and Cegla and Dzulinski (1970). It occurs where an upper layer with high frost susceptibility overlies another layer with low frost susceptibility within the active layer. Vandenburgh (1992) regards this as being more common than upward injection of sediments from below

Засоление: Сибирь



Как выглядят засоленные мерзлые породы?

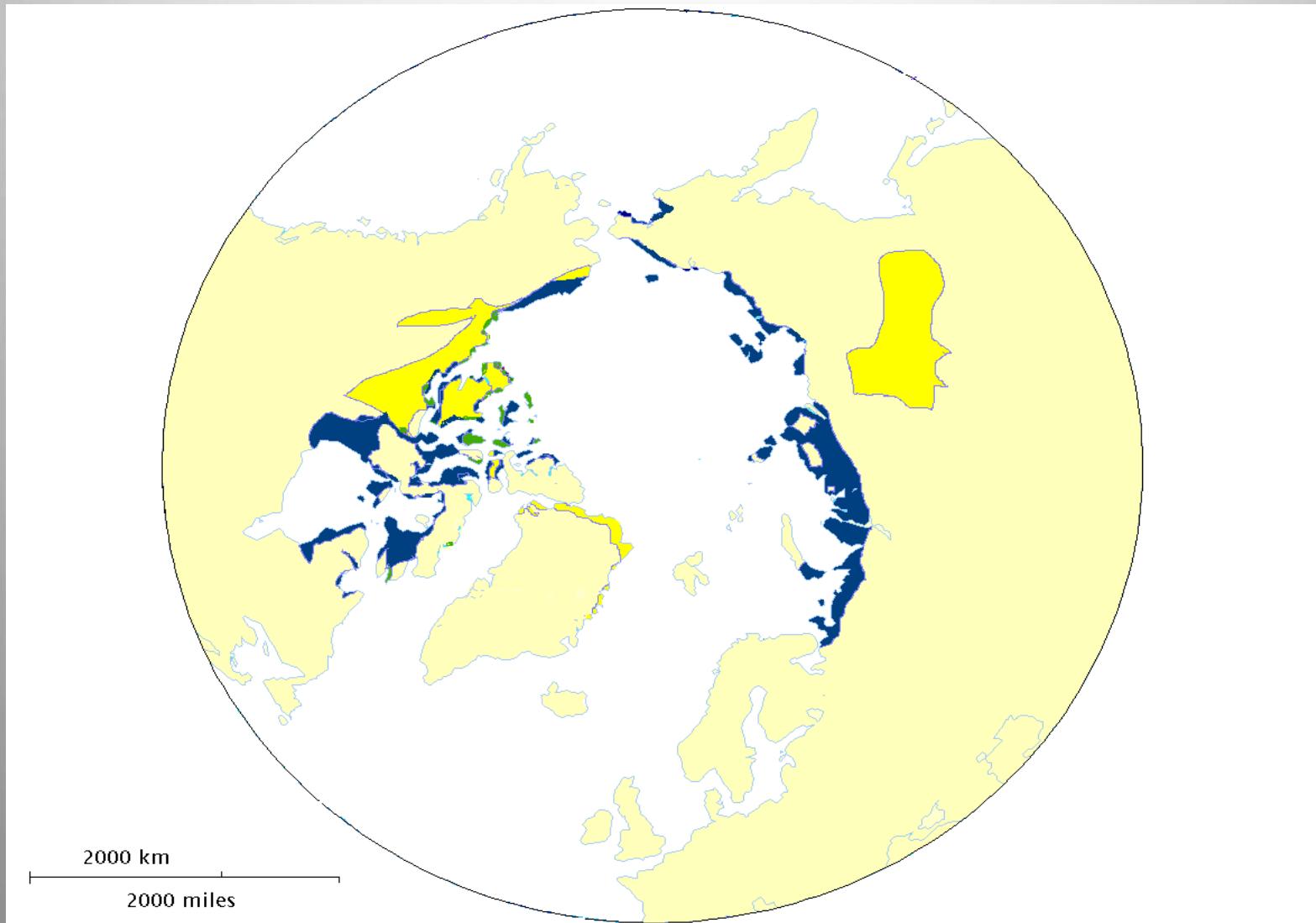


*Surroundings
of Neleger*

Как выглядят засоленные мерзлые породы? Тибет



Засоленные мерзлые породы: распространение



Distribution of frozen saline soils in the Arctic: blue - marine type; yellow - continental type

A photograph of a massive, irregularly shaped ice floe floating in dark water. The ice has a rough, crystalline texture with various shades of white, grey, and blue. The background is a dramatic, reddish-pink sky, likely from a sunset or sunrise. The lighting creates strong highlights on the ice's surface.

Общая геокриология

Химические реакции и процессы в промерзающих и протаивающих породах

-концентрация и выпадение (кристаллизация) солей при замерзании При -8.2°C из **рассола морской воды** кристаллизуется глауберова соль (мирабилит) - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, а при -22.9°C - NaCl . При температуре -36.8°C из рассола выпадает KCl , при -43.2°C - $\text{MgCl}_2 \times 12\text{H}_2\text{O}$ и при -54°C $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$

-изменение pH

Факторы, определяющие реакцию поверхностных и грунтовых вод

- Na, Ca, Fe, Mg, HCO₃, SO₄, Cl

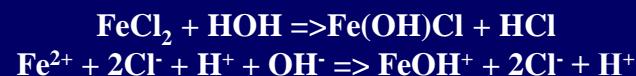
«концентрированный дождь» NaHCO₃ – щелочная реакция

-Гидролиз соли слабой кислоты и сильного основания (гидролиз по аниону):



(раствор имеет слабощелочную среду, реакция протекает **обратимо**, гидролиз по второй ступени протекает в ничтожной степени)

В соли, образованной слабым основанием и сильной кислотой (FeCl_2 , NH_4Cl , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, MgSO_4) гидролизу подвергается катион:



В результате гидролиза образуется слабый электролит, ион H и другие ионы. pH раствора < 7 (раствор приобретает кислую реакцию).

Но этих солей мало в сравнении с гидрокарбонатом натрия и кальция!

-CaCO₃ растворение карбоната кальция – щелочная реакция

-NaCl, CaSO₄, Na₂SO₄, CaCl₂ – нейтральная реакция

Факторы, определяющие реакцию поверхностных и грунтовых вод

-**Углекислый газ** хорошо растворим в воде; при температуре 20°C в 100 г воды может раствориться 87,8 мл СО. Это значительно больше, чем растворимость таких газов, как кислород, водород, азот и др.

-Растворение CO₂ в воде связано с химическим взаимодействием его молекул с водой, приводящее к возникновению угольной кислоты:



-Угольная кислота неустойчива, она может распадаться, поэтому часть растворенного в воде CO₂ находится в свободном состоянии. Это слабая кислота, т. е. она диссоциирует на ионы в незначительной степени:



-В результате диссоциации угольной кислоты в воде концентрация ионов H⁺ становится больше, чем OH и среда приобретает кислую реакцию (pH < 7).

При низких температурах растворимость углекислого газа увеличивается и его содержание в поровом растворе растет.

Природные зоны арктических пустынь и тундры.

- Почвы арктические пустынные и тундровые - глеевые сильно заболоченные, содержание гумуса- 0,5-1 %, торфянистые.



- **Болото** - избыточно увлажненный с застойным водным режимом участок земли, на котором происходит накопление органического вещества в виде неразложившихся остатков растительности.
- **Марь** — заболоченный редкостойный лиственничный 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 залежью, высоким уровнем воды и рыхлой непрочной дерниной^[7].
- **Трясина** — зыбкое болотистое место.
- **Няша** — (*северное*) зыбкое болотистое илистое или глинистое место.

Болото на 90 % состоит из воды с высоким содержанием кислот торфа (разложившихся растительных веществ). Такая среда замедляет рост бактерий, отчего тела органического происхождения, утонувшие в болоте, не разрушаются. Наличие кислот в болоте в сочетании с низкой температурой воды и недостатком кислорода оказывает дубильное воздействие на кожу, чем объясняется темно-коричневый цвет найденных тел, таким образом, благодаря отсутствию кислорода и антибактериальным свойствам сфагnuma, который является мощным консервантом, тела прекрасно сохраняются.^[14]

За последние 300 лет в заброшенных торфяных болотах Британии, Ирландии, Нидерландов, Германии и Дании были обнаружены хорошо сохранившиеся тела людей. Большая часть этих мумий датируется I в. до н. э. — IV в. н. э.

По одной из версий, название столицы России, Москвы произошло от старорусского слова «Мокшва», что означает болото

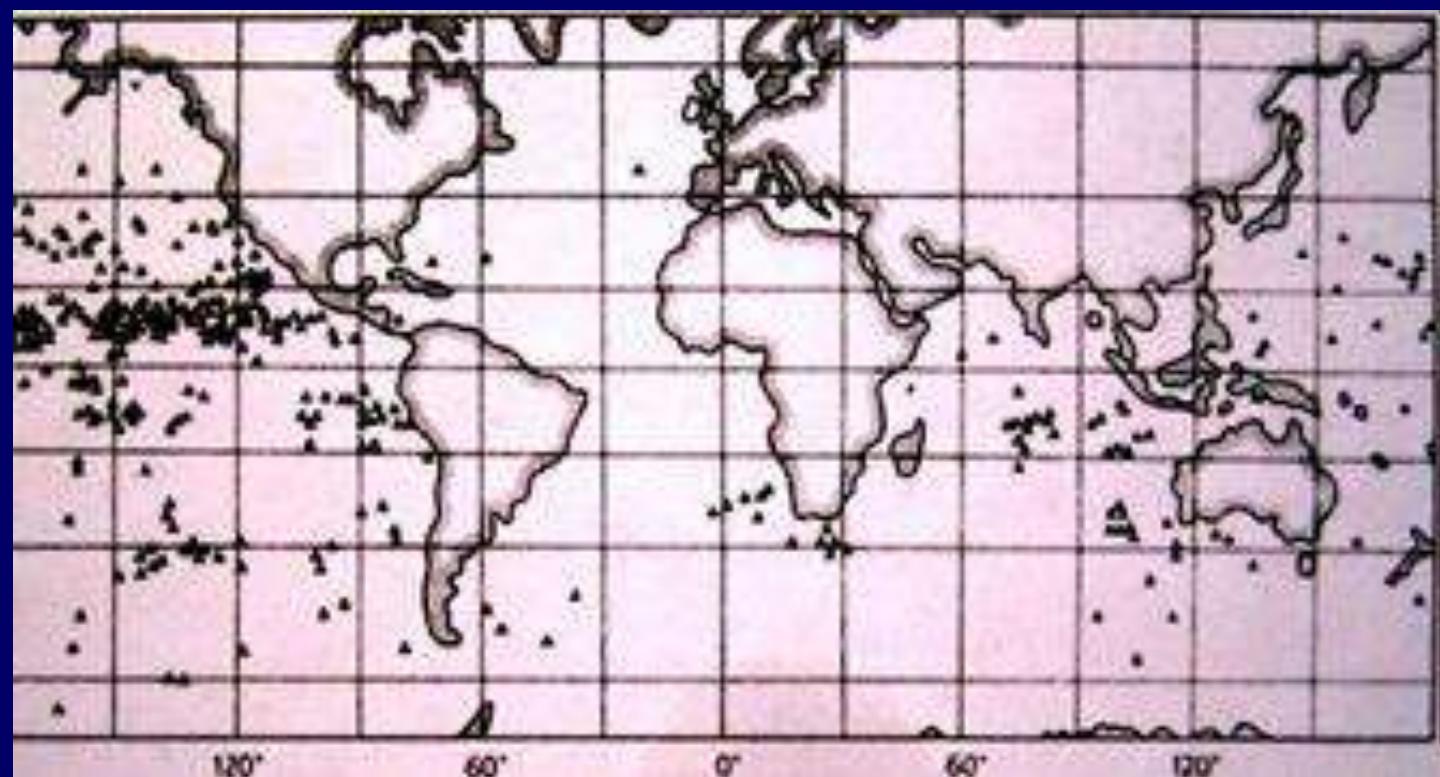
В кельтской мифологии болота являлись «вратами духов» — в том месте, где кажущаяся твёрдой почва мгновенно уходит из-под ног, открываются врата в мир загадочных духов природы и божеств. Кельты приносили на болотах жертвенные дары^[2].

Ханты и манси верили, что весь мир родился из «жидкой земли», то есть из болота^[2].

В 1868 году экспедиция шведского полярного исследователя Нильса Норденшельда на судно «София» подняла со дна Карского моря темные камни, оказавшиеся железомарганцевыми стяжениями (конкремциями). Затем океанографическая экспедиция Великобритании на корвете «Челленджер» (1872–1876) похожие конкреции обнаружила на дне Атлантики в **районе** Канарских островов. Внимание геологов привлек тот факт, что кроме железа и марганца в них были заметные некоторое количество цветных металлов. Впоследствии подводные фотосъемки показали, что дно иногда напоминает булыжную мостовую: оно сплошь покрыто конкрециями размером 4–5 см. Конкреции выступают из ила или образуют слой толщиной до полуметра в верхней части грунта.



Ресурсы ЖМК в Мировом океане распределены с загадочной неравномерностью: 85% марганца и более 95% редких металлов залегают в экваториальной части Тихого океана. Разведанные запасы богатых и очень богатых руд составляют здесь 10 млрд. т. В Индийском океане ресурсов заметно меньше, в Атлантике, морях Арктики и Антарктики их почти нет. С 2001 году Южморгеологией был подписан контракт на 15 лет на разведку двух участков дна Тихого океана общей площадью 75 тыс. кв. км. Один расположен в глубоководной Восточно-Марианской котловине и является частью рудного гиганта Кларион-Клиппертон. Другой приурочен к гайотам на глубине 2000–3500 м, в районе отведенного России участка подводных Магеллановых гор. Прогнозные ресурсы участков достигают 600 млн. т сухой рудной массы. При годовой производительности в 3 млн. т ценность поднимаемых в руде металлов достигает 3 млрд. долл.

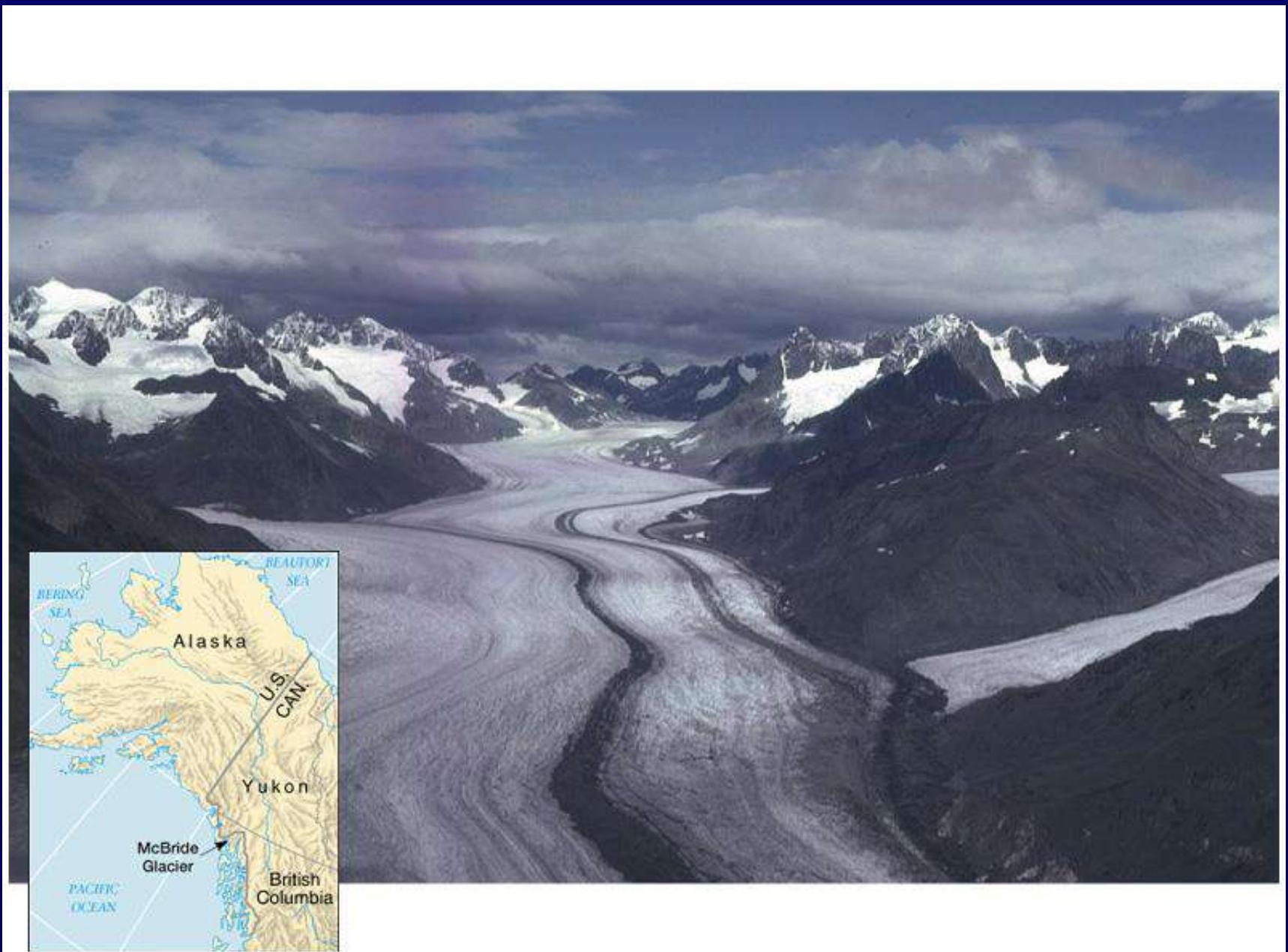


Время образования ЖМК – ледниковый период, эпоха глобальных многократных похолоданий. ЖМК, подобно болотным рудам, возникшим на дне послеледниковых озер, обязаны своим происхождением ледниковому периоду. Но их химический состав резко отличается от железистых конкреций болотных руд. В них много марганца с примесью типичных космических элементов – изотопа гелия-3, никеля, кобальта, иридия, платины.

По нашему мнению, для появления гиганта Кларион-Клиппертон были необходимы: 1) ледяной покров океана и обусловленный этим дефицит кислорода в океанской воде; 2) скопление комической пыли на ледяных щитах и возможность концентрации этой пыли при потеплении; 3) обилие кислорода в талых водах; 4) наличие субэкваториальных течений.

Ледяной покров Земли закрывал значительную поверхность океанов и нарушал кислородный газообмен между атмосферой и гидросферой. Видимо, это отразилось в снижении содержания кислорода в воде, подобно современным северным озерам, где к весне рыбам порой не хватает кислорода. Подо льдом в океане, в условиях дефицита кислорода, накапливались огромные массы растворенных металлов, главным образом марганца. А на ледяном щите десятки тысяч лет собиралась пыль космоса. На ледяном щите Антарктиды найдены тысячи метеоритов и встречены прослои льда, имеющие возраст 430 и 480 тыс. лет, с содержанием космической пыли в 100 раз выше фона. Аномально высокое содержание гелия-3, концентрация никеля, кобальта, платины подтверждают большой вклад космического вещества в ЖМК. Сохранность имплантированного изотопа гелия указывает, что космическая пыль сохраняется в виде самостоятельной пылеобразной фазы, не растворявшейся в океанской воде. Советские ученые С.П.Голенецкий и В.В.Степанюк в 1983 году оценили количество космической пыли, выпадающей на Землю в 2,4 млрд. т в год. Значит, ледяные щиты, закрывавшие океаны и континенты Земли, собрали в эпохи оледенений сотни триллионов тонн метеоритного вещества!

Процессы и явления связанные с деятельностью ледников



Accumulation zone (all parts of glacier above equilibrium line)

Equilibrium line

Ablation zone (all parts of the glacier below equilibrium line)

Snow and névé

Glacier ice

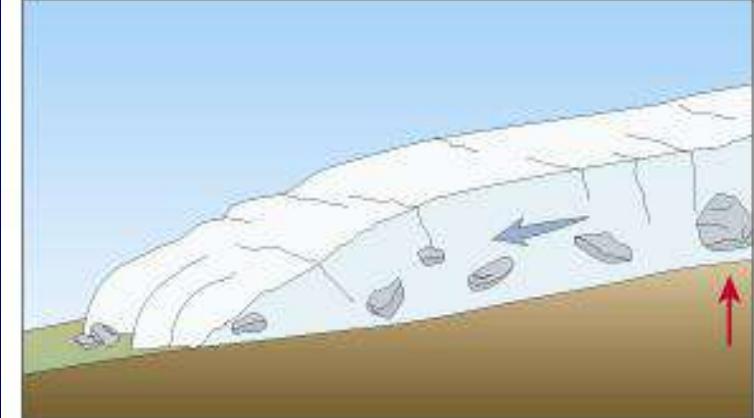
Sediments deposited by meltwater

Rock deposited at margin of glacier

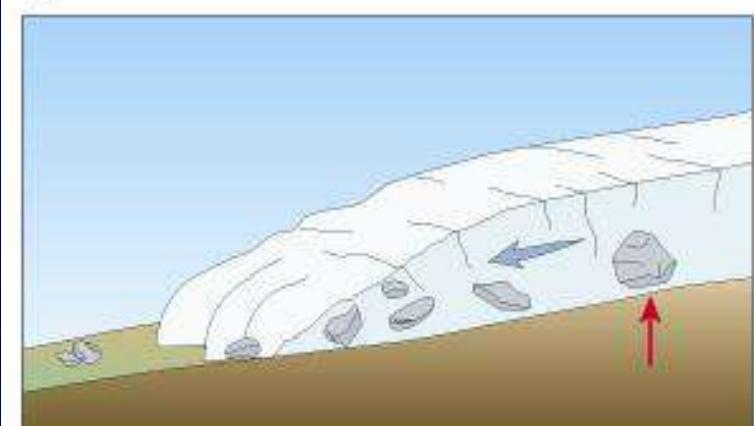
Отношение площади области питания (аккумуляции) ледника (F_p) к площади области аблации (расхода) (F_a) называют ледниковым коэффициентом:

$$K_l = F_p / F_a.$$

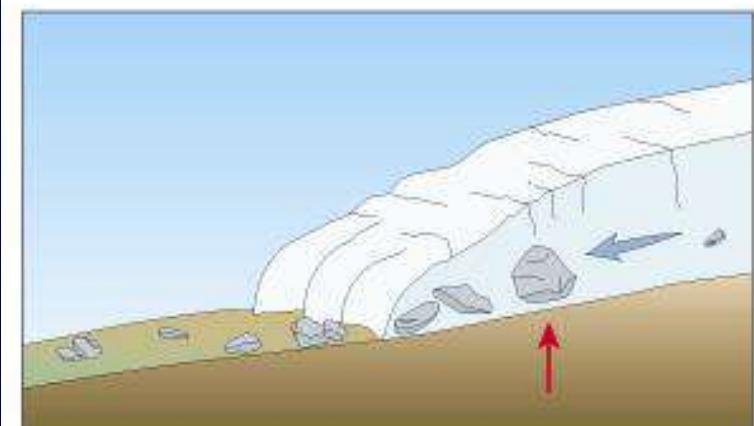
Why is a glacier the only thing that is ever coming and going at the same time?



(a)



(b)



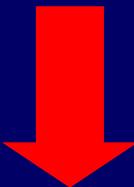
(c)

Ледники и ледниковый рельеф

образование льда

- Условия возникновения ледника
 - Снеговая линия
- Образование льда
 - фирн
 - белый фирновый лед
 - голубой глетчерный лед
- Течение ледника
- Питание ледника
 - фирновый бассейн
 - зона стока (язык ледника)

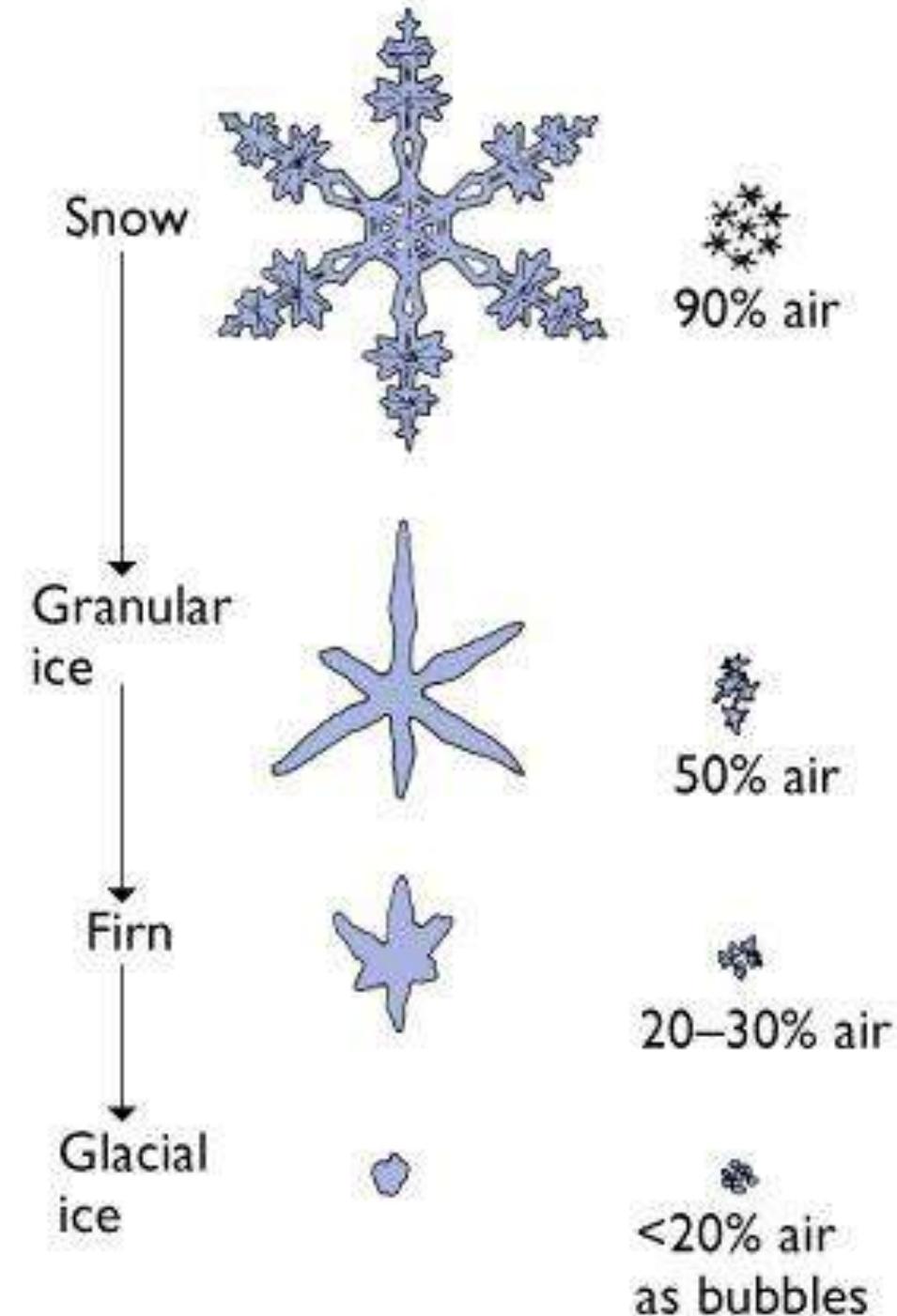
давление



через 50 лет



Образование глетчерного льда



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.

- Граница между поверхностью, покрытой снегом, и поверхностью, где снега нет называется сезонной снеговой линией.
- 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.

Типы ледников

Покровные

- Ледниковые щиты
- Ледниковые купола
- Выводные ледники

Горные

- Ледники вершин
- Ледники склонов
- Долинные ледники

Процессы льдобразования

Рекристаллизация

Режеляция

Конжеляция

Конжеляция – повторное замерзание воды на поверхности ледника

Режеляция – способность кристаллов льда прочно смерзаться друг с другом и заполнять поры и трещины.

Зоны ледообразования

Название зоны	Характер таяния, водоотдачи и ледообразования
1. Снежная (рекристаллизационная) зона	Таяние и водоотдача отсутствуют. Ледообразование - рекристаллизация. Толщина фирна 50-150 м. Нижняя граница зоны соответствует средней годовой температуре около –25 °C.
2. Снежно-фирновая (рекристаллизационно-режеляционная) зона	Слабое таяние лишь в теплый период года, водоотдача практически отсутствует. Ледообразование 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. Ледообразование происходит на 2/3 путем замерзания инфильтрационной воды и на 1/3 путем рекристаллизации. Температура ледника ниже 0°C.

Продолжение таблицы

4. Теплая фирновая (теплая) зона.	Таяние и водоотдача значительные, формируется интенсивный сток. Ледообразование идет в равной степени путем инфильтрационного замерзания и рекристаллизации. Толщина фирна 20-40 м. Температура ледника около 0°C.
5. Фирново-ледяная (инфилтратационная) зона	Таяние и водоотдача значительны. Ледообразование в основном инфильтрационное. Толщина фирна не более 5-10 м. Зона характерна для горных ледников в условиях континентального климата.
6. Зона ледяного питания (инфилтратационно-	Таяние и водоотдача интенсивные. Ледообразование идет путем инфильтрации и конжеляции, т.е.

Типы морен

Влекомые

- Поверхностные
- Внутренние
- Придонные

Отложенные

- Береговые
- Конечные

Питание и абляция в леднике

ПИТАНИЕ

Осадки

Метелевый,
лавинный
перенос

Сублимация,
конжеляция

АБЛЯЦИЯ

Таяние

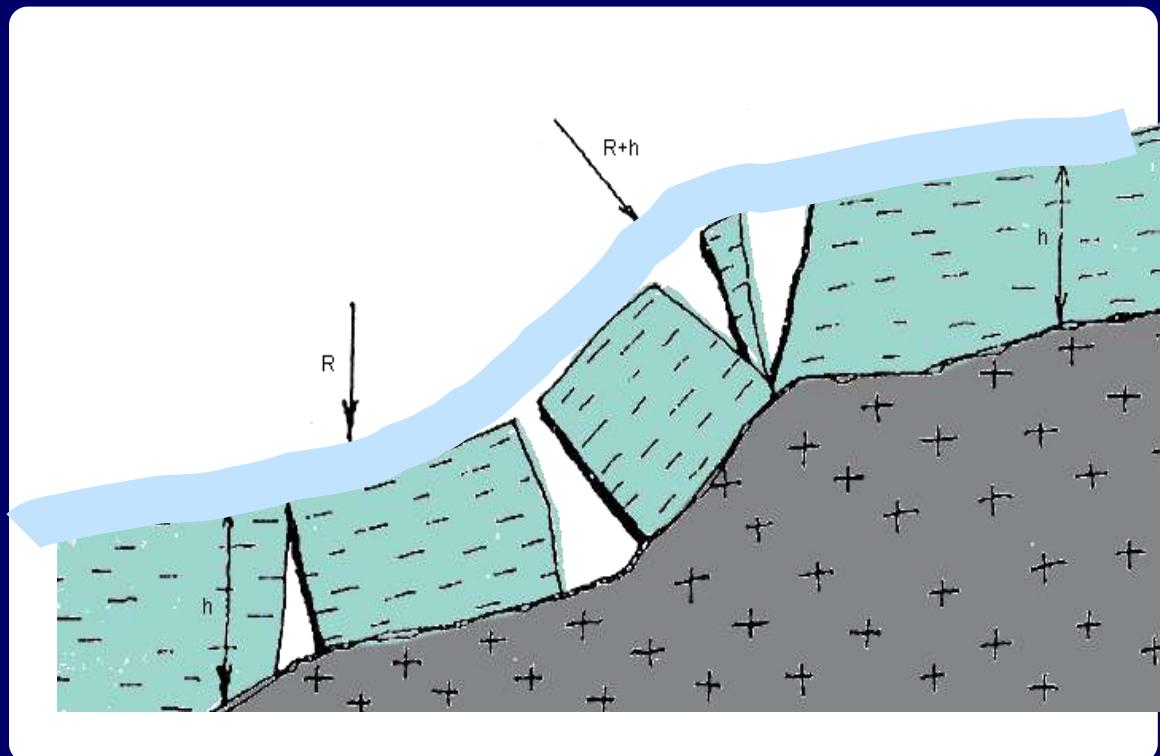
Испарение

Механическая
абляция

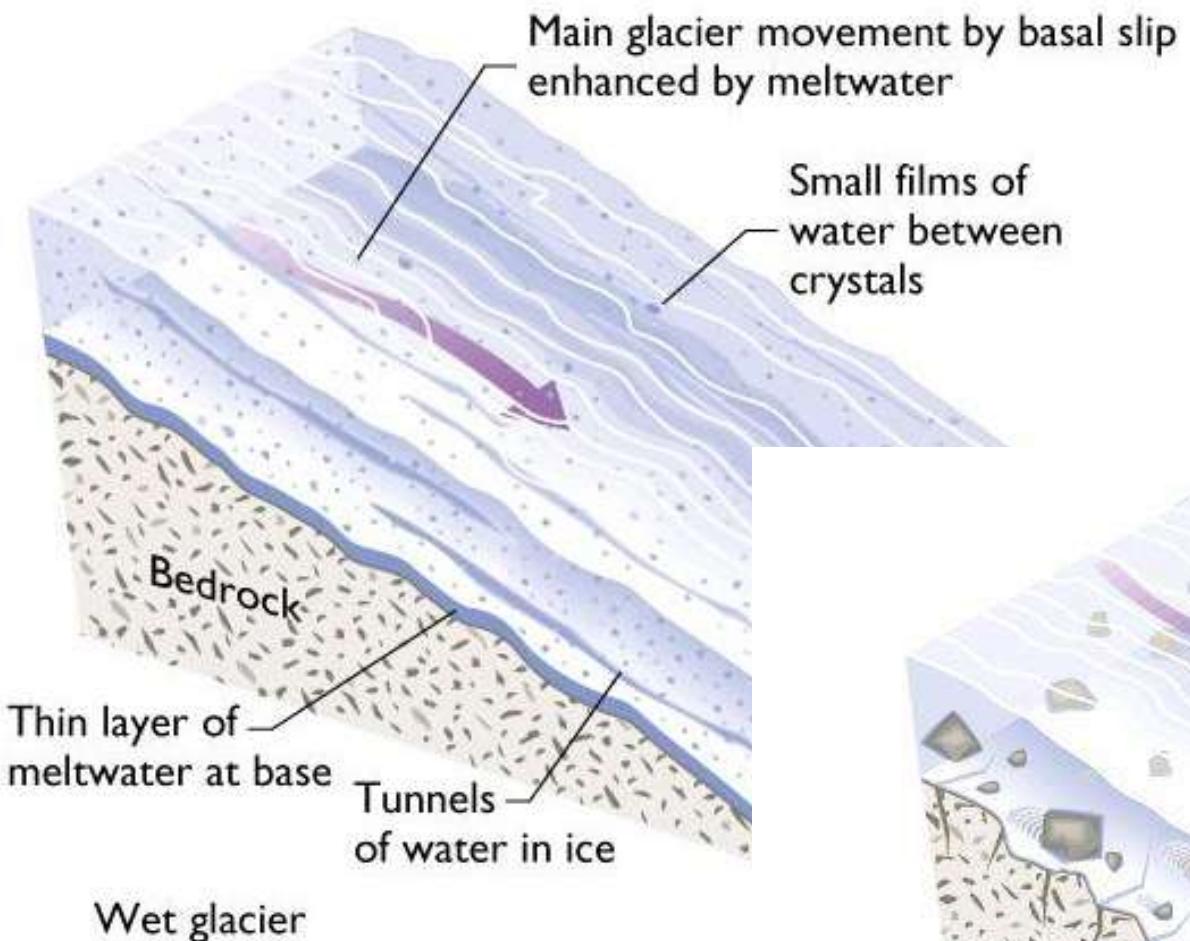
Ледники и ледниковый рельеф

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

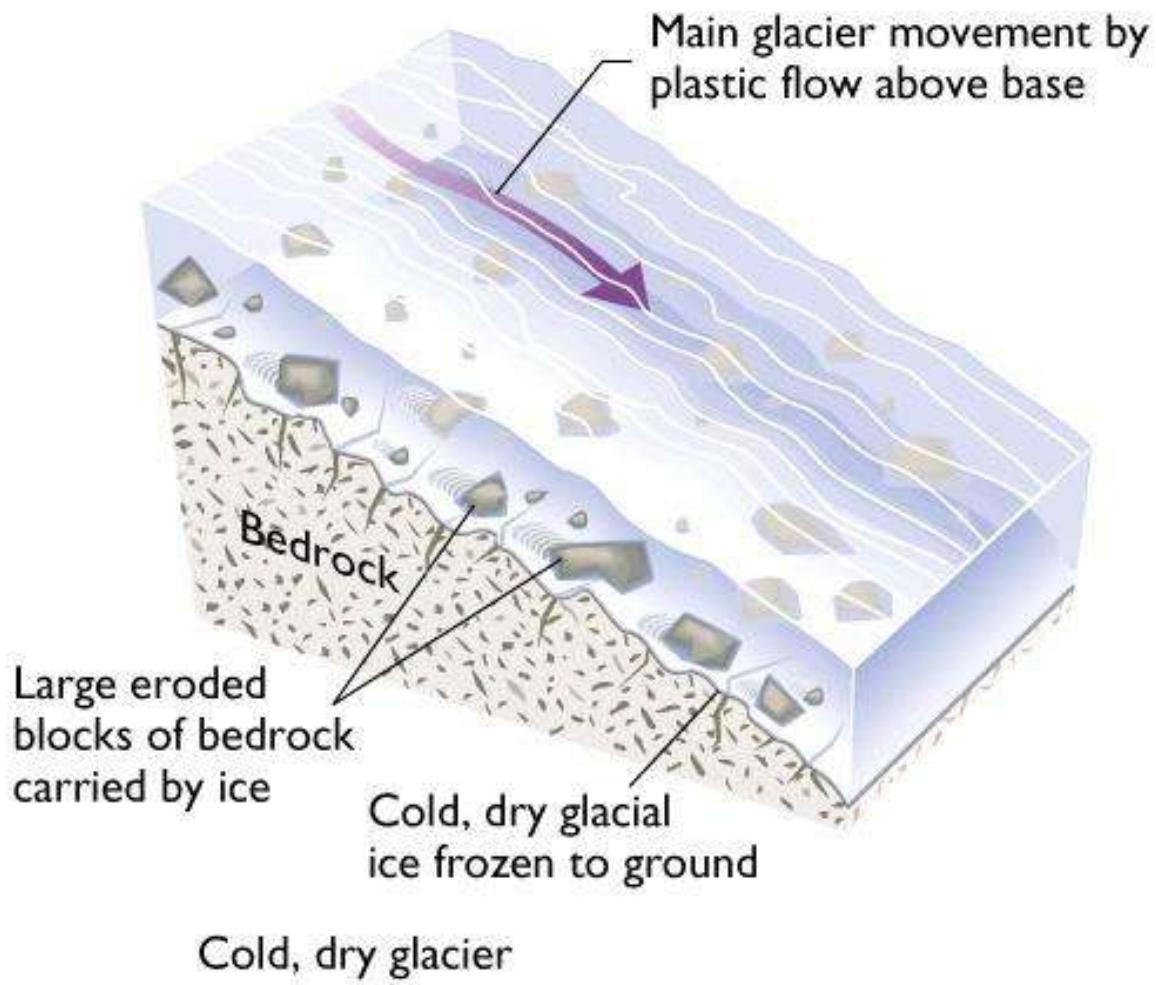
- Открытый ледник
- Закрытый ледник
- Трещины
 - Бергшрунд (сила тяжести)



Теплый и холодный ледник



- “Warm” and wet vs. cold and dry
- Consequences for erosion



Ледники и ледниковый рельеф открытый ледник



Ледники и ледниковый рельеф закрытый ледник



Ледники и ледниковый рельеф кальгаспоры



Работа ледника механическая аналогия

а – неподвижный лед

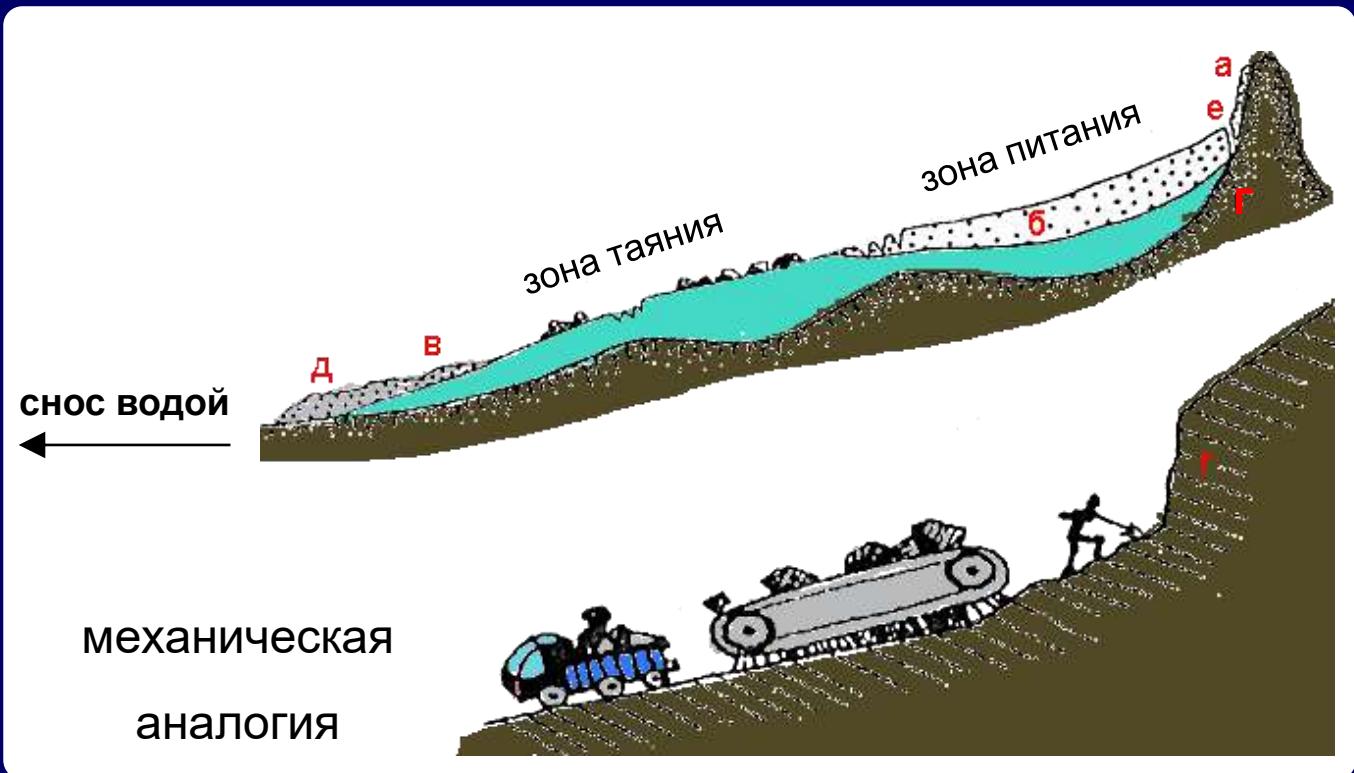
б – фирн

в – движущаяся морена

г – склон разрушаемый ледником

д – отложенная морена

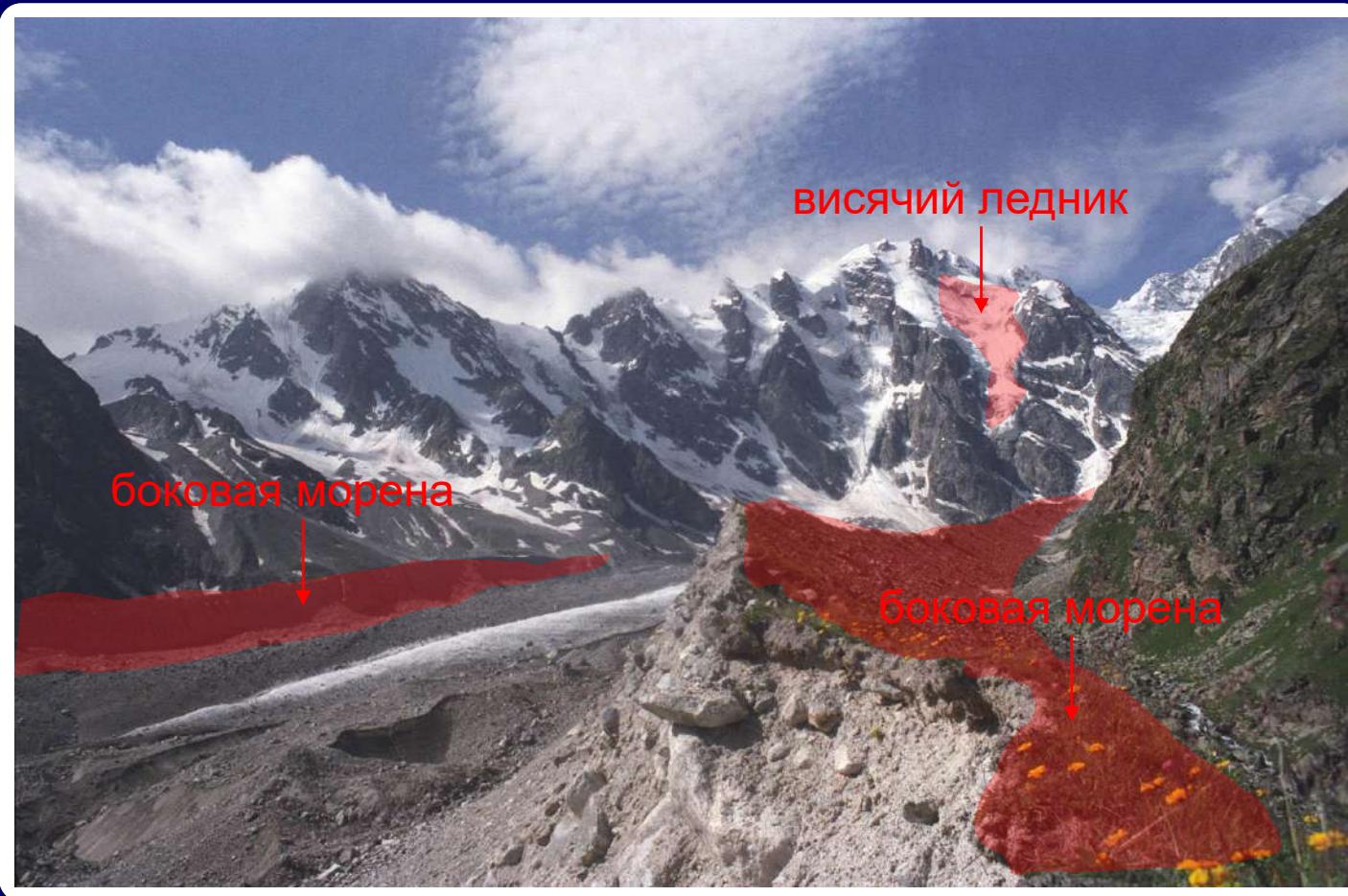
е – бергшрунд



Работа ледника бараньи лбы



Формы горного рельефа



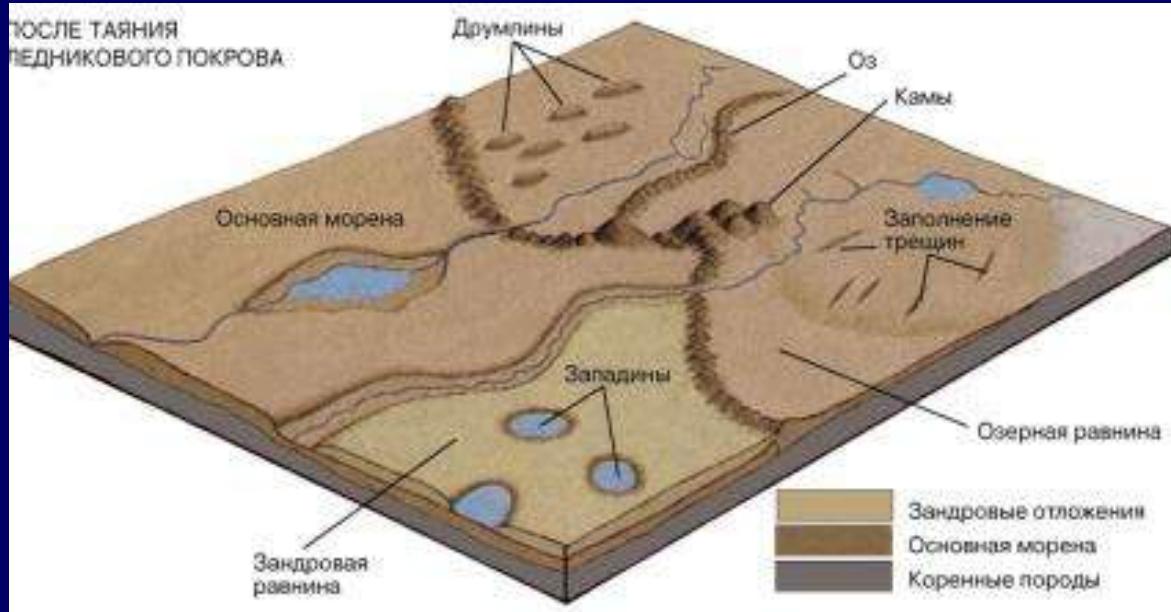
Terminal moraine (конечная морена)



У КРАЯ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА



ПОСЛЕ ТАЯНИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА



Drumlin field in Wisconsin



Шельфовый ледник



Айсберг



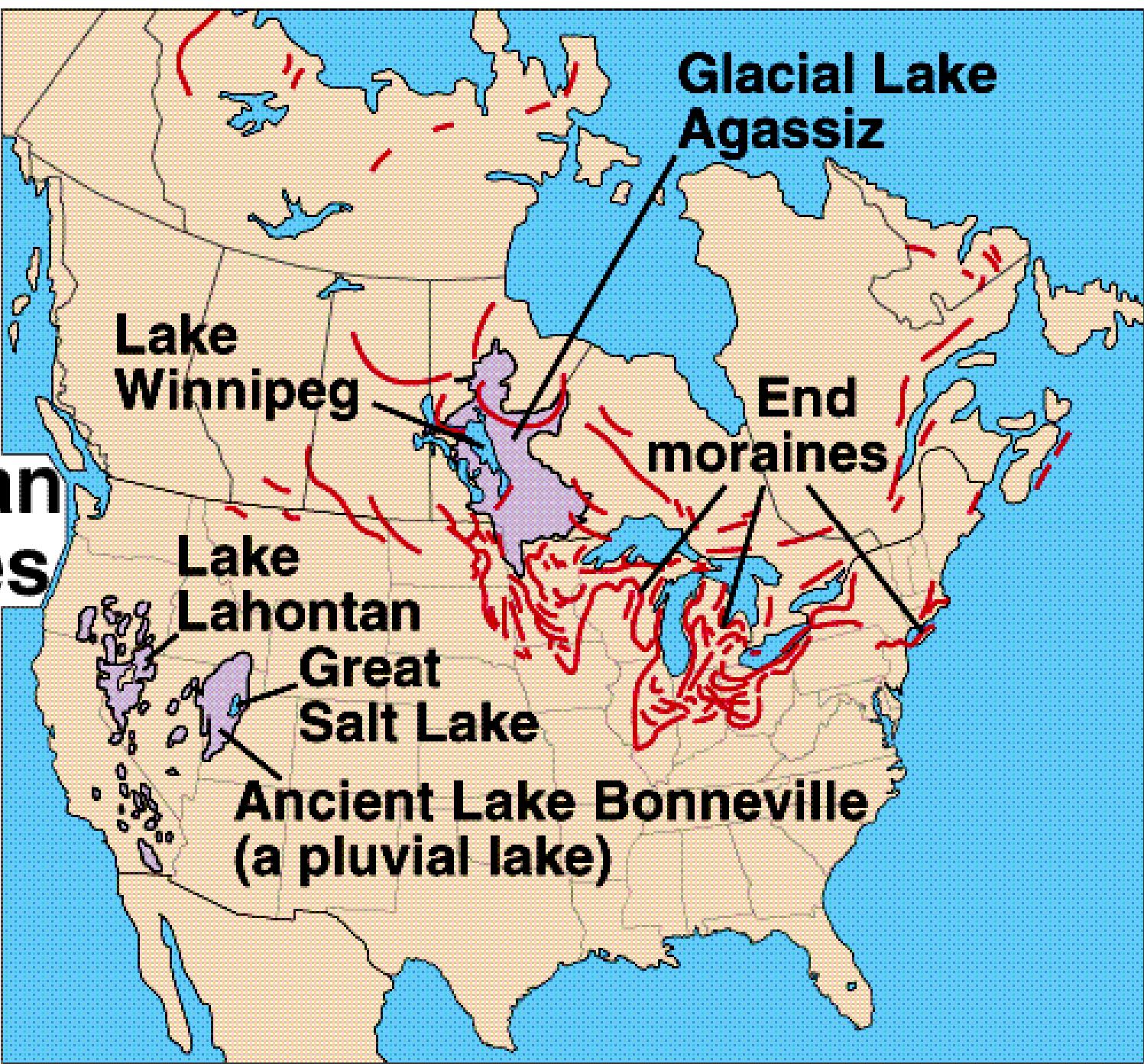
Айсберги



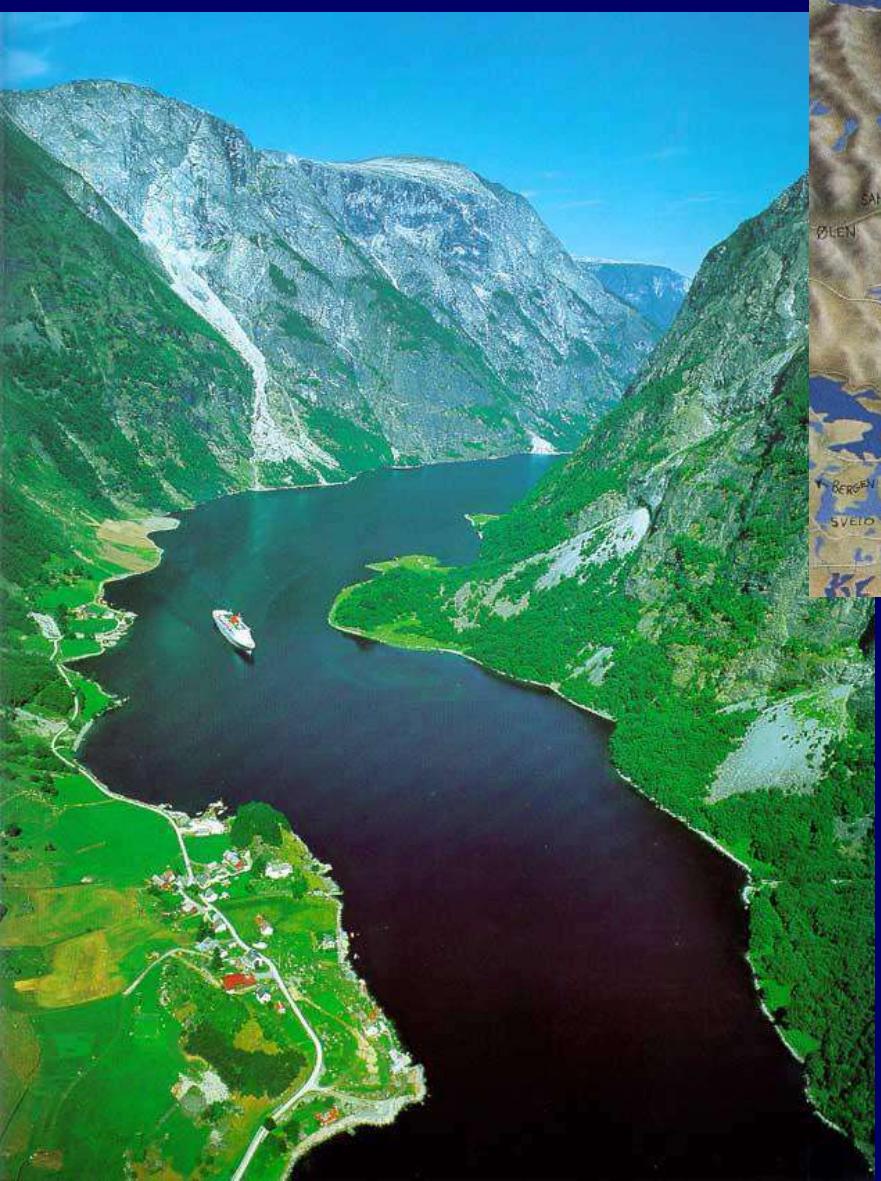
Ледниковые озера

- Pluvial Lakes-
 - Due to wetter climate
 - Examples: Lake Bonneville, Death Valley
 - Lake Bonneville flood into Snake River Canyon
- Proglacial Lakes
 - In front of the glacial sheet
 - Ice dammed lakes
 - Examples: Great Lakes, Lake Missoula

North American Moraines and Pluvial Lakes



Фьорды



Каменный патчер



Каменные глетчеры

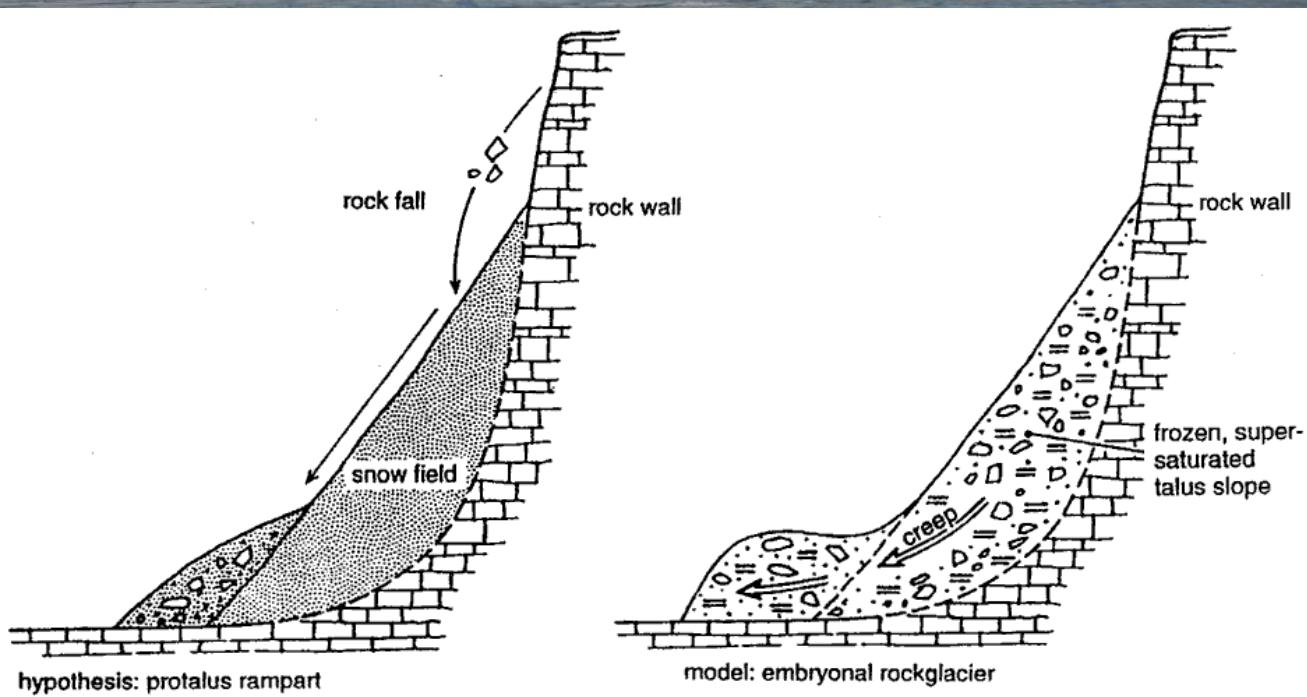
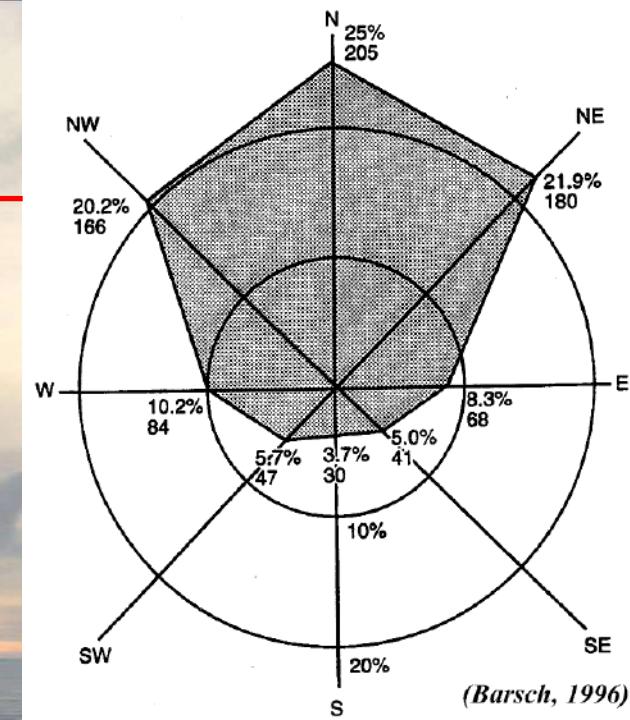
Rock Glaciers

- Transition between ice-glaciers and talus cones

- Lobate rock masses downhill from talus

- Often to treeline

- Oriented due north

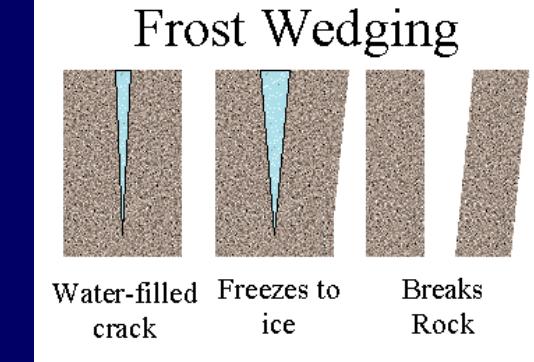


Каменъи ледник

Where a large quantity of frost-shattered rock becomes mixed with ice, a rock glacier is formed. This can occur either by:

1. A large supply of rock debris being added to a small and thin glacier = ice cored rock glacier.
2. The growth of ice within a large accumulation of rock fragments = ice-cemented rock glacier.

They tend to have a steep front, sometimes as much as 100m in height, and they can reach a length of 1km or more. The presence of ice between rock fragments allows the rock glacier to deform under its weight and move downslope at rates of up to 1m per year.



Явления	Процессы
Повторно-жильные льды	Морозобойное растрескивание
Курумы	Выпучивание и десерпция (крип)
Бугры пучения	Пучение
Алас	Термокарст
Булгуннях	Пучение
Солюфлюкционные террасы	Солифлюкция

Природный комплекс

- Природный комплекс - это совокупность взаимосвязанных потоками вещества и энергии частей литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Географическая оболочка - самый крупный природный комплекс.

Зональные природные комплексы

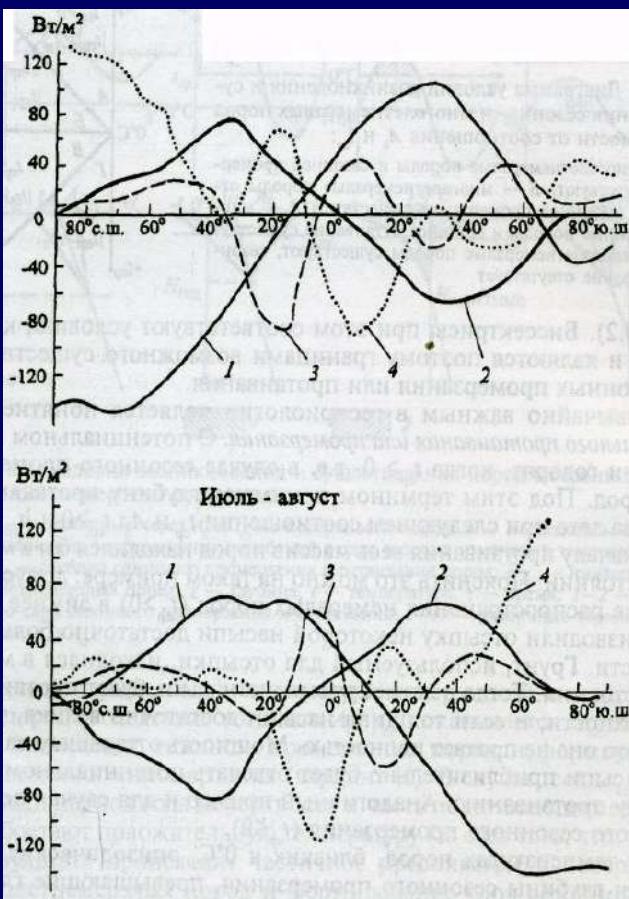
- Среди природных комплексов (ПК) есть зональные и азональные комплексы. Зональные ПК на суше формируются под приоритетным влиянием климата, т.е. обусловлены соотношением тепла и влаги. К таким ПК относятся природные зоны.

Природные зоны Земли

- 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.

Природные зоны





Средние широтные величины составляющих теплового баланса

1 — радиационный баланс; 2 — изменения теплосодержания (накопление или потеря тепла за рассматриваемый период) гидросфера; 3 — фазовые преобразования воды; 4 — перераспределение тепла горизонтальными движениями в атмосфере и океанах

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.

Азональные природные комплексы

- обусловлены наличием океанов и материков, а среди материков – гор и равнин. Среди азональных природных комплексов есть очень большие по площади (Восточно-Европейская равнина, Тибет, Эфиопское нагорье, Аппалачи, Ла-Платская низменность и др.) и совсем небольшие - озеро, овраг, склон холма, речная долина и др.

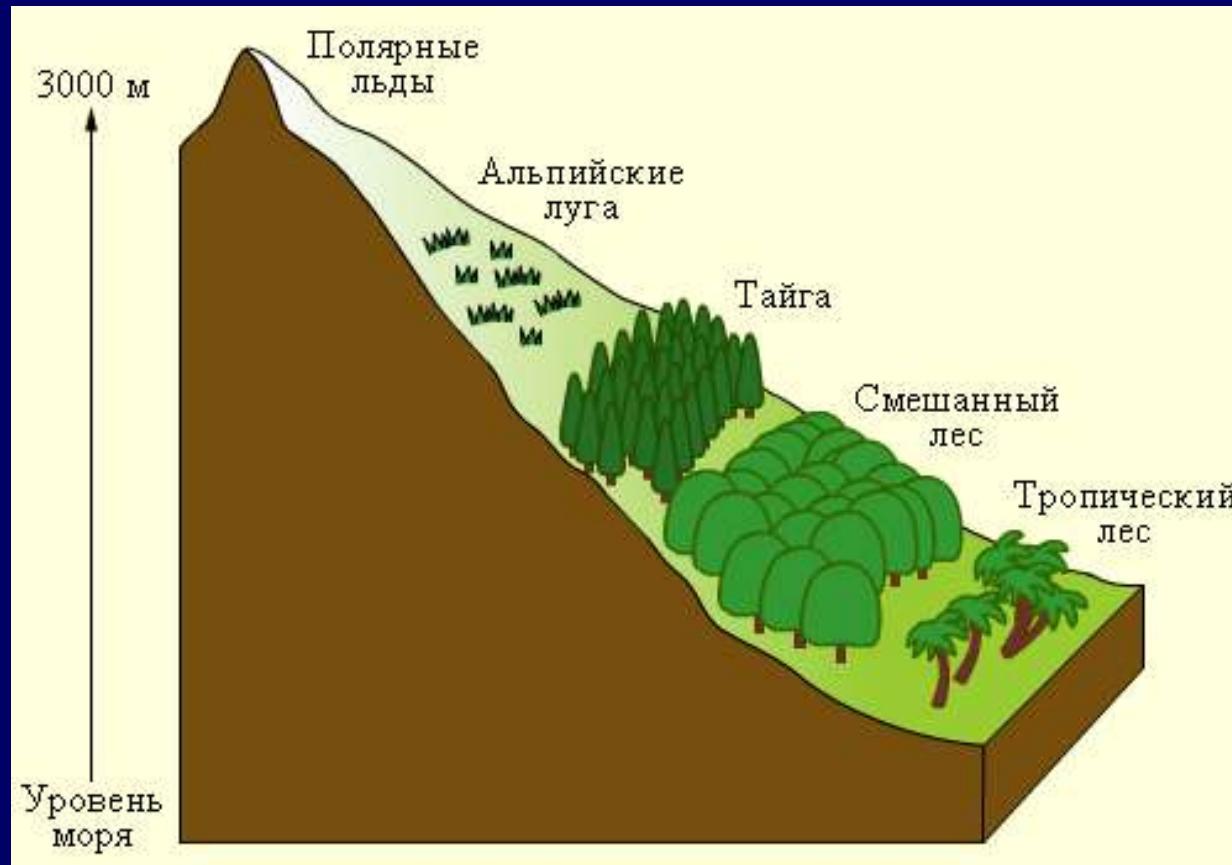
Интразональные природные комплексы

- Интразональными считаются природные комплексы, встречающиеся в нескольких природных зонах, но нигде не преобладающие по площади. Примером таких природных комплексов могут служить болота, солончаки.

Высотная поясность

- Это закономерное изменение природных комплексов и составляющих их компонентов с увеличением высоты места над уровнем моря.

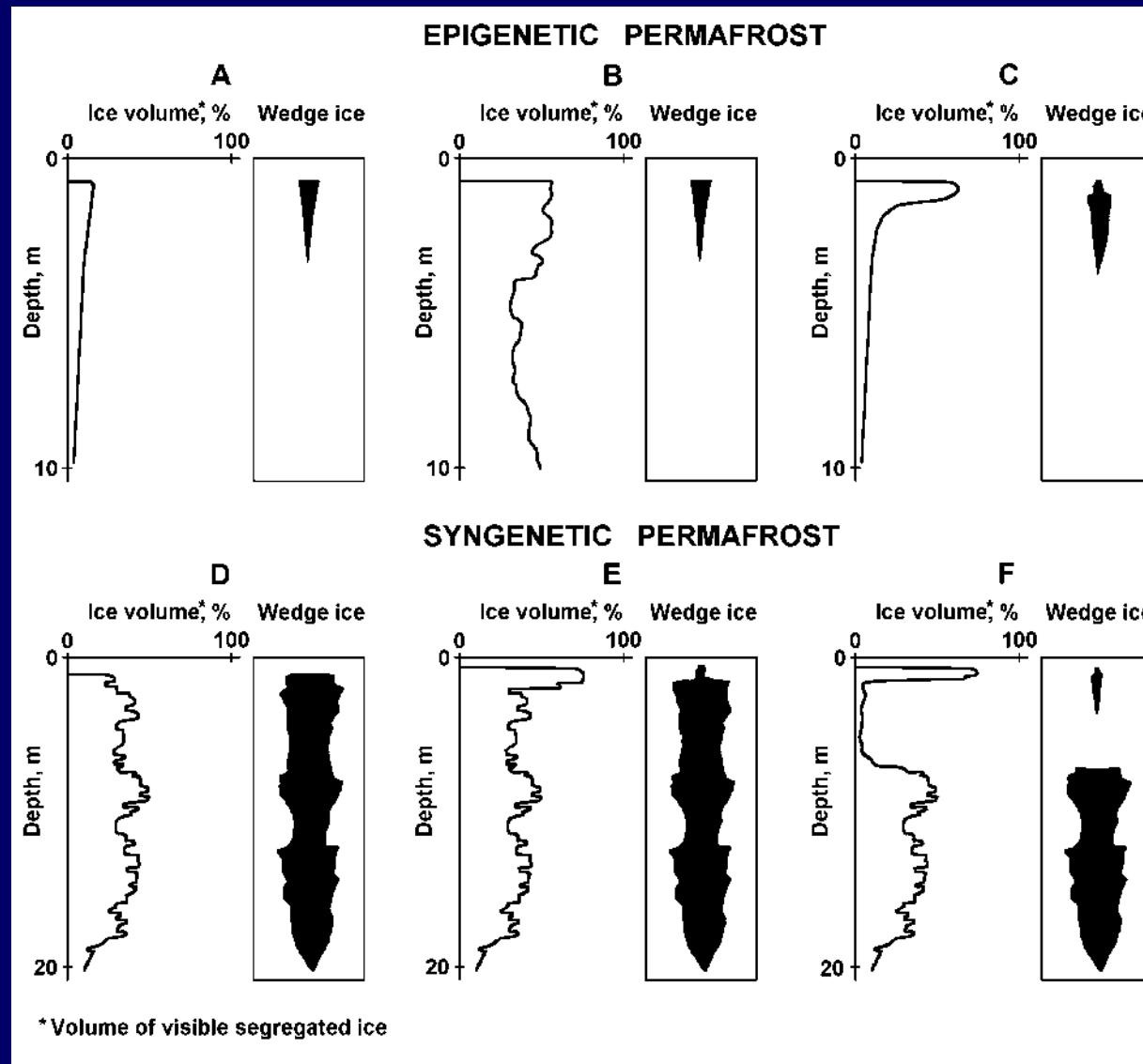
Высотная поясность



Естественная динамика мерзлых толщ

Содержание льда в различных типах мерзлых толщ

Generalized ice profiles for common types of permafrost



Resilience and vulnerability of permafrost depends on type and amount of ground ice

Conceptual model by M. Kanevskiy

Естественная динамика мерзлых толщ. Влияние граничных условий на формирование мощности мерзлых толщ.

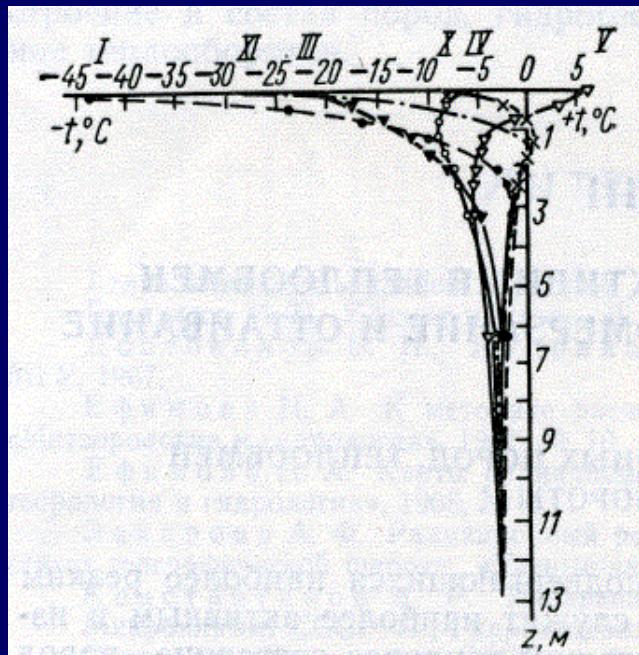


Рис. 4. Кривые изменения температур пород в зависимости от глубины в различные моменты времени

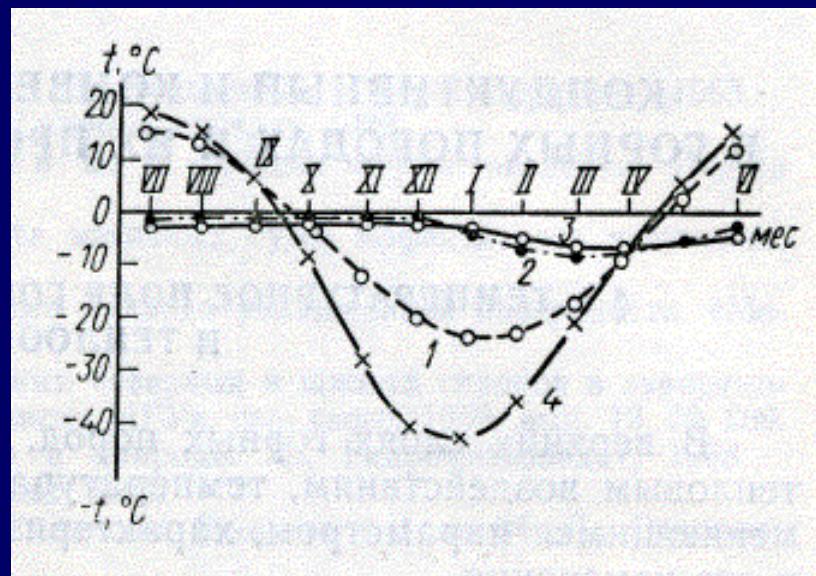


Рис. 5. Кривые изменения температур почв в зависимости от времени на глубинах: 1 — 0,4 м; 2 — 2 м; 3 — 2,4 м;
4 — воздуха

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

Естественная динамика мерзлых толщ. Влияние граничных условий на формирование мощности мерзлых толщ.

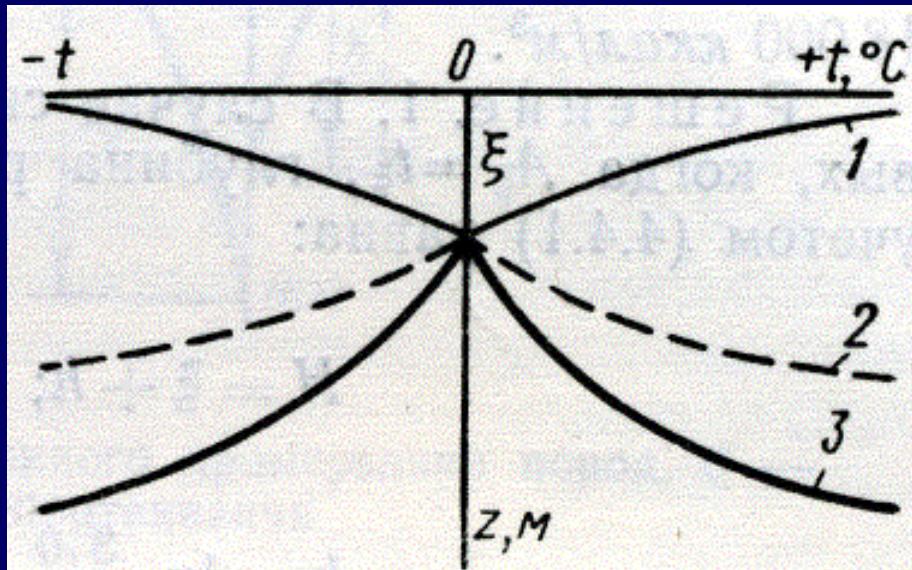


Рис. 27. Широтная зональность:
1 — глубина сезонного промерзания и оттаивания пород, 2 — глубина потенциального сезонного промерзания и оттаивания, 3 — глубина распространения годовых колебаний температур

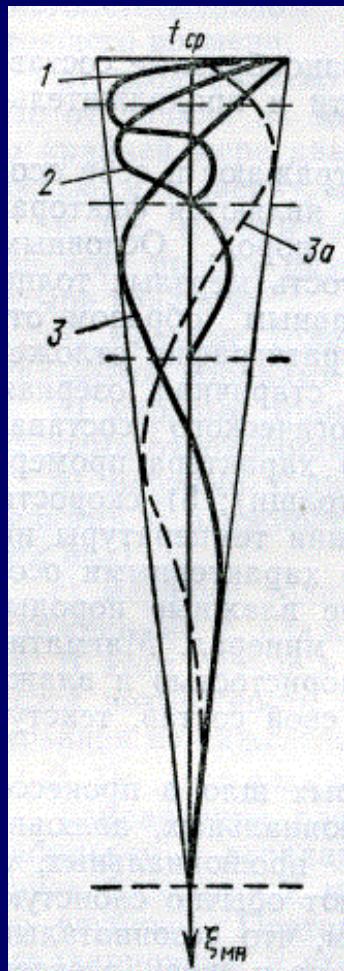
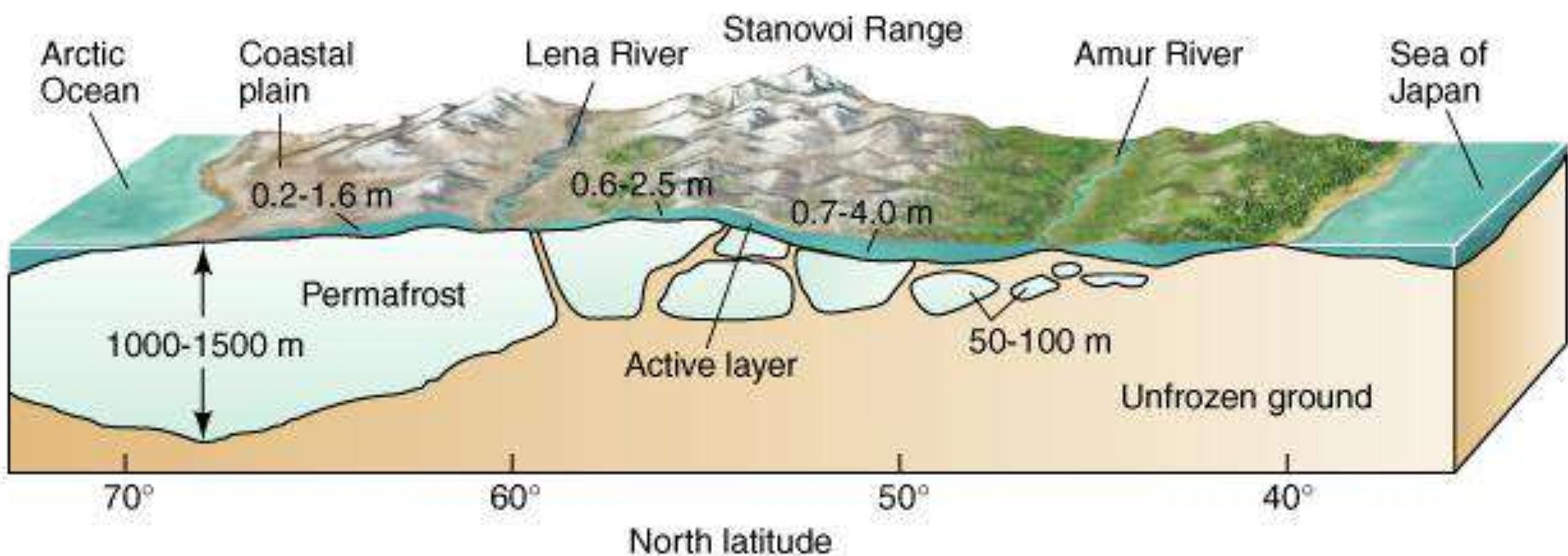


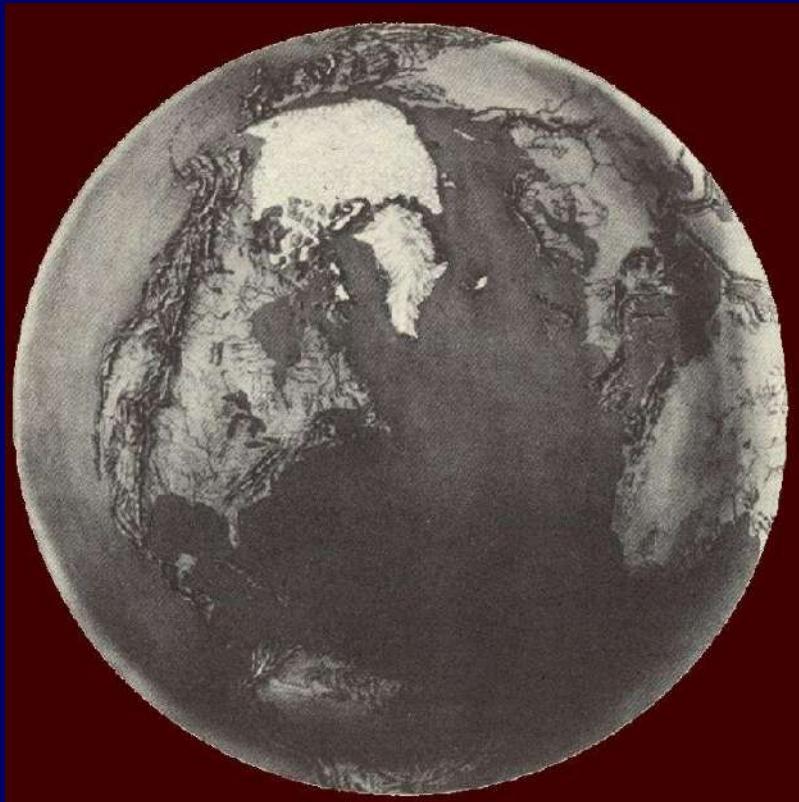
Рис. 49. Затухание амплитуд с глубиной в зависимости от T_{mn} :
1 — 10 лет, 2 — 40 лет, 3 — 300 лет
(3а—смещение фаз—
максимумов и мини-
мумов—в глубину за
четверть периода)

Вечная мерзлота в Сибири



Распространение многолетнс- и сезонномерзлых (талых и немерзлых) пород на территории России

Область (по налинию и отсутствию мерзлых пород)	Зона по ландшафтно-климатической зональности теплообмена на поверхности	Подзона			Тип сезонного оттаивания многолетнемерзлых и сс-зонного 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 почв, °С	
Многолетняя криолитозона (многолетне-мерзлые горные породы)	Северная геокриологическая	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 геокриологическая	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



Современное
оледенение
Земли

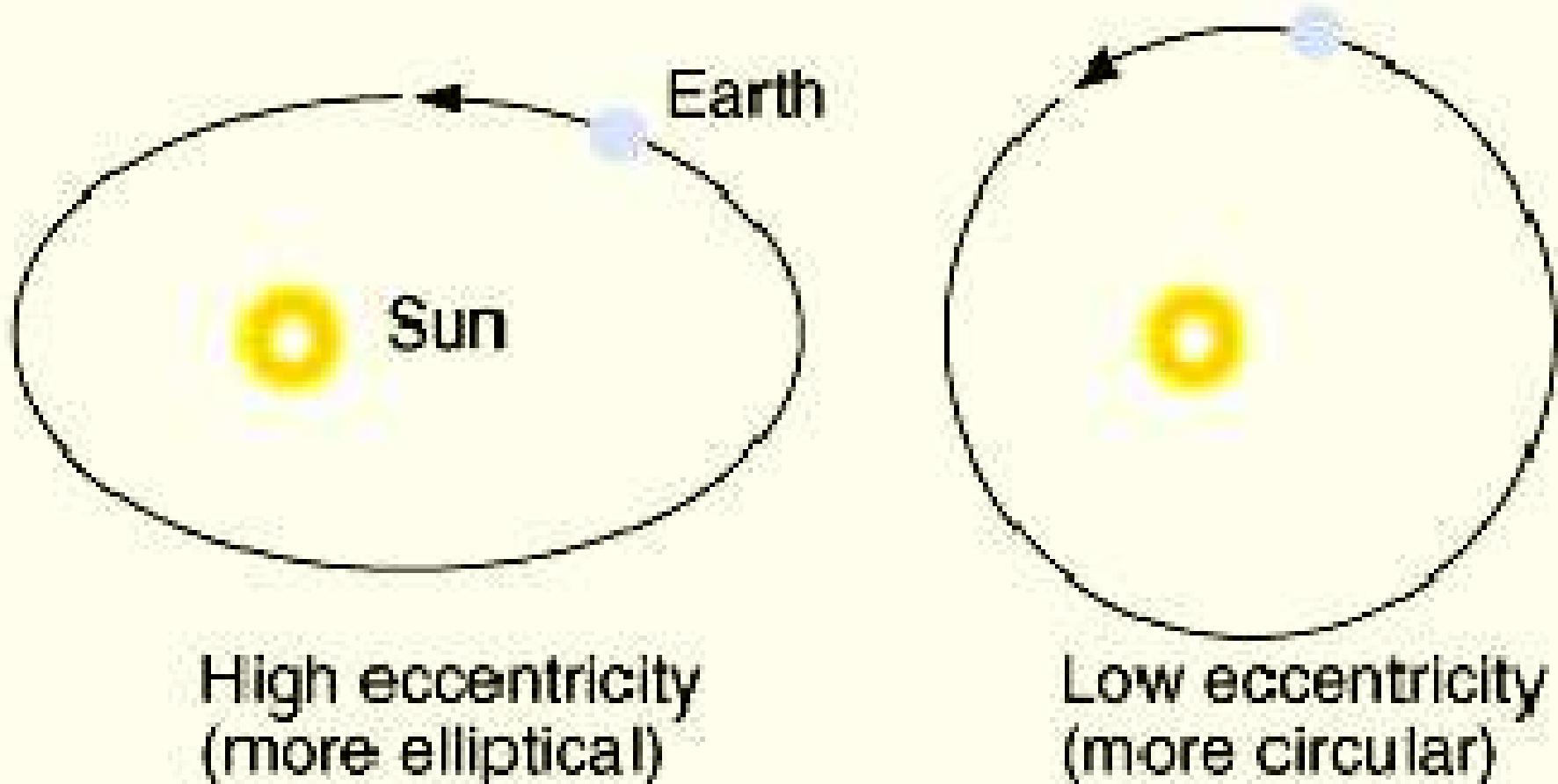


Оледенение
Земли в
плейстоцене

Причины похолоданий

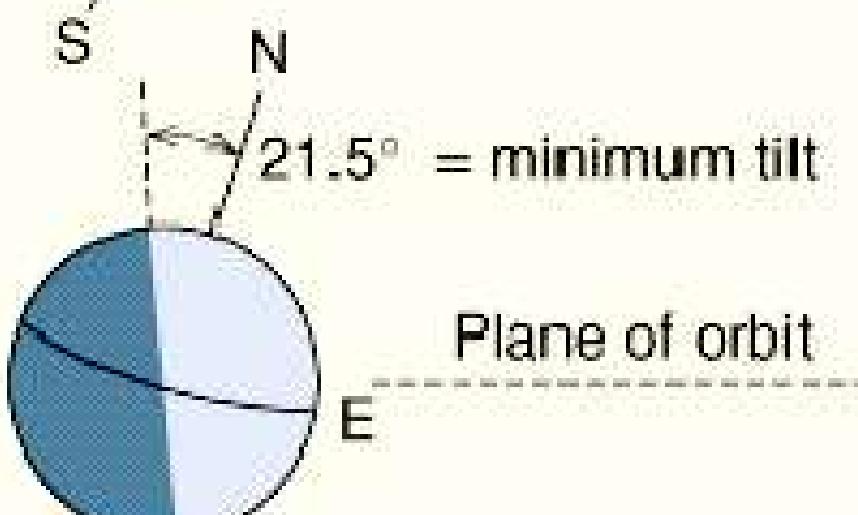
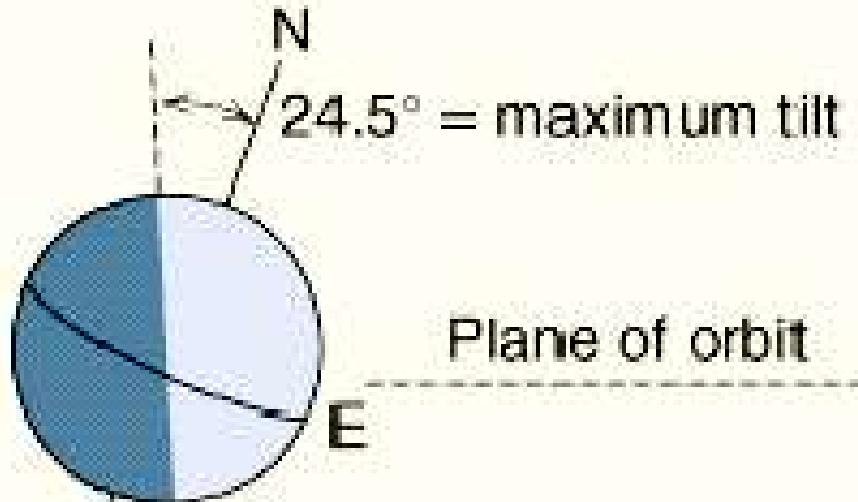
- Astronomical
- Variations in solar radiation
- Atmospheric changes
- Tectonic causes

C. Eccentricity (dominant period = 100,000 years)



Variations of Earth's orbit

B. Tilt of the axis (period = 41,000 years)

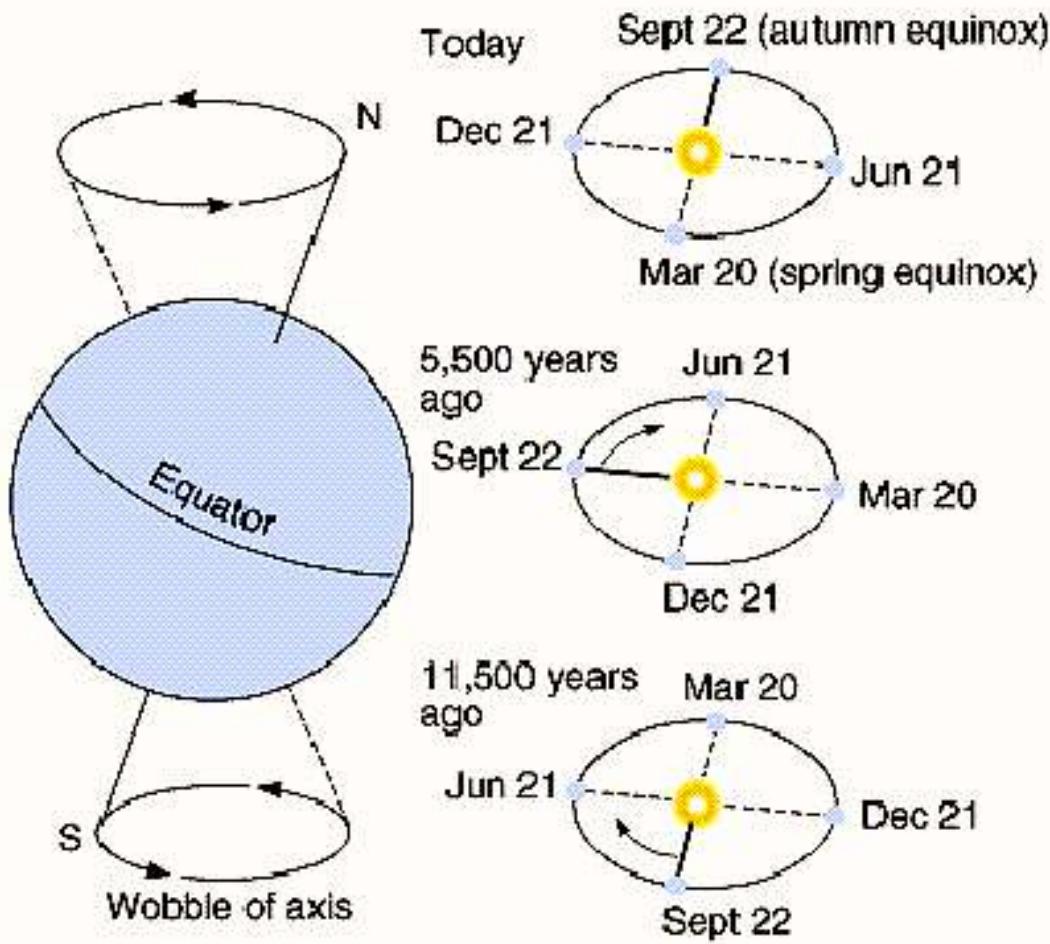


Tilt of Earth's Rotation Axis

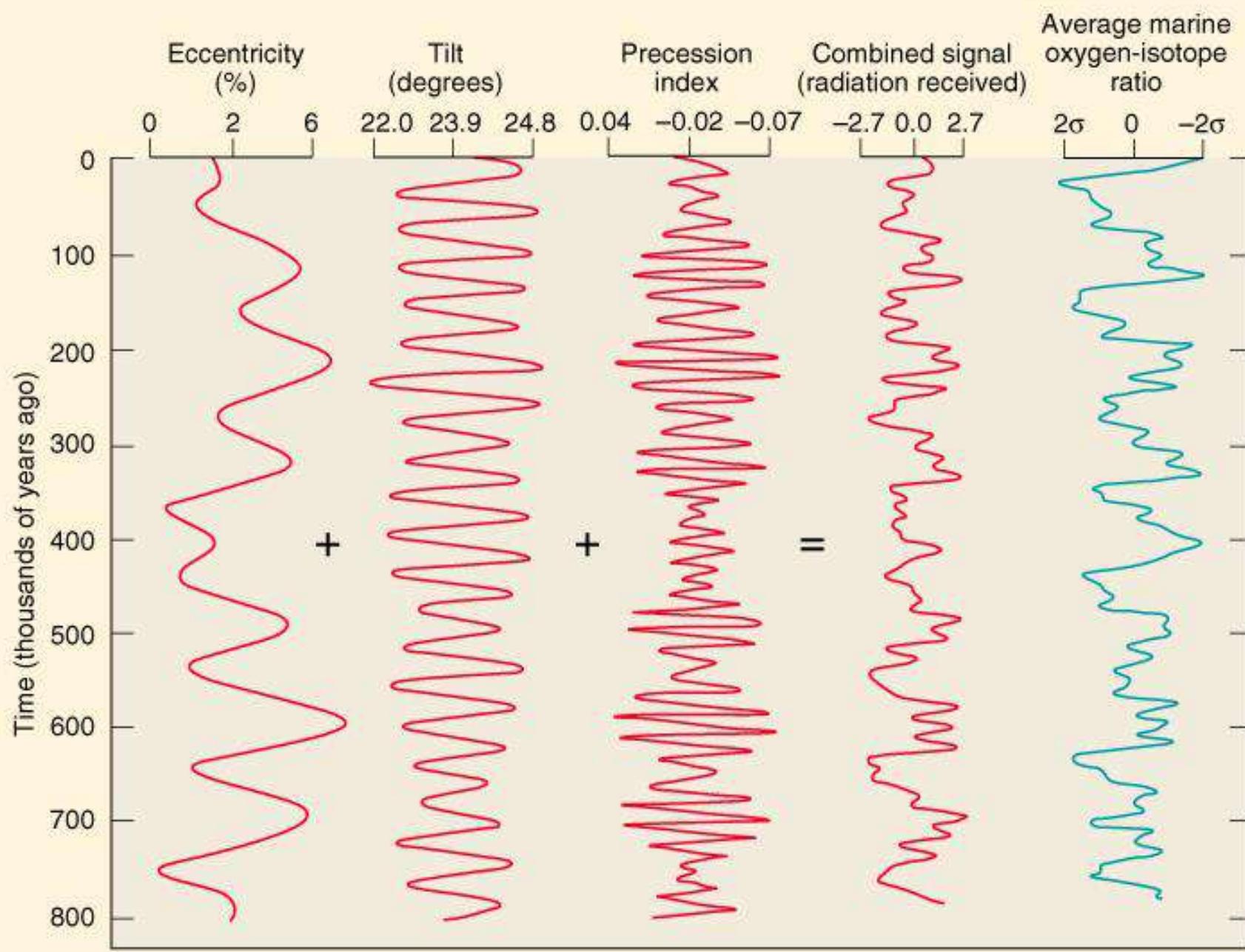
Изначально Земля была расплавлена и раскалена из-за сильного вулканизма и частого столкновения с другими телами. Но, в конце концов, из-за накопления воды в атмосфере, внешний слой планеты охлаждается и превращается в Земную кору. Немного позднее, в результате столкновения по касательной с небесным телом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

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

A. Precession of the equinoxes (period = 23,000 years)



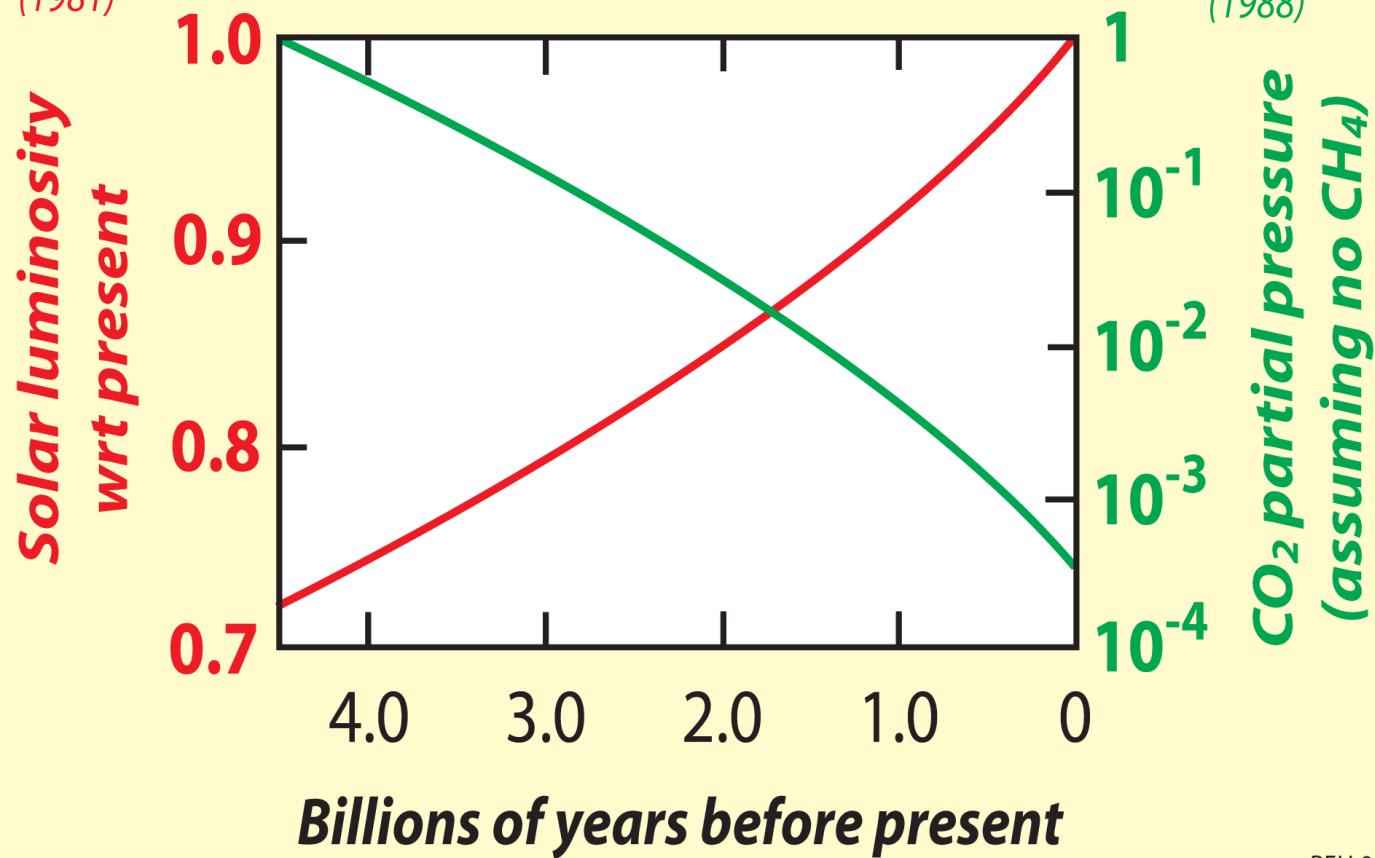
Precession: Наблюдать прецессию достаточно просто. Нужно запустить [волчок](#) и подождать, пока он начнёт замедляться. Первоначально ось вращения волчка вертикальна. Затем его верхняя точка постепенно опускается и движется по расходящейся [спирали](#). Это и есть прецессия оси волчка.



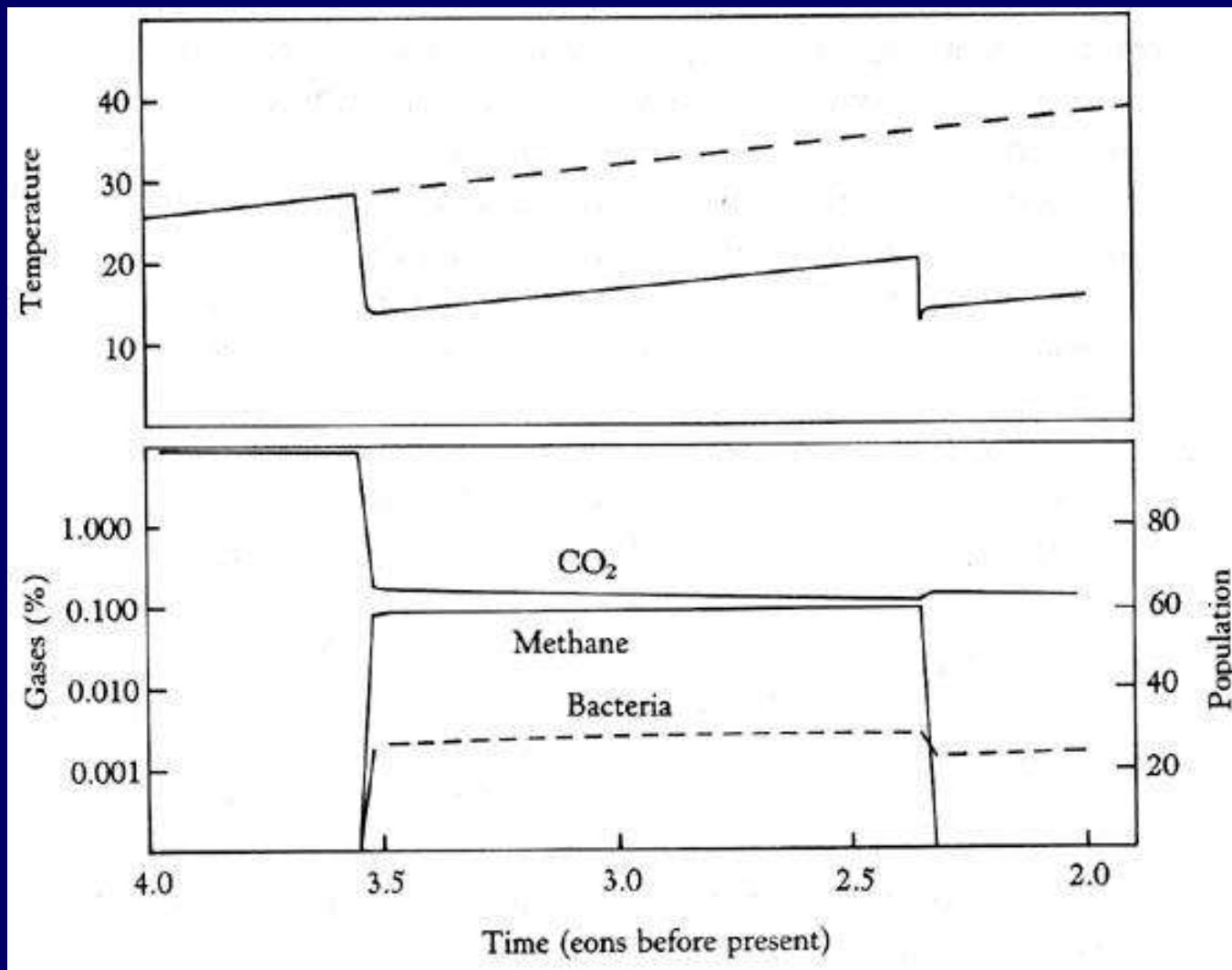
*Endahl & Sofia
(1981)*

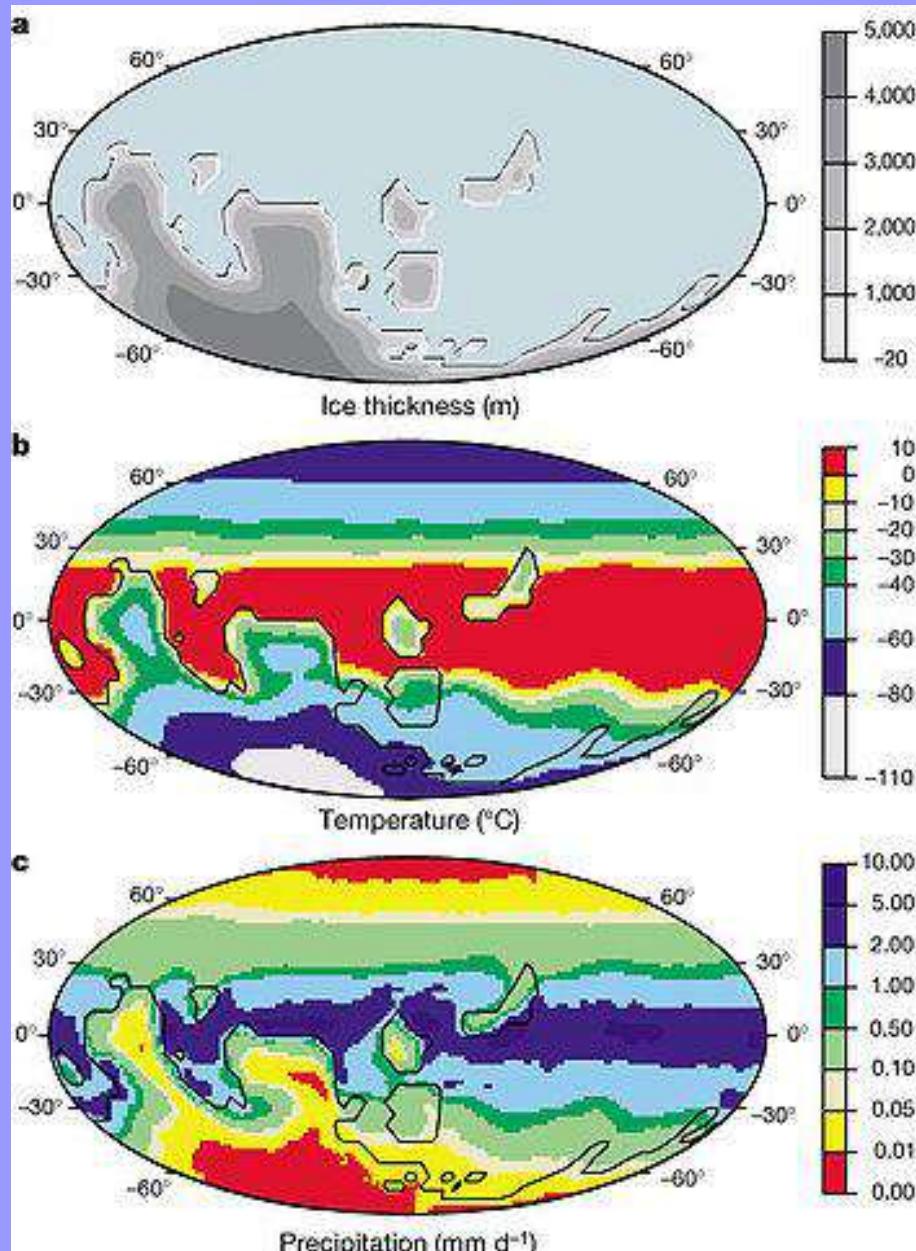
"Faint young Sun"

*Kasting et al.
(1988)*



Палеотемпературы: докембрий





One computer simulation of conditions during the Snowball Earth period



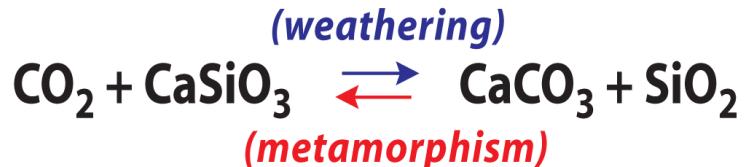
Diamictite of the Neoproterozoic Pocatello Formation, a 'snowball earth'-type deposit

Соприкасаясь с воздухом, силикатные горные породы подвергаются химическому выветриванию, которое удаляет диоксид углерода из атмосферы. В общем виде эти реакции выглядят так: минерал + CO_2 + H_2O → катионы + бикарбонат + SiO_2 . Пример подобной реакции — выветривание волластонита:

$$\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SiO}_2 + \text{HCO}_3^-$$

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 геологических масштабах времени компенсирует выделение углекислого газа вулканами.

CO₂ emission and consumption are kept in rough balance by a negative feedback resulting from the temperature-dependence of silicate weathering. The feedback operates on a million-year time scale.



Walker et al. (1981) Jour. Geophys. Res., 86, 9776.

↑ CO₂ sources (emissions)

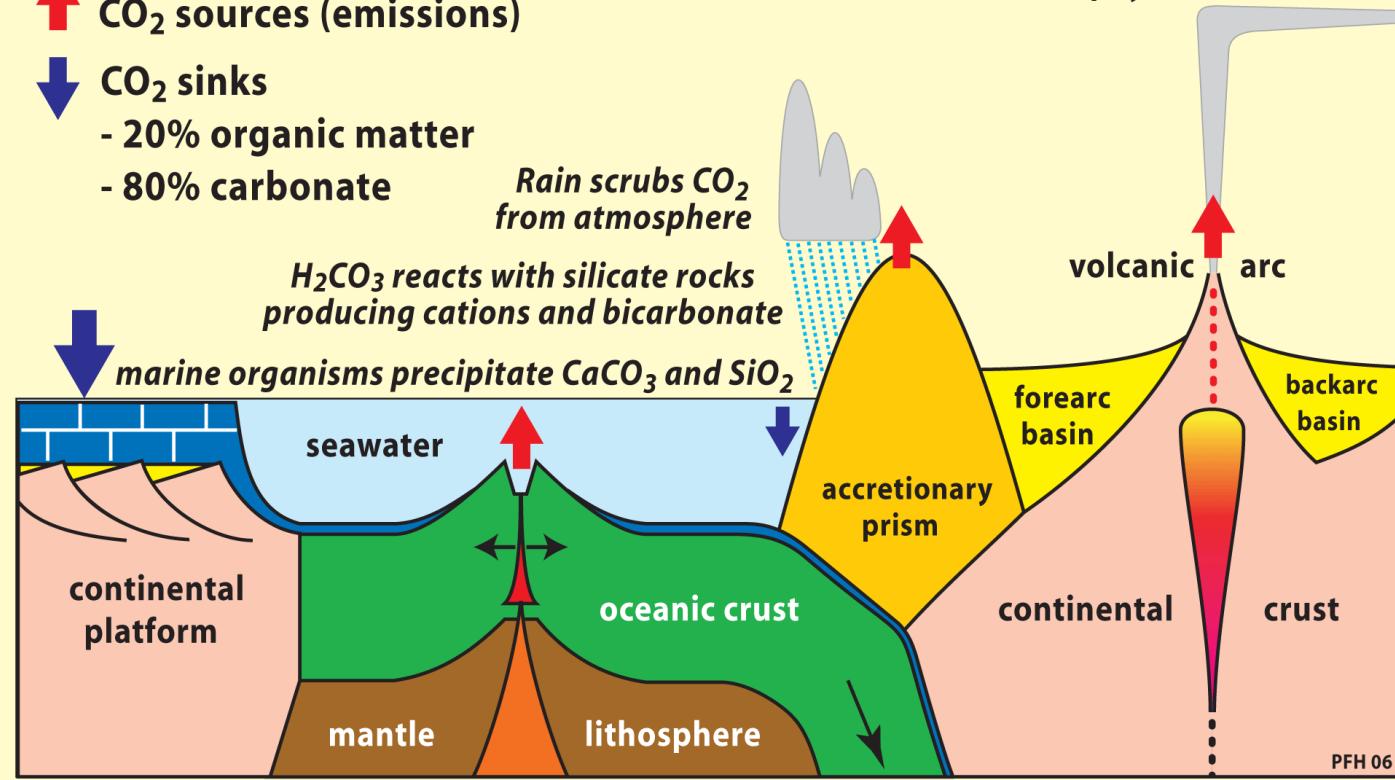
↓ CO₂ sinks

- 20% organic matter
- 80% carbonate

Rain scrubs CO₂ from atmosphere

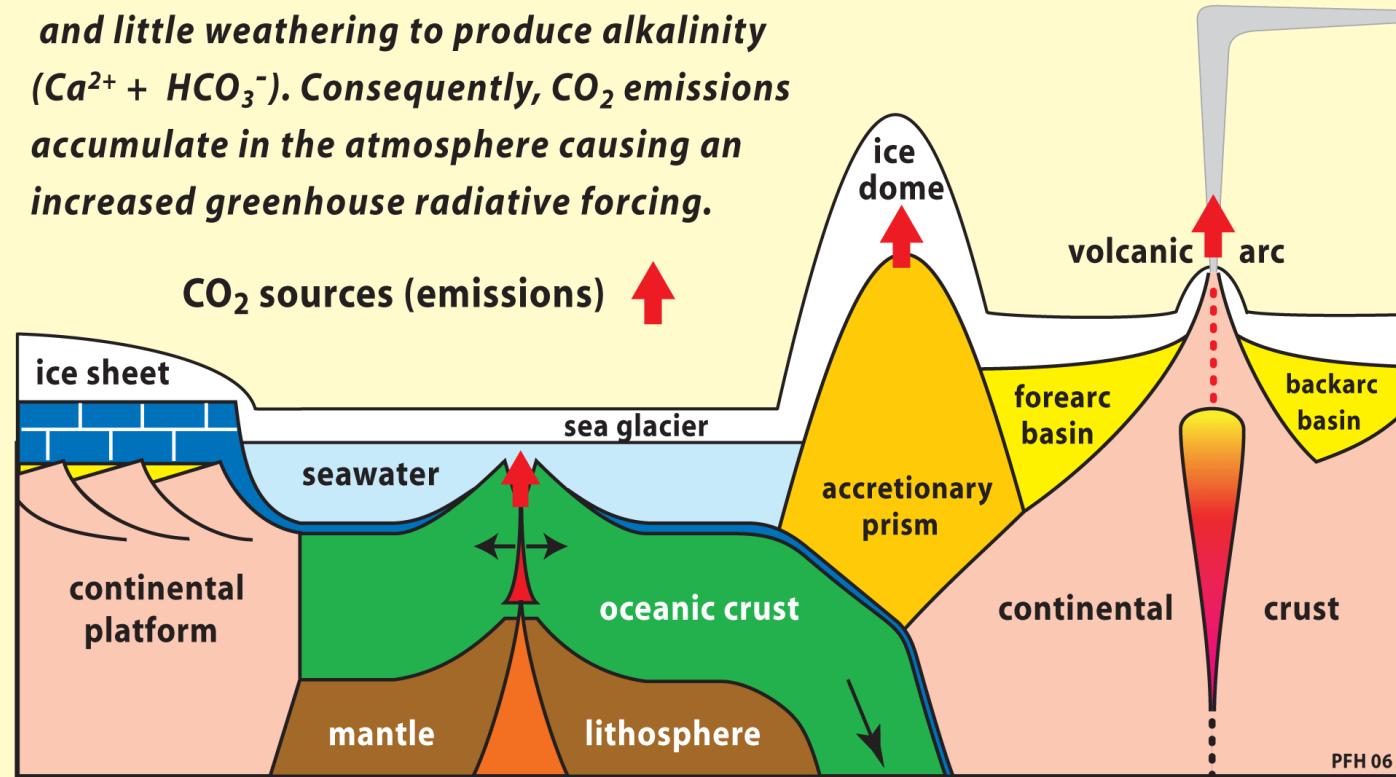
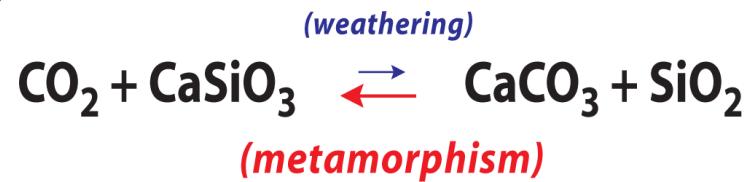
H₂CO₃ reacts with silicate rocks producing cations and bicarbonate

marine organisms precipitate CaCO₃ and SiO₂



Snowball Earth

With global mean temperature of -50°C , there is no rain to scrub CO_2 from the atmosphere, and little weathering to produce alkalinity ($\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$). Consequently, CO_2 emissions accumulate in the atmosphere causing an increased greenhouse radiative forcing.



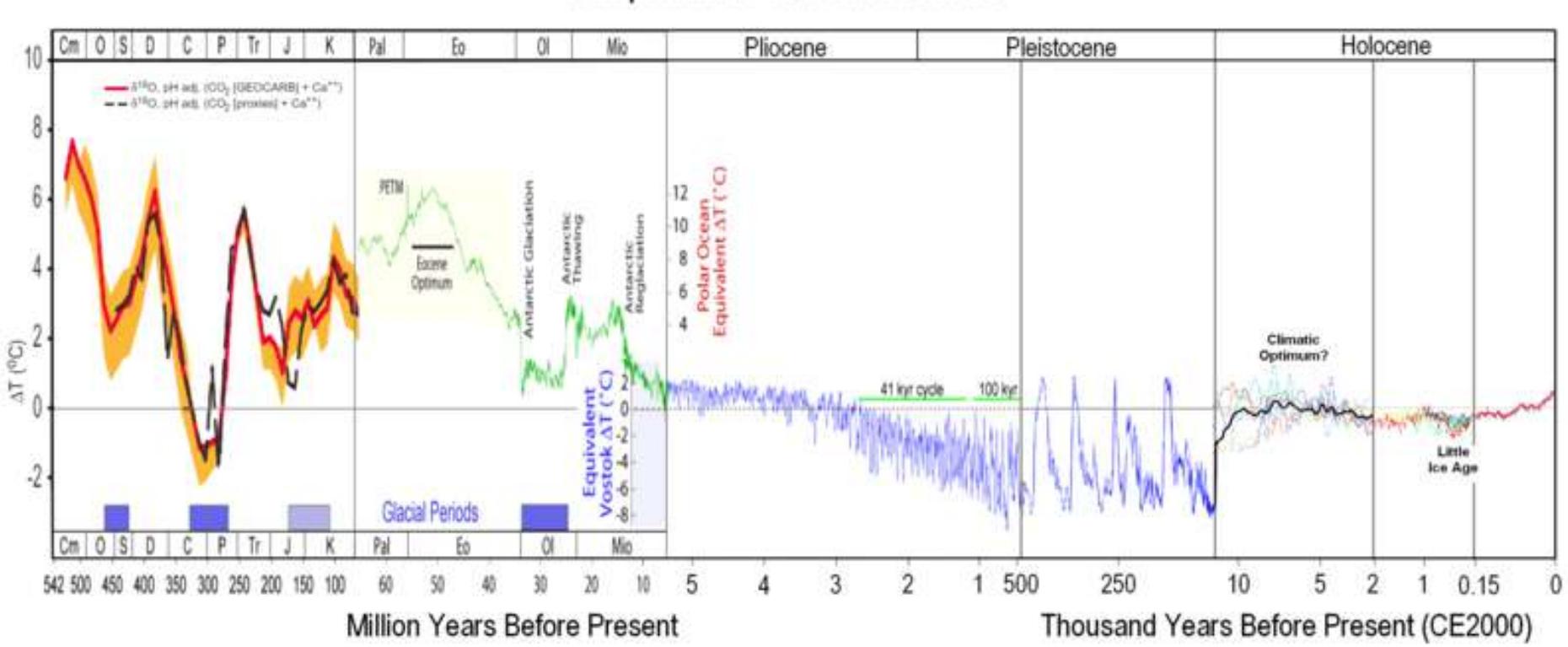
На континентах таяние ледников обнажит большое количество ледниковых отложений, которые начнут эродировать и выветриваться.

Попавшие в результате этого в океан осадки, богатые такими биогенами, как фосфор, вкупе с обилием CO₂, 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 развиться многоклеточным формам. Эта петля положительной обратной связи растопила лёд в геологически короткое время, возможно, меньшее, чём 1000 лет; накопление в атмосфере кислорода и падение содержания CO₂ продолжалось несколько последующих тысячелетий.

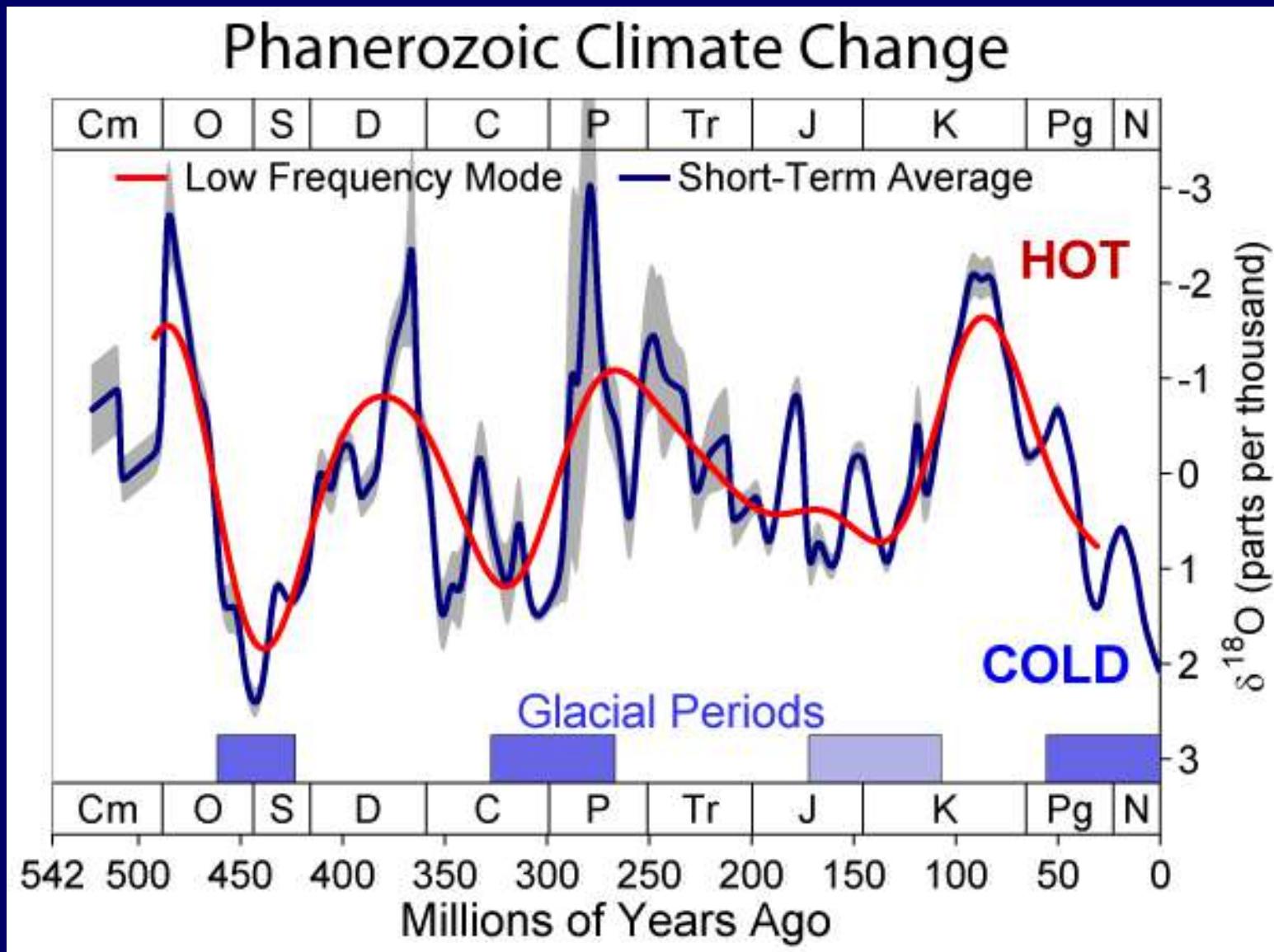
Палеотемпературы: фанерозой

Temperature of Planet Earth



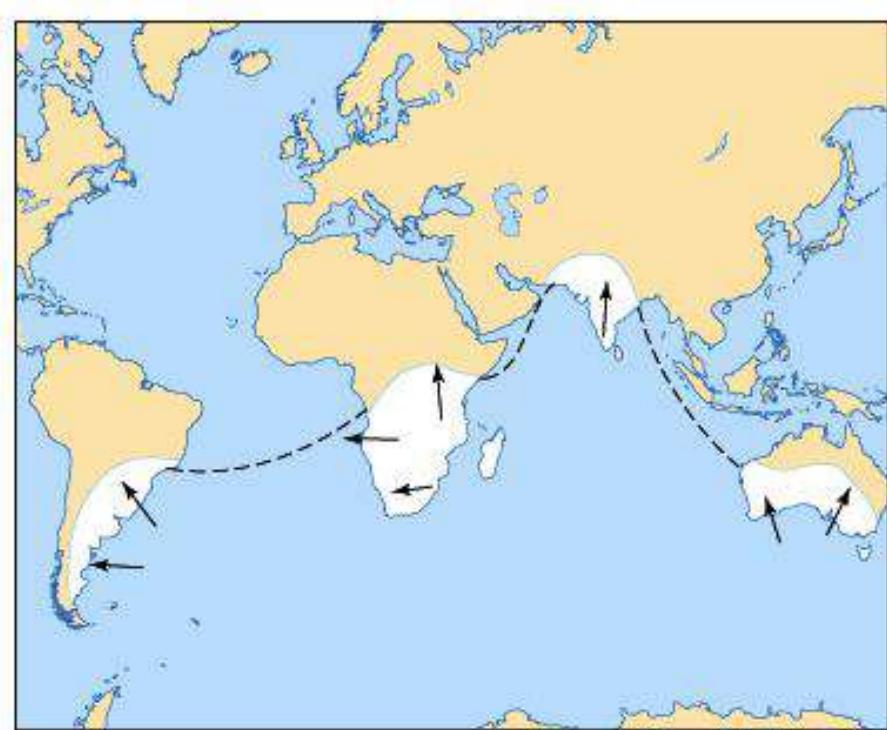
Sigman, D.M.; E.A. Boyle (October 2000).
"Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide" Nature 407 (6806): 859–869.

Палеотемпературы: фанерозой



Каменноугольно-пермская, или Гондванская ледниковая эпоха

Paleozoic (300 Ma) Glaciation



Палеотемпературы: кайнозой

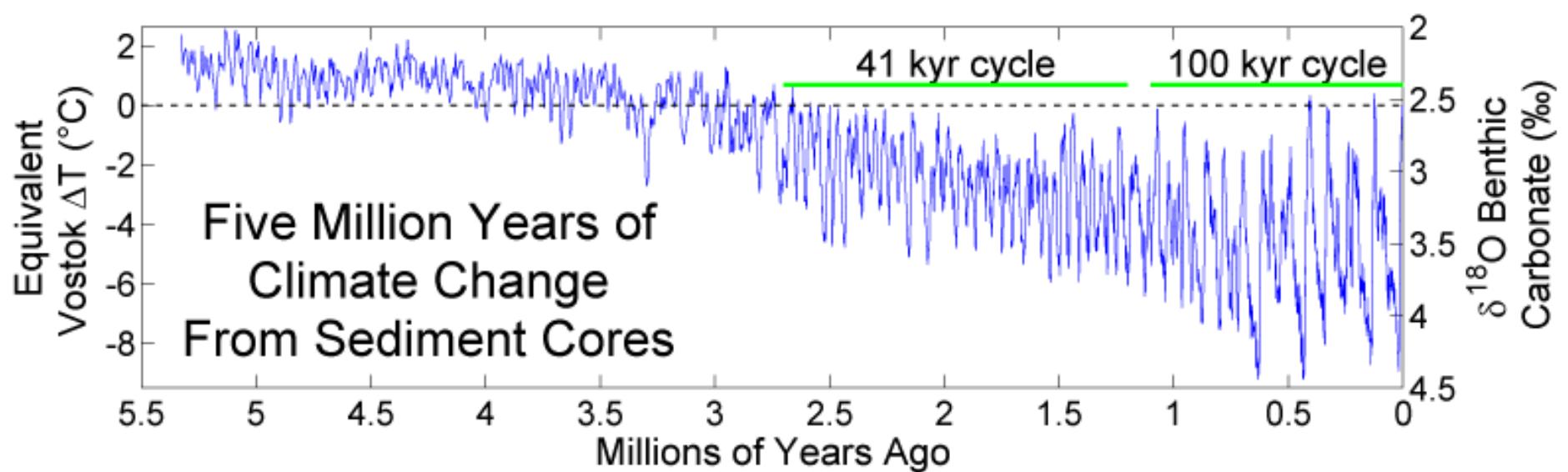
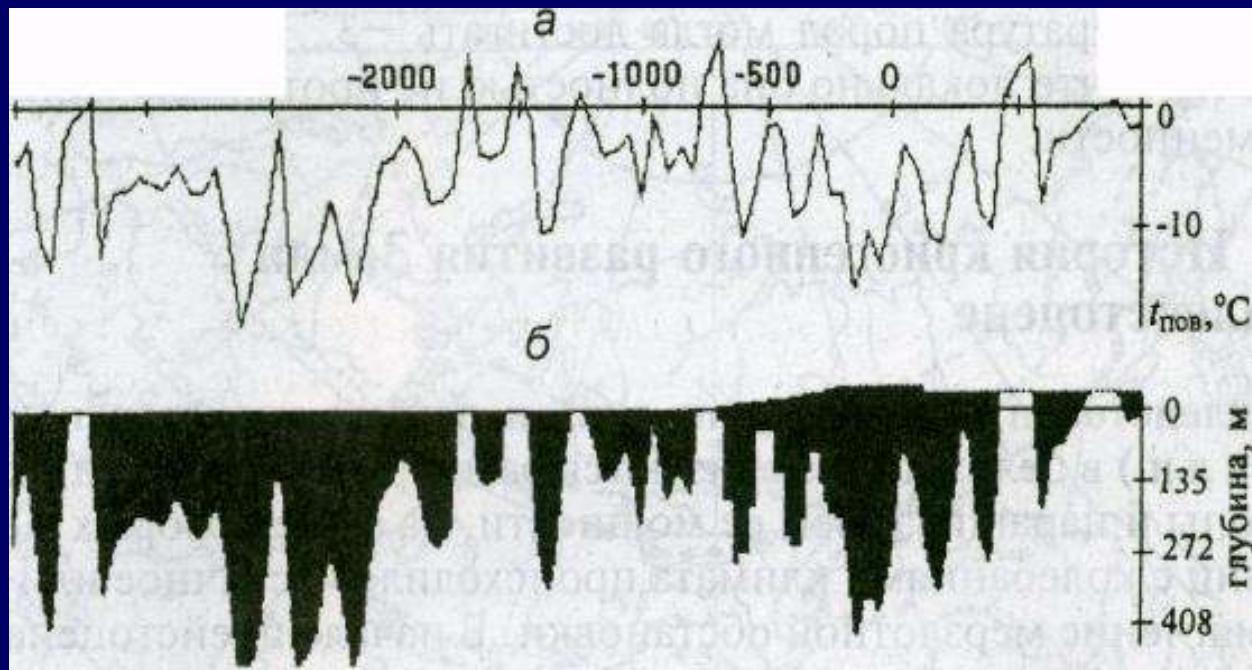


Таблица 5

Транссевероазиатская корреляция оледенений в сопоставлении с альпийской шкалой и Аляской, тыс. лет (Архипов, 1983)

Альпийская шкала	Западная и Восточная Сибирь				Аляска
	Оледенения	Межледниковая (межстадиалы)	Оледенения	Межледниковая (межстадиалы)	
W ₃	10 Позднезырянское (Сартанское) 22 22		Искатеньское, Хаймикинское (Гордеевское) 17 ± 4 ; 24 ± 4		Нептаун
W	W ₂ 50(55)	Каргинское 22—46		Амгуэмское (Пенжин- ское) 22—44	Осадки, Барроу 25—40 Кинк
W ₁	Раннезырянское (Муруктинское)		Ванкаремское Тылхойское		
R-W	Зырянское 110 ± 17 ; 110 ± 27	Казанцевское		Валькатленское (Пенжинское) 112 ± 28	Пелукские 125
			Среднекрестовское кое (Номекурское) 145 ± 40		Номское
R	R ₁₋₂ Бахтинское 200±38 230±54 Самаровское	Ширтинское 180 ± 40		Мечигменское (Нижнекрестовское) 184 ± 22 Оляйонское (Юровское) 250 ± 50	Коцебус- ские 170—175
M-R	R ₁ 260±54 270±56	Тобольское 390 ± 80		Янракинотское (Уракское) 350 ± 87	Эйнахнуто 320 ± 70
	M ₁₋₂ Позднешайтанское		Позднемитогинское (Охотское) 470 ± 120		
M ₁	Раннешайтанское	Тильтимское		Маломитагинское	?
			Раннемитогинское (Авлекитское) 580 ± 150		+
			Позднеольховское	647 ± 78	



**Динамика мерзлых толщ в плиоцене—
плейстоцене для Арктических
низменностей Северо-Востока России:**

**а — ход температуры на поверхности
пород; б — изменение мощности
мерзлых толщ**

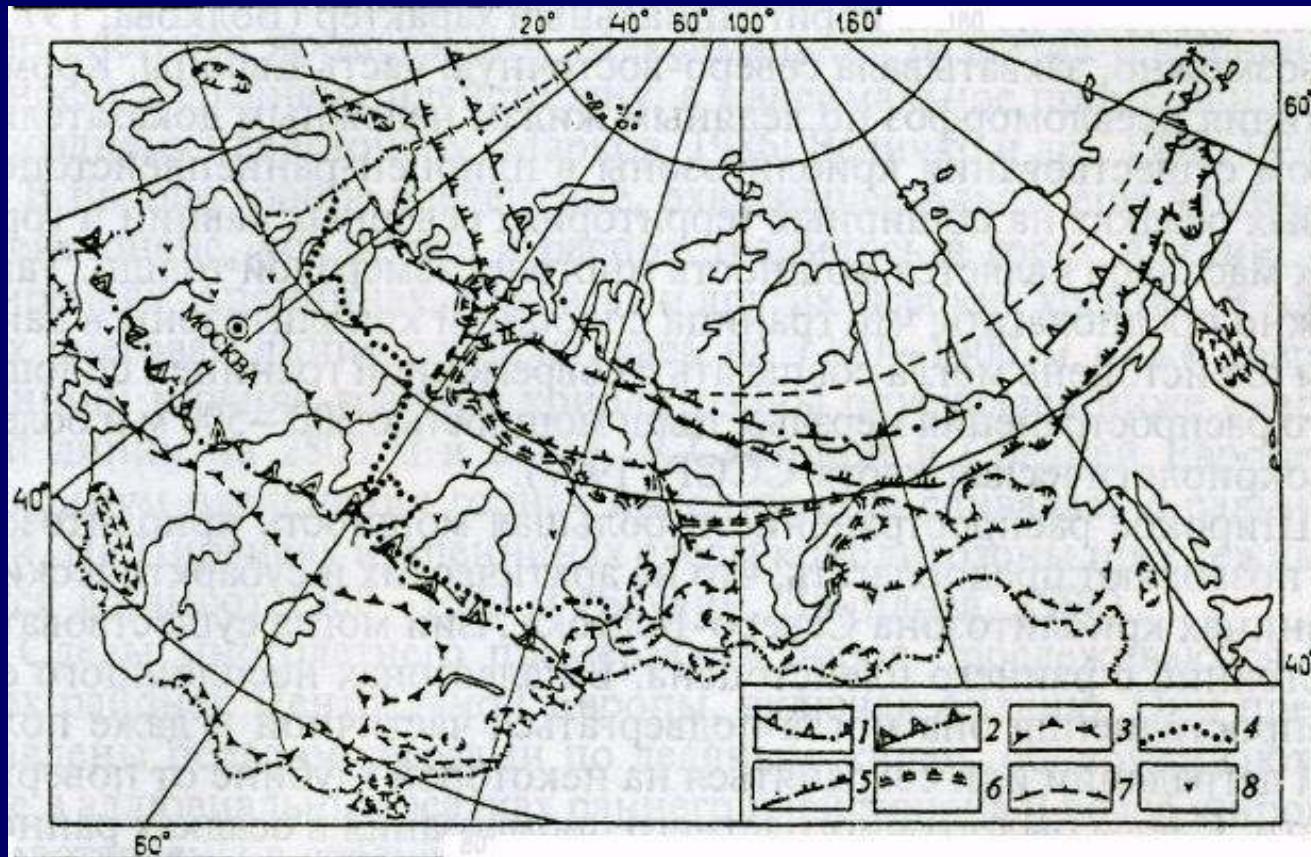


Схема возможного распространения криолитозоны к концу различных периодов позднего кайнозоя (по К.А.Кондратьевой):

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



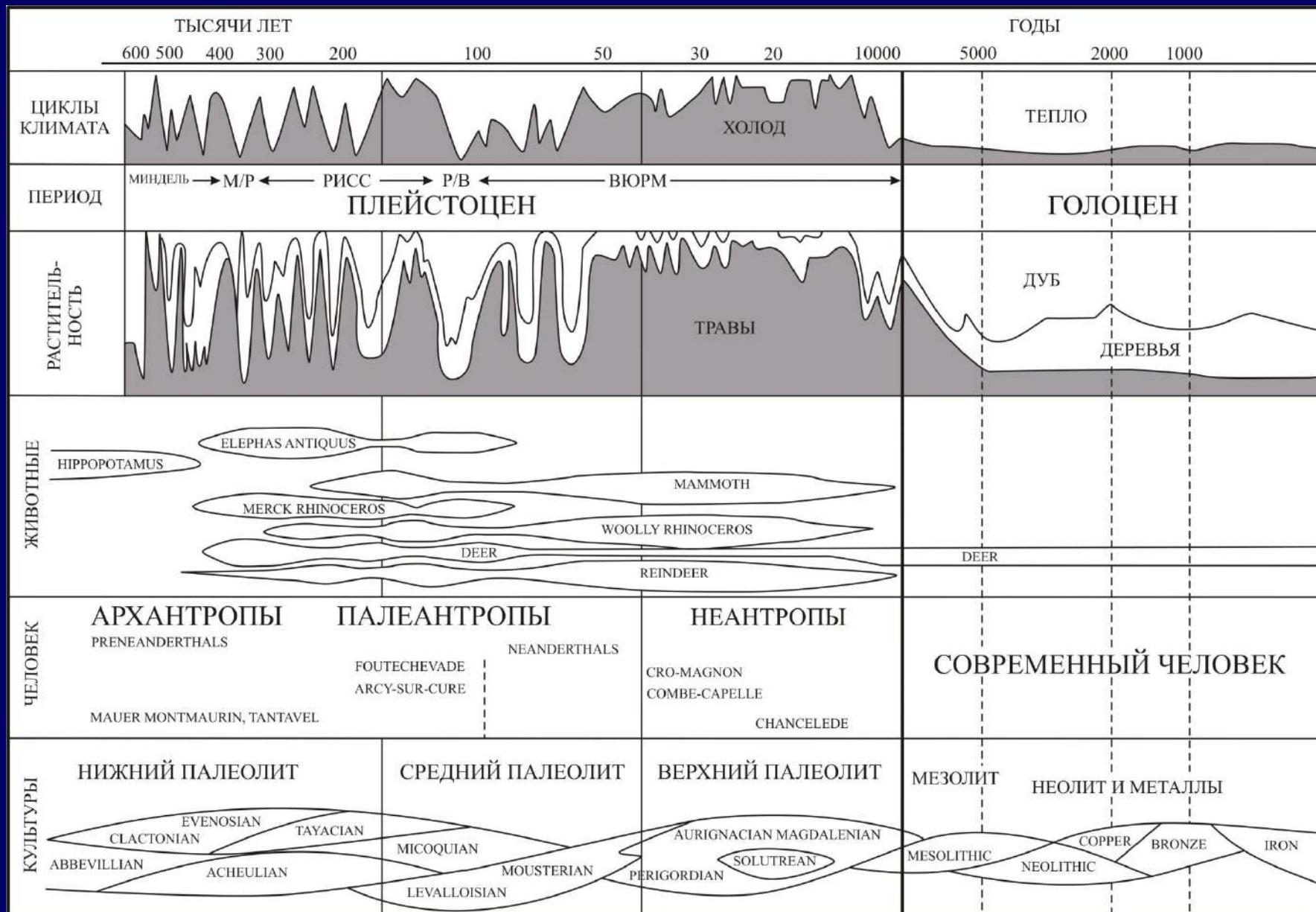
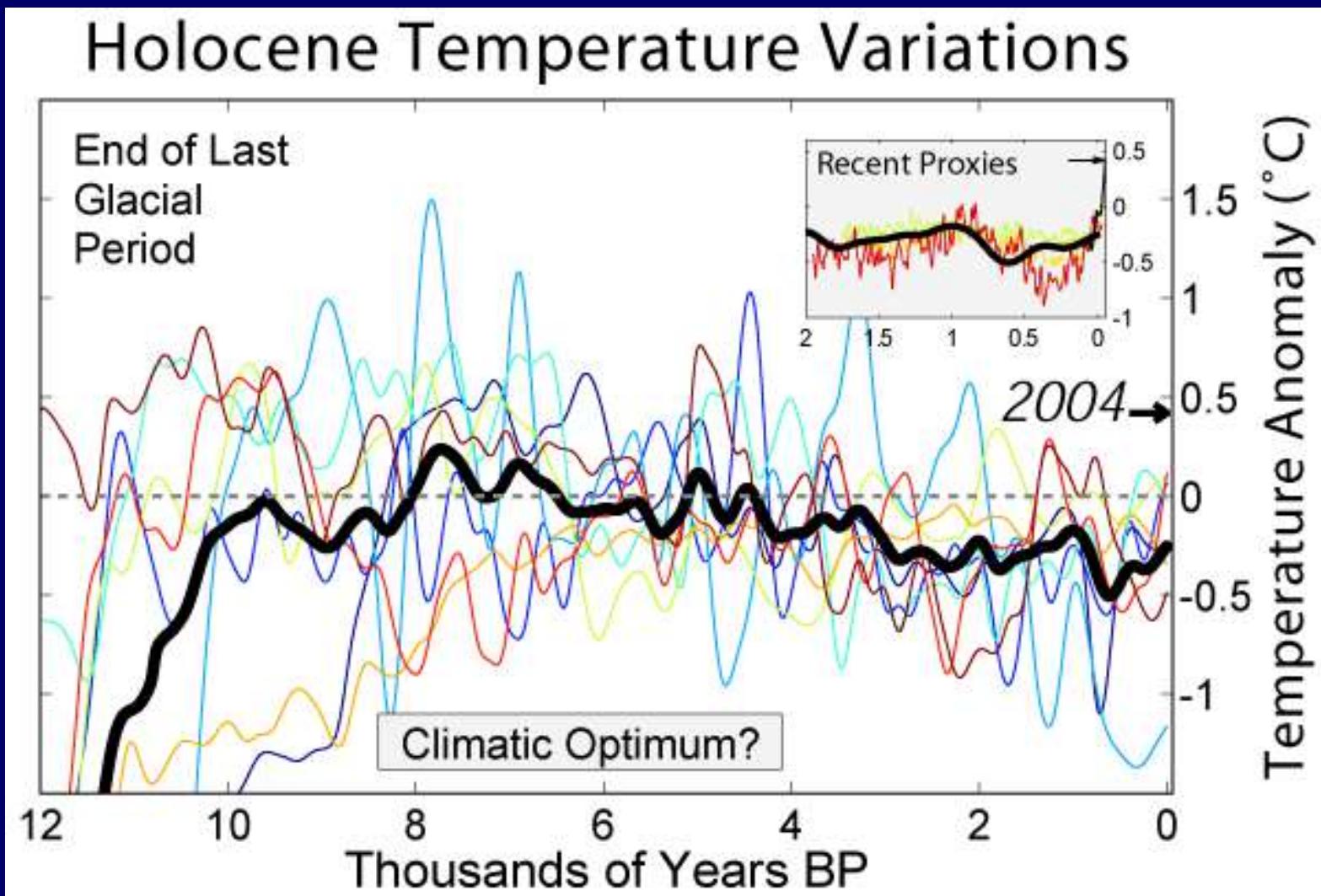
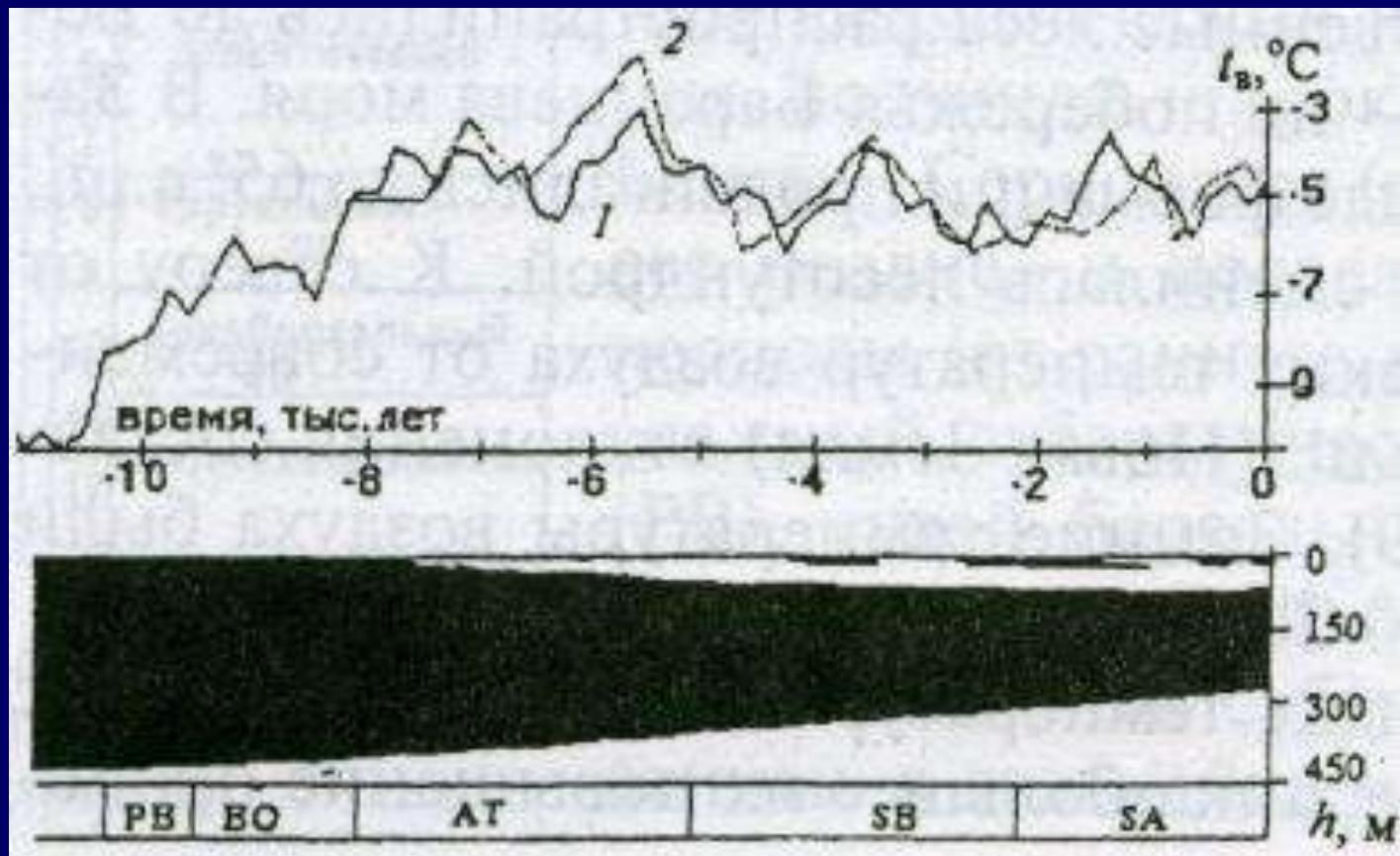


Рис. 45. Временная (годы, вверху) шкала изменений сверху вниз: температуры, растительности, развития животного мира и человеческих культур (Leroi-Gourhan, 1989)

Палеотемпературы: голоцен





Динамика мерзлых толщ в голоцене для Русской платформы:
вверху — ход расчетной температуры на поверхности пород (1) и исходной
пaleотемпературы (2); внизу — изменение мощности мерзлых пород

КРИОЛОГИЯ ПЛАНЕТ

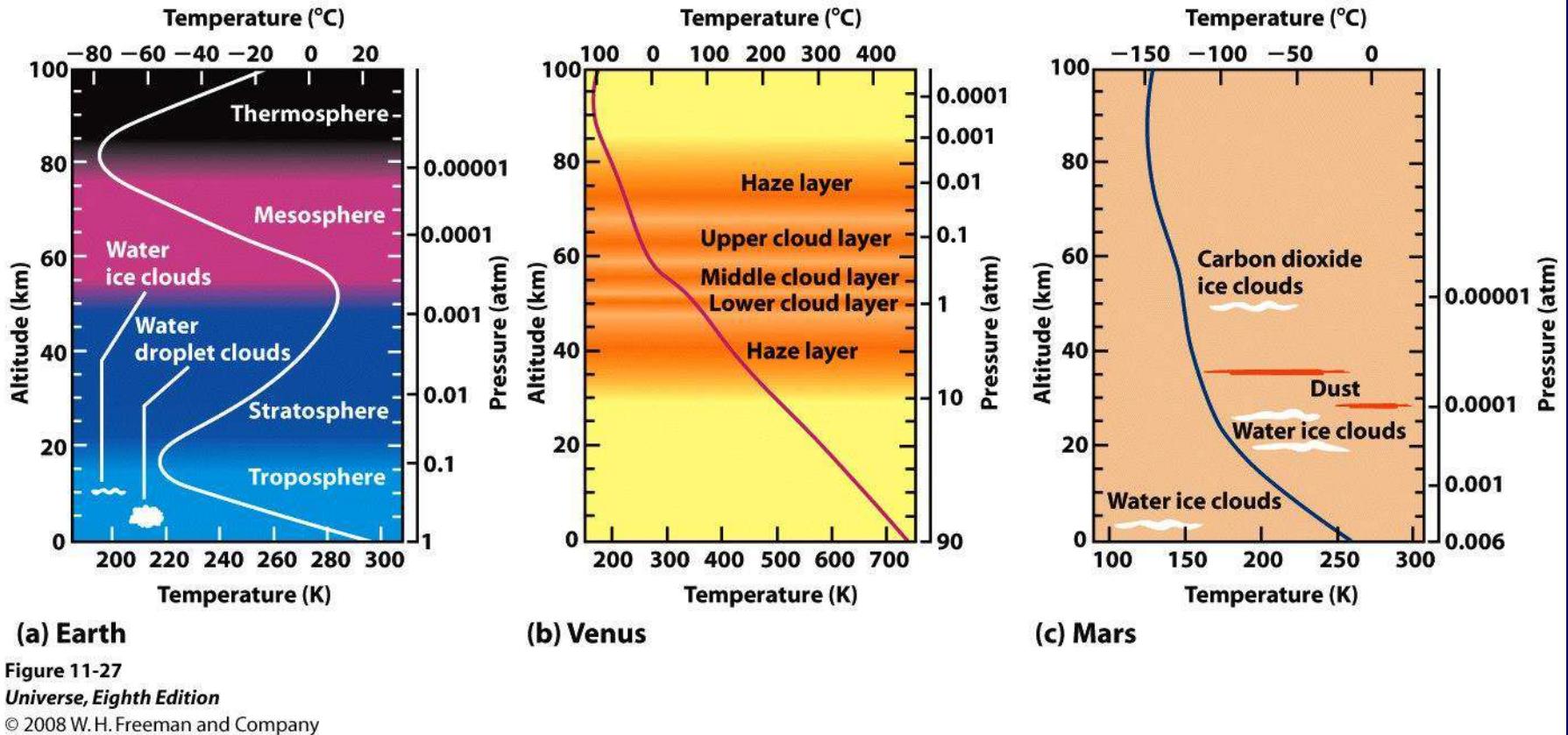


Figure 11-27

Universe, Eighth Edition

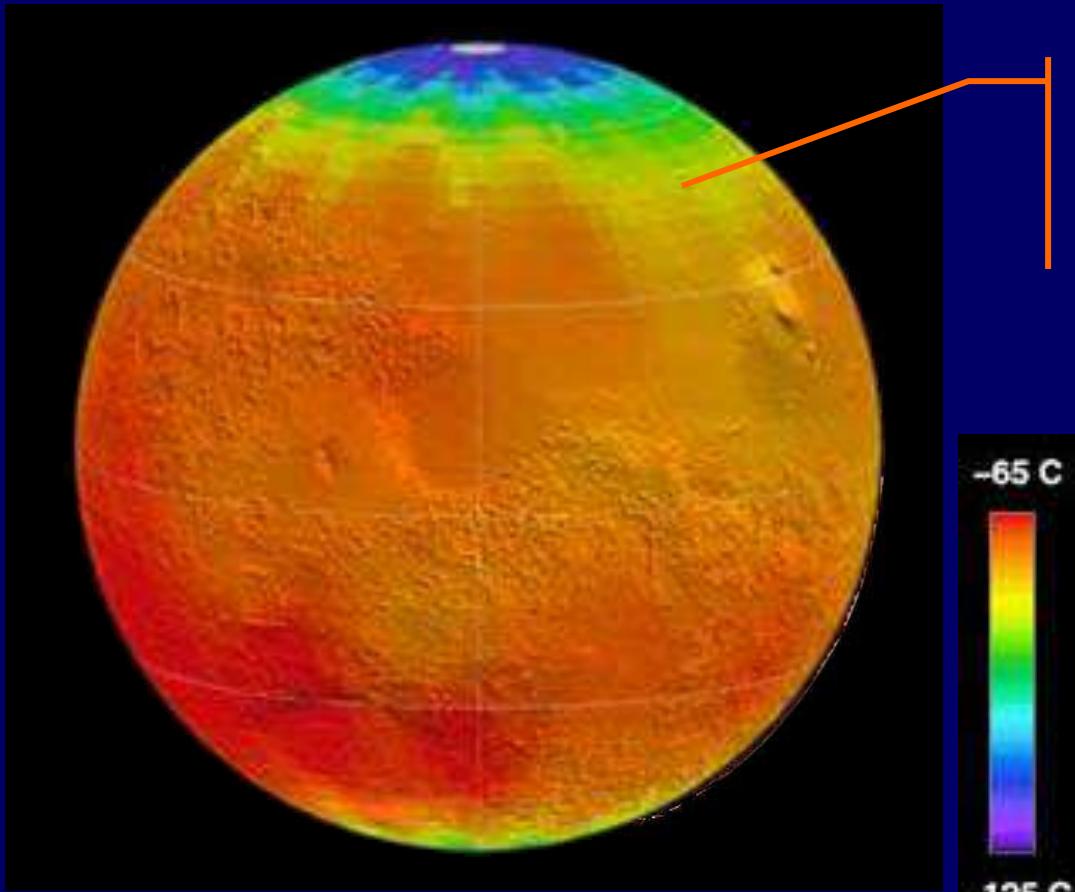
© 2008 W.H. Freeman and Company

Характеристики планет

- Состояние воды контролируется температурой и давлением
- Температуры определяются расстоянием от Солнца и парниковым эффектом

	Distance from our Sun	Greenhouse Gases	Temperature	Atmospheric Pressure
Venus	0.72UA	96.5% CO ₂	460°C	9.3 MPa
Mars	1.5UA	95.32% CO ₂ 0.07% H ₂ O	-53°C	6 hPa (av)
Titan	9.5UA	1.4% CH ₄	-179°C	147 kPa

Температура на Марсе

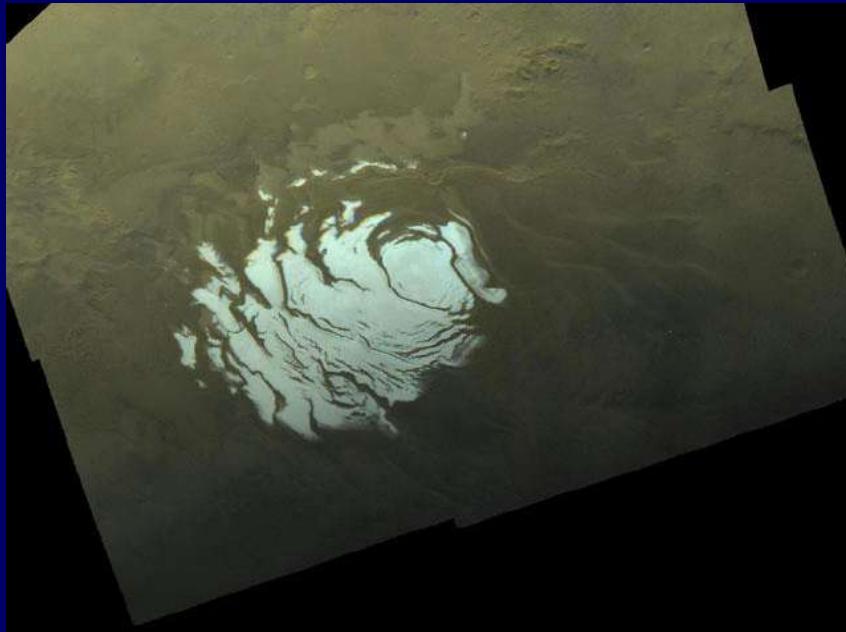


JUL 14, 2001

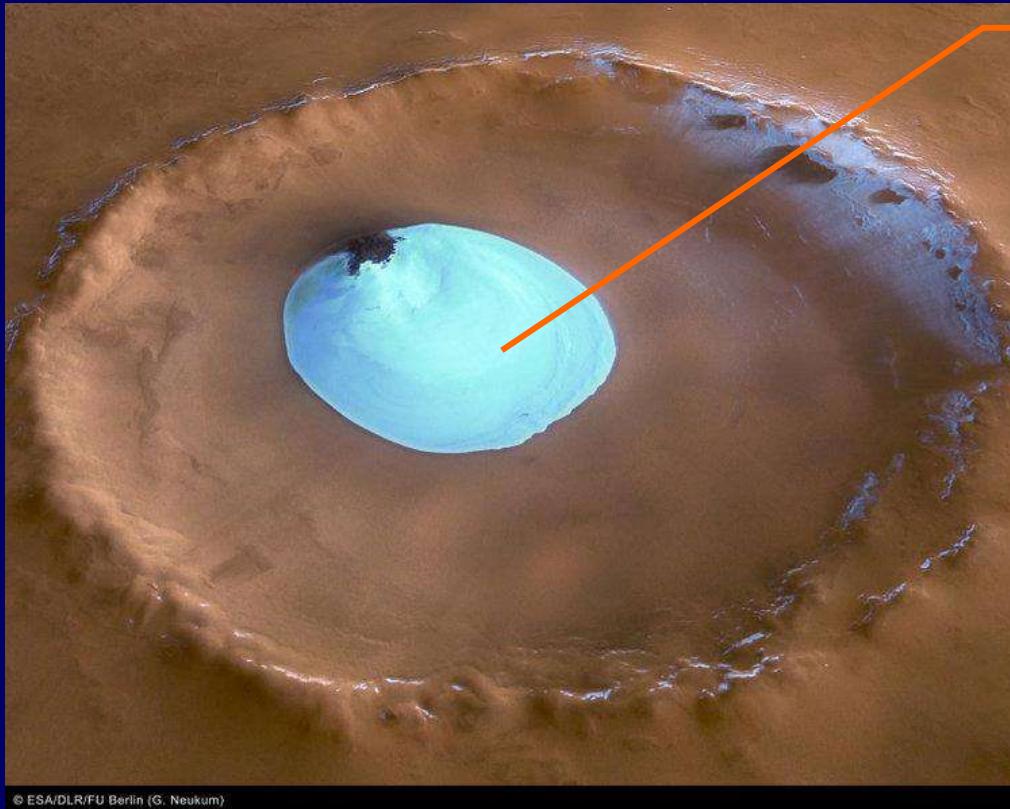
Mars Atmosphere
Temperature at Night

Cold enough to let freeze
CO₂ in Martian winter

Вода и углекислый газ в составе ледяной шапки Марса на южном полюсе



Ледяные озера

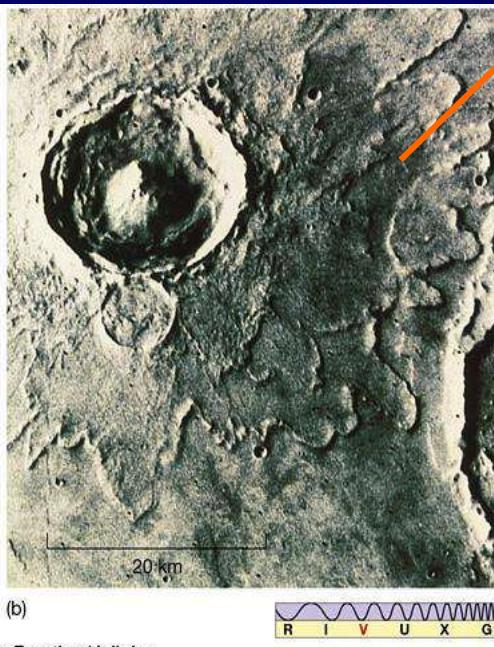
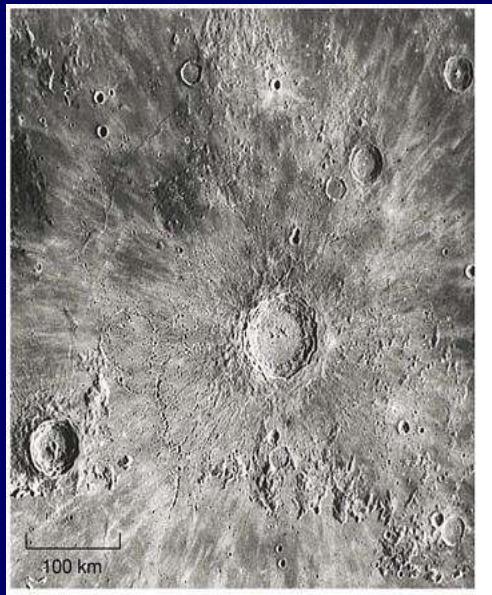


Water-Ice lake

Discovered in a meteor crater on the northern hemisphere

Must be water ice because the CO₂ ice on the poles has already sublimated at this moment

Следы воды вблизи кратеров



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

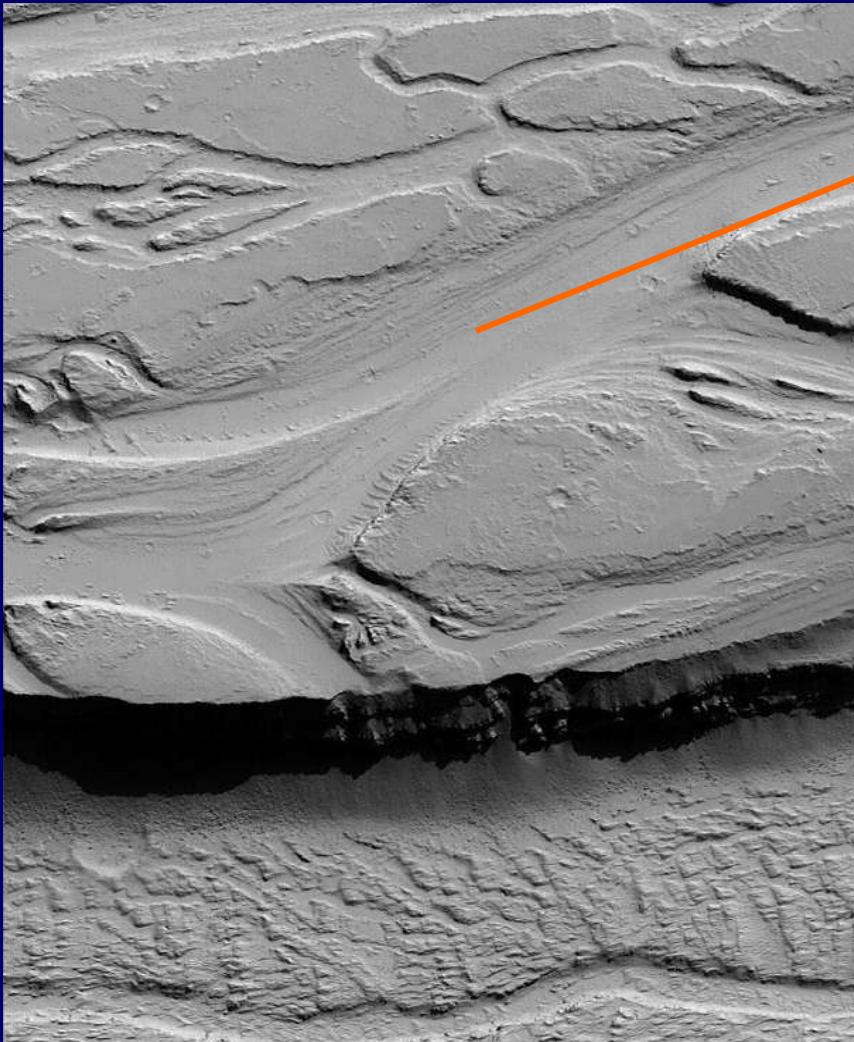
Water erosion

The permafrost in surface layers on Mars melted at impact and the water carried loose particles away from the crater.



Овраги в Саратове

Водные формы рельефа на Марсе



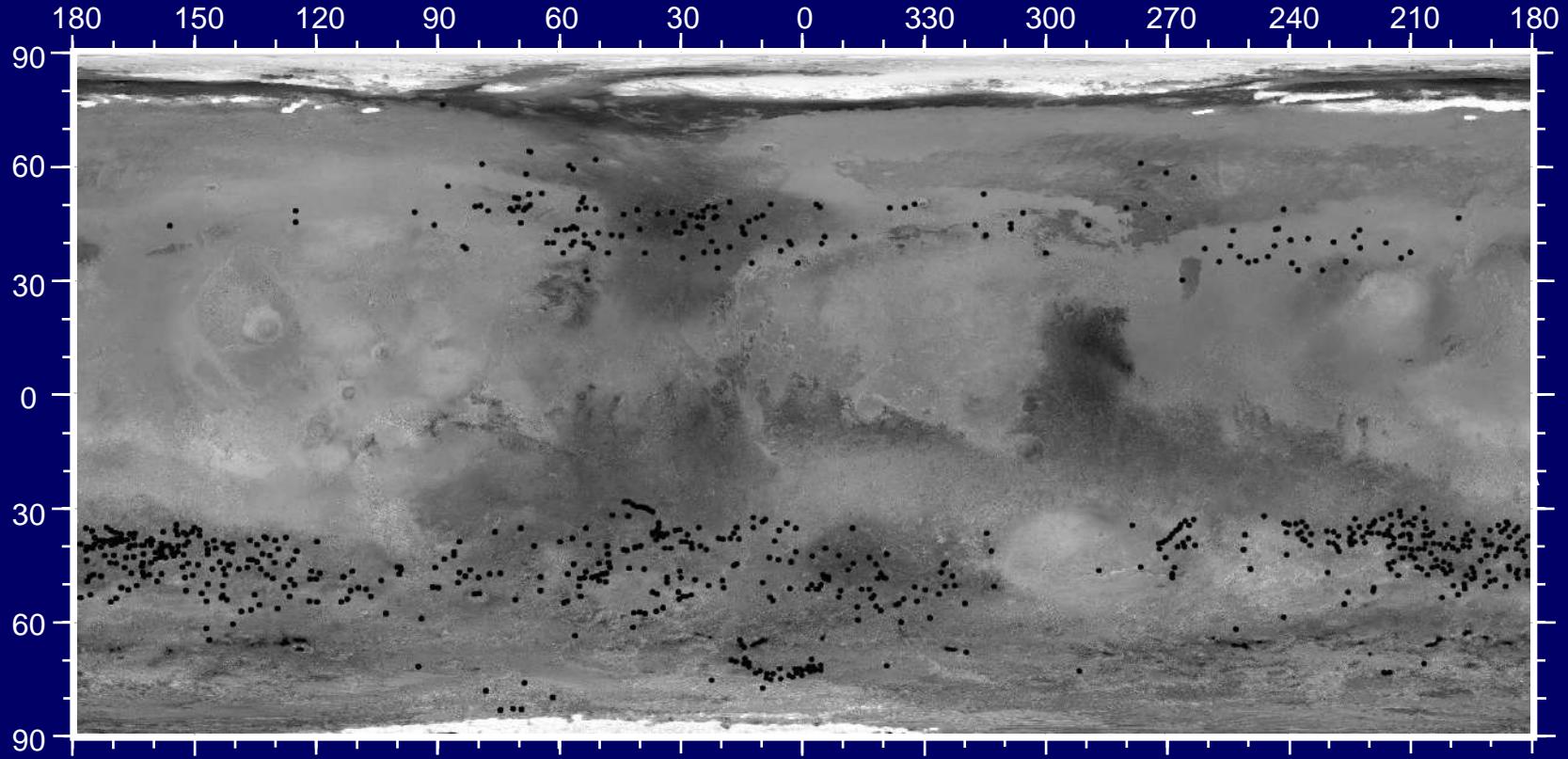
Gullies and Gorges on
the surface

Carved V-gullies and
gorges must be formed
by LIQUID water

Great U valleys must be
formed by glaciers

Gullies -> Rinnen | Gorges -> Schluchten

Карта оврагов

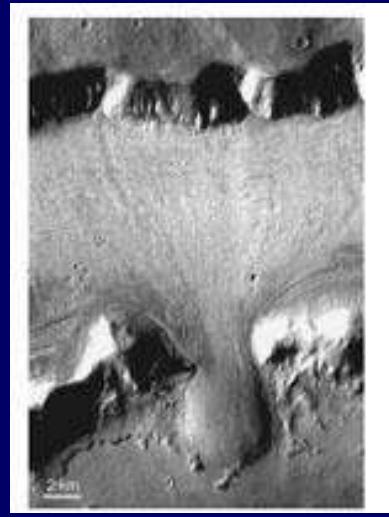


Some—although, certainly, not all—gullies might be sites at which liquid water comes to the surface within the next 100 years.

Возможные ледники

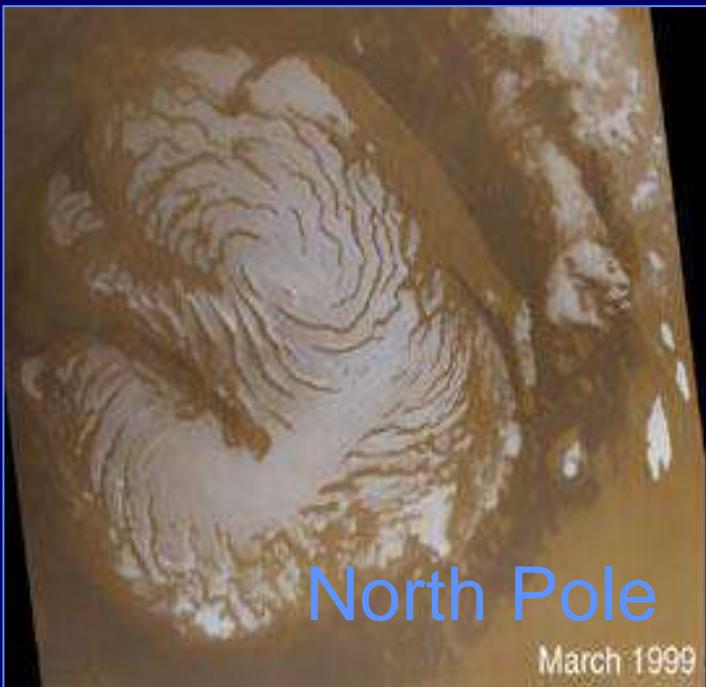
- The topic of glaciation—even at equatorial latitudes—has been discussed and debated for more than 3 decades.
- Huge possible glacial deposits on Tharsis volcanoes.
- Eskers, drumlins, and other indications of classic wet-based glaciation are absent. This suggests that cold-based glaciation (typical of polar latitudes on Earth) is a more appropriate analog.
- Although we cannot rule out that there may be some residual ice at depth in equatorial deposits, because of their age it would certainly be below a thick sublimation till—residual shallow ice is highly unlikely.

*Promethei Terra
at the eastern rim
of the Hellas
Basin, 38° S,
104°,
ESA/DLR/FU
Berlin*

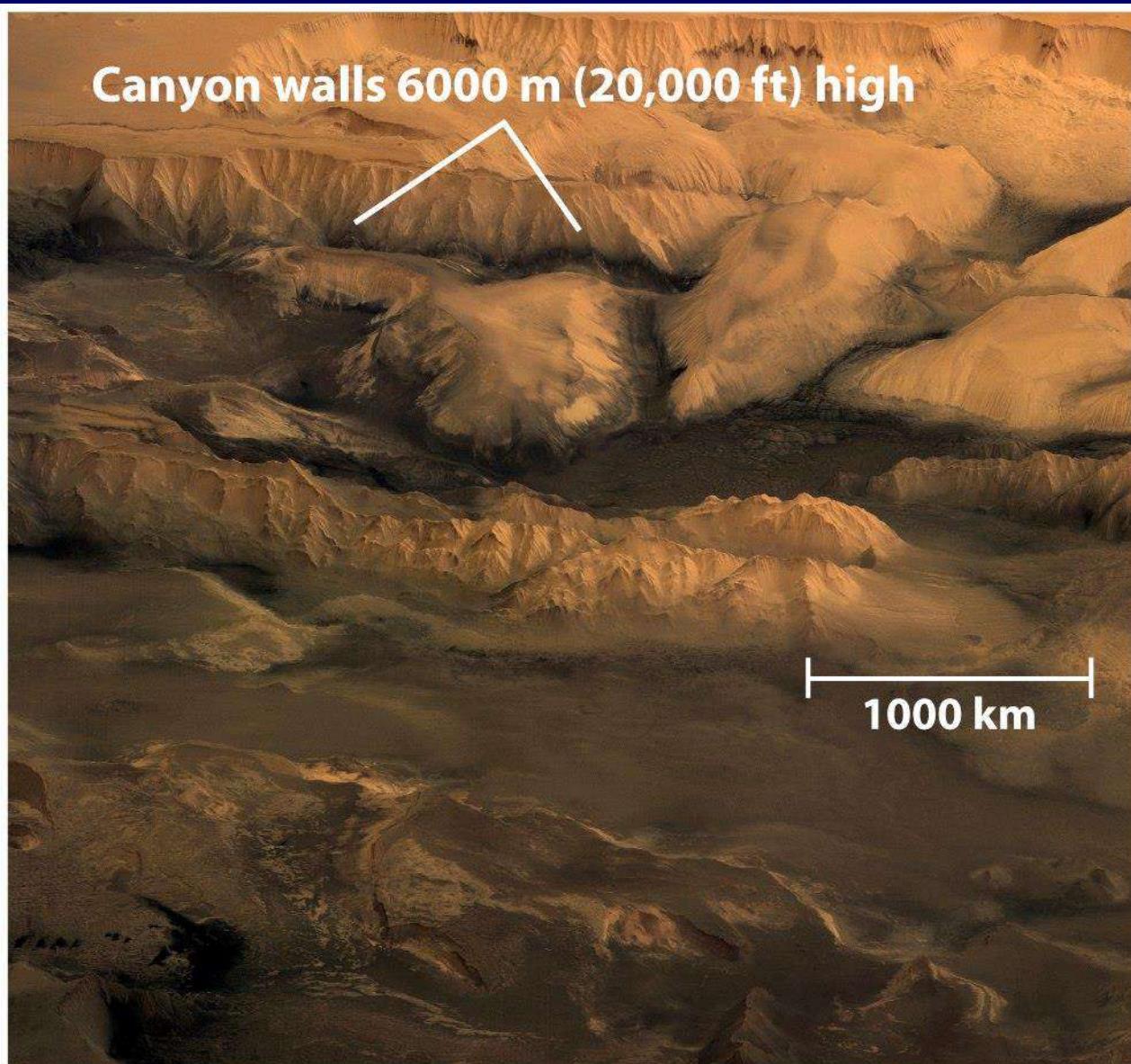


*Deuteronilus
Mensae region
40N, 25E,
THEMIS
(P12057009).*

Полярные шапки



- Maximum summer temperatures typically reach about 200K at the north pole
- The south polar cap, despite receiving more summer sunlight, is protected by a layer of highly reflective CO₂ ice, which holds the surface temperature at a constant 145K.
- Contributing to the perpetual low temperature is not only the latitude (hence low sun angle) but also the high conductivity of solid ice.

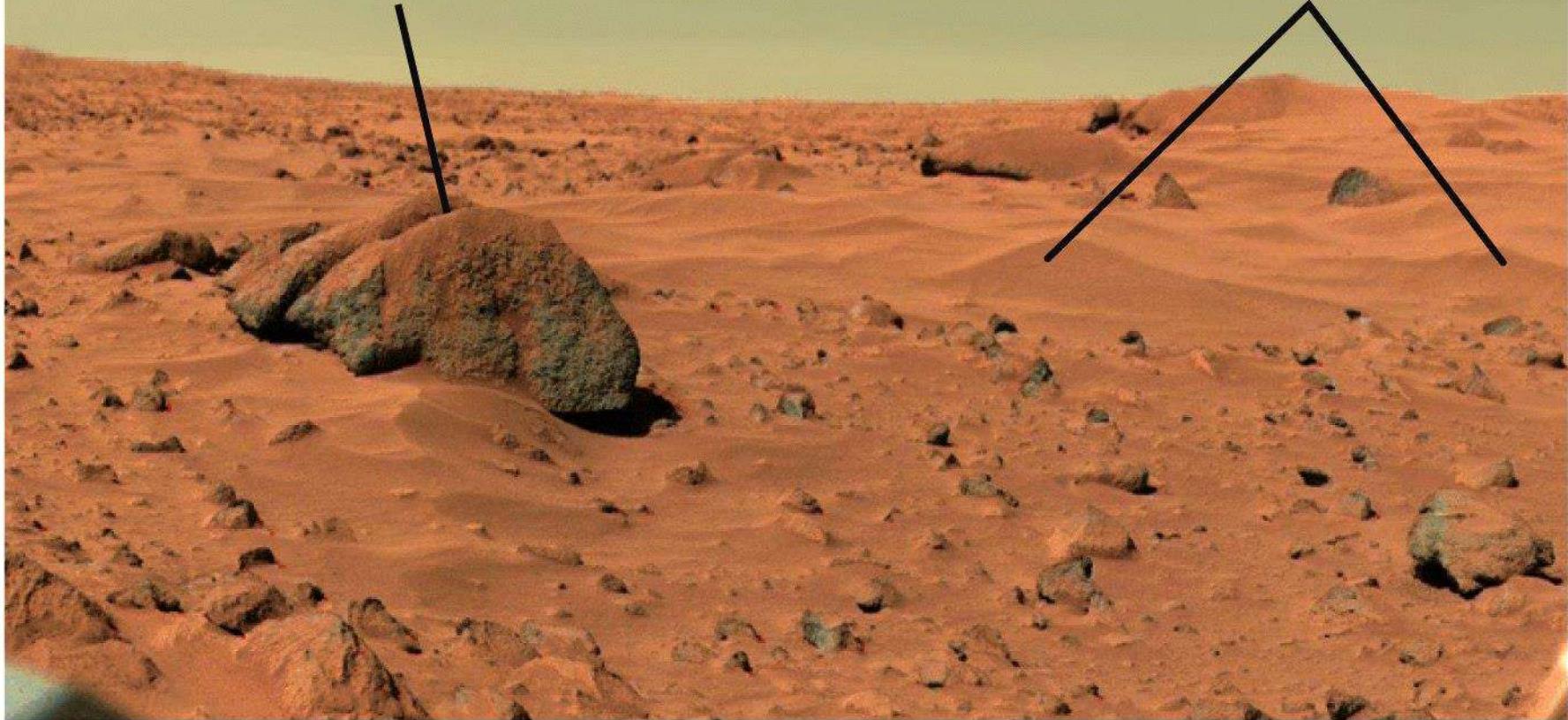


The central region of Valles Marineris

Figure 11-23b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

Group of rocks about 2 m across, 8 m from the camera

Dunes



A view from *Viking Lander 1*

Figure 11-31a
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company



(a) Volcanic rocks



(b) Sulfur salts

Figure 11-37
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Вода на Марсе, вероятно, существует в следующих формах:

- A. liquid in rivers only.
- B. atmospheric water vapor only.
- C. underground reservoirs of liquid water.
- D. ice in polar icecaps only.
- E. permafrost, polar icecaps, and a small amount of atmospheric vapor.

Марсианский микроорганизм?

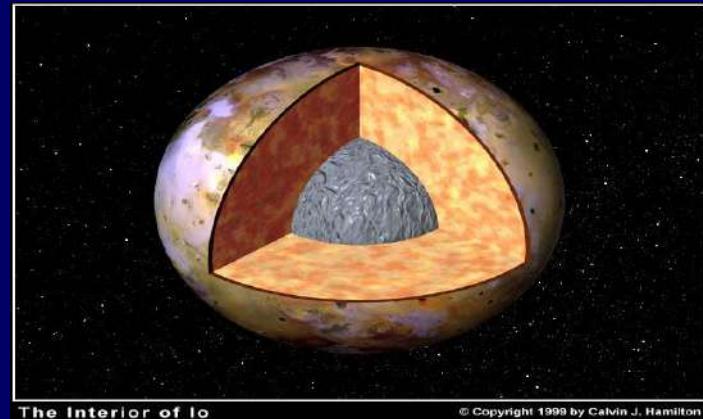
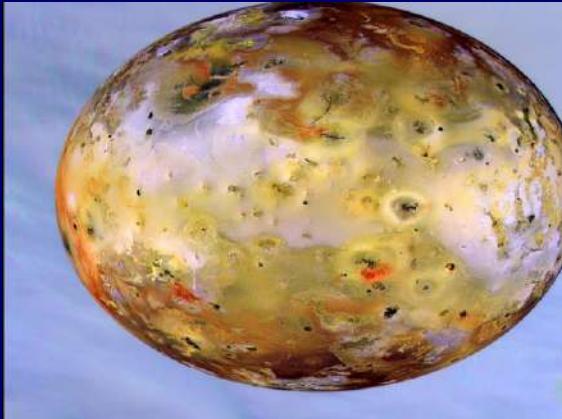


Спутники Юпитера

Inner Moons	4 small moonlets, close to planet inside ring, Amalthea 155x270 km
Io	Volcanically active, heated by tidal forces, new surface
Europa	White – fairly smooth icy surface, fractures, possible ocean beneath
Ganymede 5262 km diameter	Ice-rock composition, cratered surface, renewed icy surfaces, magnetic field
Callisto 4800 km diameter	Heavily cratered surface, little geologic activity, weak magnetic field
Outer Moons	8 small, dark moons, captured bodies in early stage of solar system

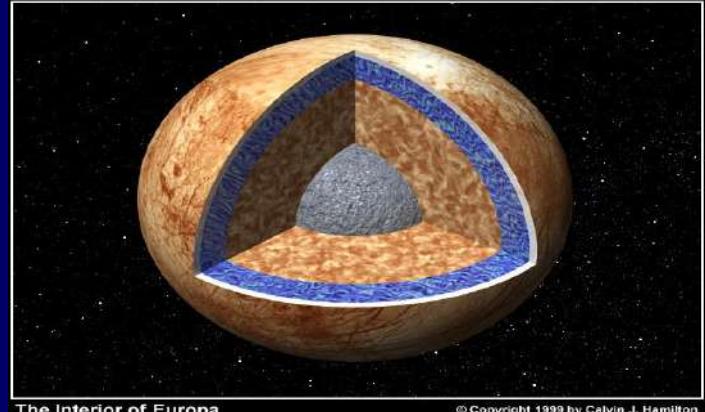
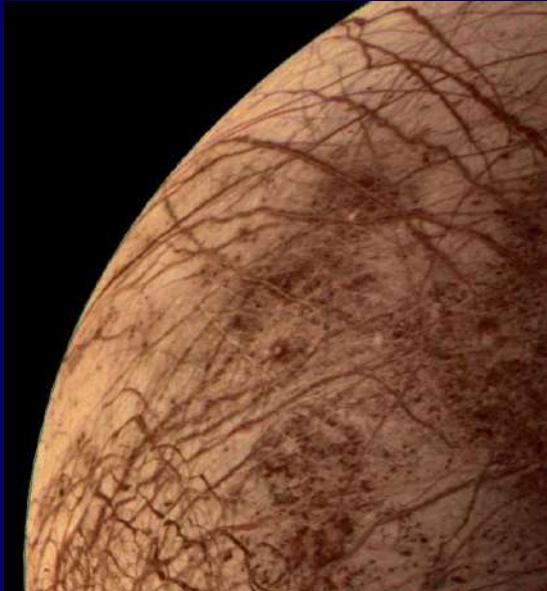


Io



- It is the center of a tug-a-war between Ganymede, Europa, and Jupiter
- The effect is intense tidal volcanic activity
- Surface temperature is low (-143° C)
- Has a solid core surrounded by a rocky shell of silicate? Composition

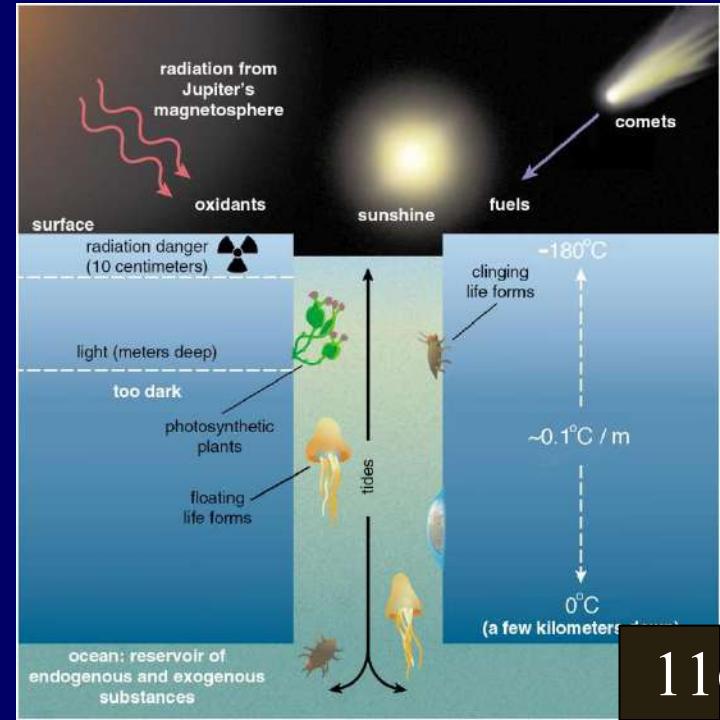
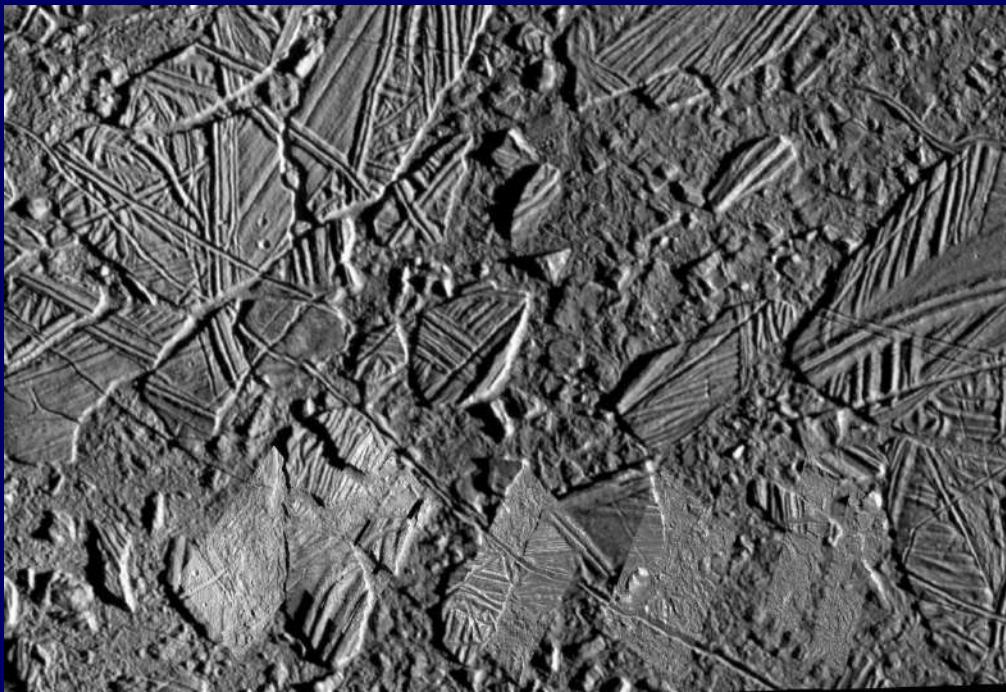
Европа



- Europa consist of a metallic core, a silicate rock layer, and water.
- The outer ice shell of Europa is crisscrossed by dark bands.
- Beneath the ice shell there is potentially large oceans.
- Water exist because of tidal heating.

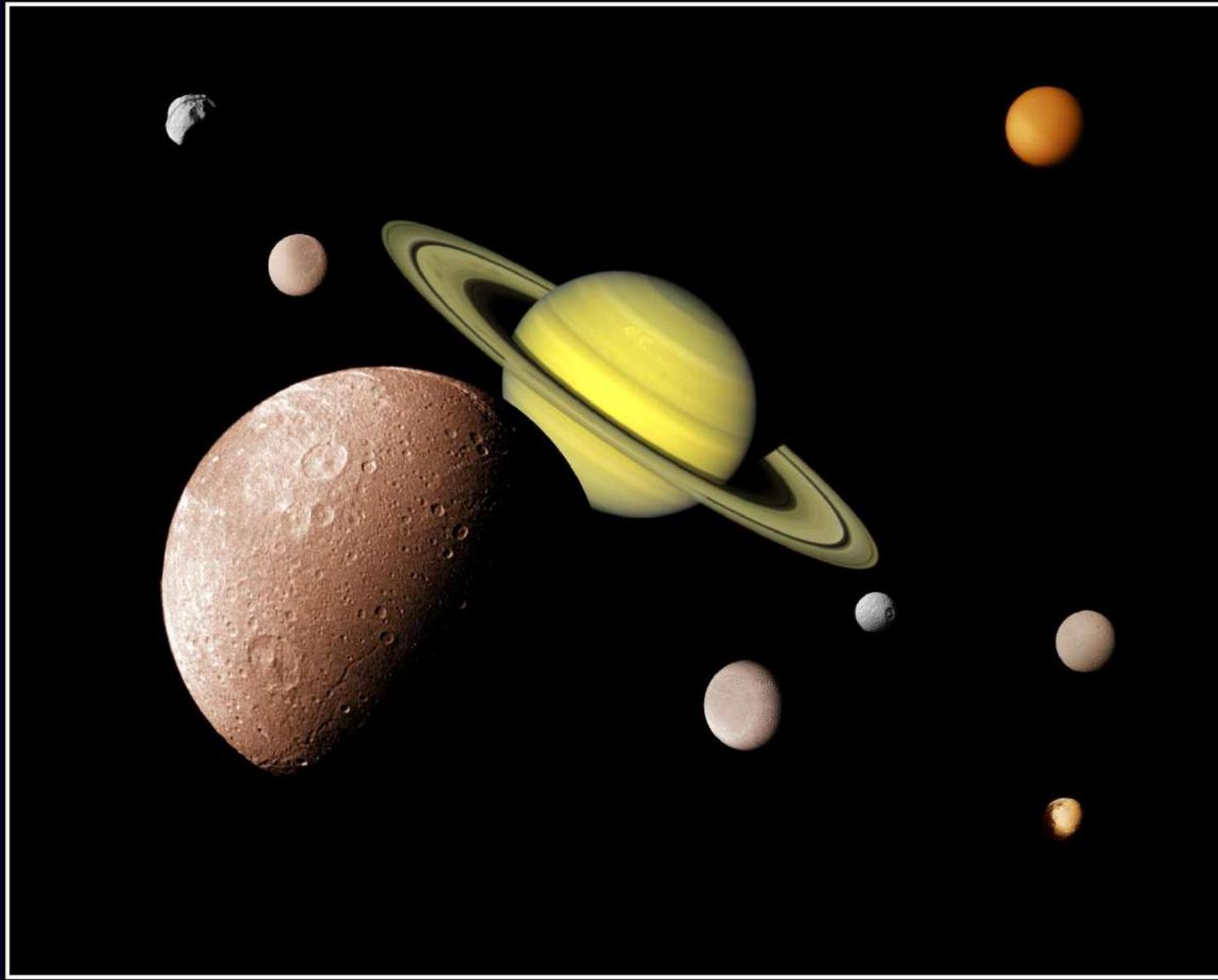
Европа

- Cold surface temperature and no atmosphere to protect it from Jupiter's radiation
- Induced magnetic field → **subsurface ocean!** (probably due to tidal heating and ammonia in water)
- Surface features suggest **shallow ice layer** (however, see Schmidt et al., 2011)
- Life could be possible IF there's an energy source and nutrients



Спутники Сатурна

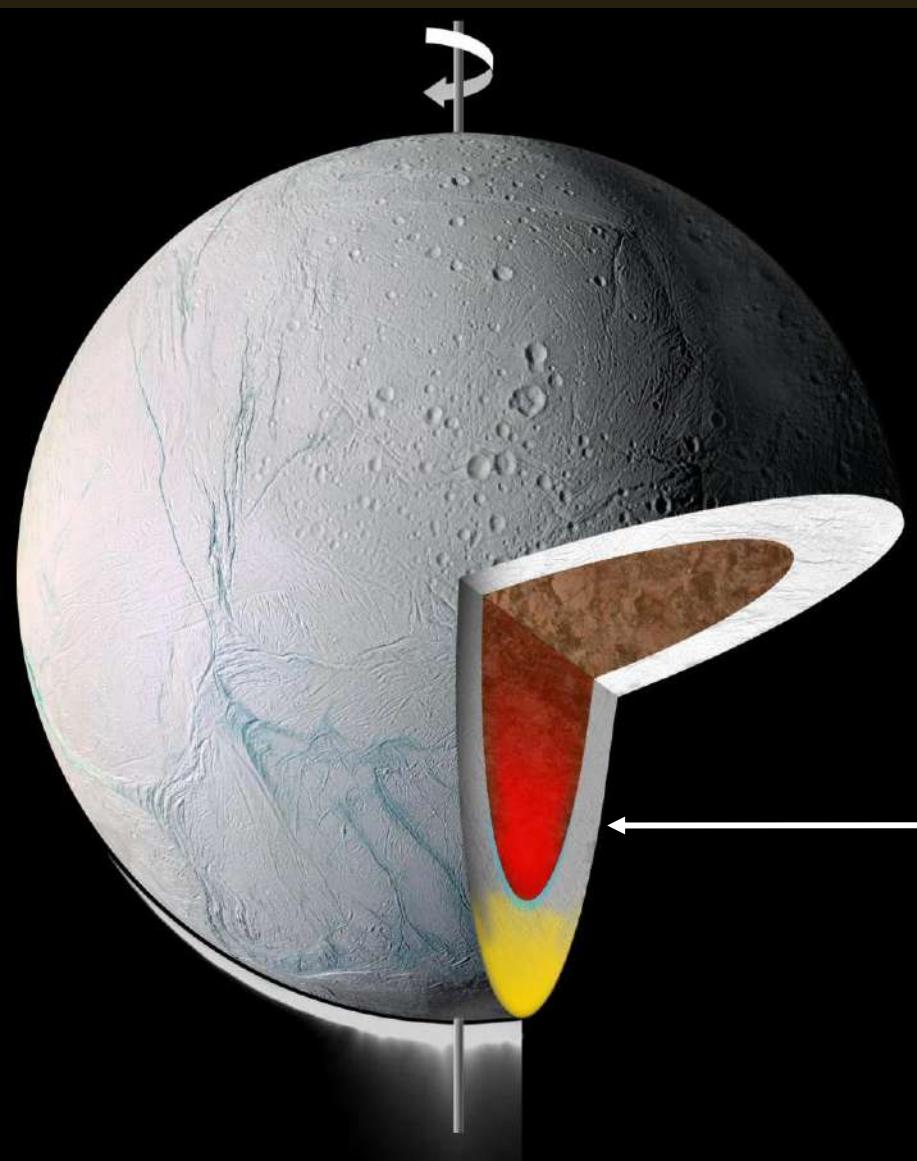
Inner Moons	6 small moons, outside rings, largest 160 x 220 km, icy
Midsized Moons	5 moons outside the inner moons, 300 to 1500 km diameter, tidal heating and some geologic activity
Titan 5150 km diameter	Synchronous rotation, thick atmosphere, nitrogen methane atmosphere - smoggy
Outer Moons	3 small moons, about 300 x 200 km
Callisto 4800 km diameter	Heavily cratered surface, little geologic activity, weak magnetic field
Outer Moons	8 small, dark moons, captured bodies in early stage of solar system



The Saturn System

© Copyright 1998 by Calvin J. Hamilton

Источник тепла на Энцеладе



Tidal heating may be sustaining ‘hot spots’ in its interior, causing the surface geological activity

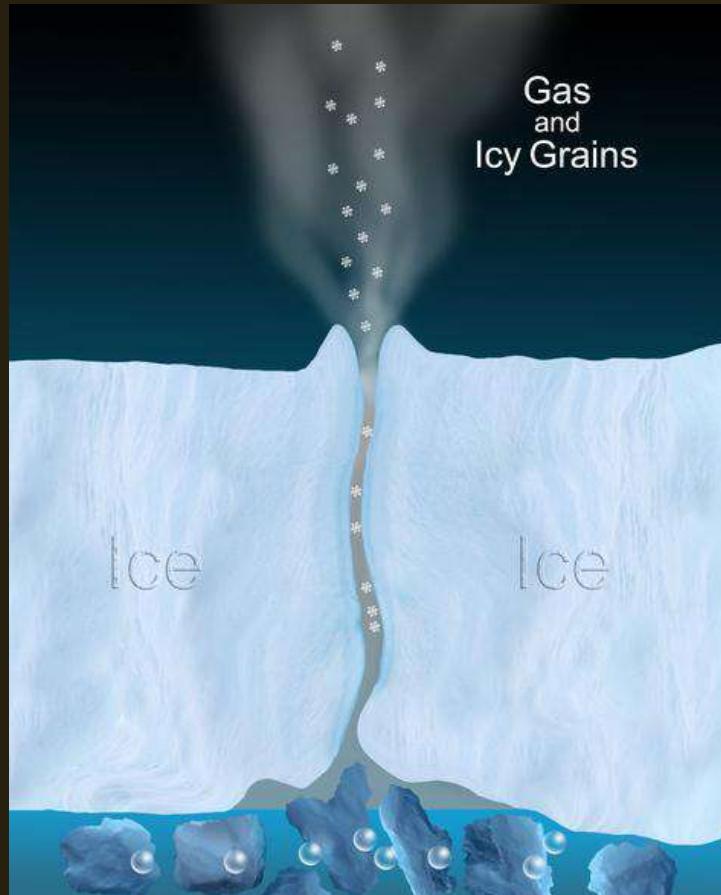
Is there another possible heat source?

Today, there is one hot spot right under Enceladus' South Pole

Процесс образования плюмов?

Subsurface salty ocean
(or lake)

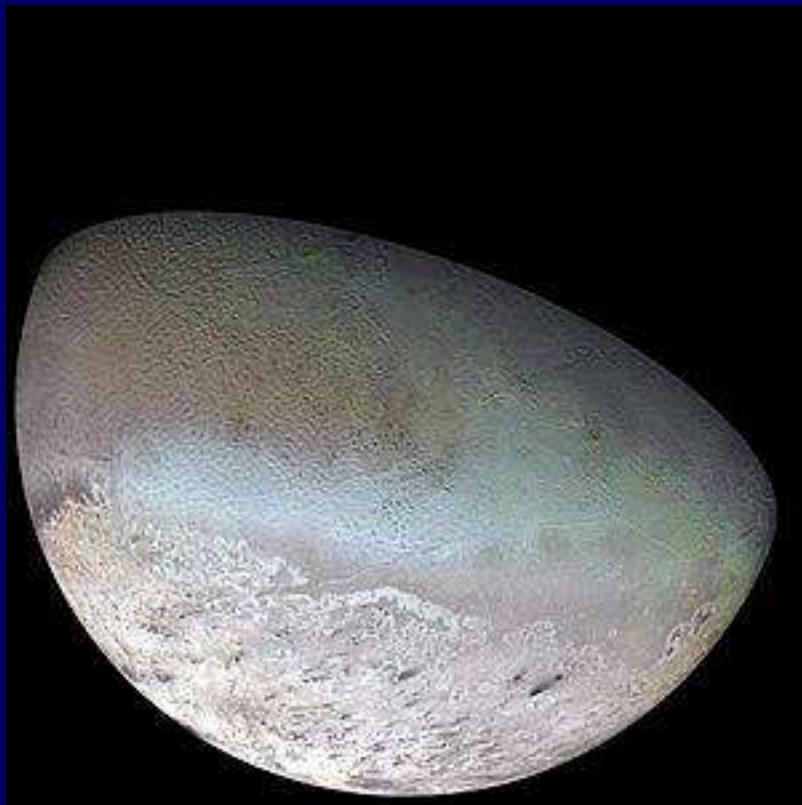
Ice along cracks may sublime,
venting water vapor and icy
particles



Спутники Урана и Нептуна

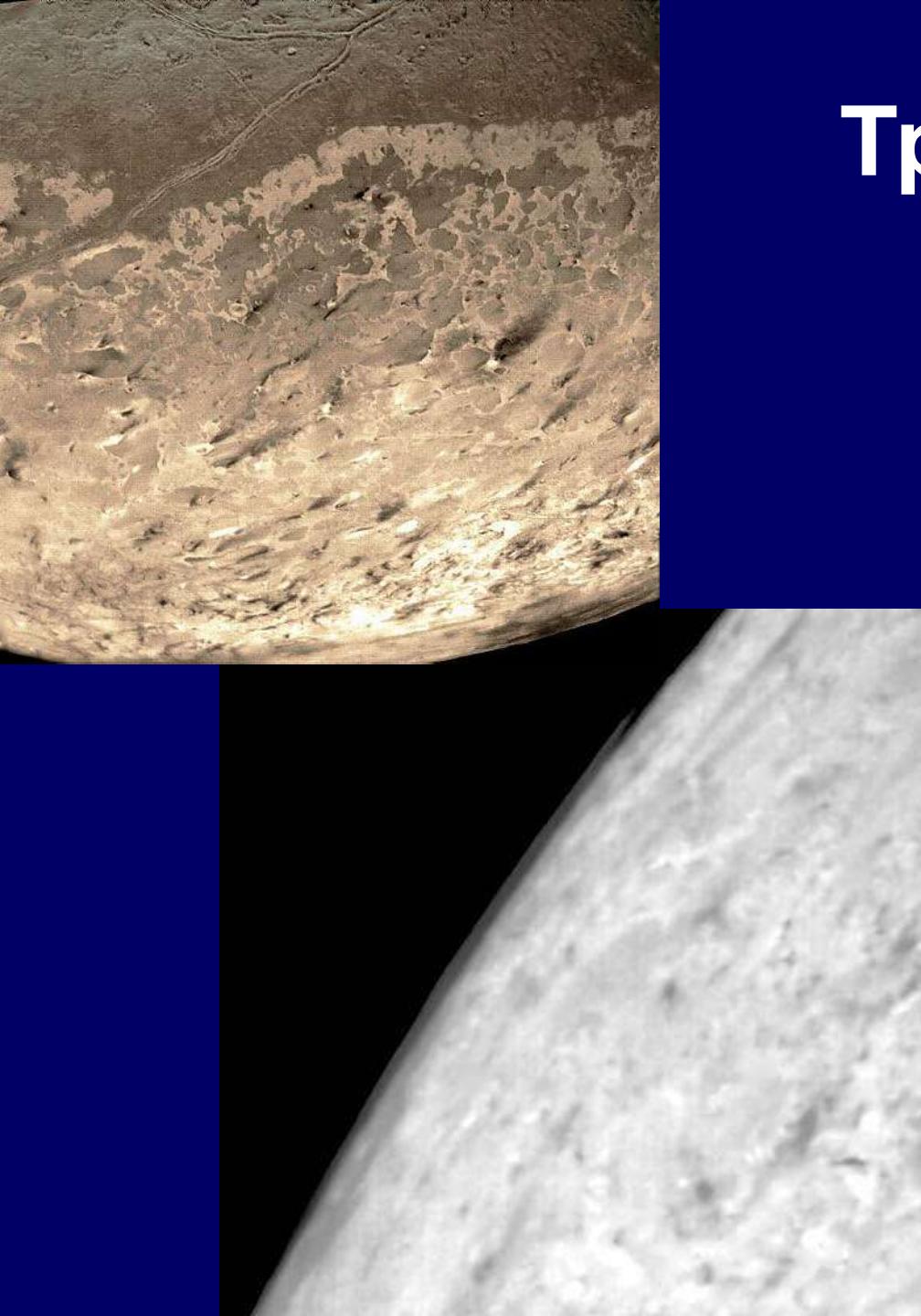
Uranus 10 inner moons – 50 – 100 km 5 outer moons – 1220 to 1600 km	Inner ice and soil Outer methane ice
Neptune 6 inner moons – 50 – 200 km 2 outer moons – 400 & 2700 km	Inner ice and soil Outer Methane ice
Triton Neptune's big outer moon 2705 km diameter	Few impact craters, thin atmosphere of nitrogen and methane, 38 K, geysers or volcanoes, geologically active

Тритон – спутник Нептуна



- Largest satellite of Neptune
- 2700 km diameter (7^{th} largest moon in the SS)
- Mean density: 2061 kg/m^3
- **Retrograde** orbit, synchronous rotation, high axial tilt
- Mean surface T $\sim 38\text{K}$

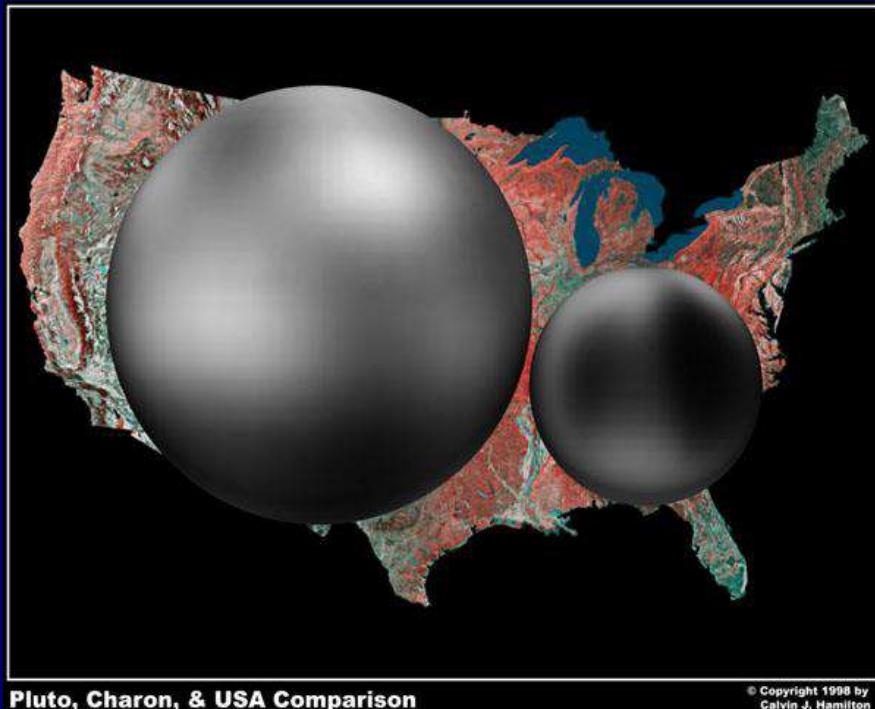
Voyager 2 Flyby 1989



Тритон

- Nitrogen and methane ice surface
- Few impact craters: 6-50 Ma surface age
- Geyser eruptions of N gas from solar heating?
- Cryovolcanism with ammonia-water lava?
 - Flat plains from eruptions
 - Ridges from tidal flexing

Плутон



Pluto, Charon, & USA Comparison

© Copyright 1998 by
Calvin J. Hamilton

- 9th planet from the sun (5913 million km)
- Radius: 1,140 km
- Mass: 0.01×10^{24} kg
- Gravity: 0.03
- Orbit: 90,700 days
- Rotation: 6.387 days

Состав Плутона

- Average density is 1.8 – 2.1 g/cm³
 - Implies 50 – 75% rock
- **Charon:** 1.2 – 1.3 g/cm³
- Icy surface composed of:
 - 98% nitrogen
 - Traces of methane and carbon monoxide
- Atmosphere is thin, constantly freezes, and falls to the surface

Астероиды и кометы



- Remnants of primordial planets that were destroyed or never formed.
- Provide information about past.
- Originated in two locations.
 - Asteroid belt and Kuiper belt, respectively

Пояс Койпера (иногда также называемый пояс Эджворта — Койпера) — область Солнечной системы от орбиты Нептуна (30 а. е. от Солнца) до расстояния около 55 а. е. от Солнца. Хотя пояс Койпера похож на пояс астероидов, он примерно в 20 раз шире и в 20—200 раз массивнее последнего.

Кометы



Комета (от др.-греч. κομῆτης, komētēs — волосатый, косматый) — небольшое небесное тело, обращающееся вокруг Солнца по вытянутой орбите. Комета образует кому и иногда хвост из газа и пыли. Предположительно, кометы прилетают во внутреннюю Солнечную систему из **облака Оорта**, (Пояс Койпера и рассеянный диск, две другие известные области транснептуновых объектов, по диаметру примерно в тысячу раз меньше облака Оорта. в котором находится огромное количество кометных ядер). Тела на окраинах Солнечной системы, как правило, состоят из водяных, метановых и других газов. По модели Уиппла ядро — смесь льдов с вкраплением частиц метеорного вещества (теория «грязного снежка»). Кометы выглядят как туманные объекты, за которыми тянется хвост, иногда достигающий в длину нескольких миллионов километров. Ядро кометы окутано туманной оболочкой, которая называется комой. Ядро диаметром в несколько километров может иметь вокруг себя кому в 80 тыс. км в поперечнике. Многие из наблюдаемых метеоров («падающих звёзд») имеют кометное происхождение.

Состав астероидов и комет

- Asteroids:
 - C-type: (75%) same composition as sun minus hydrogen and helium
 - S-type: (17%) nickel-iron mixed with iron and magnesium silicates
 - M-type: (8%) pure nickel-iron
- Comets:
 - Mixture of non-volatile grains and frozen gases

Экзопланеты

Also called **exoplanets**, they are planets that orbit other stars other than the Sun

The existence of other solar systems has been suspected for centuries, but verified only in the 1990s



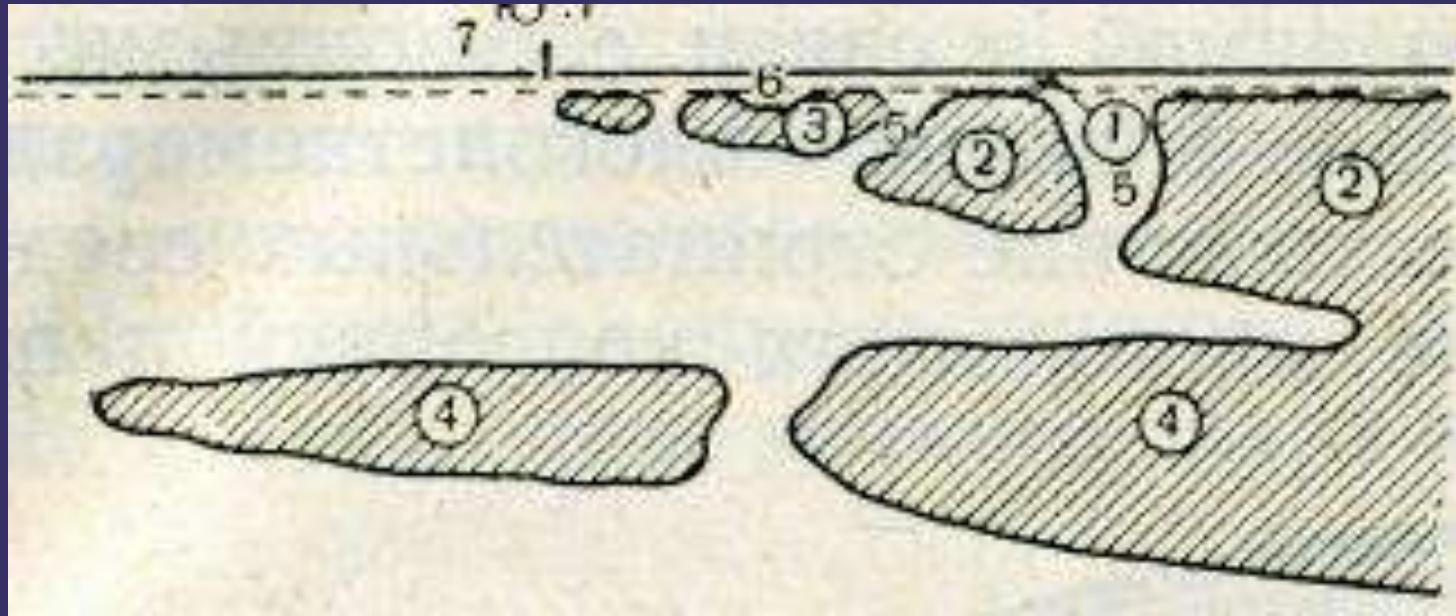
A photograph of a massive iceberg floating in a body of water. The iceberg is a light blue-grey color with visible internal sedimentary layers and some darker, possibly organic, material. It has a jagged, irregular shape with several smaller icebergs and chunks of ice scattered around it. The background is a vast expanse of water meeting a sky that is a soft, hazy pinkish-orange, likely from a sunset or sunrise.

Общая геокриология

Подземные воды в криолитозоне

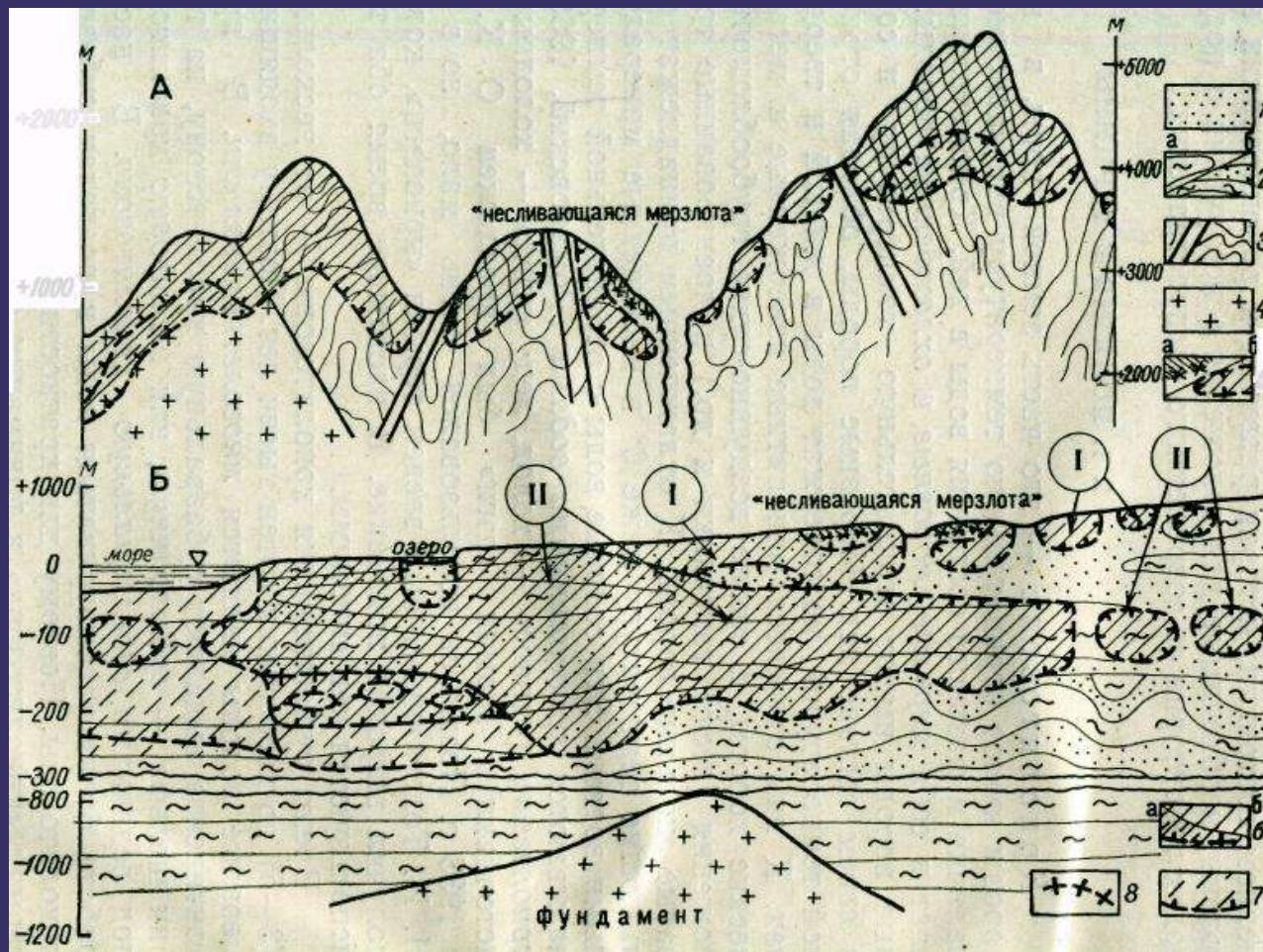
Криолитозона— это часть земной коры, в которой породы имеют отрицательную температуру вне зависимости от наличия и фазового состояния воды в ней. Криолитозона включает в себя *мерзлые, морозные и охлажденные* породы.

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



Северная геокриологическая зона с севера ограничивается пределами шельфа, а с юга — границей смыкания ММП плейстоценового и верхнеголоценового возраста.

Южная геокриологическая охватывает ММП верхнеголоценового и реликтовые толщи плейстоценового возраста. Здесь выделяются площади распространения (подзоны): а) островных и прерывистых верхнеголоценовых, б) реликтовых плейстоценовых и в) двухслойных мерзлых толщ.

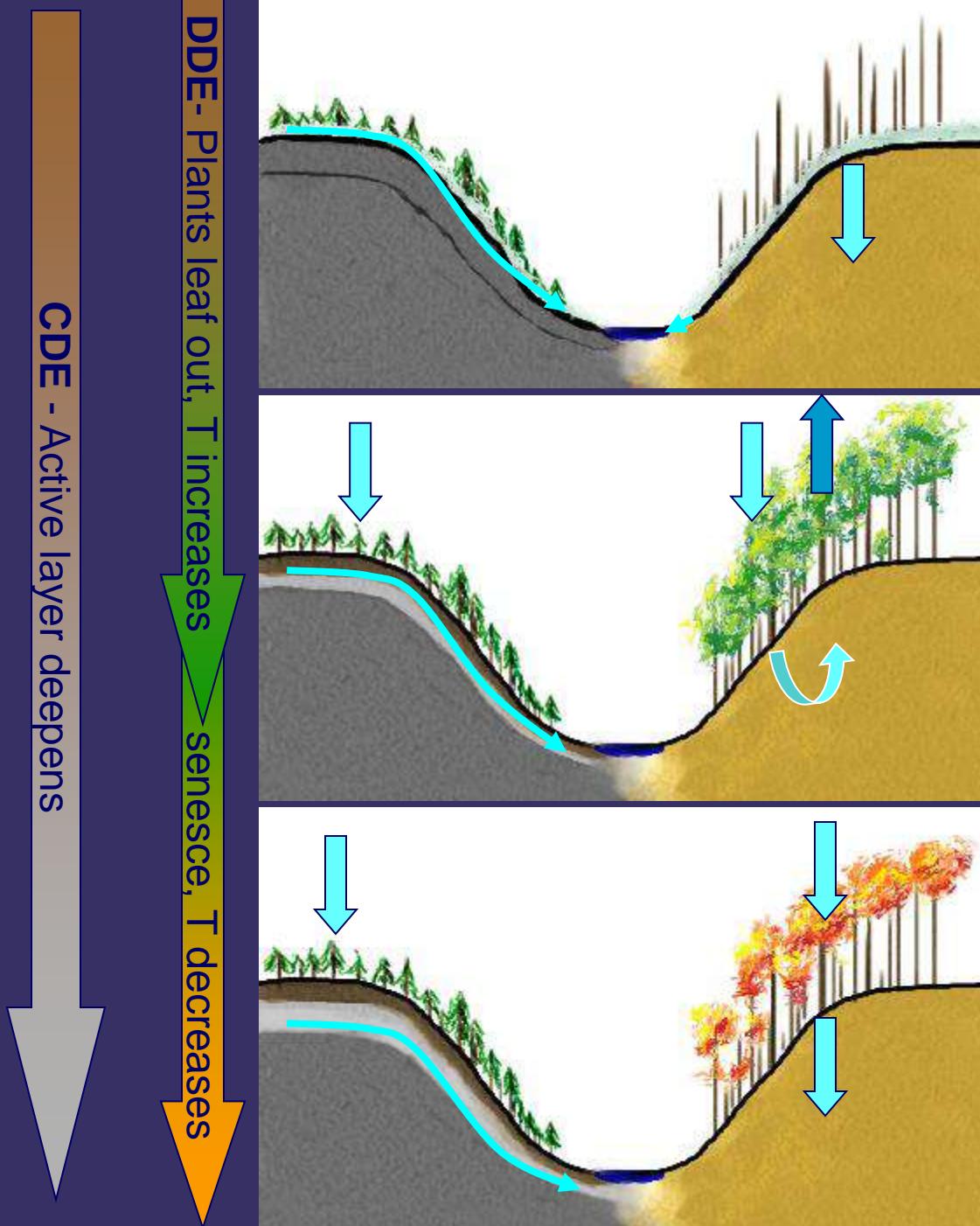


Строение криолитозоны в горно-складчатых областях (А) и на платформах (Б): 1 — плейстоценовые и II — голоценовые мерзлые толщи; 1 — пески; 2 — глинистые породы слаболитицированные (а), сильно литифицированные (б); 3 — сложно дислоцированные терригенические и вулканогенные породы; 4 — изверженные и метаморфические породы; 5 — слой озонаного промерзания (а), многолетнемерзлые породы (ММП) и граница их распространения (б); 6 — морозные породы - монолитные (а) и трещиноватые воздушно-сухие (б); 7 — охлажденные породы с криопэгами граница их распространения ; 8 — граница между плейстоценовыми и голоценовыми ММП

Мёрзлые толщи как криогенные водоупоры, тиปизация 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 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.



Spring
snow melt period

Growing season

Autumn

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 мерзлых 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 условиях «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. Наиболее эффективными оказались **«мерзлотные пояса»**, идея которых была высказана М. И. Сумгиным. Мерзлотные пояса представляют собой перемычки из искусственно промороженного 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 доказано широкое распространение пресных вод глубокого подмерзлотного стока 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 криопэгов. 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.

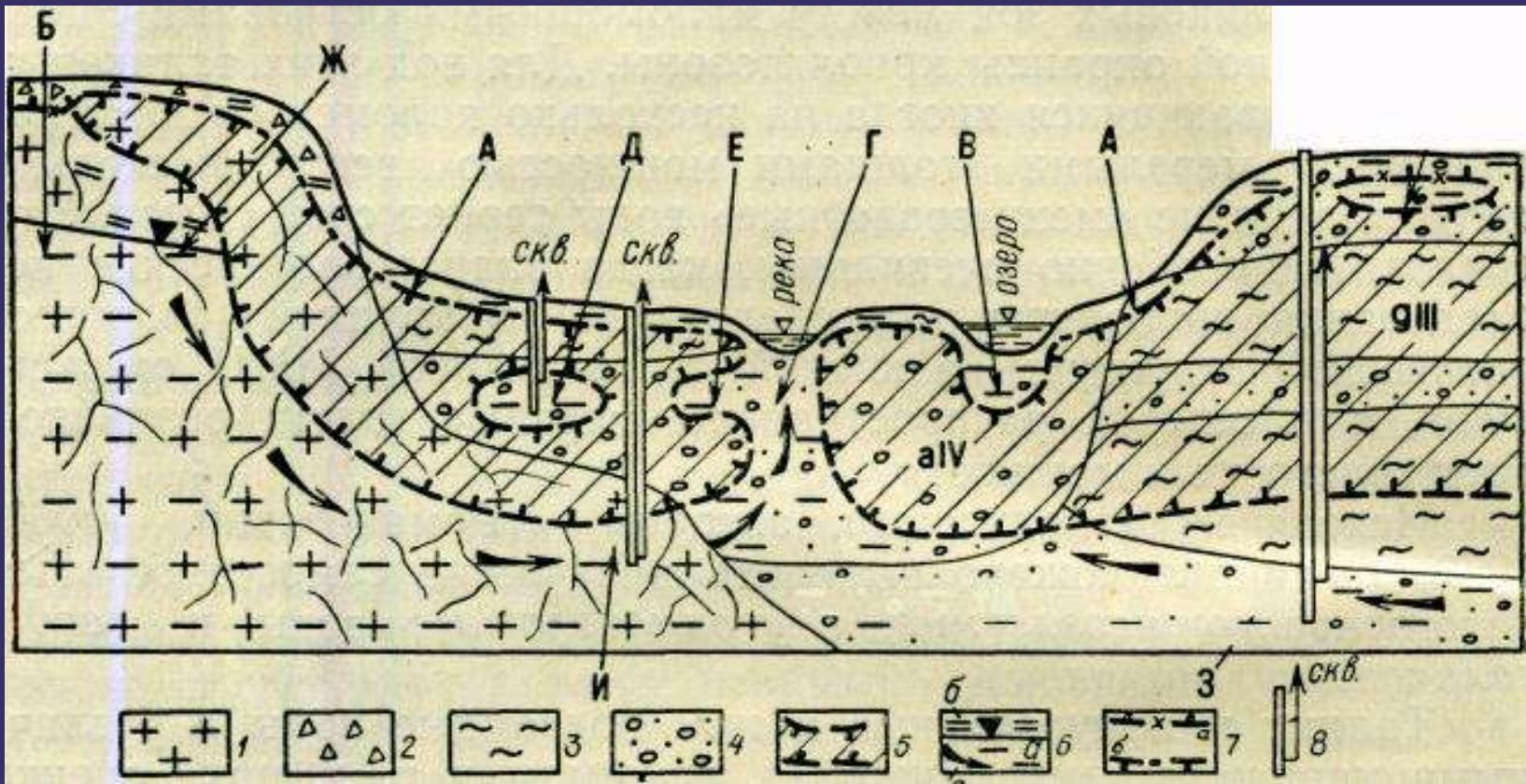
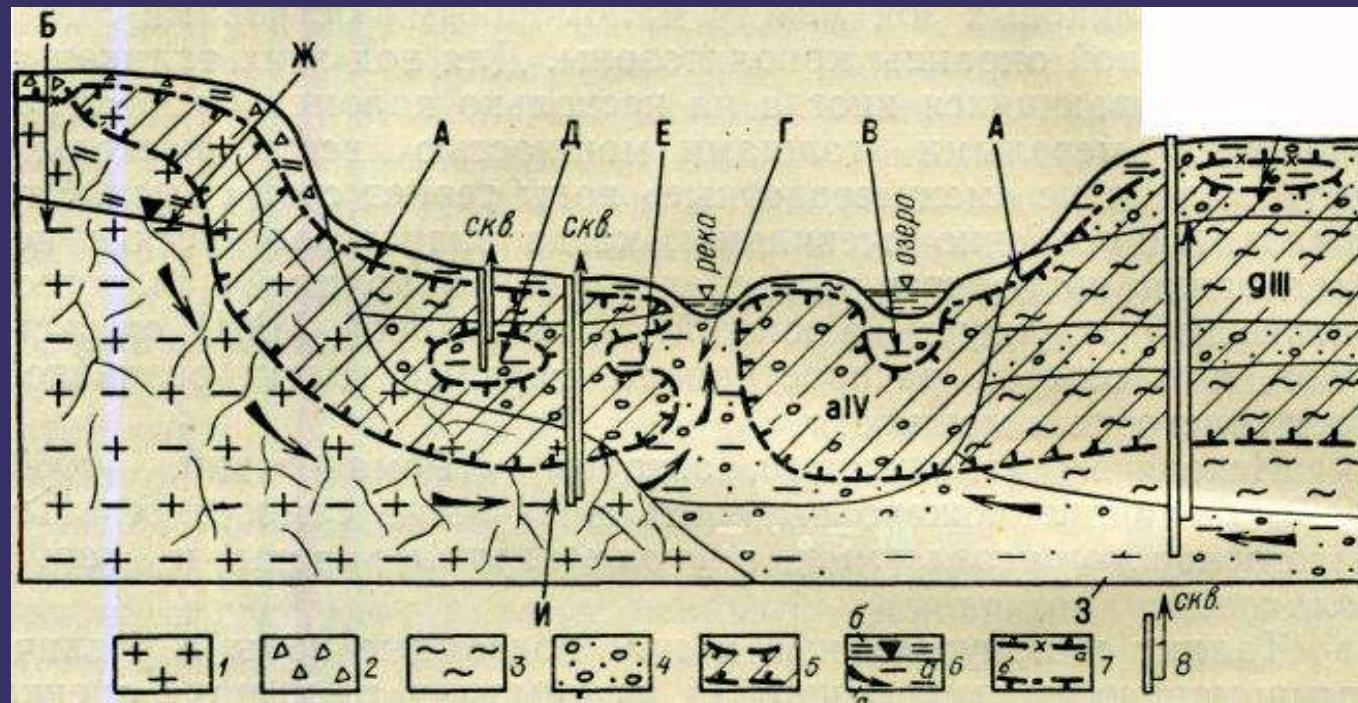


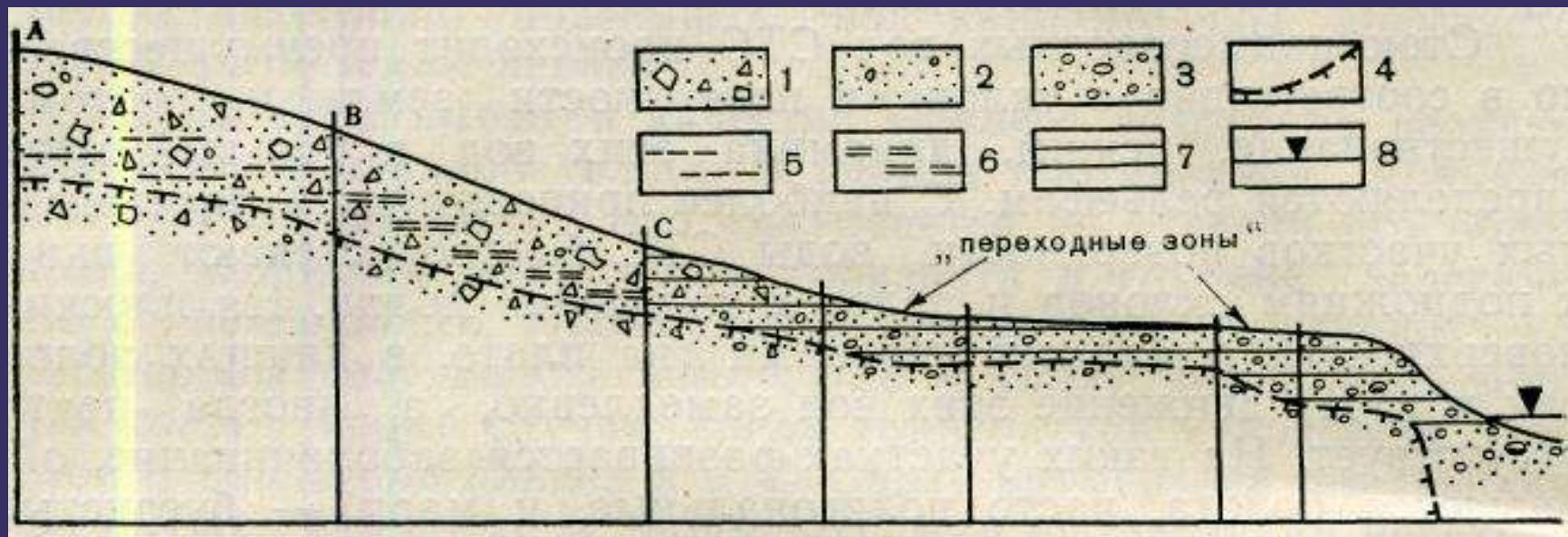
Схема различных категорий подземных вод по отношению к ММП: А — надмерзлотные воды СТС; Б — воды сквозного дождевально-радиационного талика; В — надмерзлотные воды подозерного несквозного талика; Г — воды сквозного подруслового талика; Д — внутримерзлотные воды; Е — межмерзлотные воды; Ж — подмерзлотные воды неконтактирующие безнапорные; 3 — 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 (б); 7 — подошва СТС (б) и СМС (а); 8 — скважина, стрелкой показан уровень появления и установления вод

Надмерзлотные воды сезонноталого слоя существуют сезонно, обычно только в течение летне-осеннеого 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 субаэральных таликовых зон. Воды СТС обладают рядом специфических, присущих только им особенностей.



Схематический мерзлотно-гидрологический разрез отложений СТС от водораздела до тальвега долины: 1 — дресва и щебень, заполнитель 1 — песок: 2 — пески с галькой, 3 — галечник с песчаным заполнителем, 4 — граница ММП, 5 — зона *периодически появляющегося обводнения* (A), 6 — зона *периодически исчезающего обводнения* (B), 7 — зона *постоянного обводнения* (C), 8 — уровень воды в реке

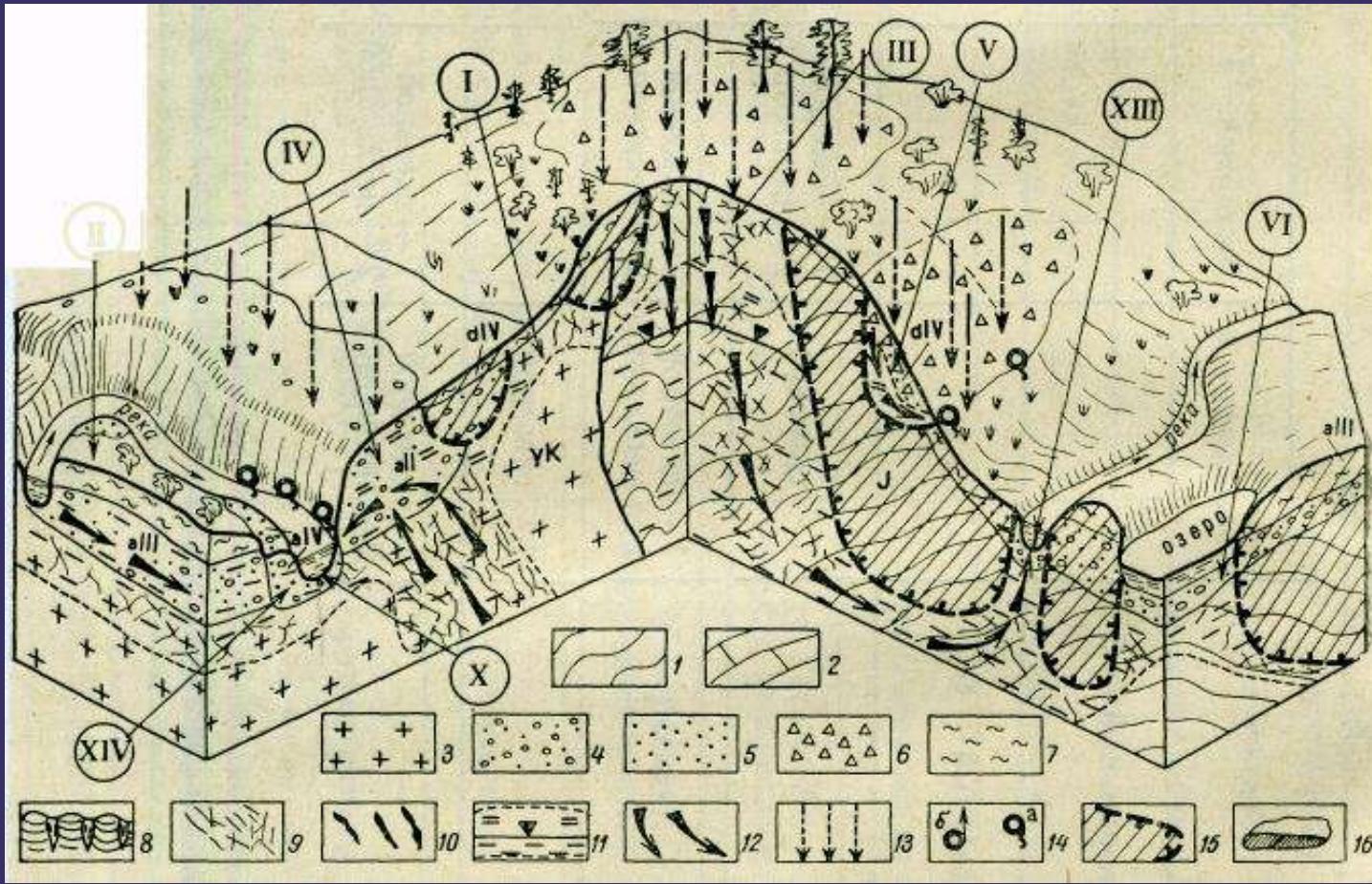


КЛАССИФИКАЦИЯ ТАЛИКОВ - ТИПЫ

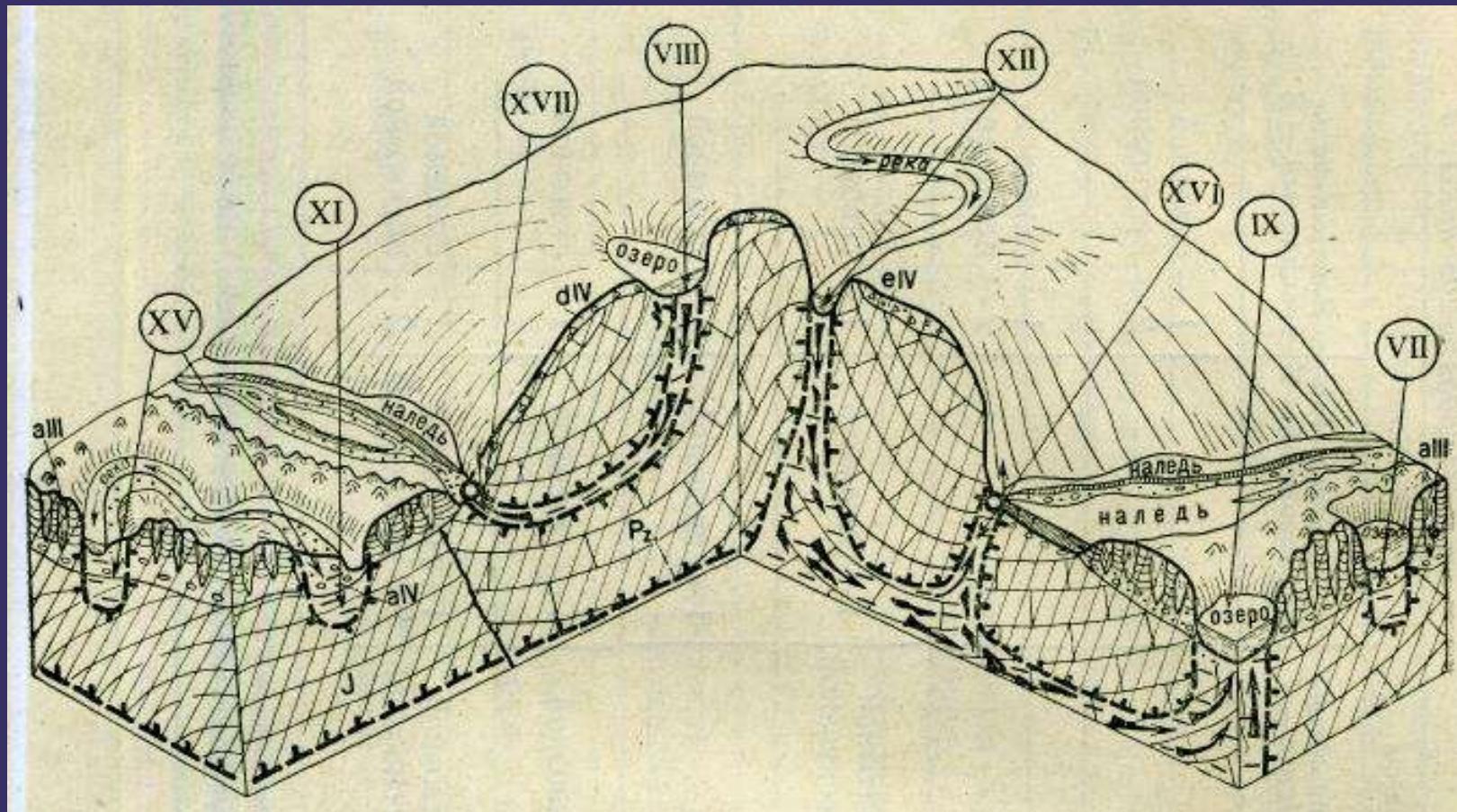
Три типа (радиационно-тепловой, гидрогенный и гляциогенный) выделены по условиям на поверхности земли, определяющим термодинамический уровень теплообмена выше 0°C или выше температуры замерзания гравитационных капельно-жидких вод.

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.



Строение некоторых категорий таликов. Радиационно-тепловые талики: I — радиационный безводный сквозной (1Р-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). Гидрогенные талики: VI — подозерный застойный сквозной (ПО-З1),



Строение некоторых категорий таликов. Гидрогенные талики: VII — подозерный застойный несквозной (ПО-32), VIII — подозерный инфильтрационный несквозной (ПО-И2), IX — подозерный напорно-фильтрационный сквозной (ПО-Н1), X — подрусловой грунтово-фильтрационный сквозной (ПВ-Г1), XI — под-русловой грунтово-фильтрационный несквозной (ПВ-Г2), XII — подрусловой

КЛАССИФИКАЦИЯ ТАЛИКОВ - ТИПЫ

Гляциогенные талики. Существуют под ледниками «теплого» типа, у которых температура пр冻онных слоев льда 0°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, видимо, имели место под ледниковых щитами, покрывавшими север Европы, Америки и некоторые районы Сибири (горы Пutorана и др.).

Хемогенные талики. Образуются в результате выделения тепла при окислительных реакциях в толщах горных пород. Известны талики, приуроченные к геологическим телам с повышенным содержанием сульфидов металлов, а также к участкам возгорания углей как в естественном залегании, так и в отвалах.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТАЛИКОВ - КЛАССЫ

Класс. 1. **Безводные талики**, в которых гравитационные подземные воды отсутствуют в течение круглого года на всю их мощность, т. е. 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 слабо-проницаемыми 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 пластам складчатых структур. Такие талики являются водовыводящими, так по ним осуществляется разгрузка подземных вод глубокого подмерзлотного и межмерзлотного стока

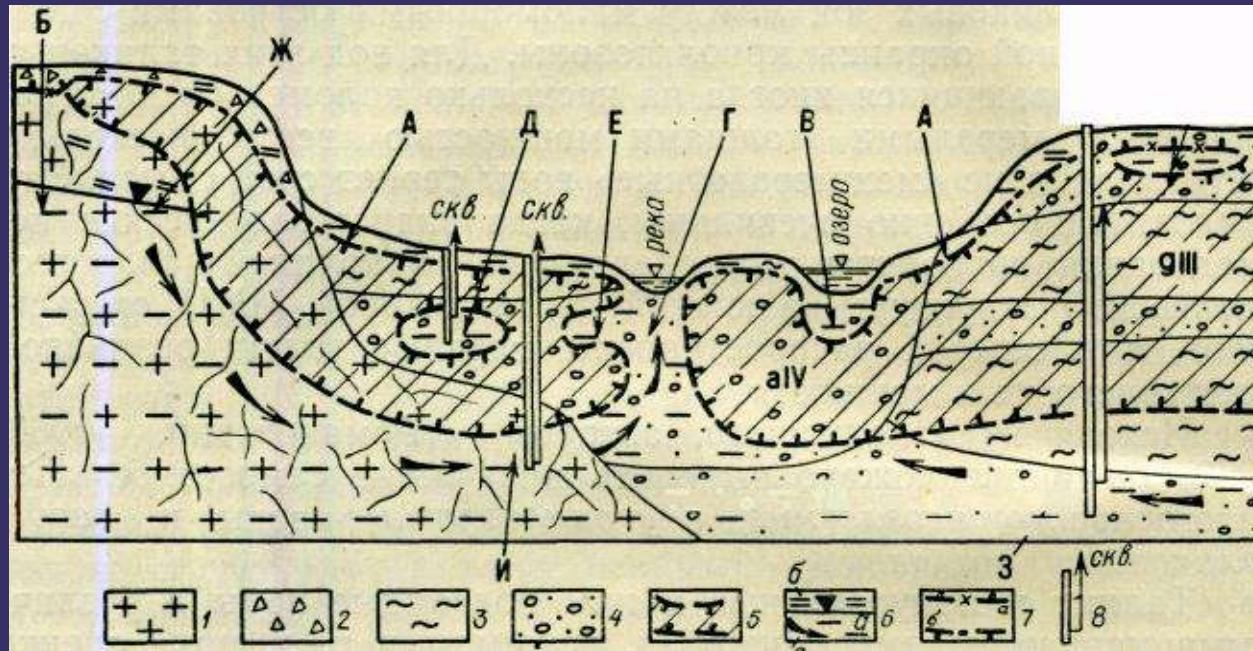
КЛАССИФИКАЦИЯ ТАЛИКОВ

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 более дробные категории. Например, И. А. Некрасов выделял среди эндогенных таликов вулканические и тектонические, а среди экзогенных — инсоляционные, инфильтрационные и кондуктивно-инфильтрационные.

По способам теплопередачи: кондуктивные, конвективные, конвективно-кондуктивные, кондуктивно-конвективные. При этом обычно авторами (Суходольский, Чижов и др.) подразумевалось, что в «кондуктивных» таликах воды или отсутствуют, или имеют застойный режим, а в «конвективных» таликах имеются движущиеся воды.

По положению в рельефе обычно выделяются водораздельные, долинные, а иногда и склоновые талики, а в пределах этих градаций дается более детальное разделение. Например, среди долинных таликов различают подрусловые, пойменные, а иногда террасовые, подозерные (старичные), конусов выноса, днищ временных водотоков и т. д.

По особенностям движения подземных вод (и их взаимодействию с поверхностными): водовыводящие (выводящие), водопоглощающие (поглощающие), водопроводящие (С.М.Фотиев и др.)



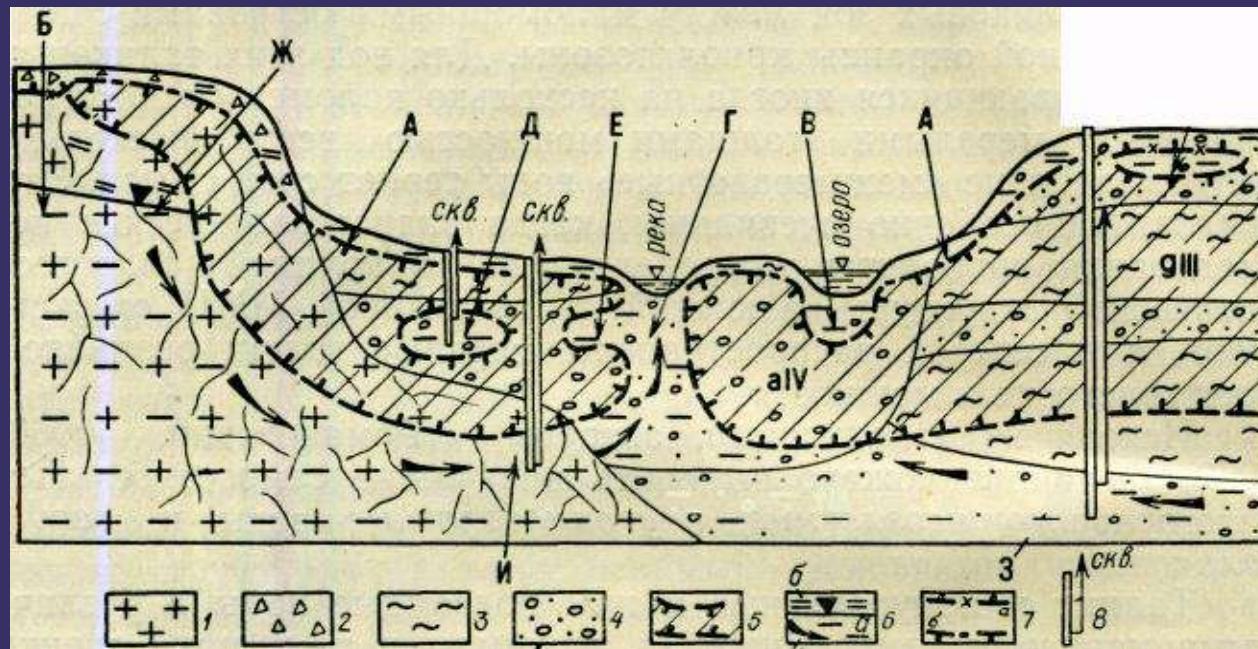
Надмерзлотные воды несквозных таликов

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

Обычно воды несквозных таликов относятся к тем же водоносным горизонтам, что и воды соответствующих категорий сквозных таликов, и обладают теми же характеристиками

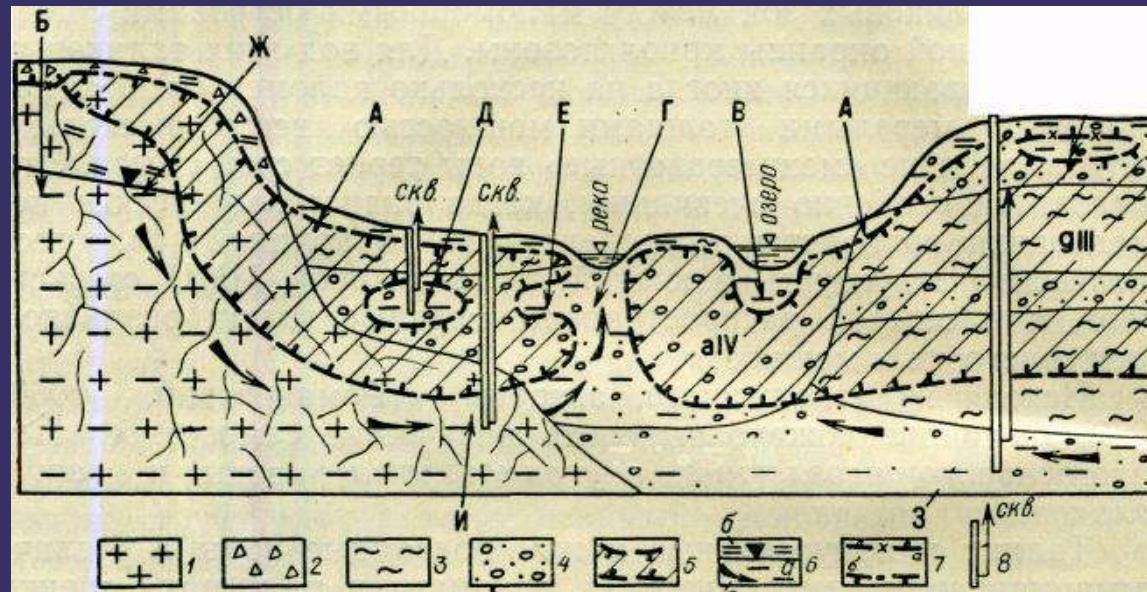
Воды сквозных таликов охватывают разнообразные категории подземных вод, имеющих различный характер и направления движения, состав, температурный и гидравлический режимы.

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.



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

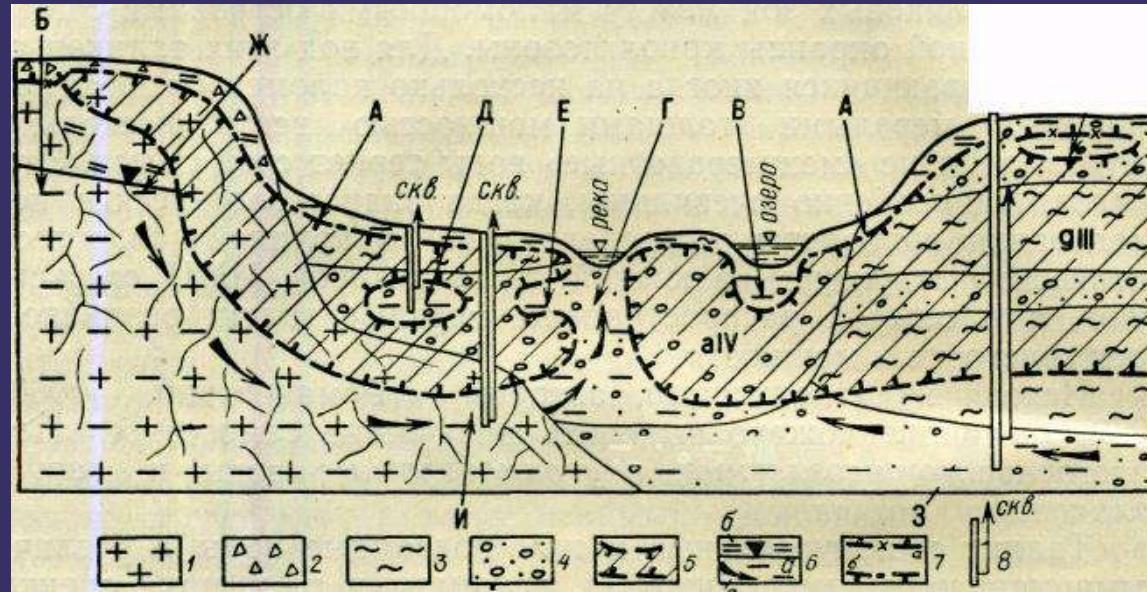
В категорию собственно подмерзлотных вод входят воды, весьма различные по генезису, характеру водовмещающих пород, режиму, химическому и газовому составу, интенсивности водообмена и другим признакам. Характер этих вод существенно определяется типом гидрологической структуры, а также степенью ее промороженности



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 вод криолитозоны.

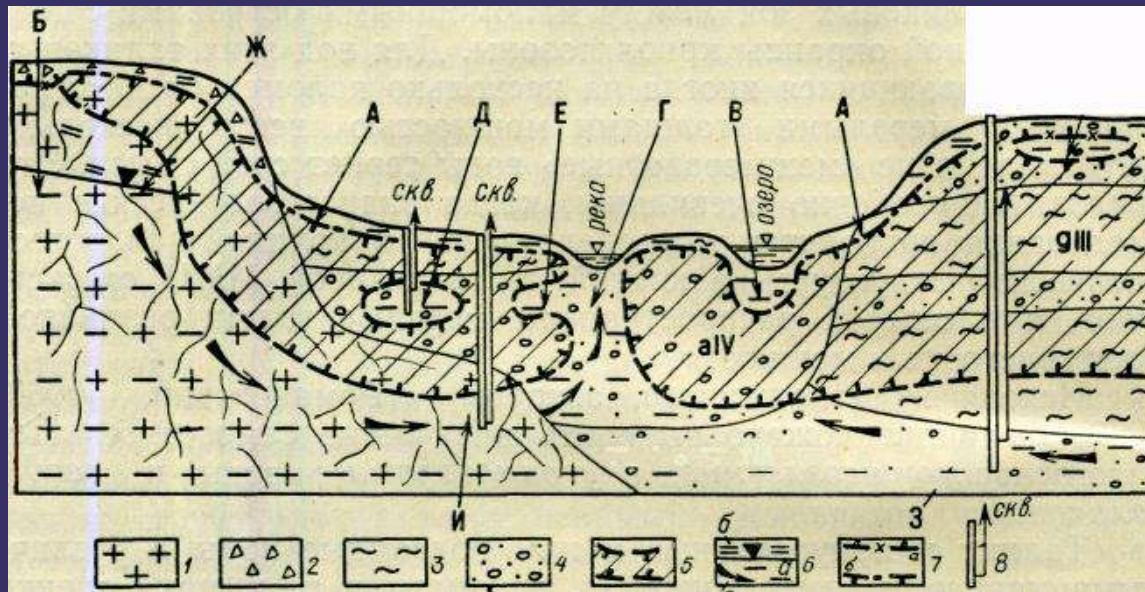
Межмерзлотные и внутримерзлотные воды имеют сходный генезис и условия формирования и образуются как формы скопления подземных вод внутри толщ ММП на одних и тех же или близких стадиях криогенного преобразования гидрогеологических структур.



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 мерзлыми породами термодинамически устойчивые системы. Линзы и слои криогалинных вод возникают, во-первых, при промерзании пород, содержащих солоноватые и соленые воды, во-вторых, благодаря миграции вниз криогалинных вод, образовавшихся в иодощве СТС на побережьях северных морей, в аридных районах или в городах и поселках.

Во вторую группу входят межмерзлотные и внутримерзлотные пластово-поровые и трещинно-пластовые воды, имеющие положительную температуру и, как правило, слабоминерализованные.



Замерзание природных вод сопровождается **криогенной метаморфизацией** их химического состава. При этом 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 также 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 протаиванию.

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, т.е. содержащих **соль в меньшей концентрации, при охлаждении выделяется сначала лёд** и только при достижении криогидратной температуры кристаллизуются оба компонента.

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

Эвтектические температуры водно-солевых систем

<https://monographies.ru/ru/book/section?id=2297>

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 + CaCO_3
$\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-2,3	-	Лёд + 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 + K_2SO_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 + 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 + 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 + 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 + $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

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, то есть 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 ещё до более низких температур), чем в двухкомпонентной системе. Осаждение солей происходит не при фиксированном значении температуры, а в некотором диапазоне температур.

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.

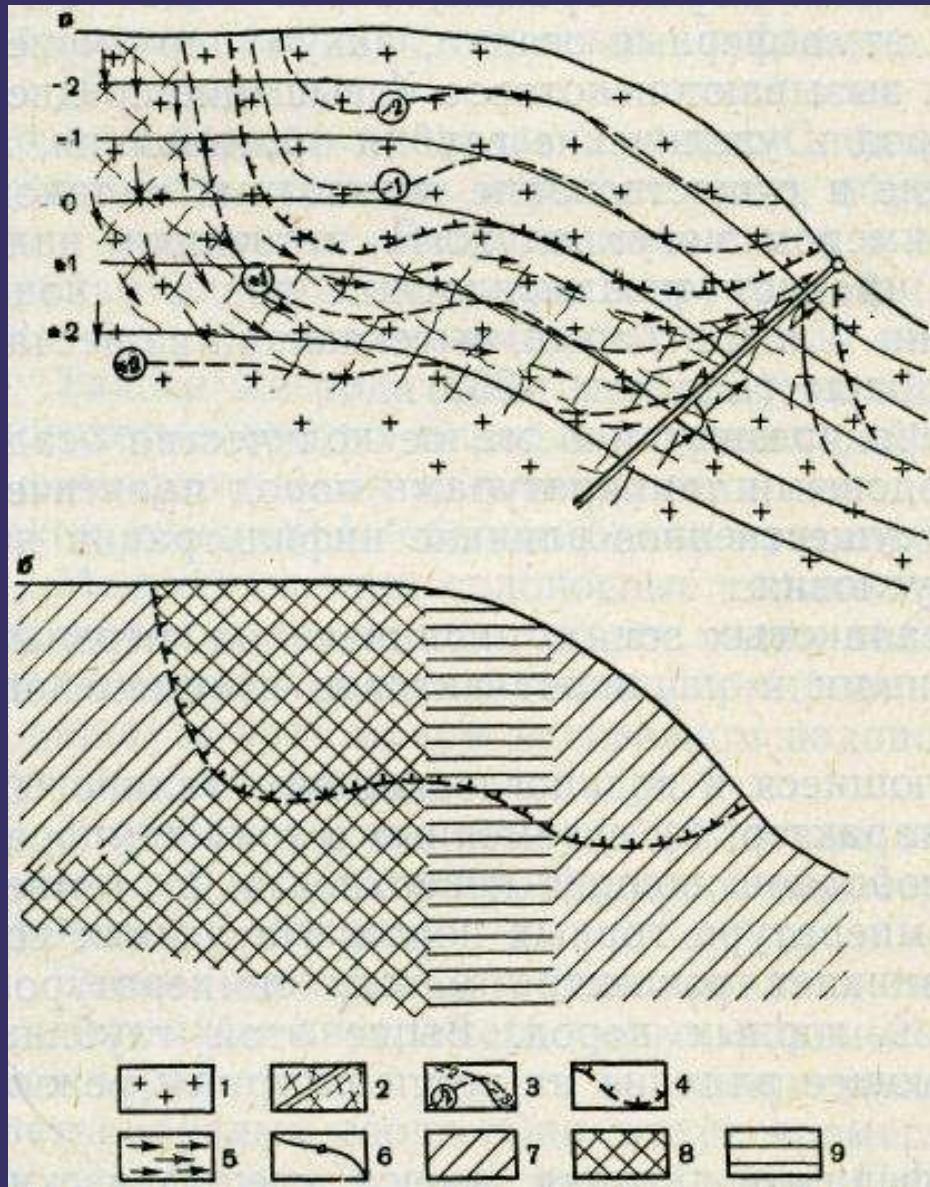
Временная жёсткость обусловлена присутствием в воде гидрокарбонатов кальция и магния ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$). Постоянная жесткость воды обусловлена присутствием в воде сульфатов, хлоридов Са и Mg (CaSO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 , MgCl_2).

По величине общей жёсткости различают **воду мягкую (до 2 мг-экв/л), средней жёсткости (2-10 мг-экв/л) и жёсткую (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 жёсткой или мягкой воды обычно не является опасным для здоровья, хотя есть данные о том, что высокая жёсткость способствует образованию мочевых камней, а низкая — увеличивает риск сердечно-сосудистых заболеваний.

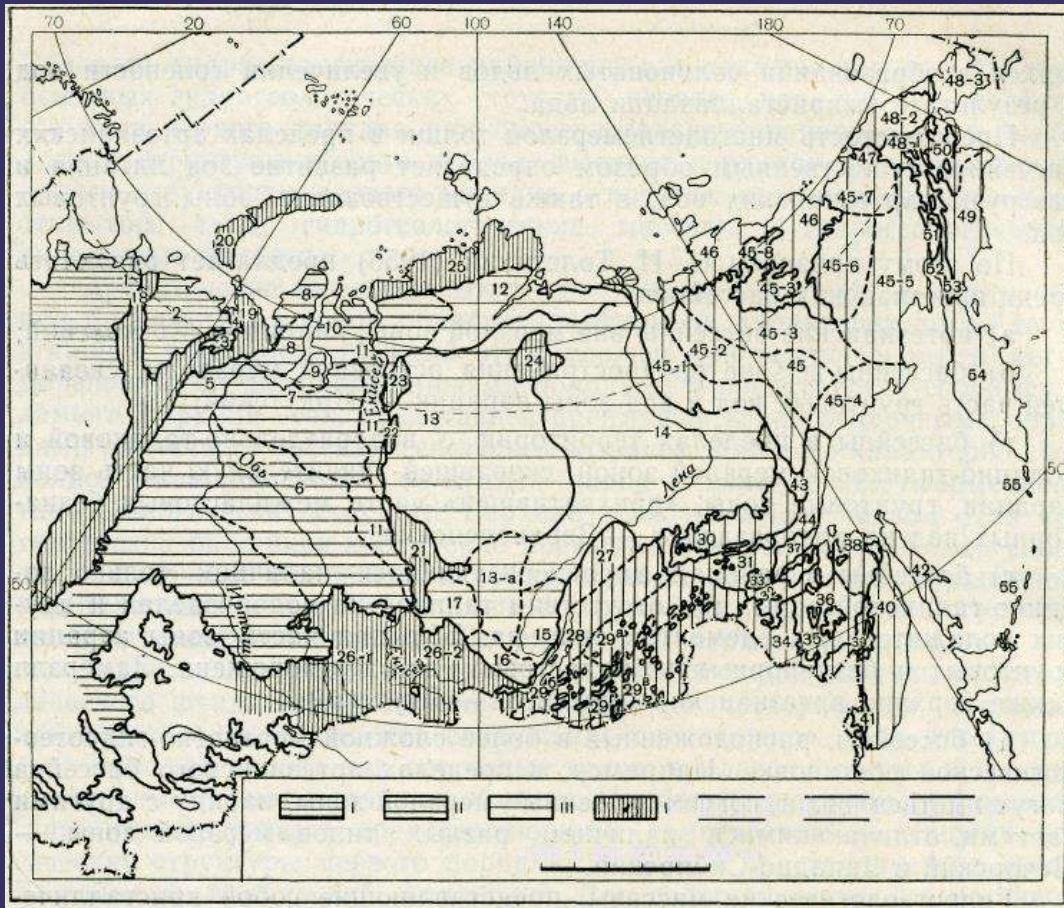
Жёсткость природных вод изменяется в широких пределах и в течение года; она максимальна в конце зимы, минимальна — в период паводка (например, жёсткость волжской воды в марте — 4,3 мг-экв/л, в мае — 0,5 мг-экв/л).

В подземных водах жёсткость обычно выше (до 80-100 мг-экв/л) и меньше изменяется в течение года. Увеличивается жёсткость из-за замерзания и испарения воды, уменьшается в сезон дождей, а также в период таяния снега и льда.



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 с кондуктивным теплопотоком за теплый период года в слое годовых теплооборотов. При этом в связи с сезонным промерзанием инфильтрация атмосферных осадков имеет место только летом, а в зимнее время отсутствует



Карта-схема гидрогеологических структур артезианских бассейнов и гидрогеологических складчатых областей (по Н. И. Толстыхину).

I — Артезианские бассейны Восточно-Европейского севера:

II — Западно-Сибирский сложный артезианский бассейн:

III—Восточно-Сибирский сложный артезианский бассейн:

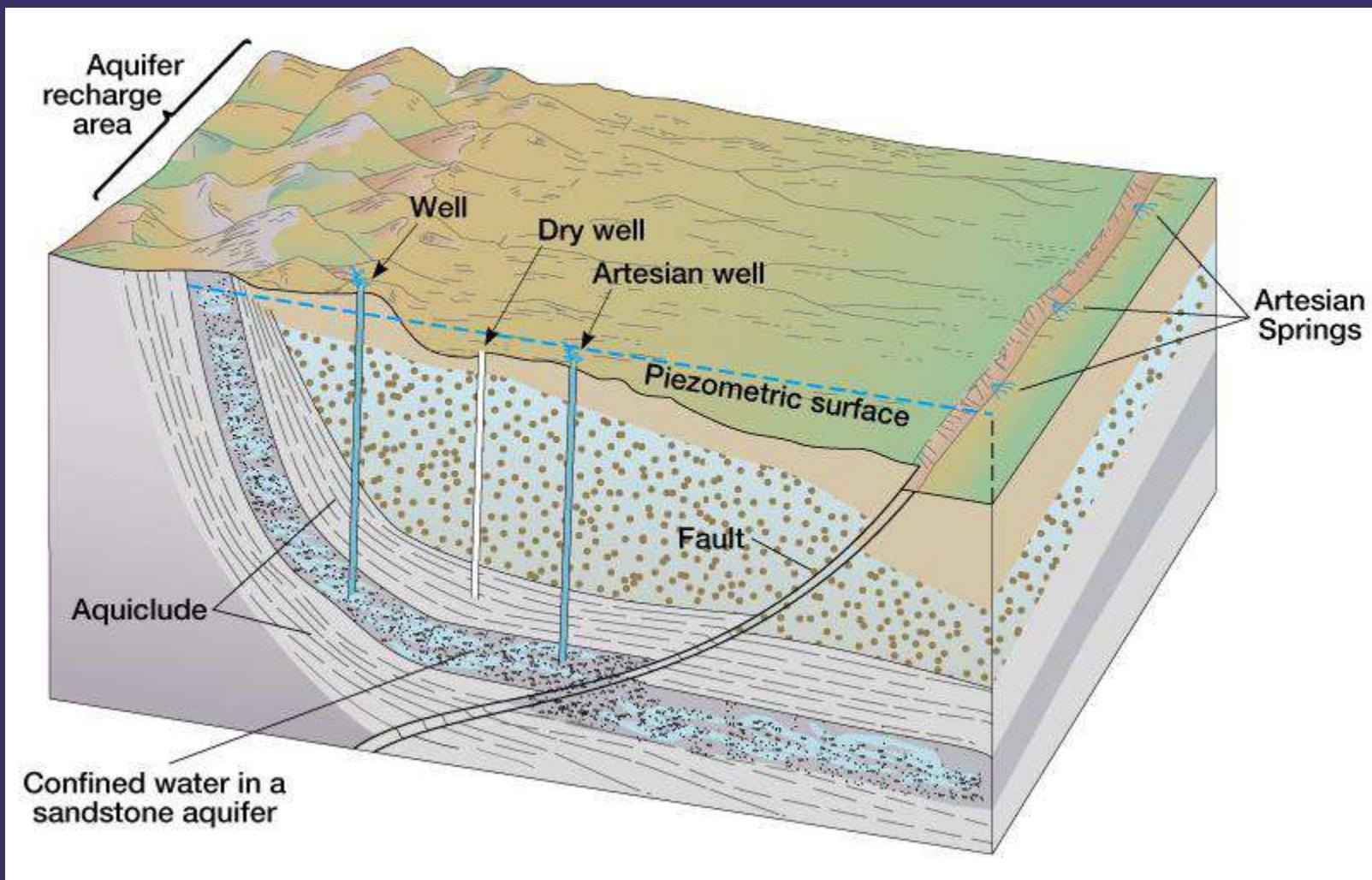
IV—Гидрогеологические складчатые области и артезианские бассейны

V — Восточно-Сибирская сложная гидрогеологическая складчатая область

VI — Гидрогеологические складчатые области и артезианские бассейны Южной Якутии и южной части Дальнего Востока

Гидрогеологические горноскладчатые области представляют собой горные сооружения, различные по возрасту, рельефу, характеру неотектонических движений, состоящие из сложного сочетания **гидрогеологических массивов**, относящихся к хребтам, и межгорных **артезианских бассейнов замкнутого типа**, занимающих межгорные тектонические впадины и краевые прогибы. Пример - Восточно-Сибирская сложная гидрогеологическая складчатая область

Артезианский бассейн



Артезианские бассейны открытого типа в геоструктурном отношении представляют собой области платформ и характеризуются двухэтажным строением.

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 мало нарушенное 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.

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

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

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. При оттаивании мерзлых толщ в изолированных системах внутрипластовое давление воды может резко падать.

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:

- а) преимущественно **нисходящим движением вод** во впадинах или их застойным режимом, а также меньшей плотностью потока геотермического тепла в таких структурах;
- б) **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-Вилюйскому надвигу.

Гидрогеологические массивы представляют собой выступы кристаллического фундамента, частично прикрытыые 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 аномассивы (ГАМ) являются как одноэтажными, так и двухэтажными сооружениями, сложенными древними осадочными и вулканогенными породами, сильнometаморфизованными и дислоцированными. Основными типами вод в них являются *трещинные и трещинно-жильные воды*.

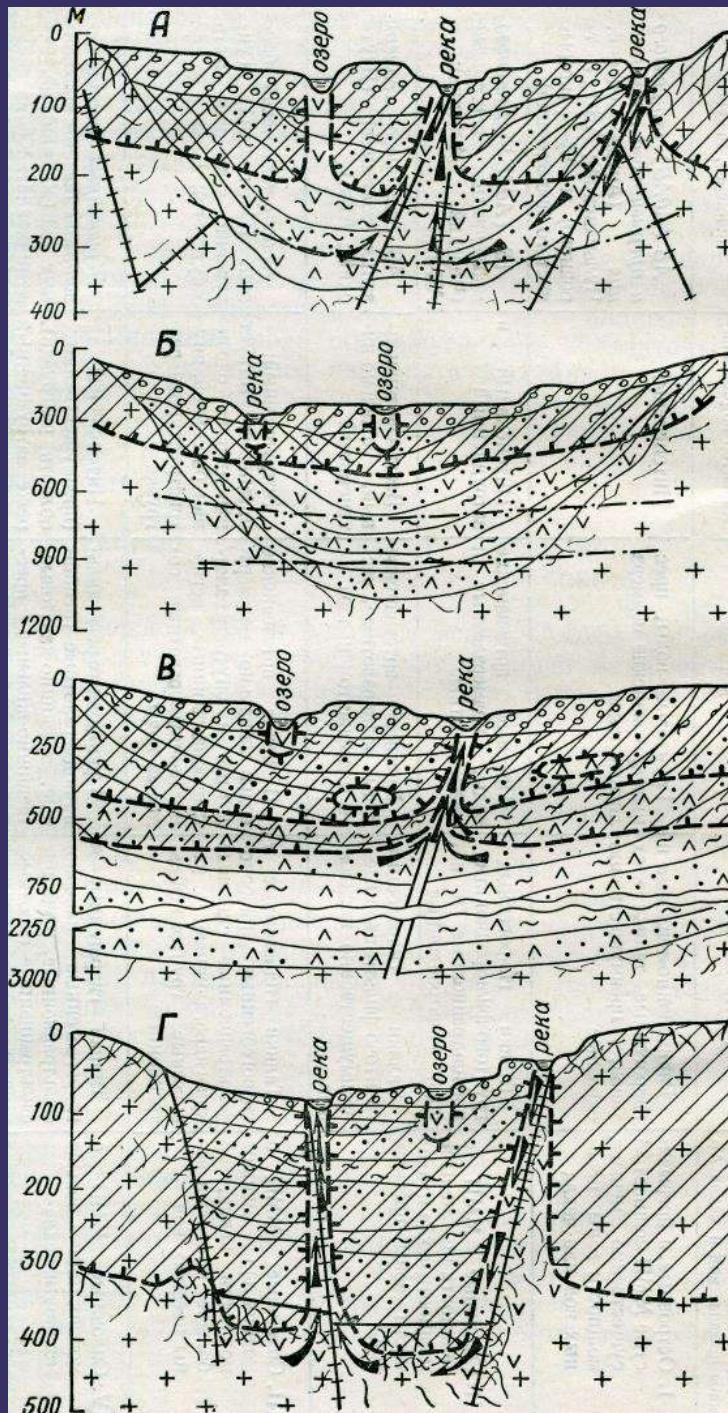
Благодаря наличию первичной слоистости пород в ГАМ, сохраняются и *пластовые подземные воды*. ГАМ образуют, как правило, положительные формы рельефа и имеют *центробежный* характер стока. Однако в структурах ГАМ, приуроченных к депрессиям рельефа, возможен и *центростремительный* сток.

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

Адратезианские 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*.

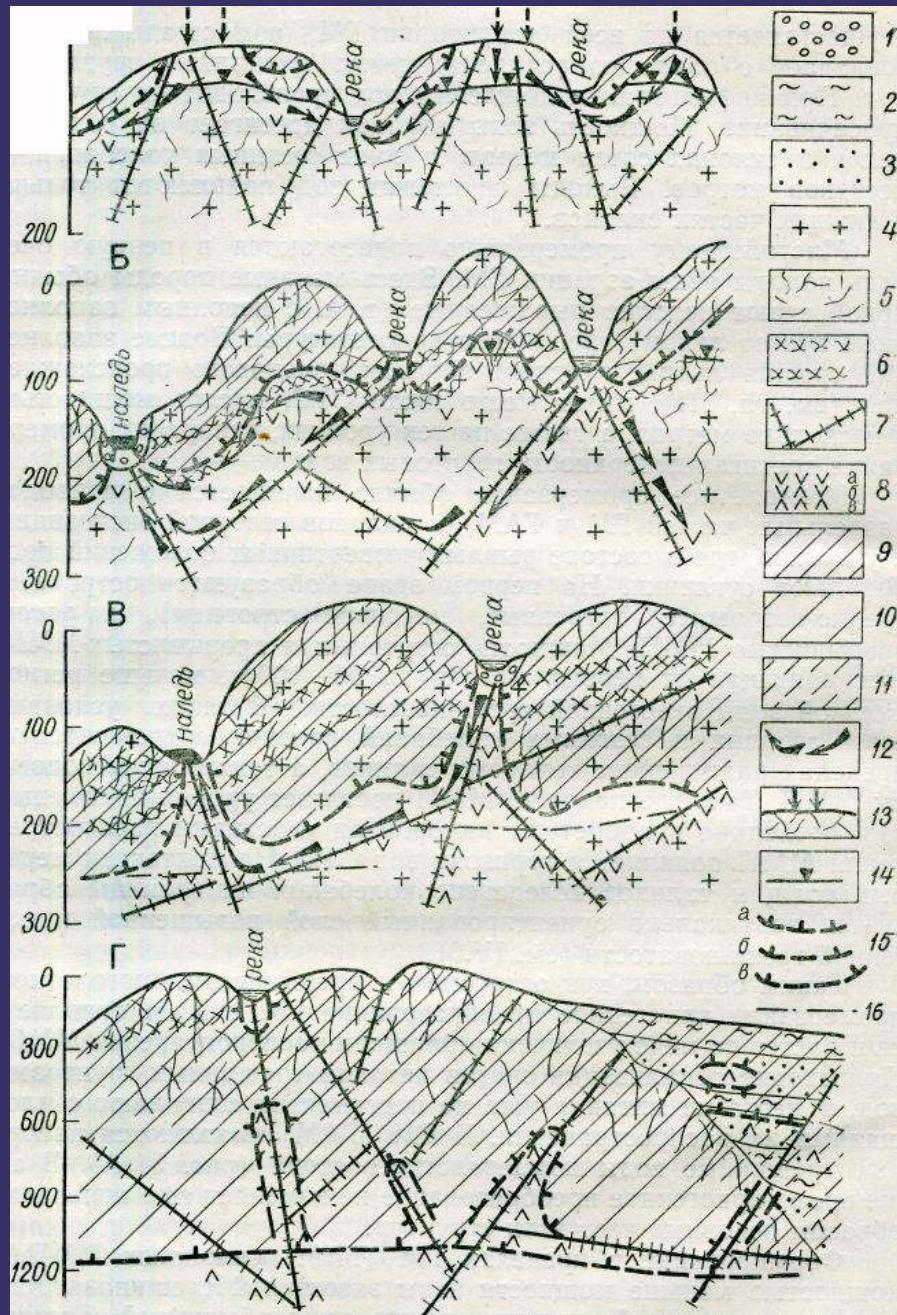
АдАБ выражены обычно в рельефе отрицательными формами, и им присущ преимущественно *центростремительный сток* Однако в гипсометрически приподнятых адратезианских бассейнах центростремительный характер стока может нарушаться и даже меняться иногда на *центробежный*.



Преобразование артезианских и
адартезианских бассейнов
многолетним промерзанием:
 А — артезианский
(адартезианский) бассейн
сплошного промерзания,
открытый;
 Б — артезианский бассейн
сплошного промерзания,
закрытый;
 В — криоартезианский бассейн;
 Г — криогенный постартезиан-
ский бассейн трещинных вод.

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.



Преобразование гидрогеологических массивов многолетним промерзанием

Криогидрогеологические массивы:
 А — прерывистого промерзания,
 Б — сплошного неглубокого промерзания,
 В — сплошного глубокого промерзания,
 Г — сплошного сверхглубокого промерзания

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

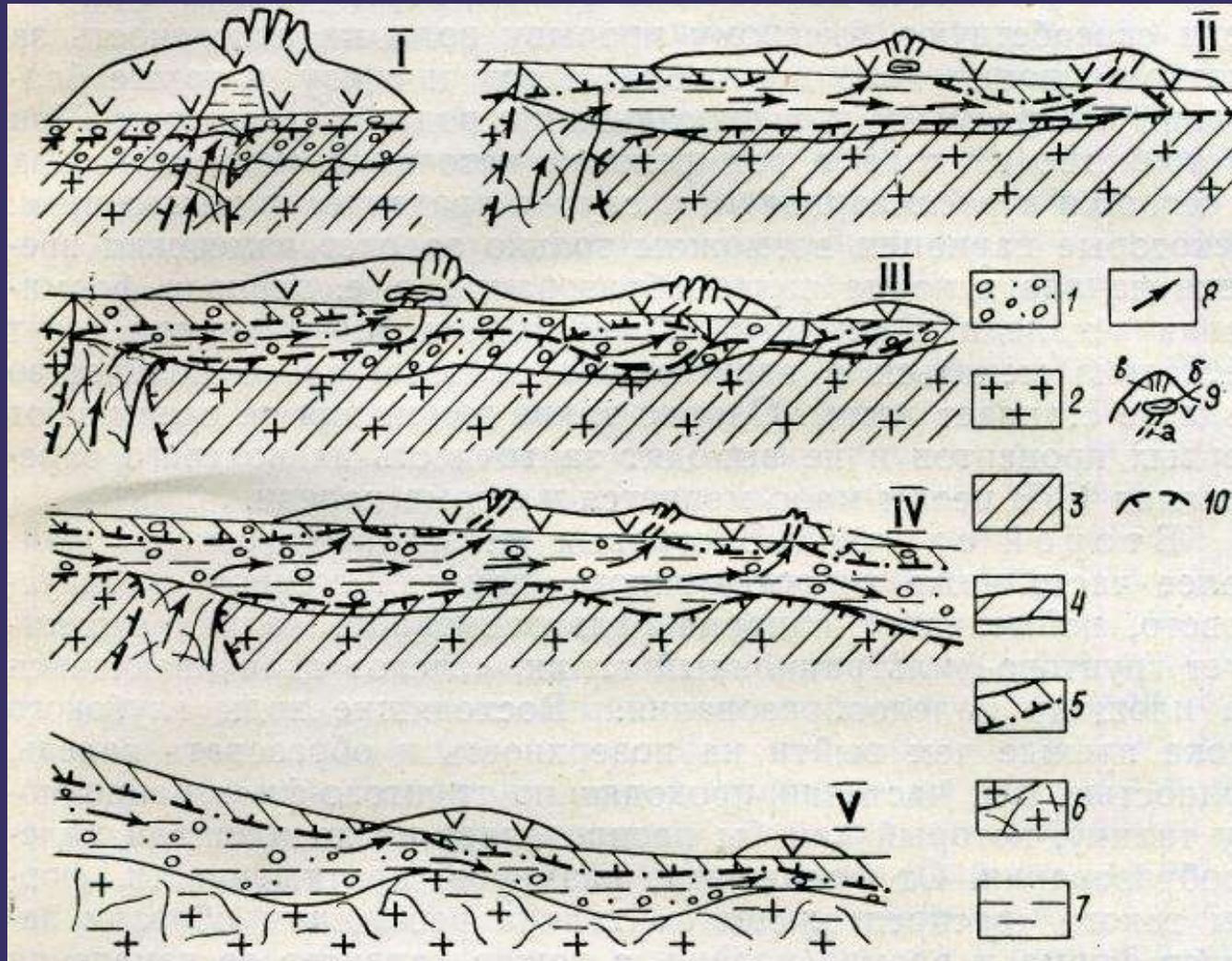


Схема соотношения наледей и напорно-фильтрационных и грунтово-фильтрационных таликов: 1 — гравийно-галечный аллювий, 2 — скальные породы, 3 — ММП, 4 — слой сезонного оттаивания, 5 — слой сезонного промерзания и его граница, 6 — трещиноватость пород, 7 — обводненность пород, 8 — направление движения подземных вод, 9 — наледь; а — каналы в теле наледи, по которым выходит вода, б — линзы воды, в — трещины в наледных буграх; 10 — граница ММП



Общая геокриология

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) особенностей **теплообмена** на поверхности Земли;
- 2) закономерностей формирования **температурного режима** мерзлых пород;
- 3) закономерностей **распространения и условий залегания** толщ мерзлых горных пород ;
- 4) особенностей формирования **таликов**;
- 5) **криогенного строения** (криогенной структуры и текстуры) мерзлых пород;
- 6) особенностей **состава и свойств** мерзлых, промерзающих и оттаивающих пород;
- 7) закономерностей распространения и развития **криогенных процессов** и явлений;
- 8) особенностей взаимодействия мерзлых пород и **подземных вод**;
- 9) **инженерно-геокриологических условий** территории и опыта строительства;
- 10) **истории** развития мерзлых толщ.

Этапы проведения геокриологической съемки. Ландшафтно-ключевой метод

Мерзлотная съемка реализуются 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 и камеральный.

Основным **задачами полевого периода** являются изучение зависимостей геокриологических характеристик от составляющих природной 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.

Что показывают на карте?

По установленным при съемке **взаимосвязям между характеристиками** природной среды и геокриологическим и характеристикам и 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 геологических, 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 территории 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:

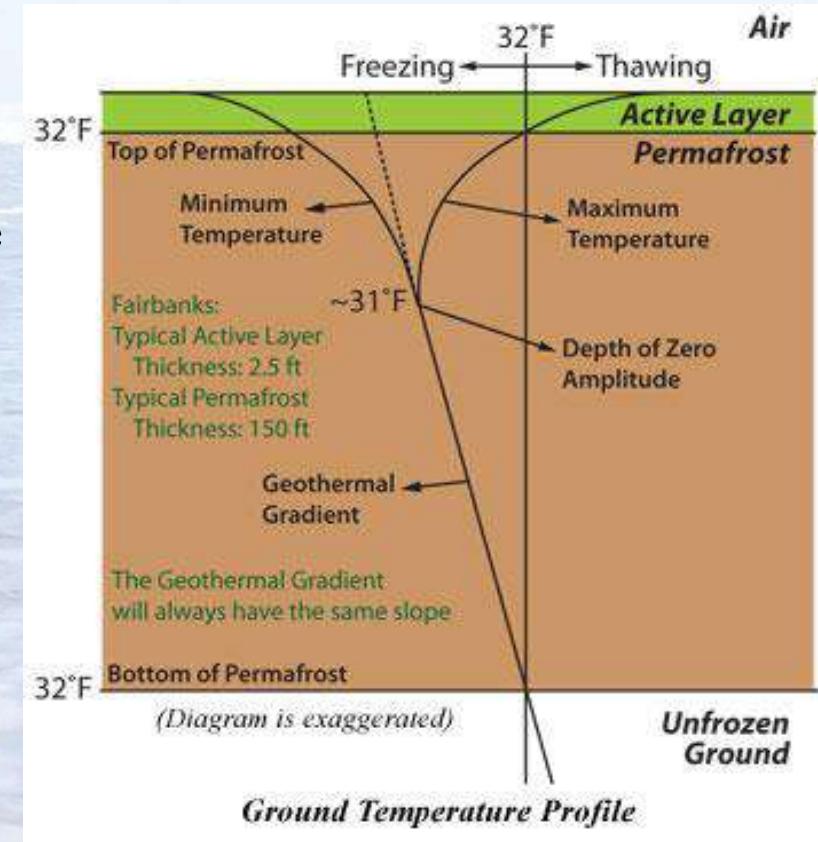
- 1) картировочные**, проходящие слой годовых колебаний температуры (10-25 м);
- 2) опорные геотермические** скважины, проходящие всю толщу мерзлых пород.

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 мерзлых 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:
содержание льда (льдистость), содержание незамерзшей воды

Методы определения **свойств** включают определения **плотности** мерзлого грунта:

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

Полевые методы 1-2-4-7

Лабораторные методы 3-5-6-7

Методы определения влажности мерзлого грунта:

Экспериментальные:

1. Точечный метод (для массивной криогенной текстуры и минеральных прослоек)
2. Метод бороздки (для слоистой и сетчатой КТ)
3. Метод средней пробы (для сильнольдистых грунтов)

Методы определения льдистости мерзлого грунта:

1. Метод Мазурова
2. Расчетный –измерение суммарной толщины включений на единицу разреза

Методы определения содержание незамерзшей воды мерзлого грунта

Калориметрический метод - основан на измерении теплового эффекта, возникающего при оттаивании мерзлого грунта

Контактный метод – основан на динамическом равновесии между льдом, нз и паром

Расчетный (СНиП 2.02.04-88) $W_{\text{нз}} = k_w * W_p$

Значения коэффициента k_w (СНиП 2.02.04-88)

Грунты	Число пластичности грунтов I_p , доли единицы	Коэффициент k_w при температуре грунта $t, {}^\circ\text{C}$								
		-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

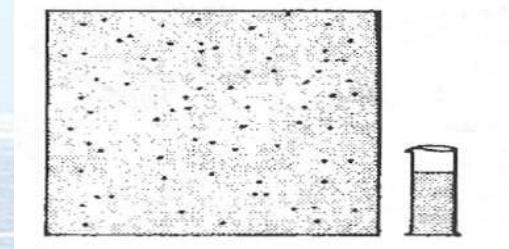
Примечание. В таблице знак «*» означает, что вся вода в порах грунта незамерзшая.

Методы изучения строения мерзлых грунтов

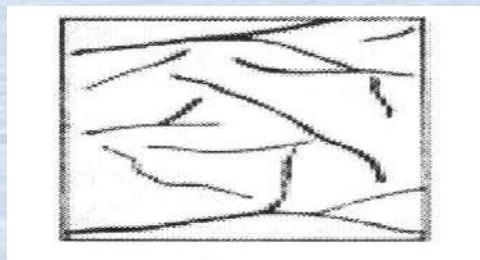
К строению мерзлых грунтов относятся:

криогенная текстура

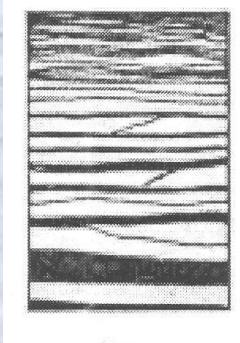
- *Массивная*



- *Сетчатая*



- *Слоистая*



1. Метод режущего кольца



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

3. Метод взвешивания образцов в нейтральной жидкости

$$\rho = \frac{m_e \rho_{жc}}{m_e - m_{жc}}$$

m_e - масса образца в воздухе,

$m_{жc}$ - масса образца в воде,

$\rho_{жc}$ - плотность жидкости,

7. Расчетный метод определения плотности МГ (Пчелинцев, Воляков)

$$\rho = 2,33(1 + W_c) / (\rho_s W_c + p_i)$$

Методы изучения свойств мерзлых грунтов

Свойства мерзлых грунтов

- Термофизические свойства
- Геофизические свойства
- Механические свойства

Теплофизические свойства мерзлых грунтов

- Необходимы для описания процессов теплообмена, происходящих в мерзлых и оттаивающих грунтах

К основным теплофизическим характеристикам пород горных пород при кондуктивном теплообмене относят

коэффициент теплопроводности λ , (Вт/(м·К)),

$$q=-\lambda \cdot \text{grad } t$$

коэффициент температуропроводности a (м²/с),

удельную теплоемкость C (Дж/(кг·К))

объемную теплоемкость $C\rho$ (Дж/(м³·К)).

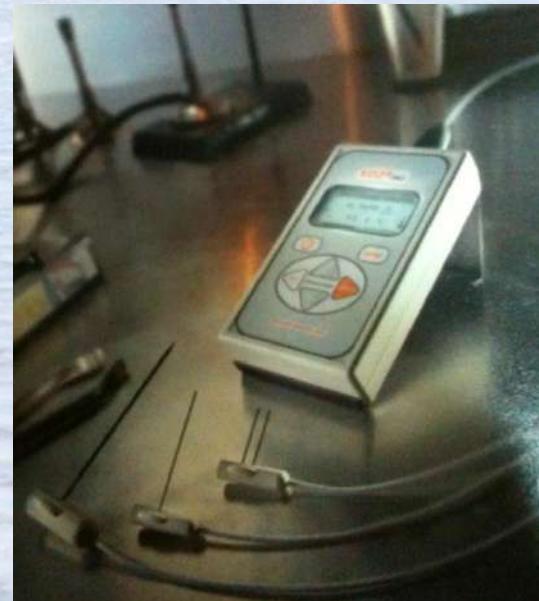
Они связаны соотношениями $\lambda = a \cdot C\rho$ и $C\rho = C \cdot \rho$,

где ρ - плотность грунта [кг/м³].

Определение температуропроводности

Метод цилиндрического щупа

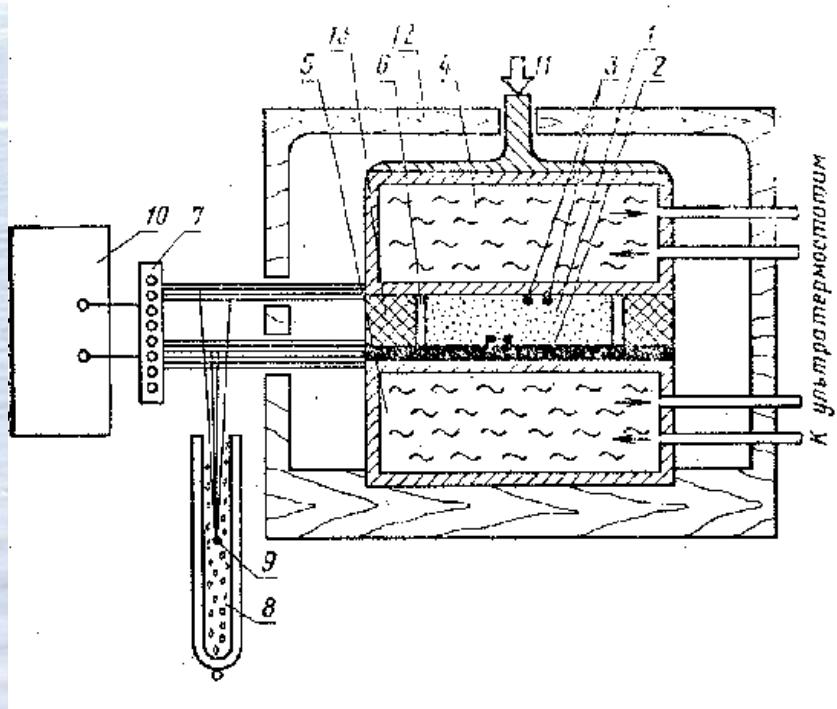
Метод основан на решении задачи о распространении тепла от бесконечного тонкого и длинного источника постоянной мощности, внедренного в однородную изотропную среду



Метод стационарного теплового режима

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

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}$$



- 1 - образец грунта; 2 - термометр; 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

Механические свойства мерзлых грунтов

- **Основные механические свойства мерзлых грунтов**
- Модуль деформации
- Эквивалентное сцепление
- Прочность на сжатие (условно-мгновенная и длительная)
- Коэффициент сжимаемости мерзлого грунта
- Прочность на разрыв
- Сопротивление сдвигу, сцепление, угол внутреннего трения
- Сопротивление срезу (с бетоном, сталью)
- Коэффициент оттаивания и сжимаемости при оттаивании
- Деформации пучения, определение касательных и нормальных сил пучения

Под **деформацией** понимается изменение формы и (или) объема тела без нарушения его сплошности. Деформации бывают **обратимыми (исчезающими после снятия нагрузки)** и **необратимыми (остаточными или пластическими)**.

Обратимыми являются **упругие и эластические деформации**. Их природа различна. **Упругие** деформации обусловлены изменением расстояния между атомами, а **эластические** — изменением конформации макромолекул полимеров. **Закон упругости Гука** — это закон прямой пропорциональности между напряжением и деформацией, характерный для идеально упругого тела, моделью которого является **спиральная пружина**.

Остаточные деформации в кристаллических телах возникают в результате скольжения дислокаций за счет последовательного перескока атомов со своего места на соседнее. В грунтах остаточные деформации связаны в основном с изменением положения минеральных частиц и льда.

В механике грунтов под **реологическими** понимают **процессы деформирования скелета грунта, протекающие во времени и связанные в основном с остаточными деформациями**. Развитие во времени объемных деформаций в немерзлых водонасыщенных грунтах в значительной мере определяется процессом отжатия или всасывания воды при изменении объема их пор. Развитие таких деформаций грунтов, определяемых только длительностью фильтрации воды, не относят к категории реологических. К 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.**

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 – Ньютона жидкость, модель - **поршень с жидкостью**.



Упругость – свойство тела деформироваться под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму и размеры после ее снятия.

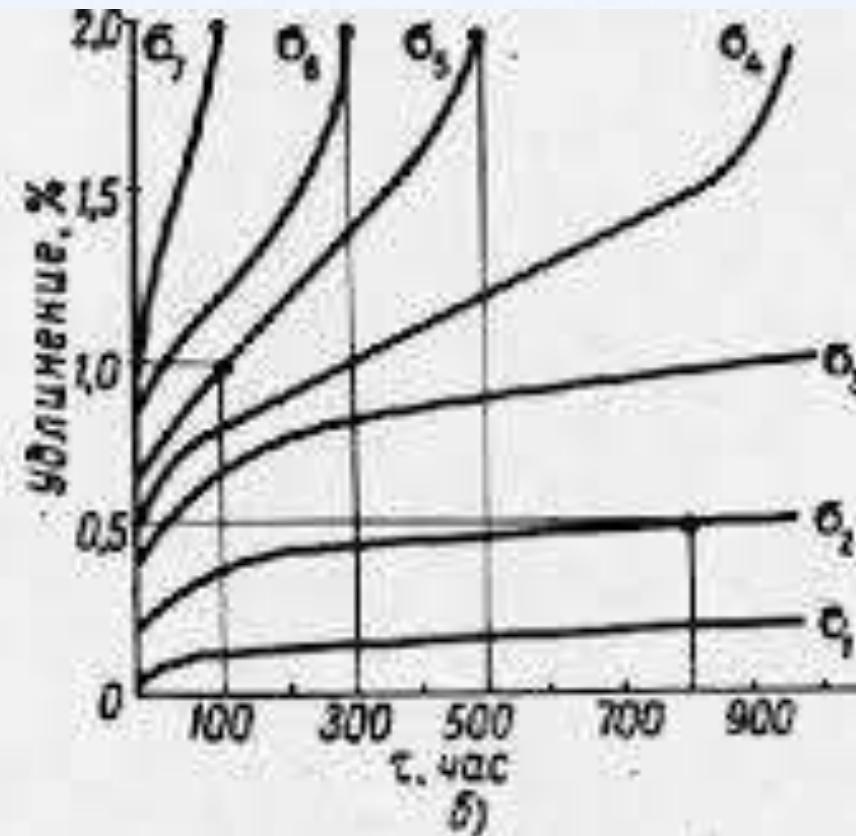
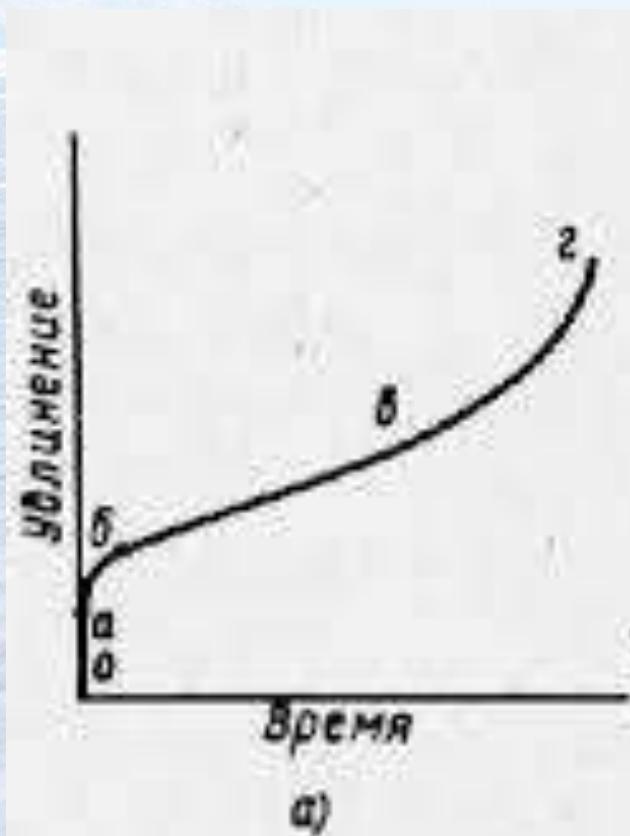


Поведение грунтов под нагрузкой имеет сложный характер, в общем виде **упруго-пластично-вязкий**

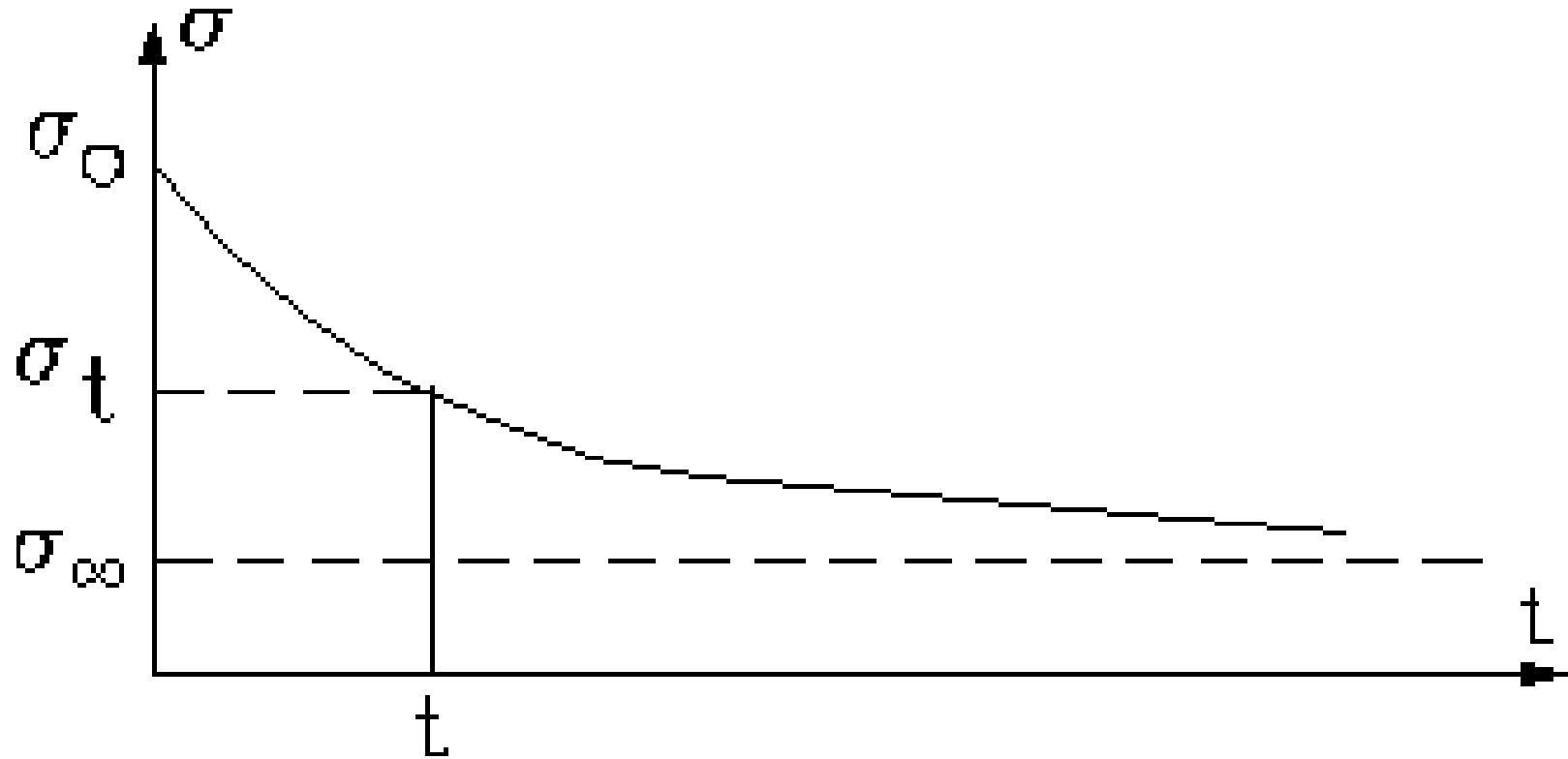
Релаксацией называют процесс расслабления (уменьшения) напряжений в грунтах при заданной неизменной деформации за счет **ползучести**.

Длительная прочность — прочность грунтов при длительном действии на

Ползучесть и разрушение

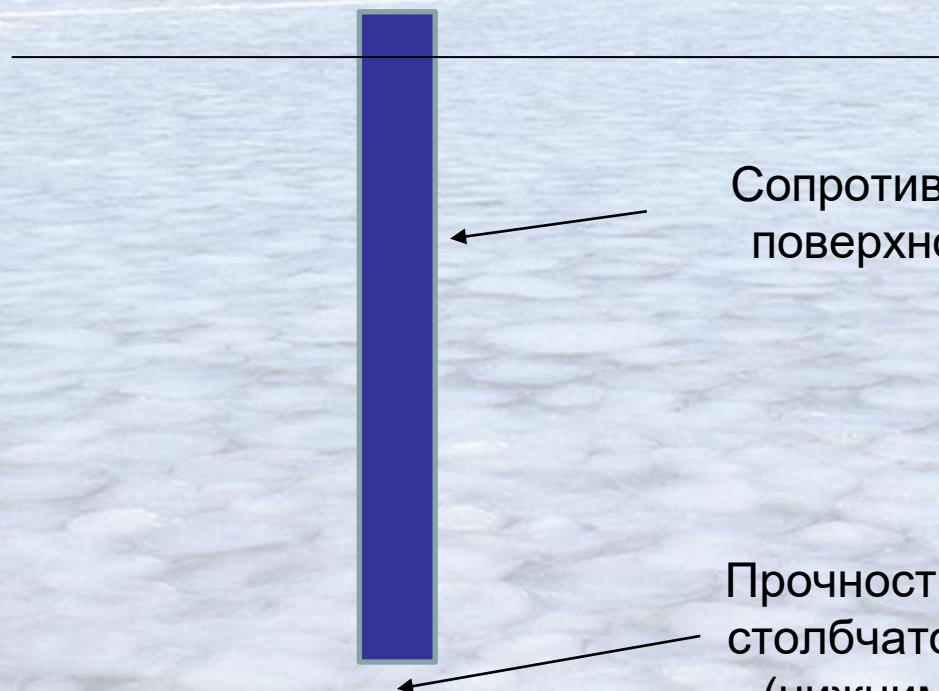


Кривая длительной прочности



Механические свойства

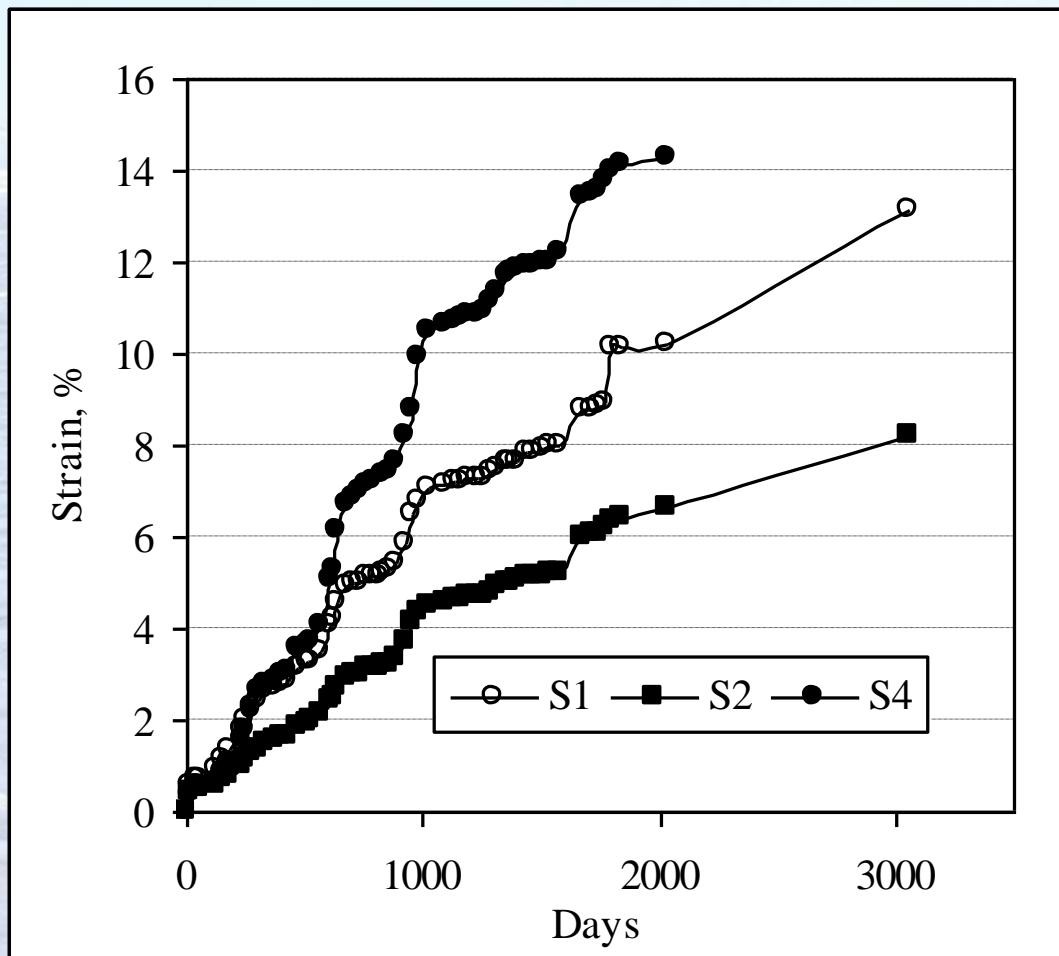
Salinization D _{sal} , %	Bearing capacity, kPa (kg/cm ²), at temperature, °C			
	-1	-2	-3	-4
Sand				
0.05	90 (0.9)	110 (1.1)	180 (1.8)	250 (2.5)
0.1	50 (0.5)	90 (0.9)	130 (1.3)	170 (1.7)
0.15	25 (0.25)	70 (0.7)	110 (1.1)	140 (1.4)
0.2	15 (0.15)	50 (0.5)	100 (1.0)	120 (1.2)
0.3		30 (0.30)	60 (0.6)	90 (0.9)
0.5		15 (0.15)	20 (0.2)	30 (0.3)
Sandy silt				
0.1	80 (0.8)	120 (1.2)	160 (1.6)	200 (2.0)
0.2	40 (0.4)	70 (0.7)	110 (1.1)	150 (1.5)
0.3	30 (0.3)	50 (0.5)	70 (0.7)	120 (1.2)
0.5	15 (0.15)	30 (0.3)	40 (0.4)	60 (0.6)
1.0				40 (0.4)
Silt				
0.1	75 (0.75)	130 (1.3)	180 (1.8)	230 (2.3)
0.2	50 (0.5)	90 (0.9)	120 (1.2)	180 (1.8)
0.5	20 (0.2)	40 (0.4)	60 (0.6)	100 (1.0)
1.0		20 (0.2)	30 (0.3)	60 (0.6)



Сопротивление сдвигу по
поверхности смерзания

Прочность под подошвой
столбчатого фундамента
(нижним концом сваи)

Длительное деформирование



Long-term strains of marine frozen saline silt under constant uniaxial stress of 0.1 MPa, at - 3°C; salinization Dsal=0.5%; specimens are numbered

Разрушения зданий на засоленных мерзлых грунтах



Разрушения зданий на засоленных мерзлых грунтах



Методы определения механических свойств мерзлых грунтов

Полевые методы

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

Лабораторные методы

- Метод одноосного сжатия
- Метод шарикового штампа
- Метод сопротивления срезу по поверхности смерзания
- Метод компрессионного сжатия

Метод испытания горячим штампом

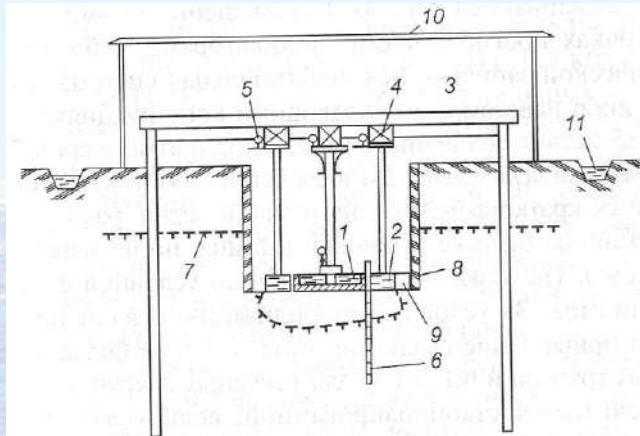
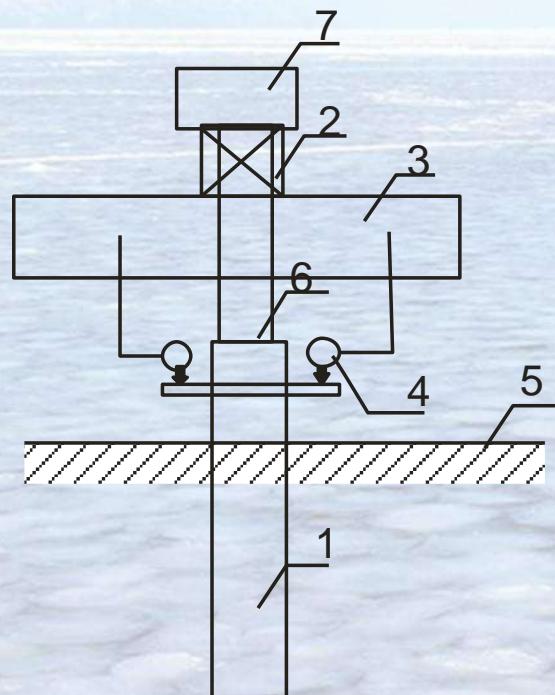


Схема установки для испытания мерзлых грунтов горячим штампом:

- 1 - горячий штамп; 2 - обогреваемое кольцо; 3 – балка; 4 – домкраты; 5 – индикаторы;
6 - термометрическая скважина;
7 – граница сезонного оттаивания; 8 - крепление шурфа;
9 – насос для откачки воды;
10 – навес; 11 – водоотводная траншея.

Метод испытания несущей способности свай

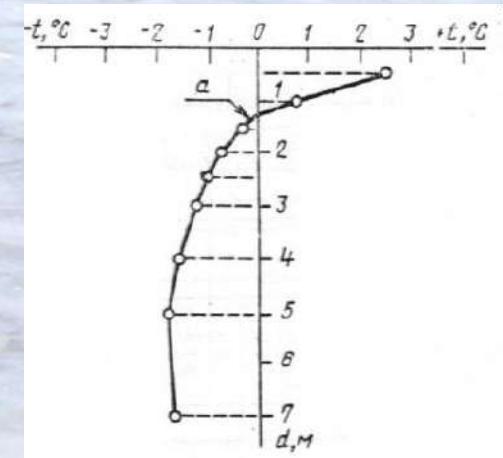
Схема установки для испытания свай статической выдергивающей нагрузкой.



- 1 – испытываемая свая;
- 2 – домкрат;
- 3 – загрузочная балка;
- 4 – индикаторы;
- 5 – поверхность грунта;
- 6 – конструкция для жесткого закрепления сваи с системой упоров;
- 7 – система упоров с анкерами.

Методы изучения температурного режима

- Термометрические скважины



Методы 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.

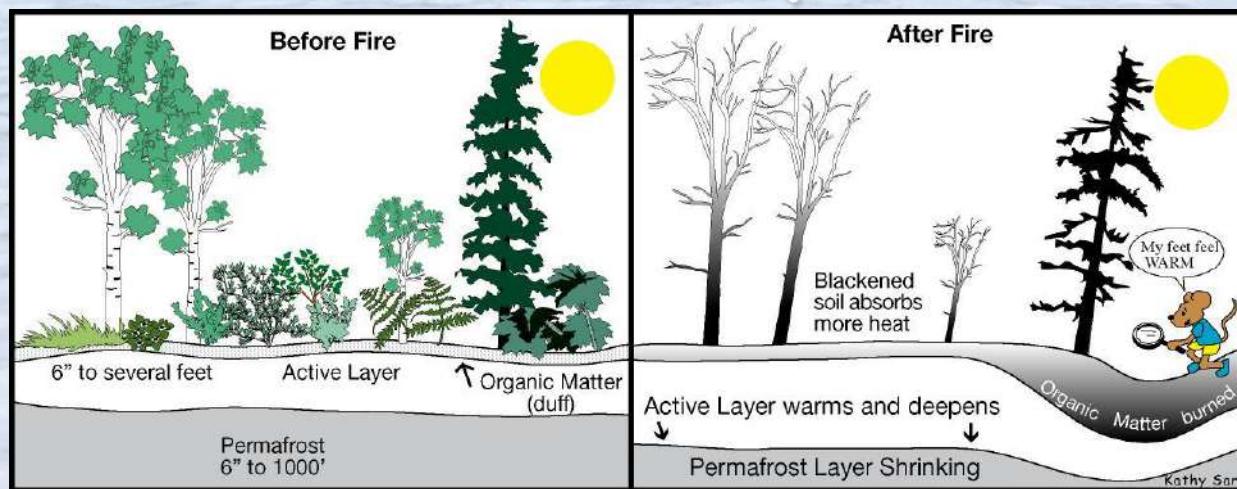
Проводится термометрический, электрический, акустический и ядерный каротаж **скважин**, **электропрофилирование** и вертикальное электрическое **зондирование**, методы переменного тока, инфракрасная и радиолокационная аэросъемки, и другие методы.

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. 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

Второй принцип основан на допущении оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания



Независимо от принципа использования я грунтов в качестве оснований (I или II 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 **I 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 дороги и мероприятиями по тепловой стабилизации.

Проектирование по **II 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°C, 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.



Общие положения по рациональному использованию мерзлых пород при освоении криолитозоны

Особенностью строительства и эксплуатации инженерных сооружений в многолетней криолитозоне является **необходимость учитывать теплообмен грунтов с сооружениями и с внешней средой.**

С изменением температурного и влажностного режимов пород при хозяйственном освоении территории, особенно **с переходом температур через 0°C**, связаны изменения состава, строения и свойств пород, развитие мерзлотных процессов.

Сохранение природных снежного и растительного покровов, гидрологического режима территории является важной задачей при освоении криолитозоны. Другой задачей является **управление** тепловым режимом для обеспечения мерзлого состояния горных пород.

Необходимо учитывать **глобальное изменение климата.**



Общая геокриология

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 (Мониторинг..., 2015). 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 определённых факторов (Мониторинг..., 1990). 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. .

Геокриологический 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 и 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).

Геокриологический мониторинг – фоновый и геотехнический

Понятие «фоновый мониторинг» в современной экологической литературе трактуется по-разному. Общепринято, что эта категория мониторинга является неотъемлемой важнейшей частью глобальной системы мониторинга состояния окружающей среды (ГСМОС) и единой государственной системы мониторинга состояния окружающей среды в России.

Геокриологический фоновый мониторинг

Необходимость введения понятия связана с количественной оценкой допустимого воздействия на экосистемы в соответствии с намечаемой деятельностью. Для этого необходимо знать, в каком состоянии находилась система до воздействия. Важно определить, какое состояние экосистемы принять за первоначальное — осредненное «фоновое» в настоящее время (при отсутствии воздействующего фактора) или состояние до начала воздействия. Оценка фоновых значений представляется сложной проблемой, требующей проведения долгосрочных наблюдений за пространственными вариациями компонентов окружающей среды.

Схема наблюдательной сети ГМСН на Воркутинском полигоне

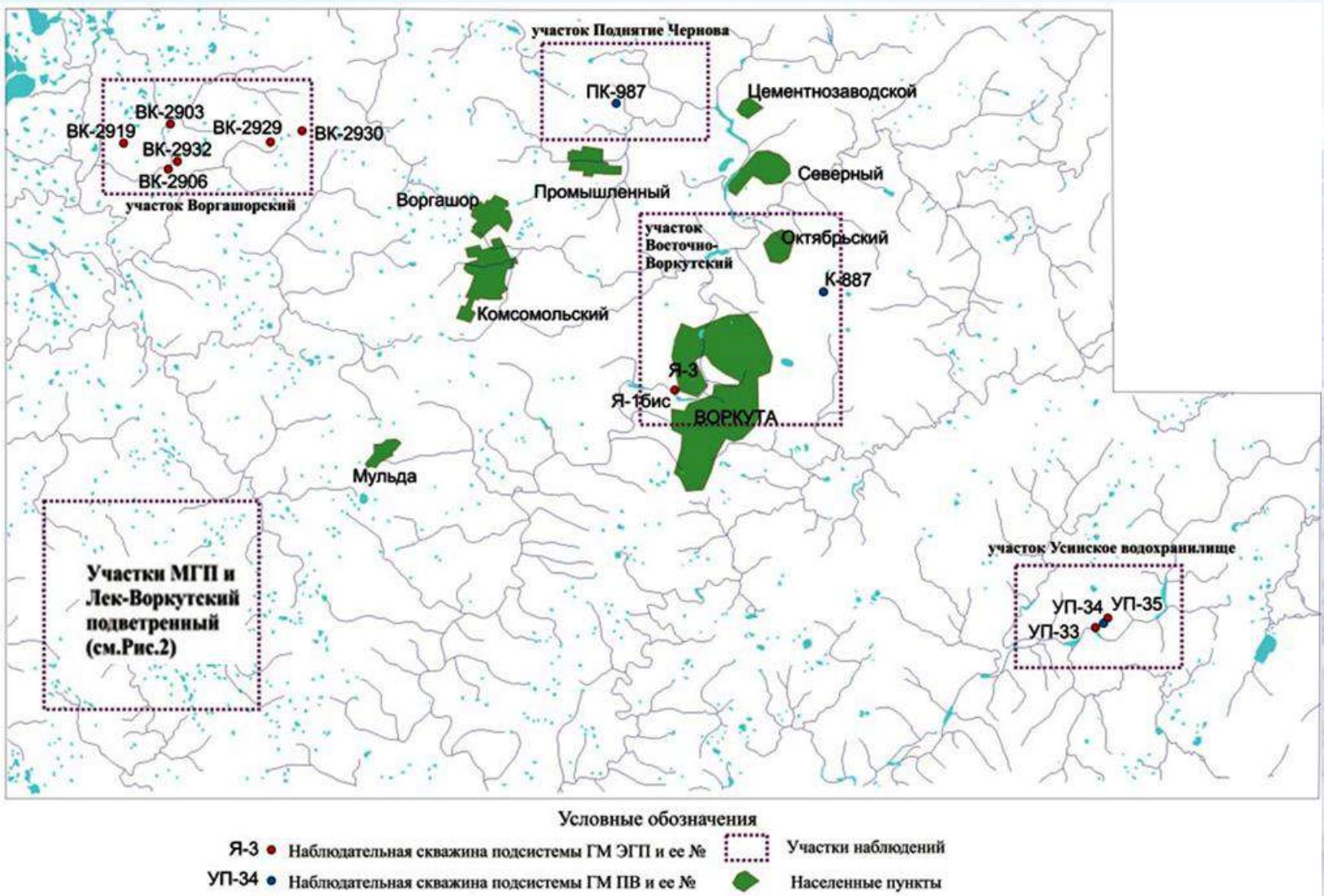
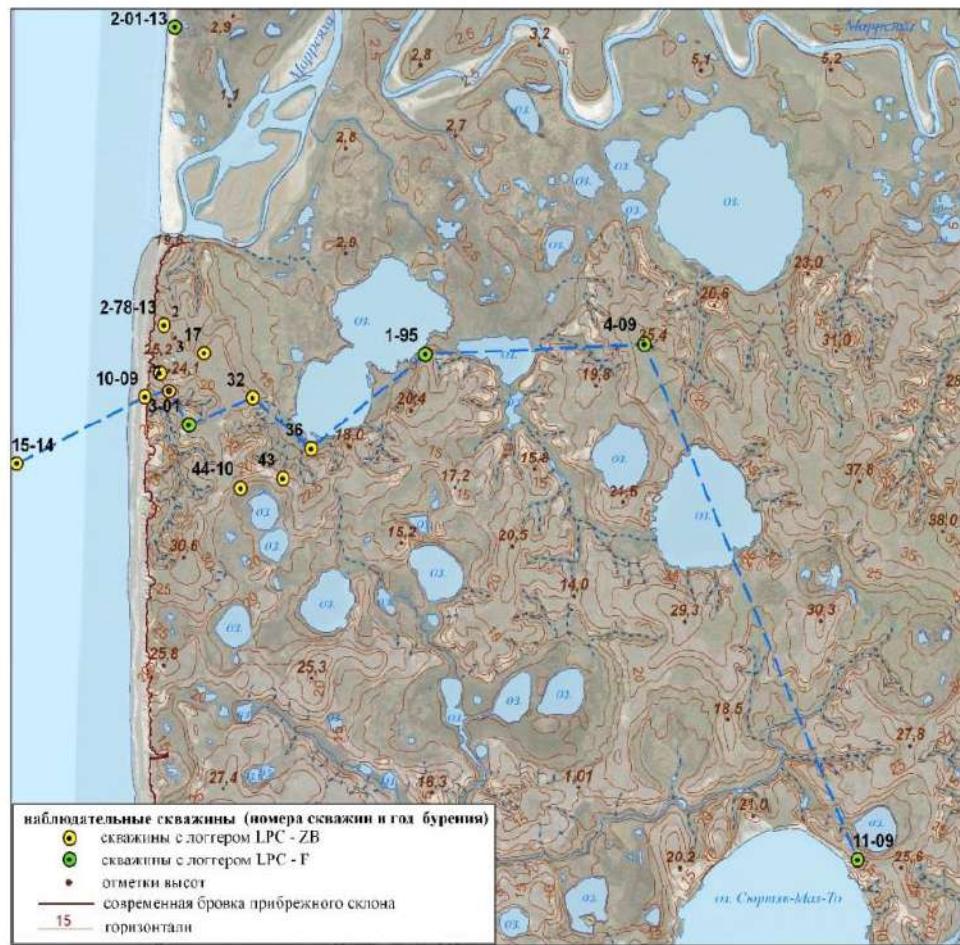


Схема расположения наблюдательных скважин на стационаре Марре-Сале на космоснимке с изогипсами рельефа

Схема расположения наблюдательных скважин
стационара Марре-Сале на космоснимке
Масштаб 1:25 000



Площадки геокриологического мониторинга



- Параметры для мониторинга WMO's GCOS – GTN-P
 - Слой сезонного протаивания

*Circumpolar Active Layer Monitoring Network
(CALM)*

– Тепловой режим горных пород

Thermal state of permafrost (TSP)

<https://ipa.arcticportal.org/products/gtn-p/tsp>

- GTN-P established under leadership of International Permafrost Association (IPA) in 1999
- Provide long-term observations of active layer and permafrost temperature that are required for:
 - *understanding the present permafrost conditions*
 - *detection of terrestrial climate signal in permafrost and its temporal and spatial/regional variability*
 - *development and validation of permafrost, climate change and impact models*
 - *assessment of carbon sources and sinks in permafrost regions*
 - *northern development and land use decisions*
 - *design of adaptation strategies to mitigate the impacts of climate warming in permafrost*
 - *improving our ability to provide ongoing, large area, timely assessment of cryospheric change*

File Edit View Go Communicator Help

Global Terrestrial Network
for Permafrost

Français

GTNP Home

Location Map

Bore

Rece

Loca

Refer

Com

User

Perma

Inventory of Candidate Boreholes

GLOBAL TERRESTRIAL NETWORK - PERMAFROST (GTNet-P)

BOREHOLE METADATA FORM (01/2000)

BOREHOLE NAME Involved Hill IH88-1

SITE 84-1 - Netscape

SITE 84-1: NORMAN WELLS PUMP STATION- T4

Sept.Temperature

Date: YYYY

Depth: Depth in meters

MAGT: Mean annual ground temperature (°C)

MaxT: Maximum annual ground temperature (°C)

MinT: Minimum annual ground temperature (°C)

Quality: A= At least 6 measurements

B= 3 to 6 measurements

Citation for this data: Smith, S.L., Burgess, M.M., Riseborough, D., Coulthard, T. and Chartrand, J., 2004. Digital Summary Database of Permafrost and Thermal Conditions - Norman Wells Pipeline Study Sites. GSC Open File 4635.

Year	Depth	MAGT	MaxT	MinT	Quality
1985	2	-1.806	-0.75	-3.85	A
1985	3	-1.81	-1.04	-3	A
1985	4	-1.851	-1.29	-2.51	A
1985	5	-1.942	-1.53	-2.46	A
1985	6	-2.004	-1.71	-2.32	A
1985	7	-2.009	-1.8	-2.19	A
1985	8	-2.082	-1.94	-2.2	A
1985	9	-2.12	-2.02	-2.19	A
1985	11	-2.04	-1.99	-2.09	A
1985	12.6	-1.994	-1.96	-2	A

GTN-P web site

<https://gtnp.arcticportal.org/>

GTN-P Boreholes: Canada - Netscape

File Edit View Go Communicator Help

GTN-P
Global Terrestrial Network for Permafrost

Global Terrestrial Network for Permafrost

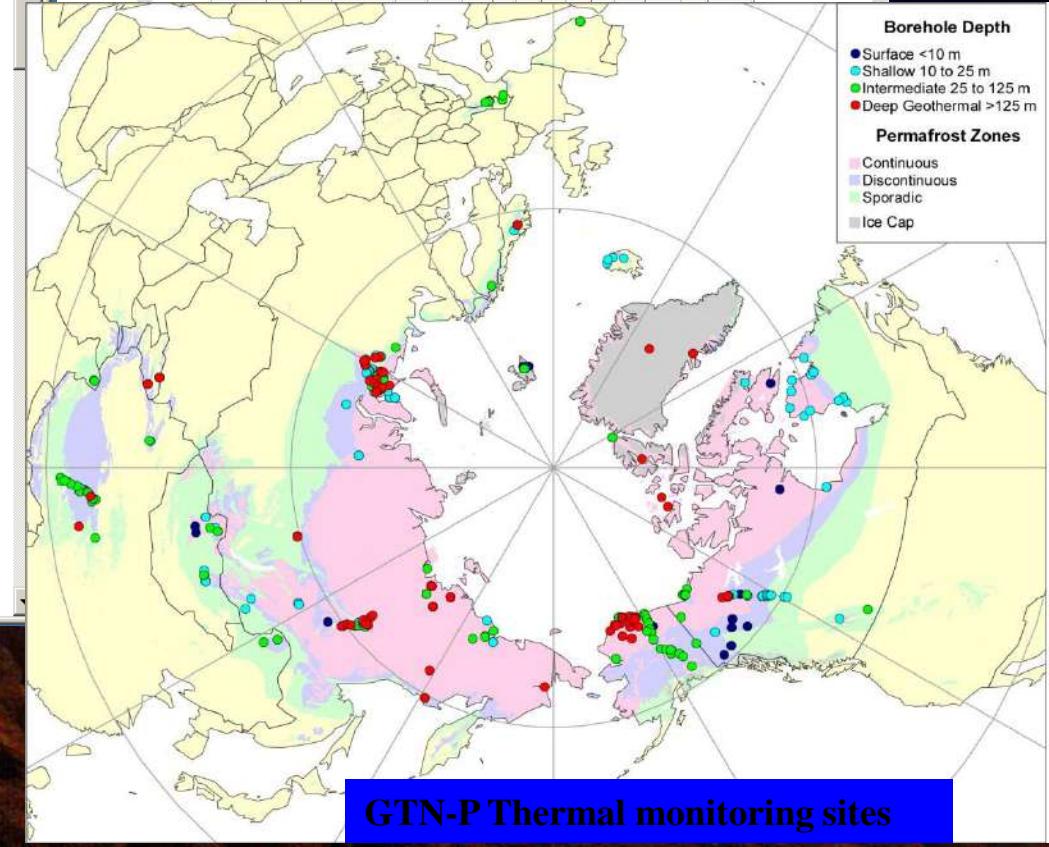
Français

Inventory of Candidate Boreholes for GTN-P

Canada

(Borehole class: (S) Surface <10 m (Shallow 10 to 25 m) (B) Intermediate 25-125 m (Deep Geothermal >125 m) (C) Ice Cap)

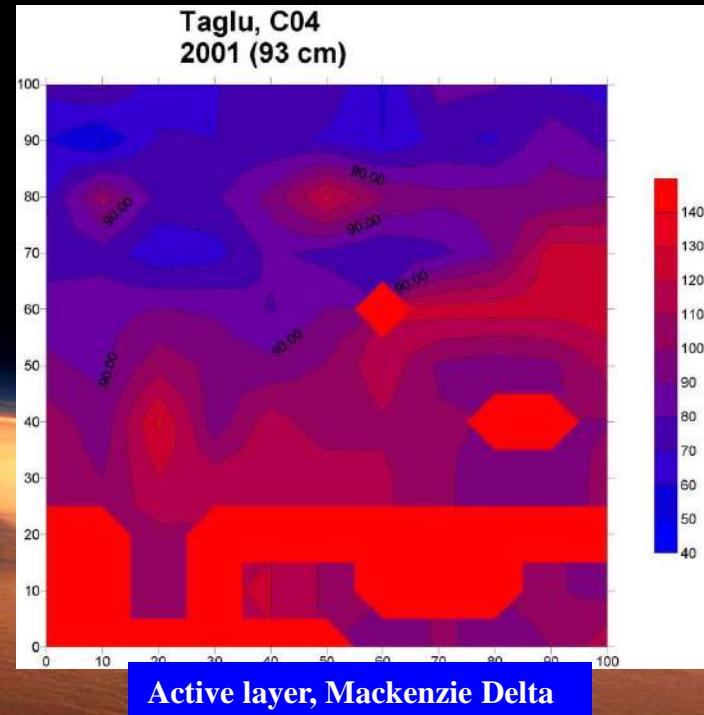
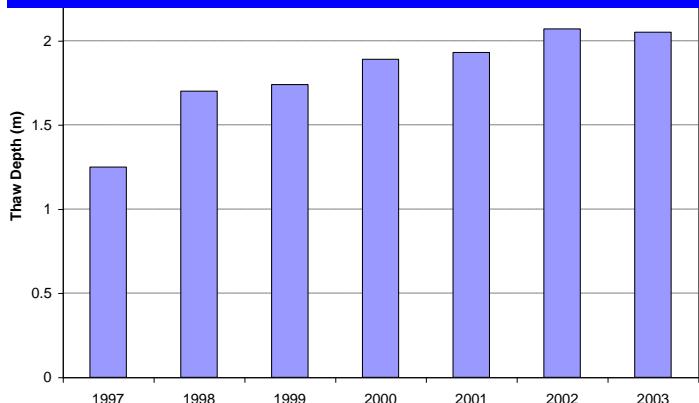
Borehole Name	Depth (meters)	Class	NearestCity	Lat	Long													
Involved Hill IH88-1	2	S	Mark Moon	69	20	32	4	125	39	77	W	25						
Involved Hill IH88-2	3	S	Mark Moon	69	20	35	4	125	39	71	W	14						
Taluk X3	30	S	Mark Moon	69	22	9	W	134	56	55	W	2						
Icey Point X3	30	S	Mark Moon	69	10	9	W	134	17	50	W	40						
Icey 1999X3	30	S	Mark Moon	69	14	27	4	134	26	27	W	50						
Icey 1999X3C	30	S	Mark Moon	69	15	9	W	134	17	40	W	40						
Skrimberg X3	30	S	Mark Moon	69	8	30	4	134	25	35	W	3						
Skrimberg X3C	30	S	Mark Moon	69	8	35	4	134	26	30	W	3						
Skrimberg X3D	20	S	Mark Moon	69	6	32	4	134	26	32	W	11						



Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Network

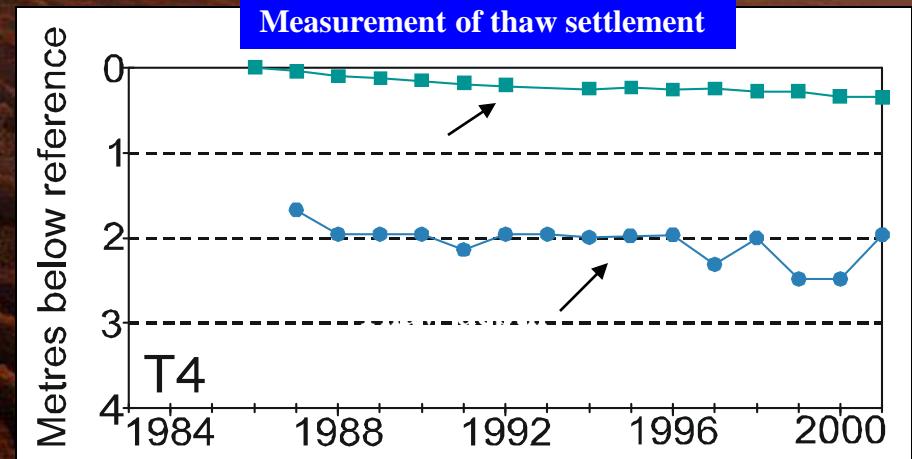
- 125 sites contribute to CALM
- Active layer thickness determined through
 - probing
 - thaw tubes
 - temperature measurements
- Measurements maybe done
 - at points
 - along transects
 - on grids

Thaw depth determined from interpolation of ground temperature profile at Baker Lake BH4

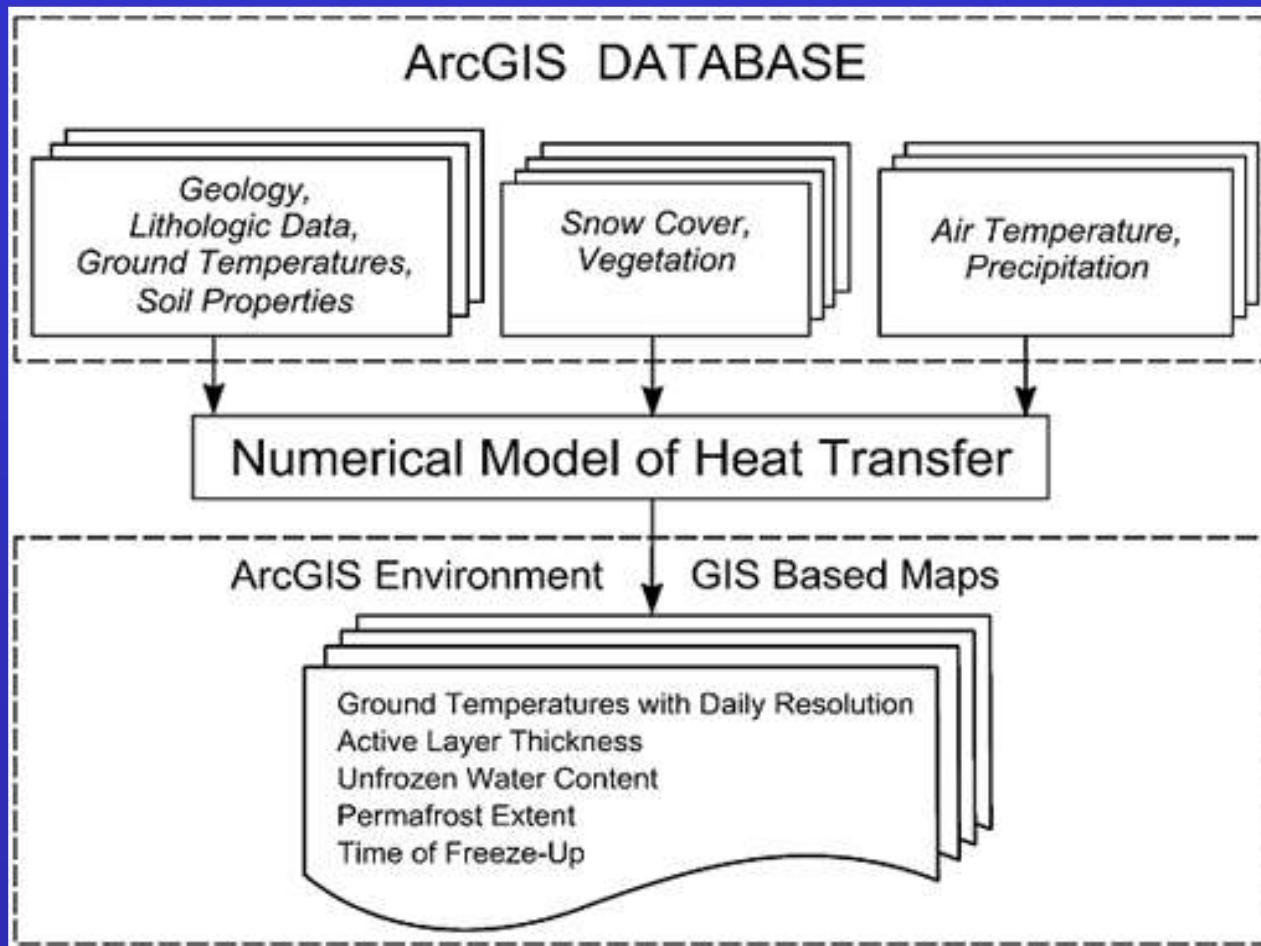


Active layer, Mackenzie Delta

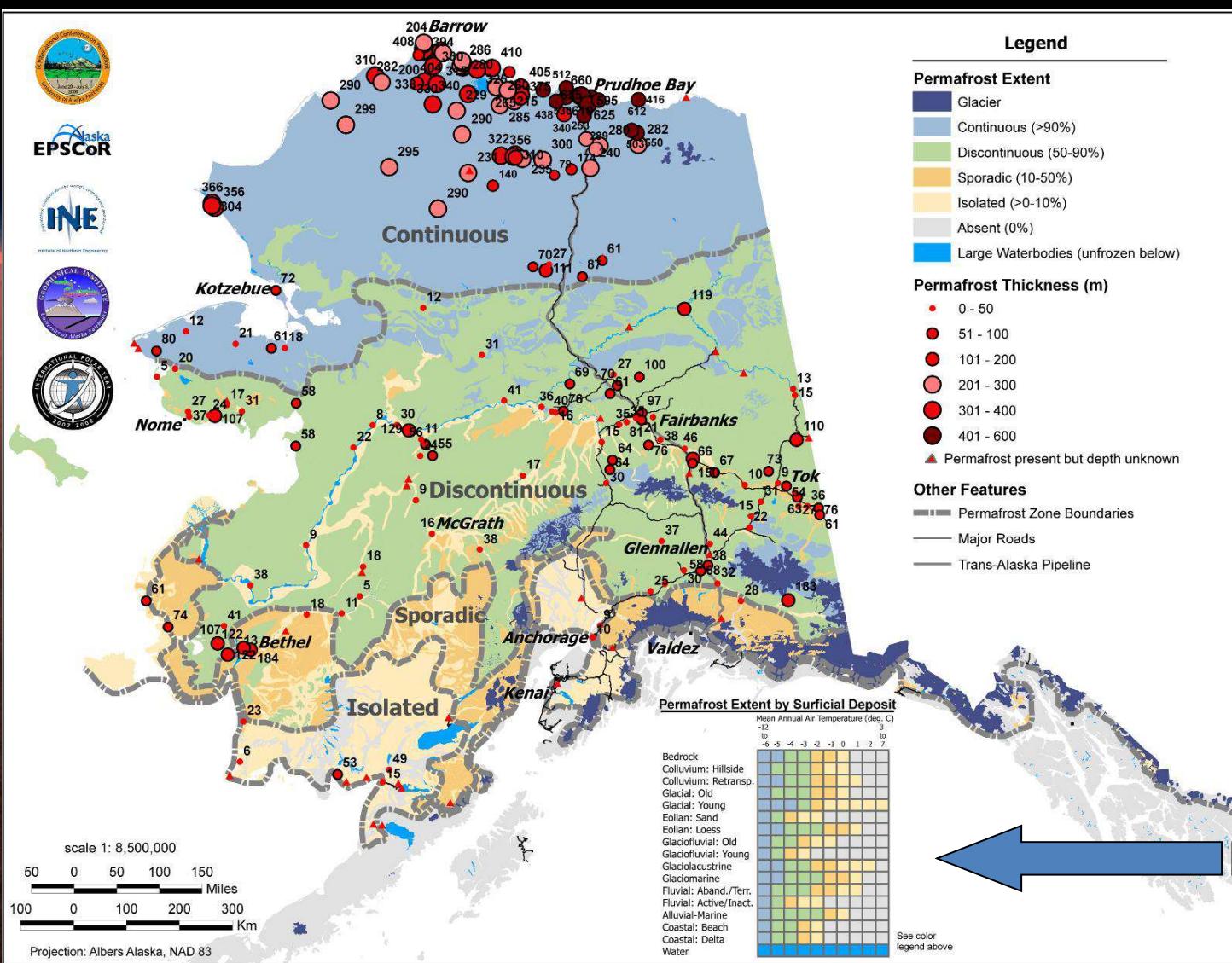
Measurement of thaw settlement



Геоинформационные системы в геокриологии

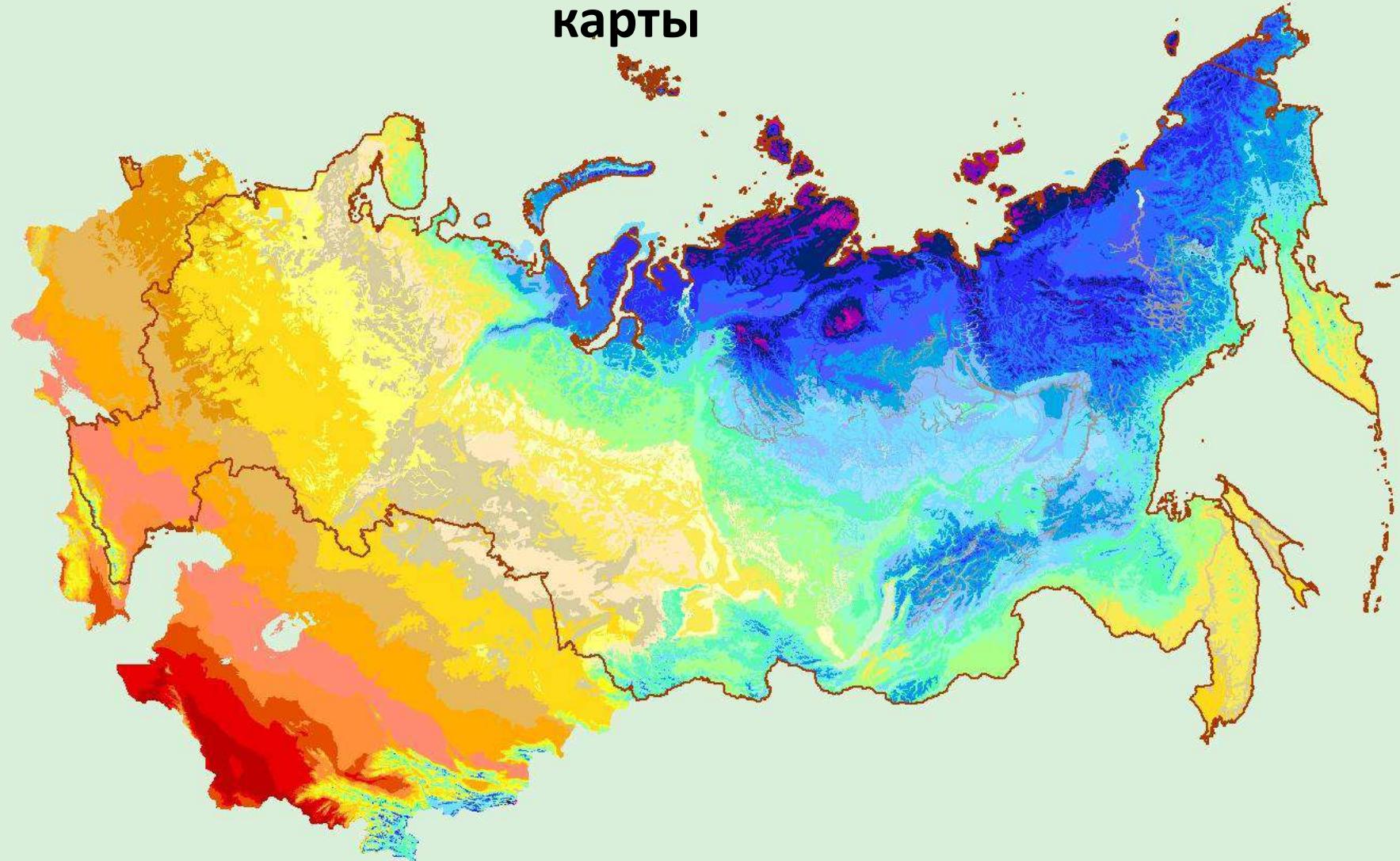


A New Permafrost Map for Alaska



Map based on
terrain units
and climate

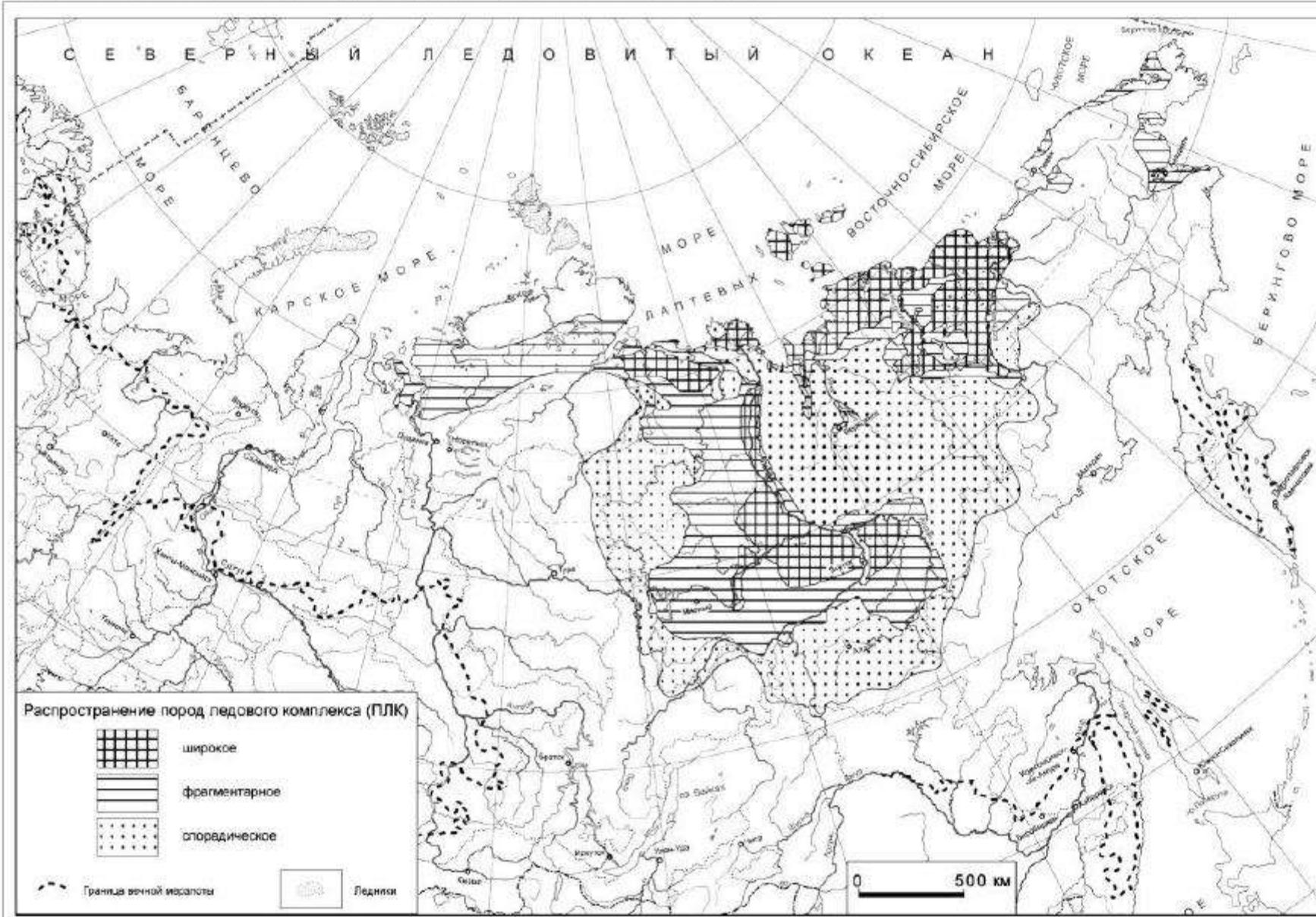
Цифровой вариант 1:2 500 000 Геокриологической карты



Возможное изменение температур и оттаивание многолетнемерзлых толщ в конце столетия.



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОРОД ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА. РОССИЯ



Методы мерзлотного прогноза (эволюционный, или естественно – исторический, и техногенный)

Моделирование

Метод аналогий

Классификация

Экстраполяция и интерполяция

Экспертные оценки

Для геокриологического прогноза необходима следующая информация:

- Модель грунтовой толщи. Оптимально – типовые (опорные) разрезы грунтовой толщи
- Модель естественного температурного поля в грунтовой толще на момент начала расчета (данные термометрии)
- Техофизические 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 толщой и атмосферой (сооружениями) – принцип строительства, материал и характеристики отсыпки, и тип фундамента, конструкция вентилируемого подполья (при наличии), конструкция полов, температурный режим помещений и пр.
- Климатические данные (в том числе модель изменения климата на прогнозный период)

Геотехнический мониторинг

Под геотехническим мониторингом (ГТМ) природно-технических комплексов (ПТК) или геотехнических систем (ГТС) понимается система комплексного контроля, прогнозирования и управления их состоянием с целью обеспечения эксплуатационной надежности на всех стадиях жизненного цикла.

Геотехнический мониторинг

Необходимость осуществления ГТМ регламентируются рядом федеральных нормативных документов, главные из которых следующие:

- Федеральный закон ФЗ-384 “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений” ;
- СП 22.13330.2011 “Основания здания и сооружений”;
- СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых фундаментах”.

Воздействие объектов нефтегазовой промышленности на многолетнемерзлые породы



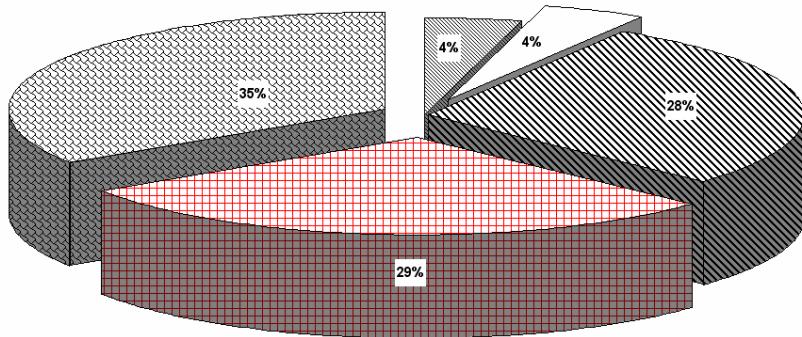
Рис. 4.3.1. Типизация техногенных воздействий объектов нефтегазовой промышленности на ММП.

Блок-схема ГТМ



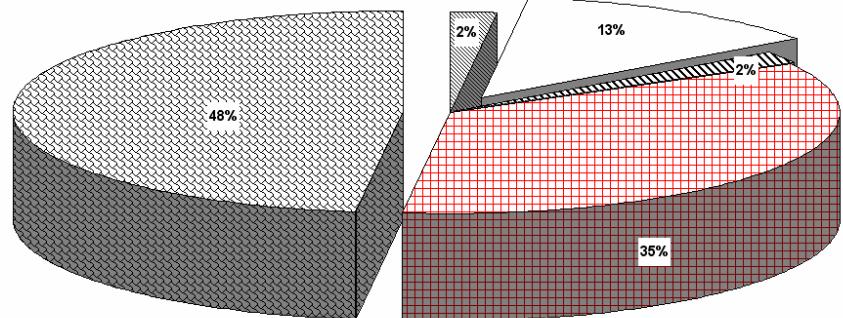
Оценка влияния ММП на надежность функционирования газодобывающих ГТС по различным критериям

а) Критерий “Потери добычи газа”



- Прочие причины
- Нарушение технологического режима эксплуатации оборудования
- ▨ Брак при сварке
- ▨ Техногенное воздействие на ММП
- ☒ Нарушение правил производства огневых работ

б) Критерий “Частота отказов ГТС”



- Прочие причины
- Нарушение технологического режима эксплуатации оборудования
- ▨ Брак при сварке
- ▨ Техногенное воздействие на ММП
- ☒ Нарушение технологии и правил строительства и освоения скважин

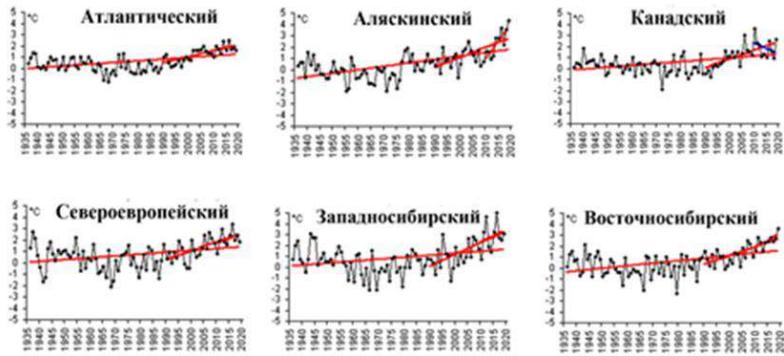
Общая геокриология

Современные проблемы геокриологии

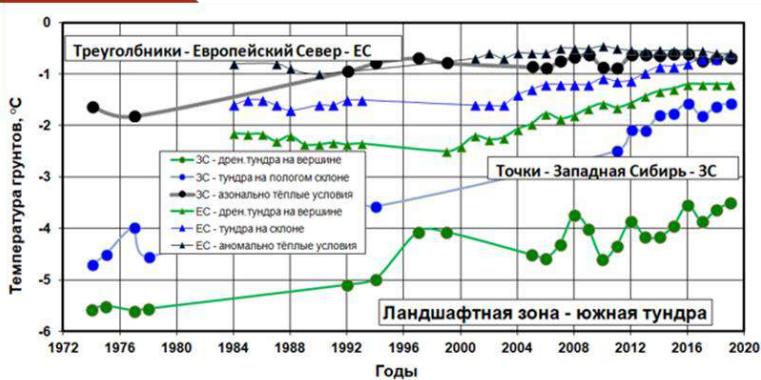
The background image shows a massive iceberg with a jagged, textured surface. It is set against a dark, hazy sky that transitions from a deep red at the horizon to a darker shade of purple and blue at the top. The water in front of the iceberg is a dark, opaque blue.

Глобальное изменение климата и его последствия

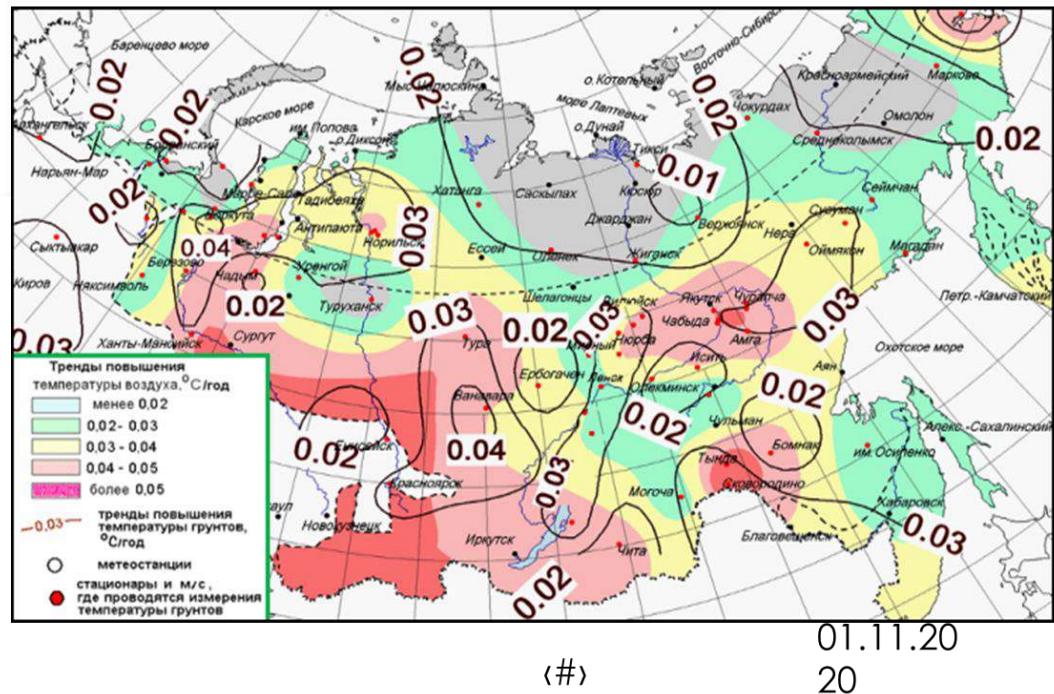
Изменение температуры воздуха Северного полушария



Линейные тренды аномалий среднегодовой температуры воздуха для отдельных районов Арктики за различные периоды
(1936-2019 гг.; 1990-2019 гг.; 2010-2019 гг.)



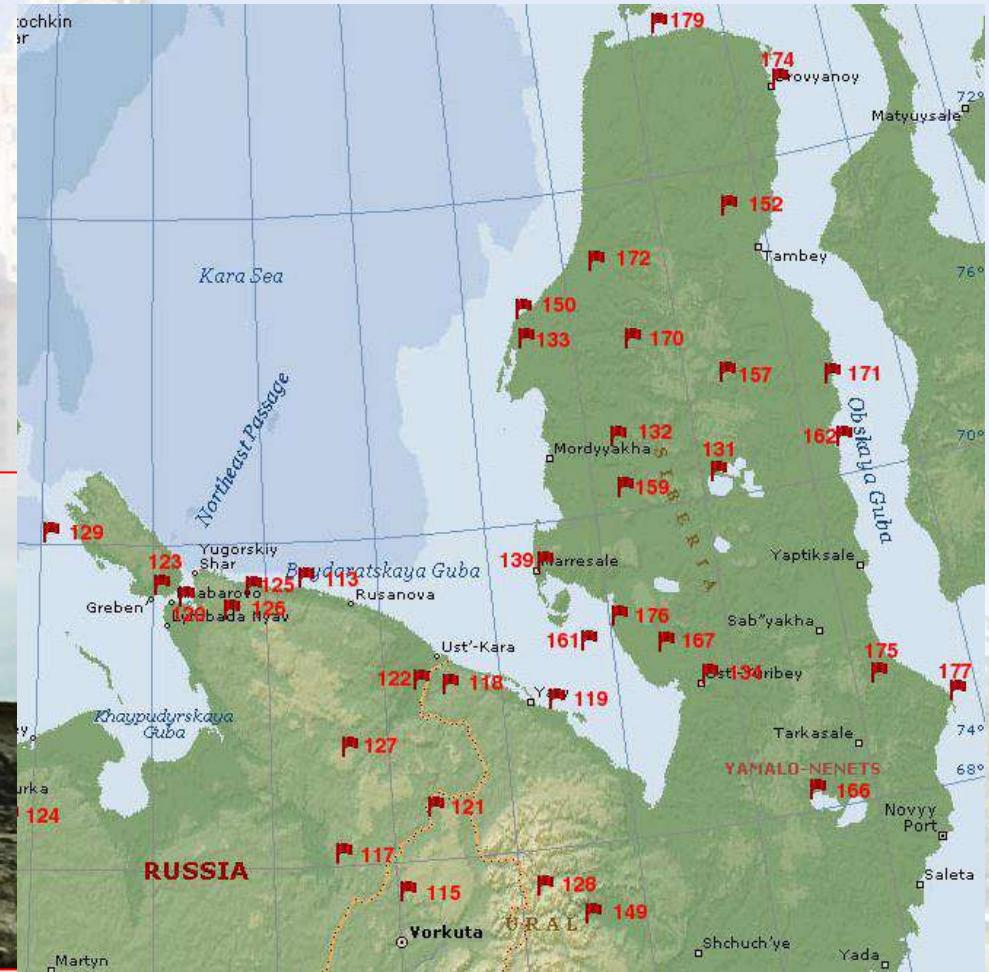
Современные тренды среднегодовой температуры воздуха и грунтов ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$)

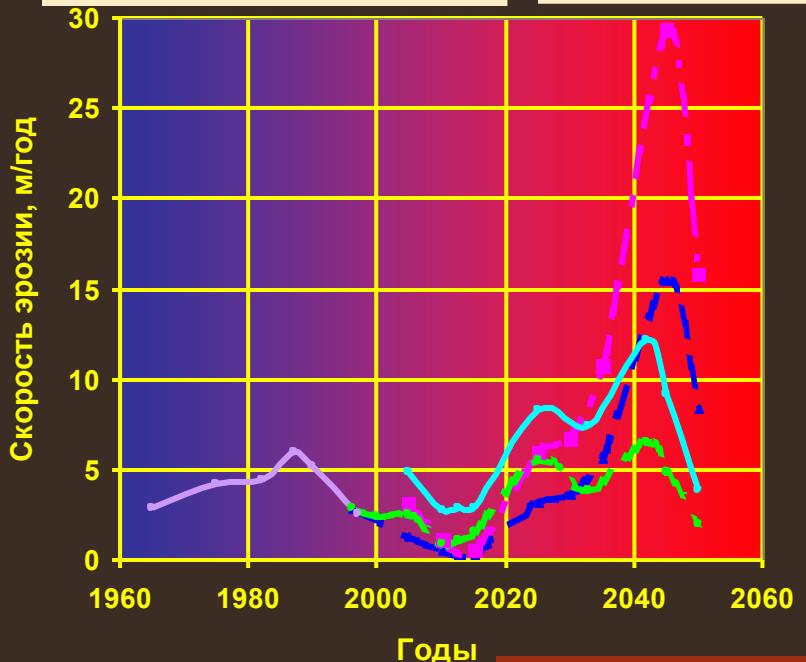
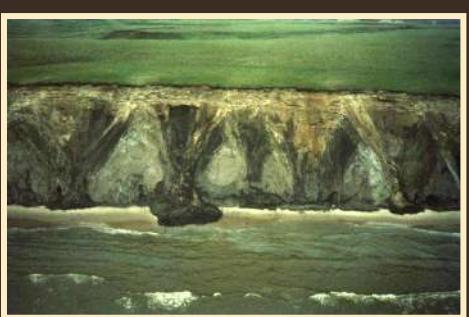




РАЗРУШЕНИЕ БЕРЕГОВ

About 40 000 km of Arctic
coastal line in Russia





■ Сценарий А (потепление на $3 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ с сохранением к середине ХХI века линейного тренда средней летней температуры, наблюдавшегося в ХХ 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 – 16 м, максимальными – до 30 м/год.

■ Сценарий Б (двукратного уменьшения линейного тренда колебаний средней летней температуры к середине ХХI 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 ХХ 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 (линии 1 и 2) и Б (линии 3 и 4). Измеренные средние скорости эрозии (линия 5)

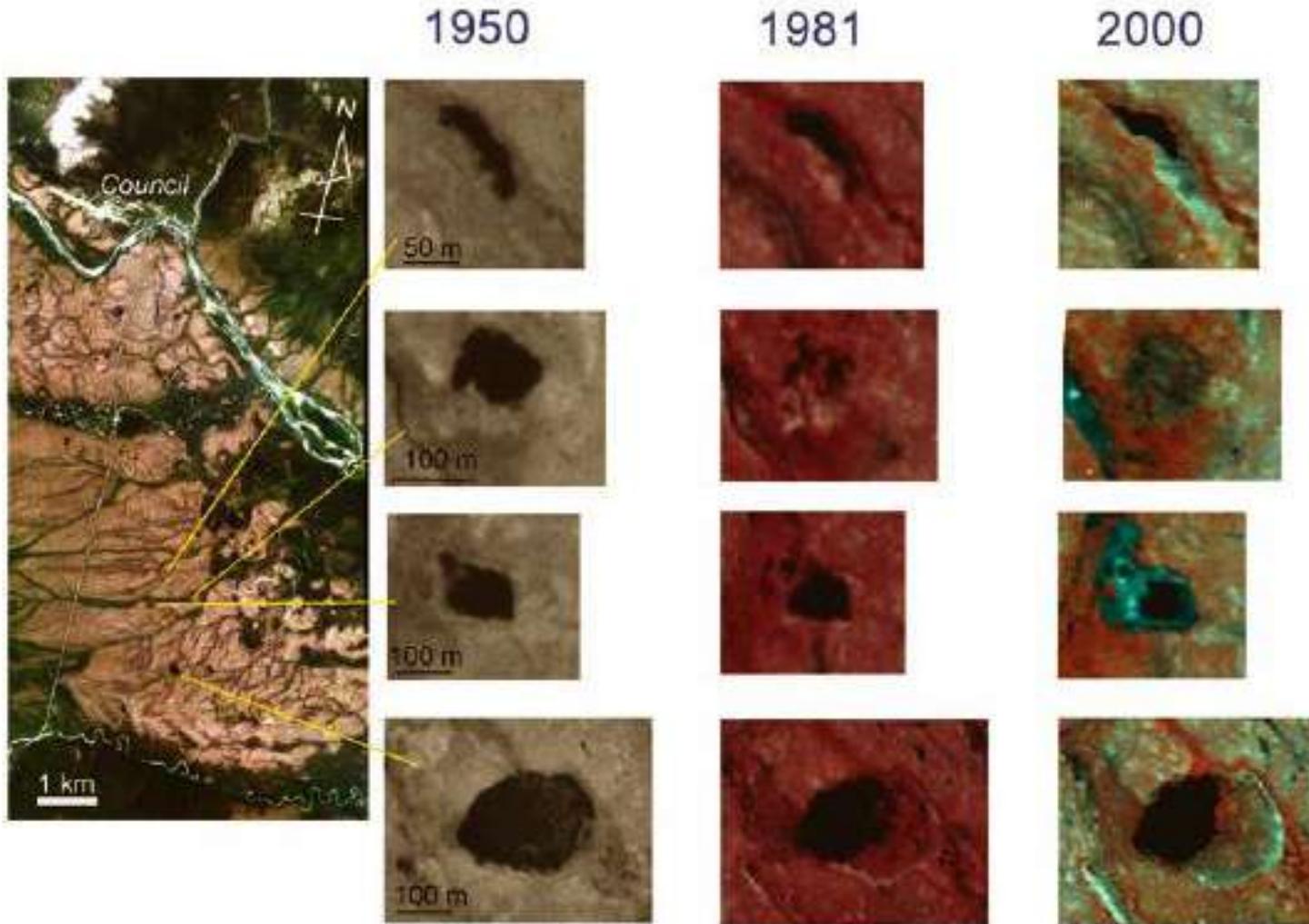
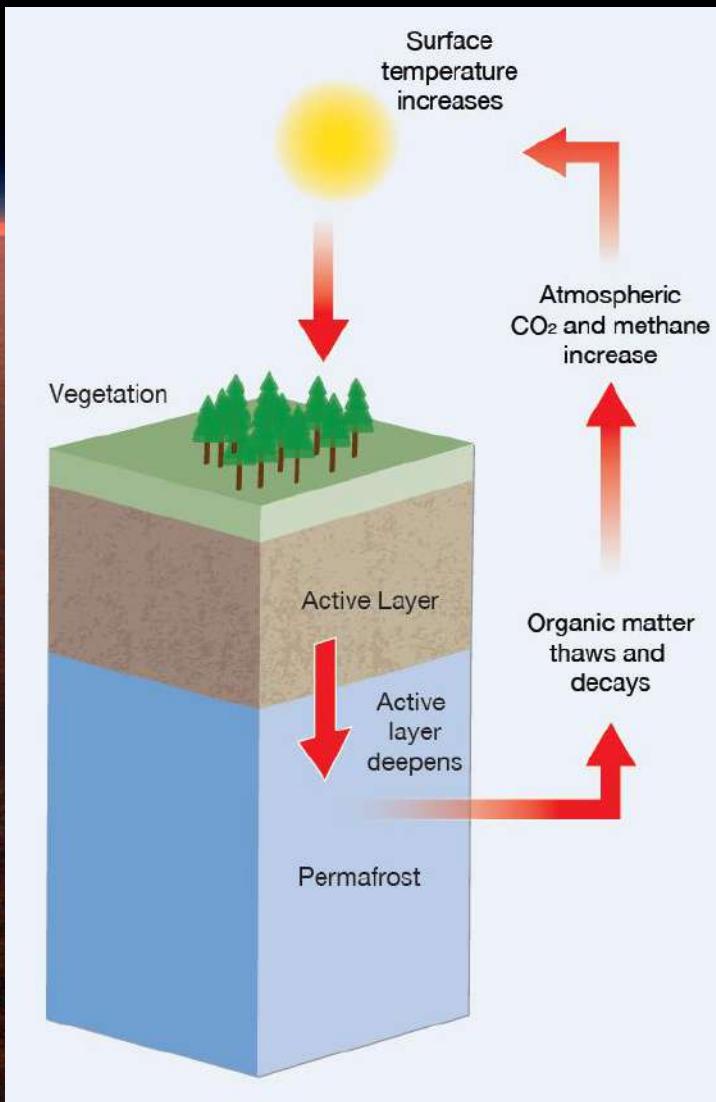


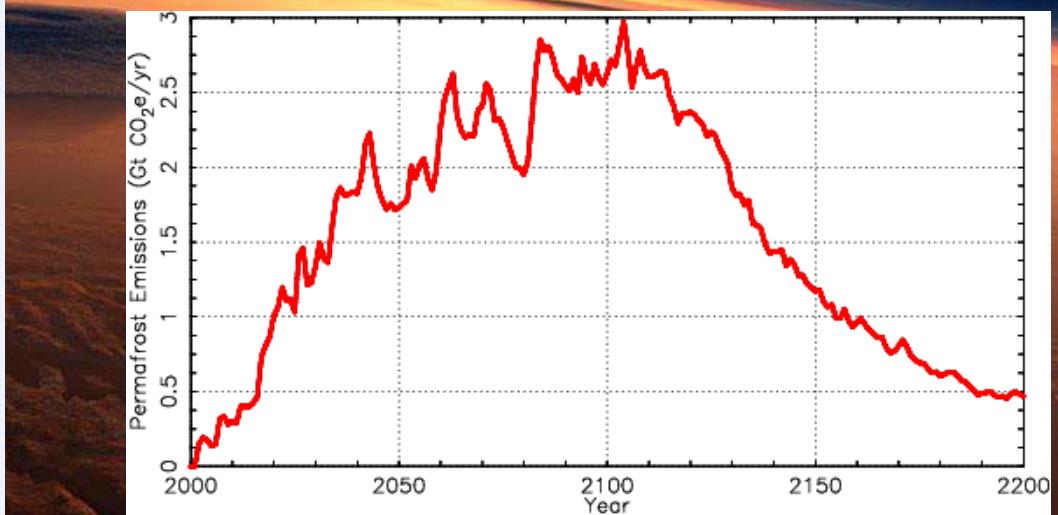
Figure 6. Numerous tundra ponds near Council, Alaska ($64^{\circ}51'N$, $163^{\circ}42'W$) have decreased in surface area over the last 50 years. A probable mechanism for these shrinking ponds is internal drainage through the degradation of shallow permafrost (Yoshikawa and Hinzman, 2003).

Source: Hinzman et al. (2005)

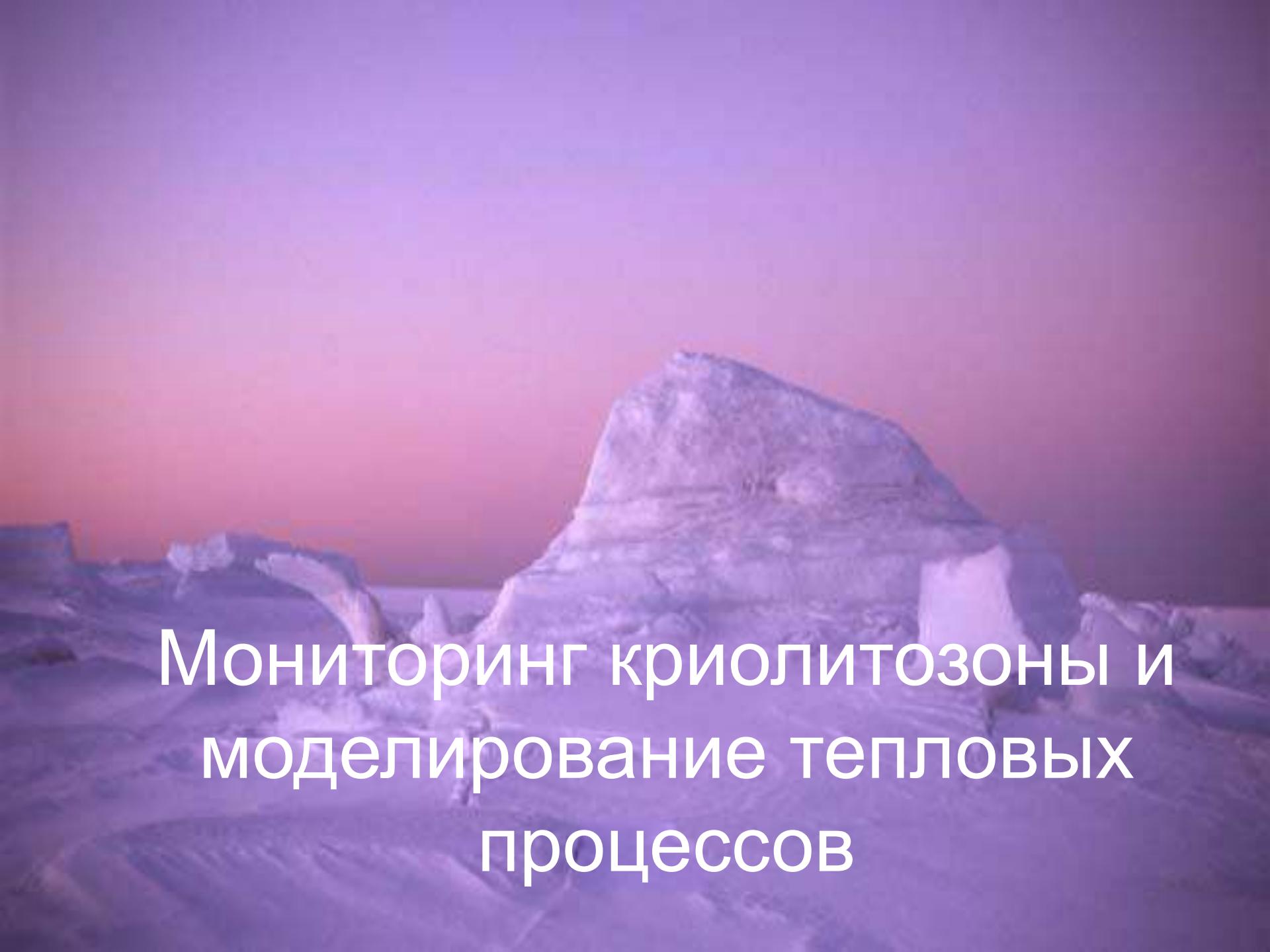
ЭМИССИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ



- Amplifies surface warming
- Irreversible
- Emissions for centuries



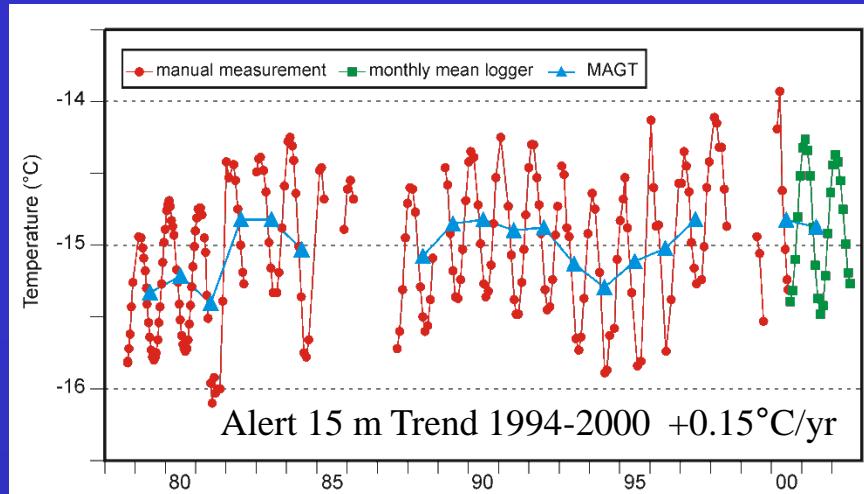
Projected annual permafrost emissions
for A1B scenario

The background of the slide features a close-up photograph of a light-colored, textured rock or ice formation. The lighting is dramatic, with a warm, reddish-orange glow from behind the main peak, creating a strong silhouette and casting deep shadows on the front face. The sky is a gradient of pink, purple, and orange.

Мониторинг криолитозоны и моделирование тепловых процессов

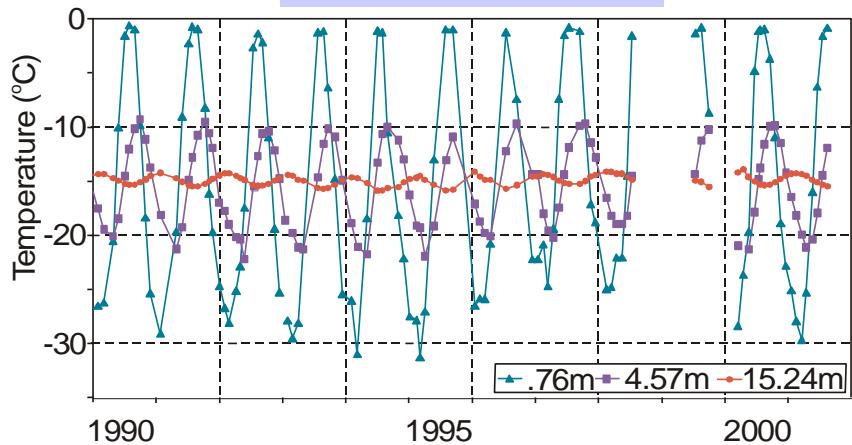
Permafrost Thermal State

- **Borehole monitoring**
 - few metres to several 100 m deep
 - frequency of measurements varies from daily to monthly to annual to several years
- **Method**
 - Single probe
 - Permanent multi-sensor cable
 - *manual measurements*
 - *continuous measurements with data loggers*

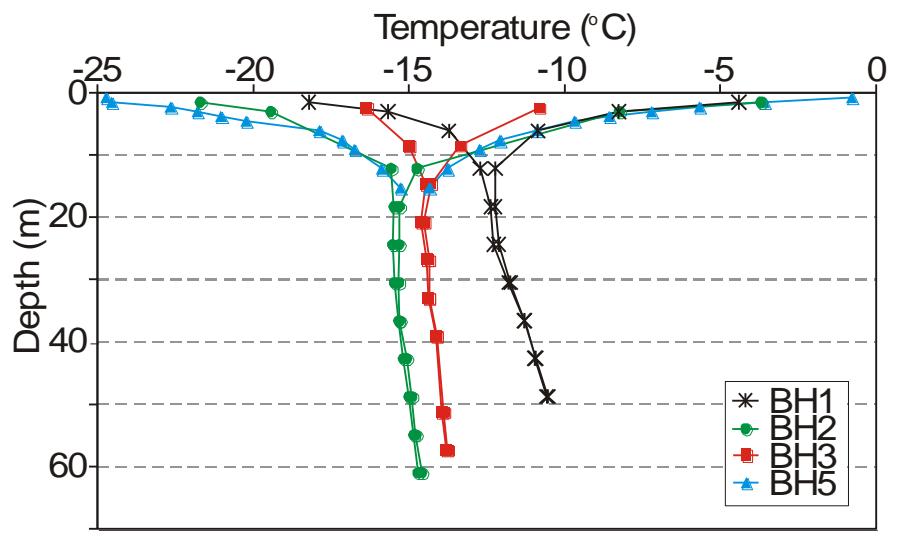


Manual Measurements

Alert BH5

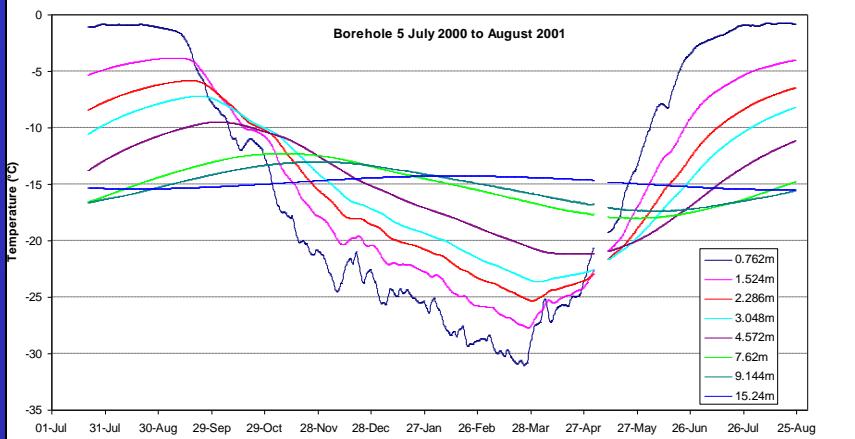


Temperature Envelopes - Alert



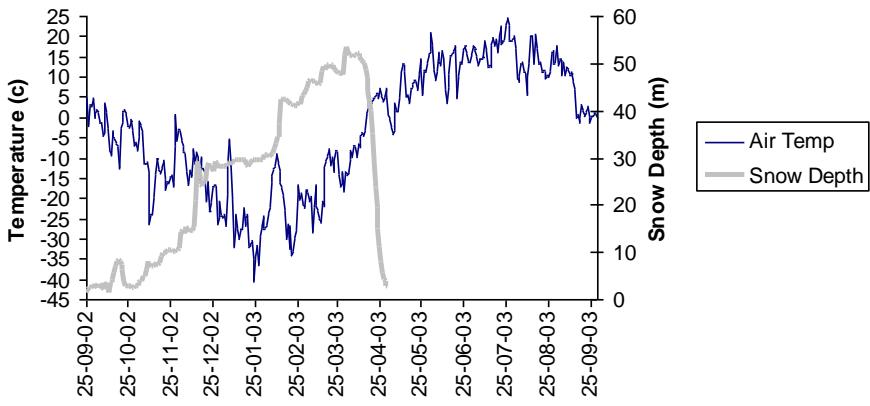
High frequency data collection with data loggers

Alert BH5

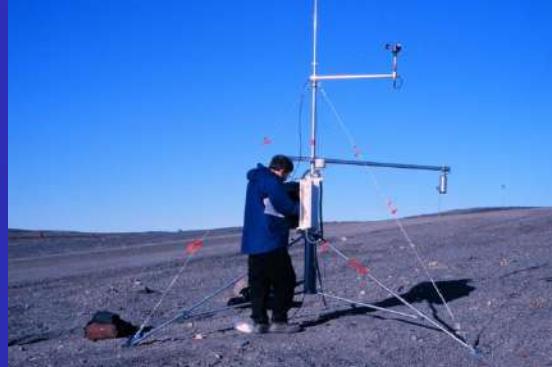
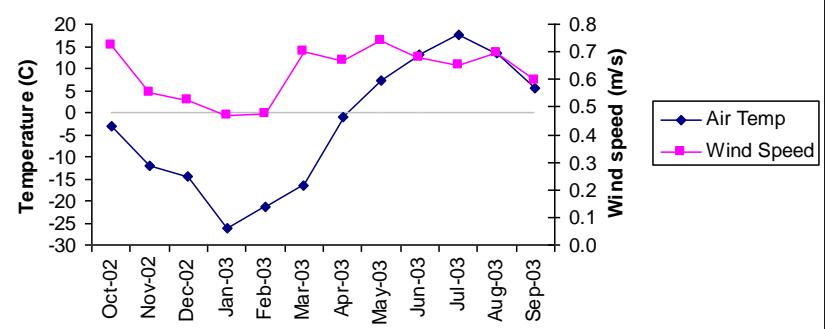


Климатические данные

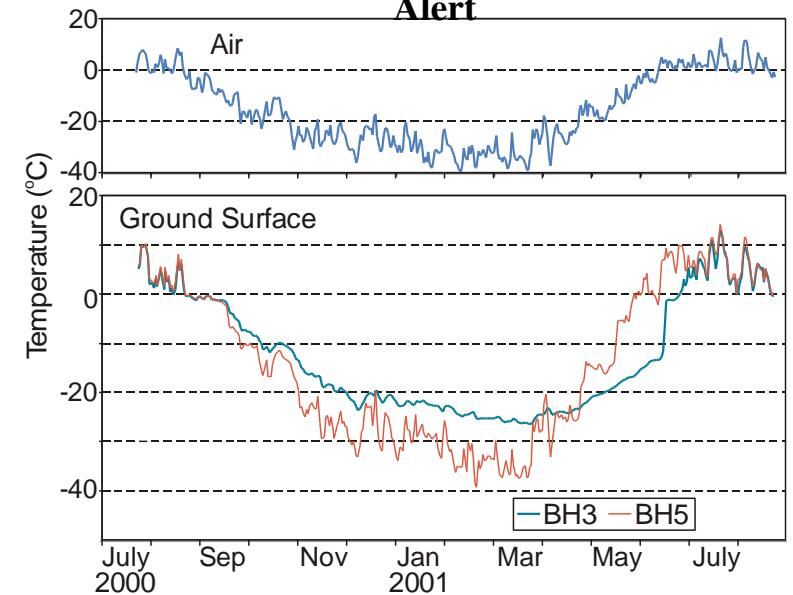
Wrigley daily air temperature and snow depth



Wrigley monthly mean air temperature and wind speed



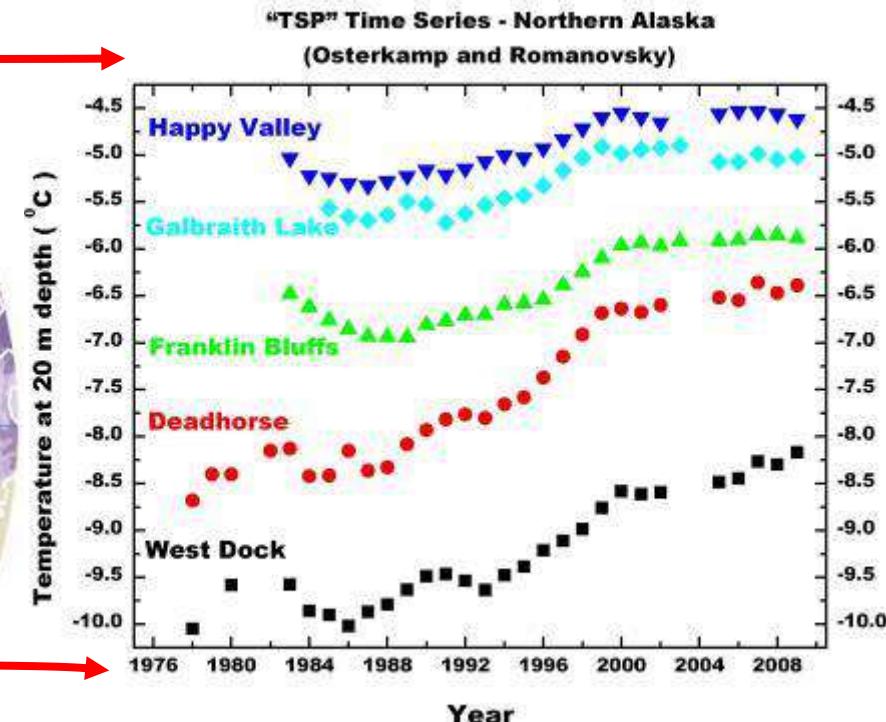
Alert





International Permafrost Association

Observed temperature evolution of Alaska's permafrost



GTN-P
Global Terrestrial Network for
Permafrost

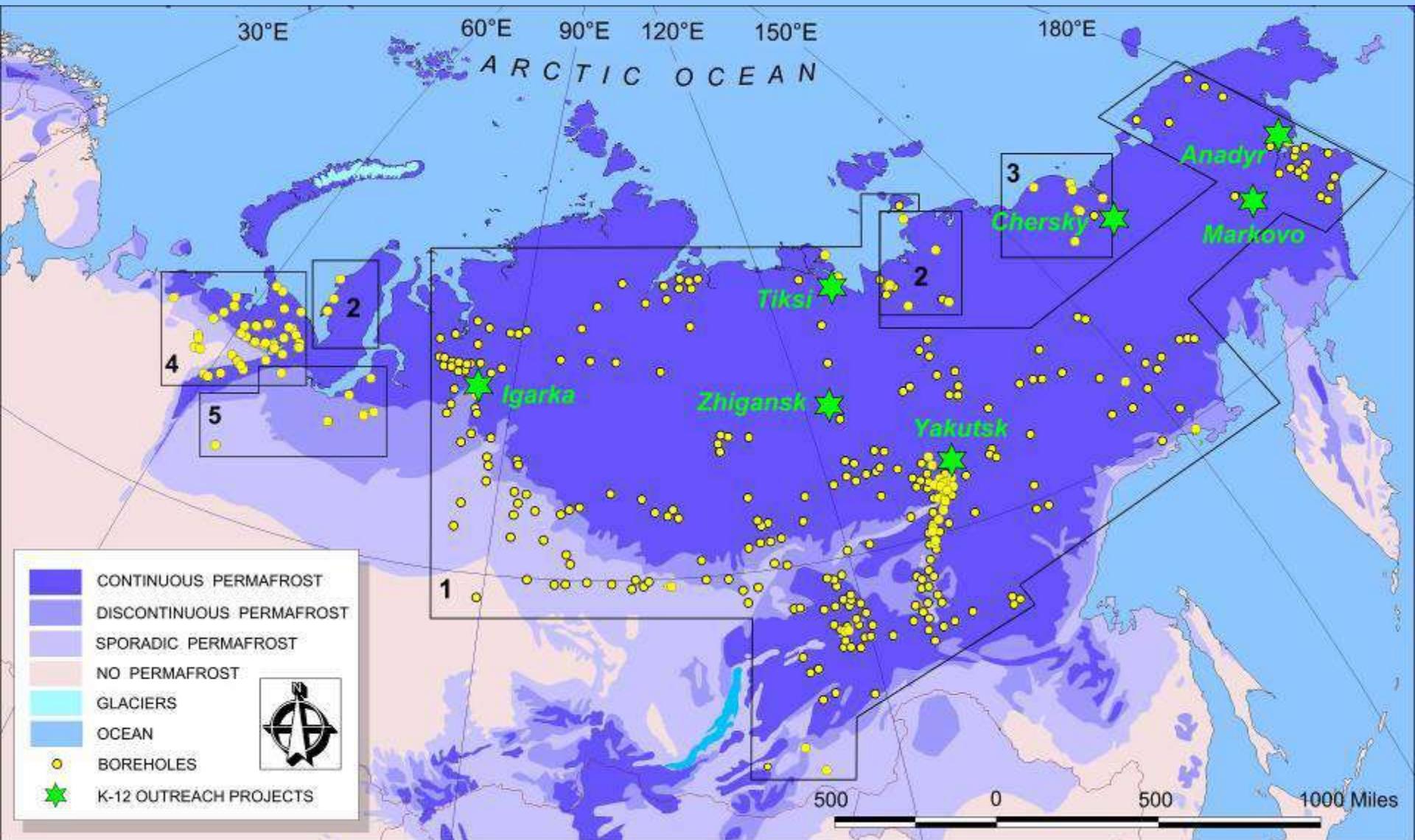


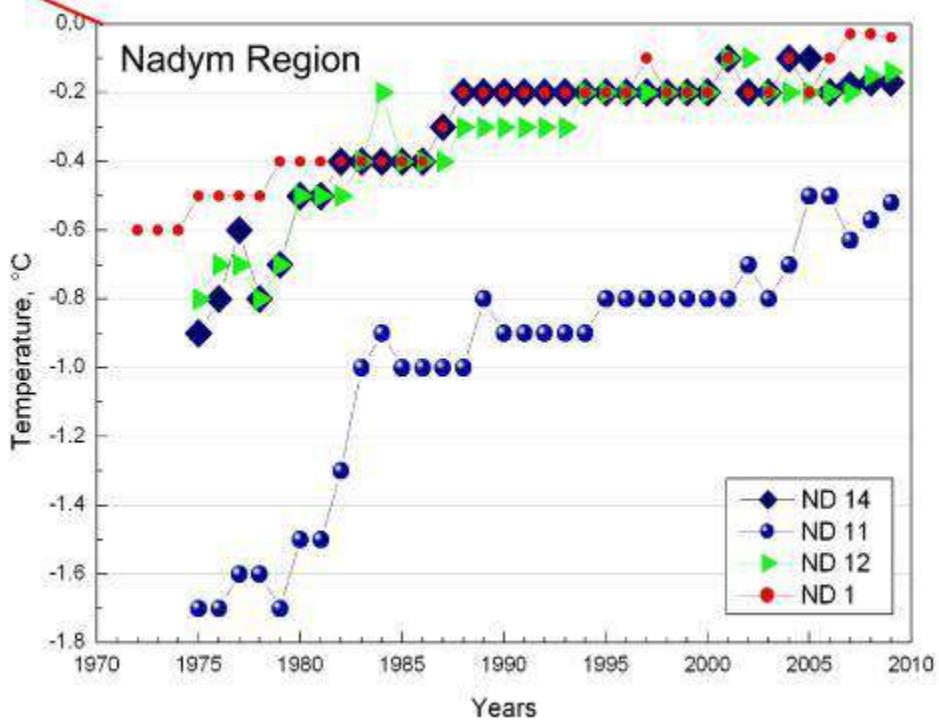
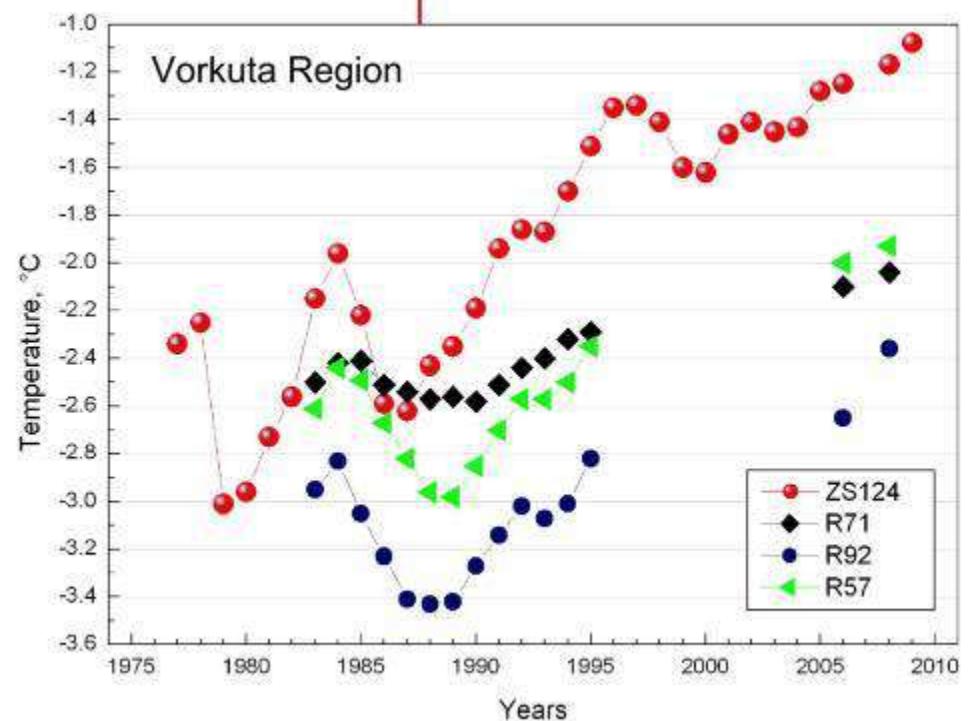
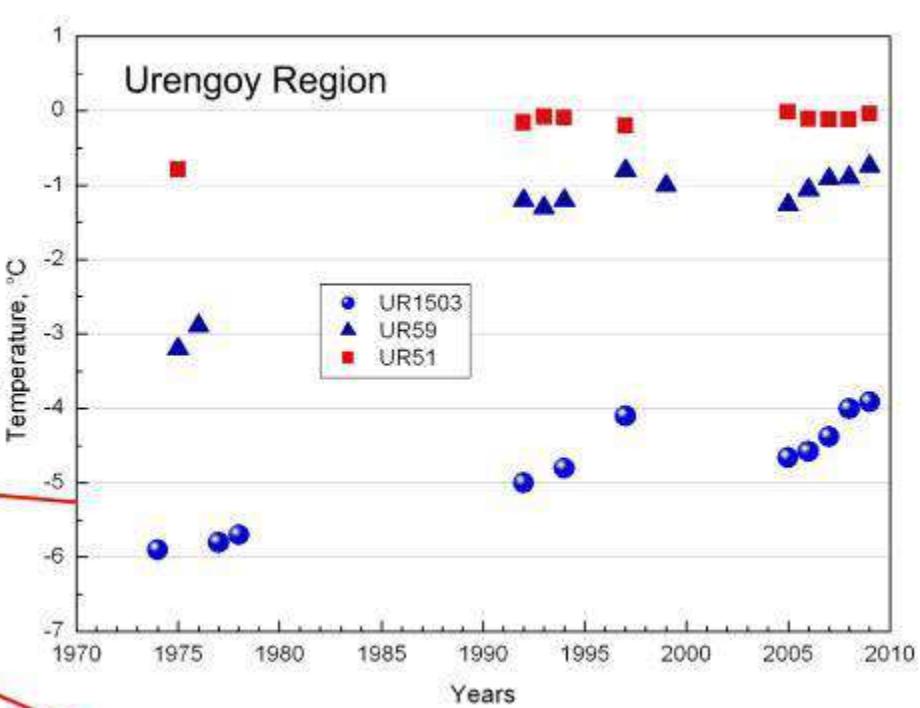
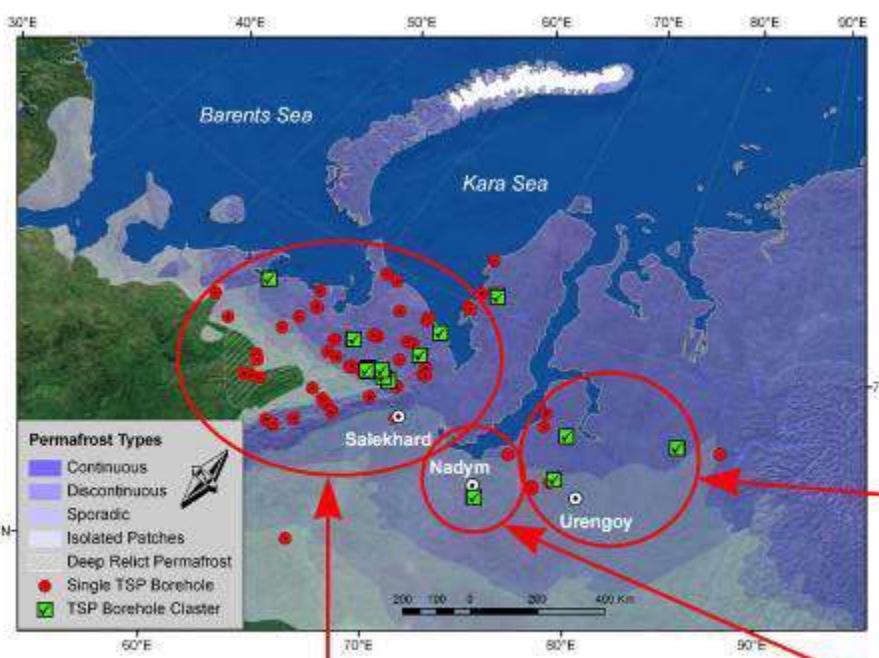
ipa-permafrost.org

Temperatures at 20 m depth

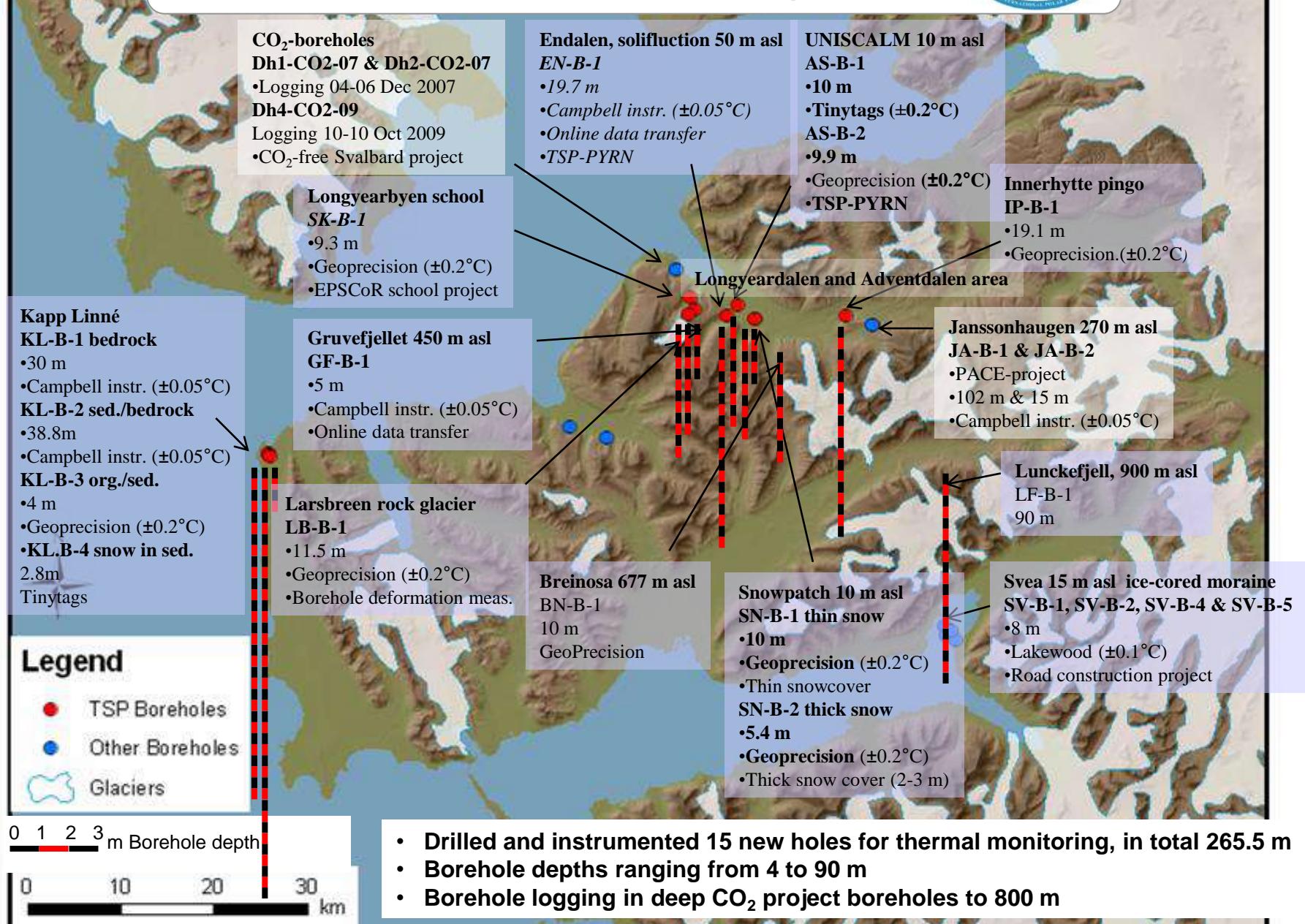


International Permafrost Association





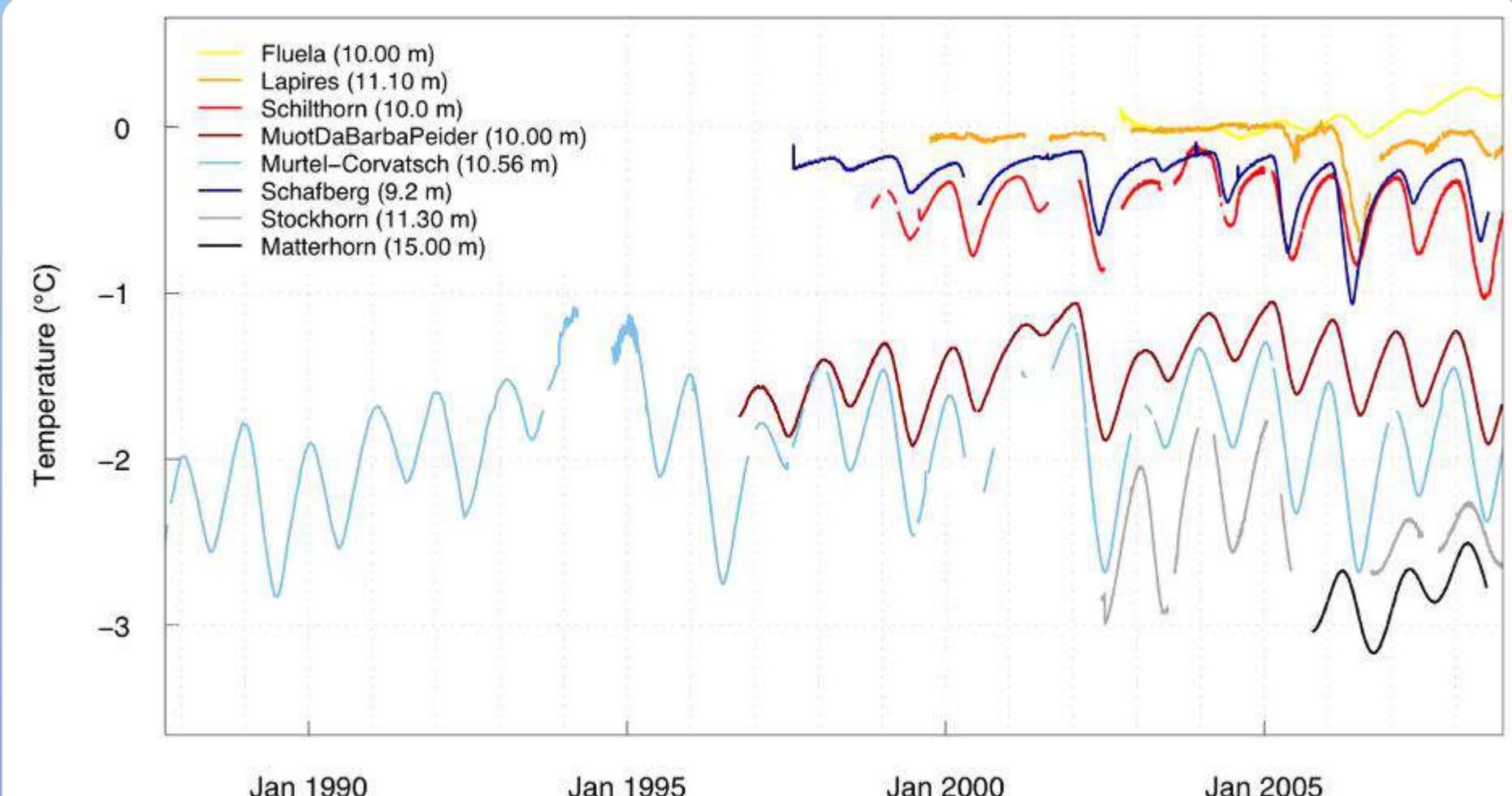
TSP Svalbard: Nordenskiöldsland Permafrost Observatory, Svalbard





International Permafrost Association

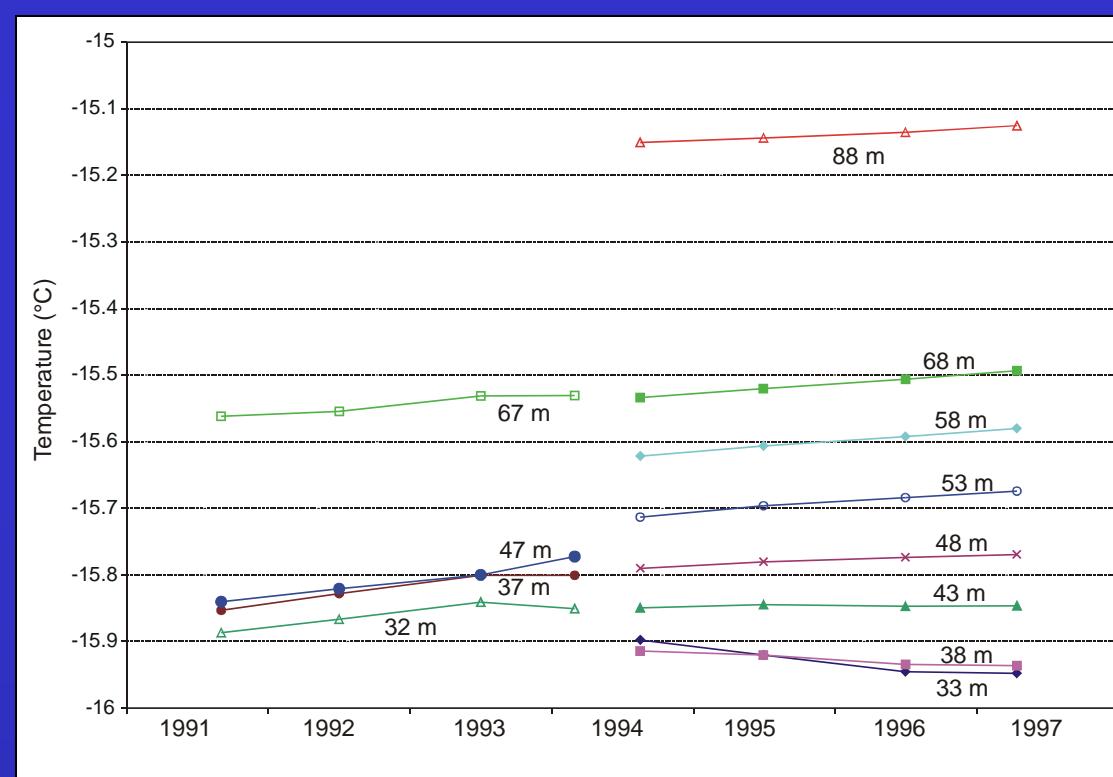
PERMOS Borehole Temperatures



source: permos

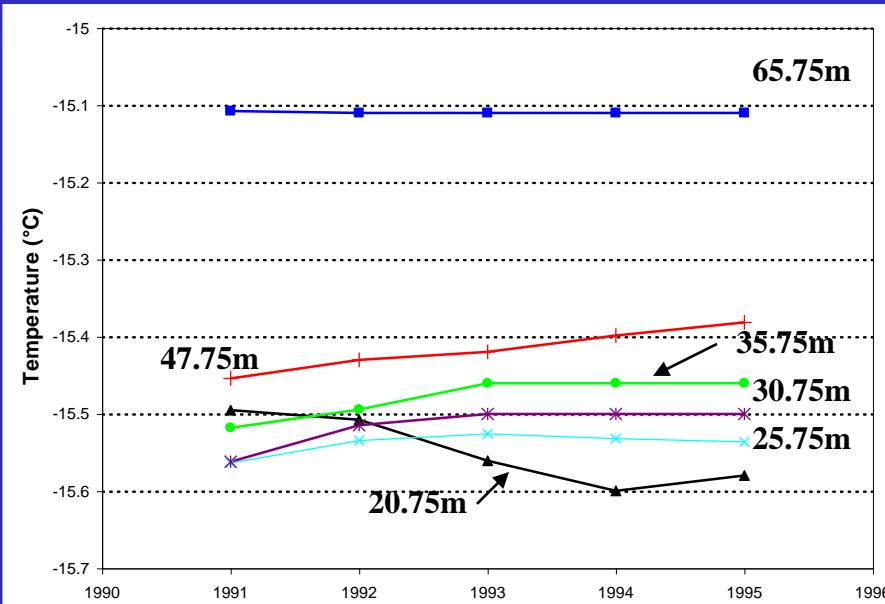
High Arctic Observatories

- High resolution data collection
- Development of ground surface temperature histories through application of mathematical inversion techniques



Mean annual permafrost temperature
from Gemini, near Eureka

Mean annual permafrost temperature
from Pat Bay, Lougheed Island



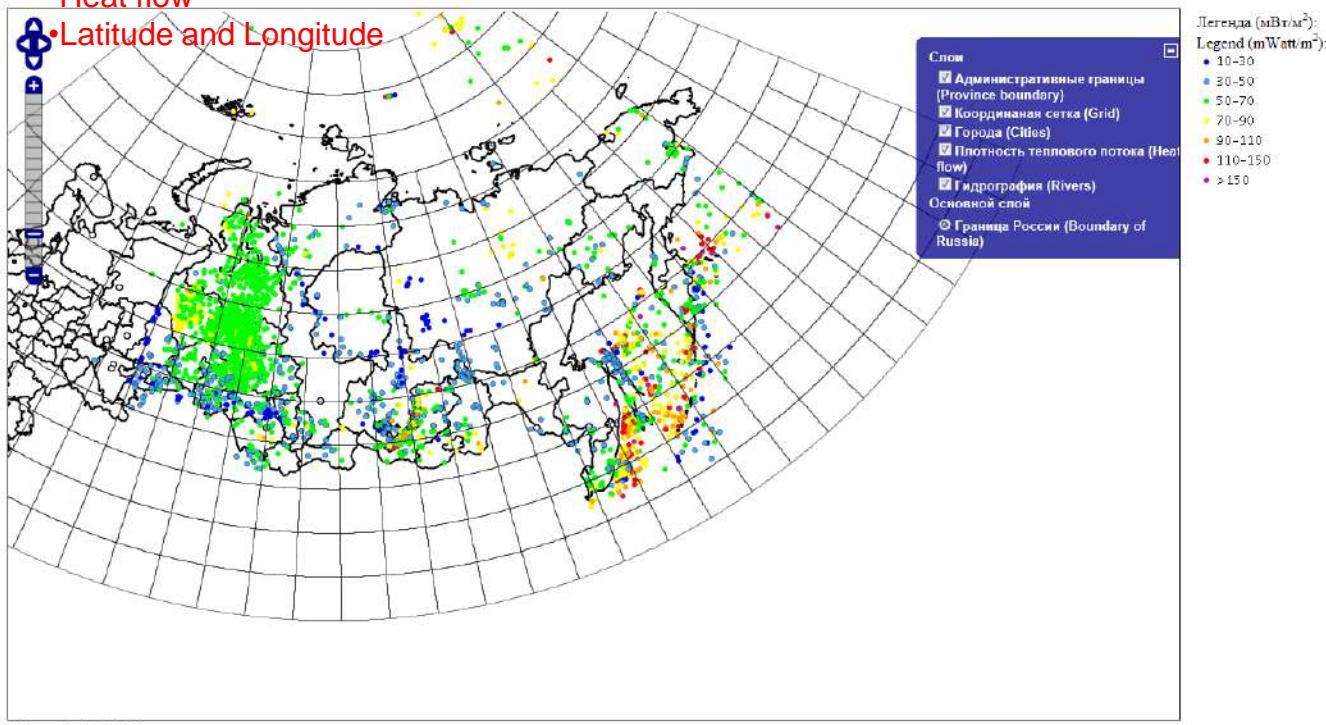


III. ELECTRONIC GEOTHERMAL ATLAS OF SIBERIA AND FAR EAST OF RUSSIA

Ayunov D. E., Duchkov A.D., Dobretsov N.N.
(IPGG BB RAS, IGM SB RAS, Novosibirsk)

• Heat flow

• Latitude and Longitude



Масштаб = 1 : 28M

- Плотность теплового потока(Heat flow): 50 мВт/м²
- Площадь и номер скважины(Site and holes): Бахчайай, 1
- Номер участка(Number): 388.0
- Широта сев.(Latitude): 66.0 дес.град.
- Долгота вост.(Longitude): 123.916667 дес.град.

Номер квадрата(Number of square): q51,52

<http://maps.nrcgit.ru/geoterm/>

SAMOYLOV Research Station (Lena River Delta)

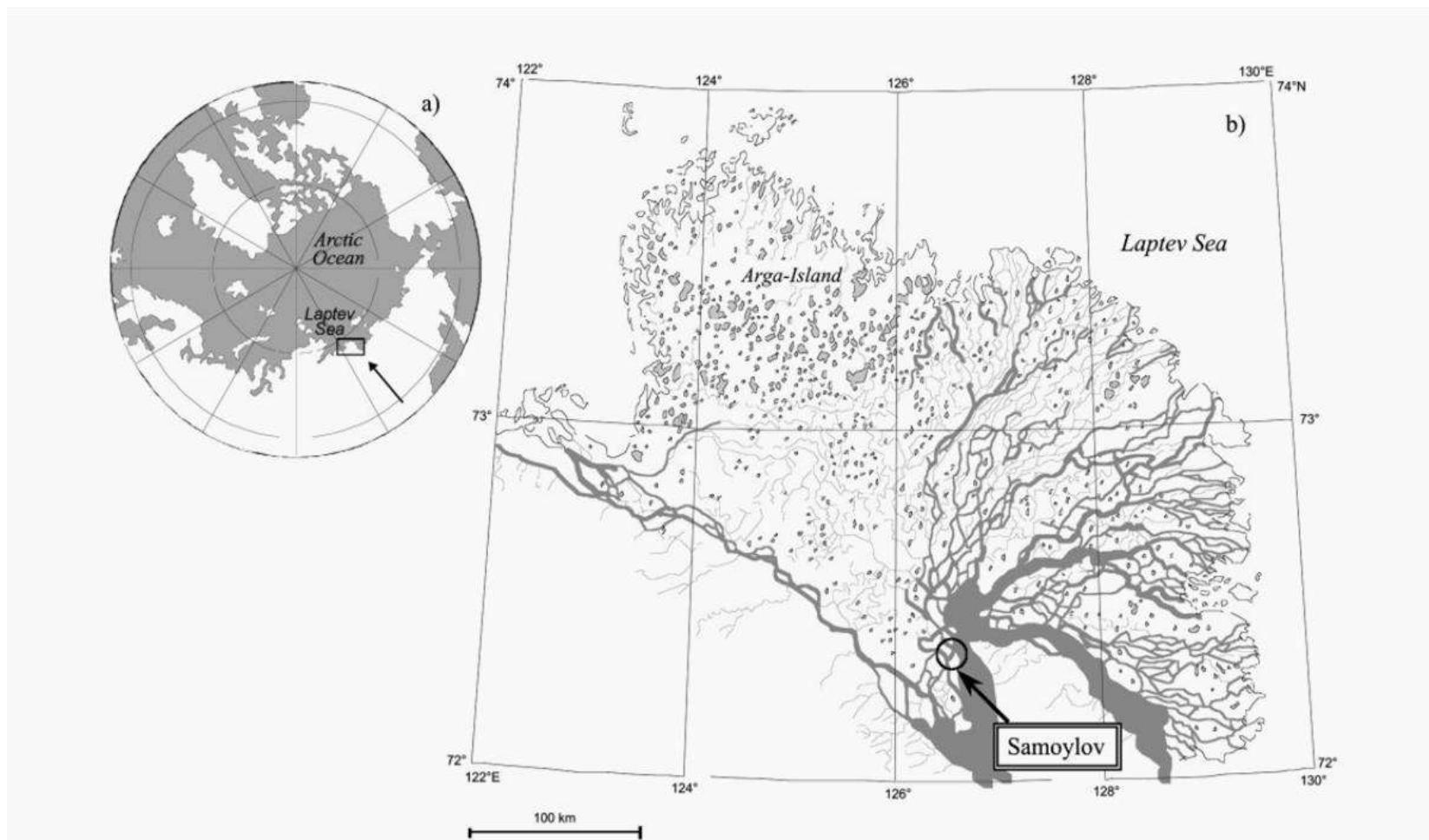


Fig. 1: Position of the Lena Delta region on the coast of the Laptev Sea, Arctic Ocean (a) and location of Samoylov Station on Samoylov Island ($72^{\circ}22'N$, $126^{\circ}28'E$) within the active and central part of the delta (b).

Станция на острове Самойловском в дельте Лены до реконструкции



Fig. 4: Samoylov Station on Samoylov Island (Lena Delta) showing the main building on the left and the new extension on the right side (G. Stoof, AWI).

Abb. 4: Forschungsstation auf der Samoylov-Insel (Lenadelta) mit dem Hauptgebäude auf der linken Seite und dem neuen Anbau auf der rechten Seite (G. Stoof, AWI).

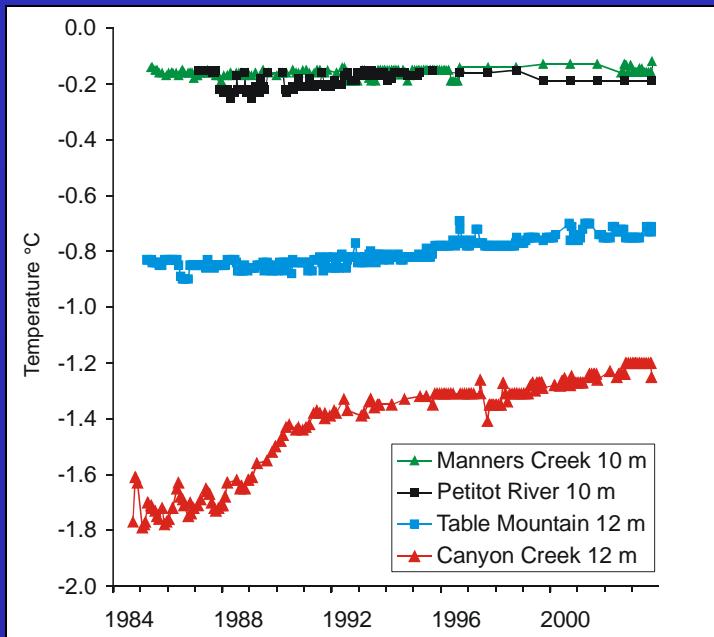
Станция на острове Самойловском в дельте Лены после реконструкции



Резюме

GTN-P provides information that can be used to:

- Document and quantify fluctuation in permafrost conditions
- Improve understanding of cryosphere-climate processes
- Develop and validate permafrost-climate models
 - *Including improved representation of ground thermal regime in climate models*
- Development and validation of remote sensing techniques



Permafrost temperature
trends, Mackenzie Valley,
south of Norman Wells

Permafrost data (Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions)



Permafrost Map Legend

The legend consists of five entries, each with a colored square icon and a label:

- Subsea Permafrost**: Represented by a grey square with a diagonal hatching pattern.
- Relict Permafrost**: Represented by a grey square with horizontal hatching.
- Continuous Permafrost (>90%)**: Represented by a dark blue square.
- Discontinuous Permafrost (50-90%)**: Represented by a teal square.
- Sporadic Permafrost (10-50%)**: Represented by a light grey square.
- Isolated Permafrost (<10%)**: Represented by a light blue square.

Измерение температур в скважинах

Термисторы и логгеры

Интервалы глубин установки термисторов, метры:

СТС (СМС) – с частотой 0,1-0,2 м

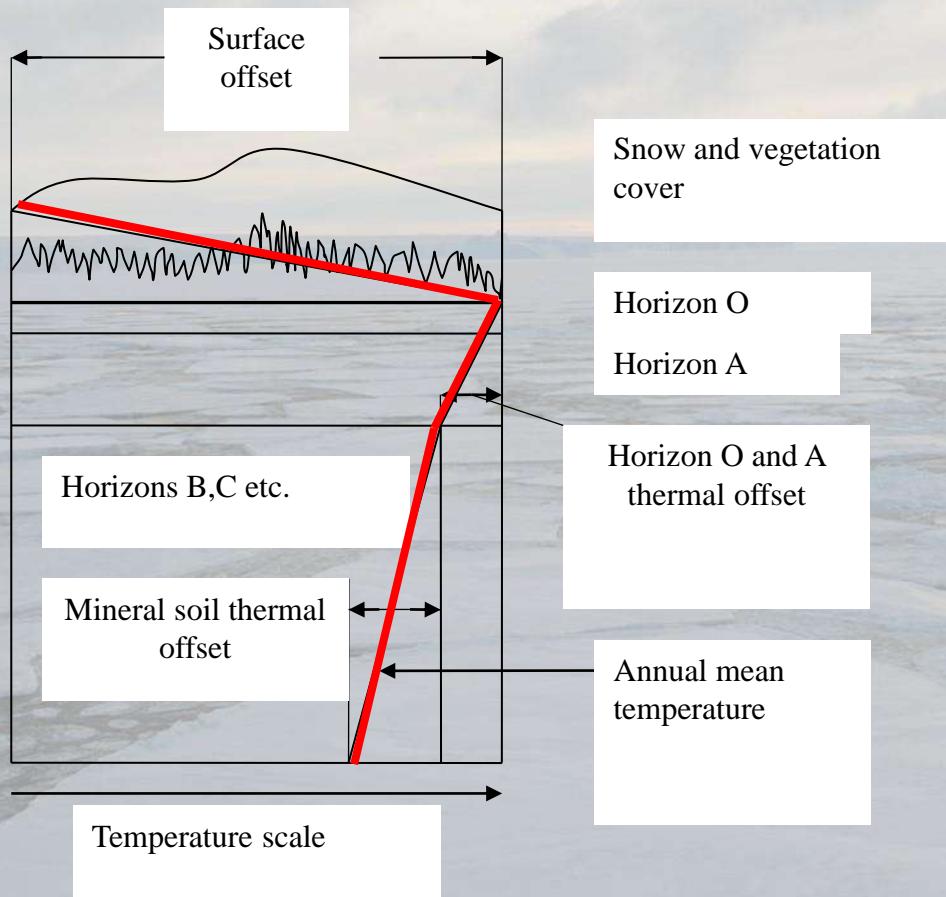
0.5- 5 – с частотой 0,5 м

5-10 – с частотой 1 м

10-25 – с частотой 2,5 м

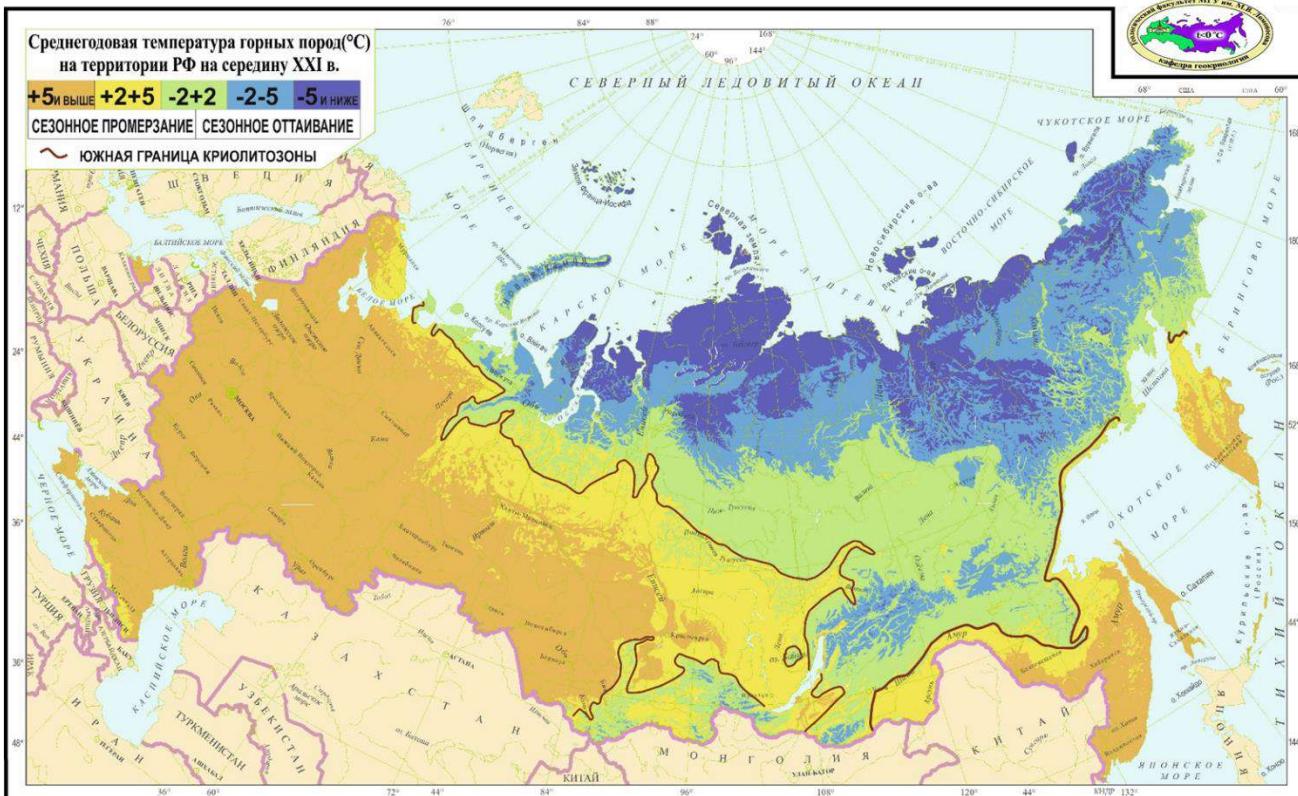
Глубже – 5-10м и более.

Изменения среднегодовой температуры в слое сезонного оттаивания



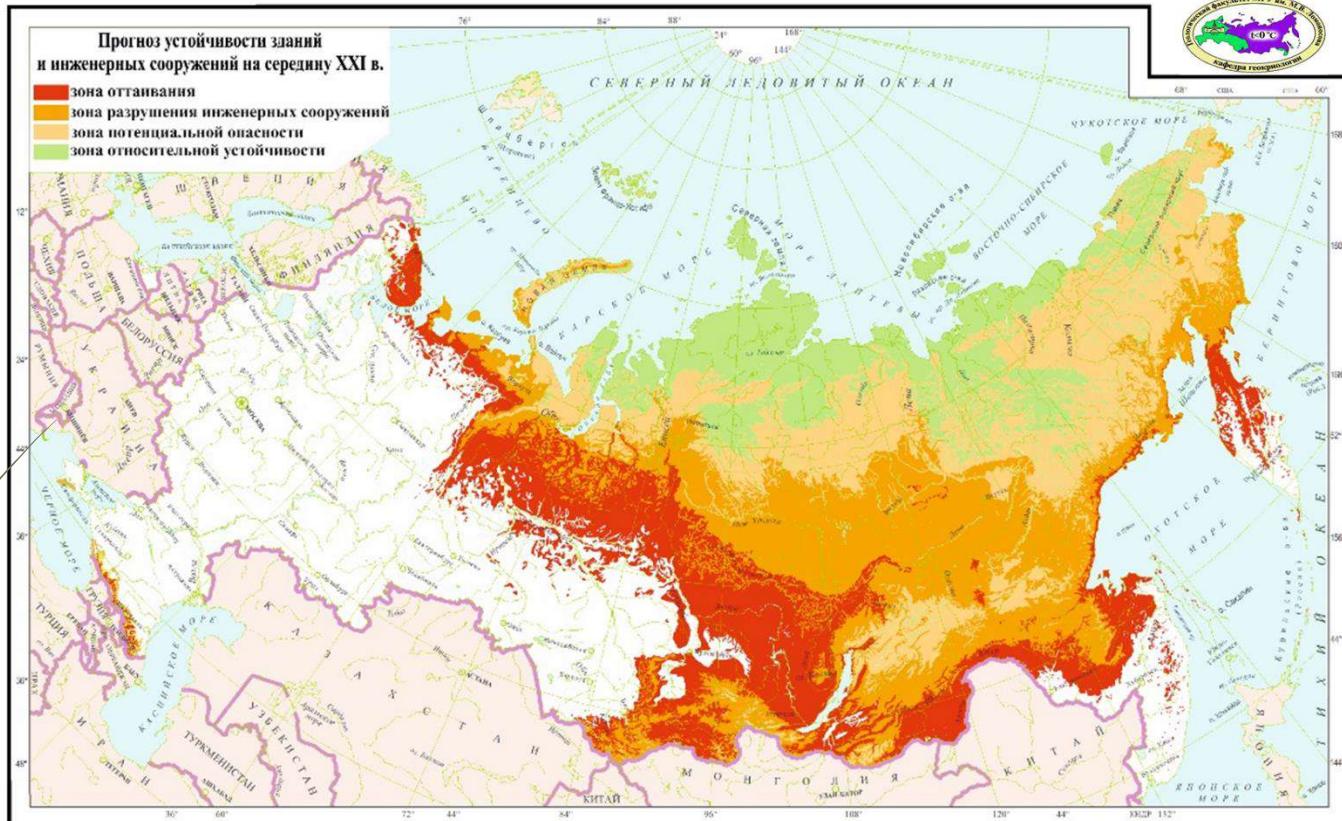
3

Изменение температуры горных пород на территории РФ



Сокращение несущей способности и устойчивости зданий и инженерных сооружений

4



МГРИ



Институт географии
Российской академии наук



ИНП РАН

Российский государственный
геологоразведочный университет
имени Сергея Орлова

Геологоразведочный институт
 Российской Академии Наук

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ПО РАЗВИТИЮ
ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА И АРКТИКИ

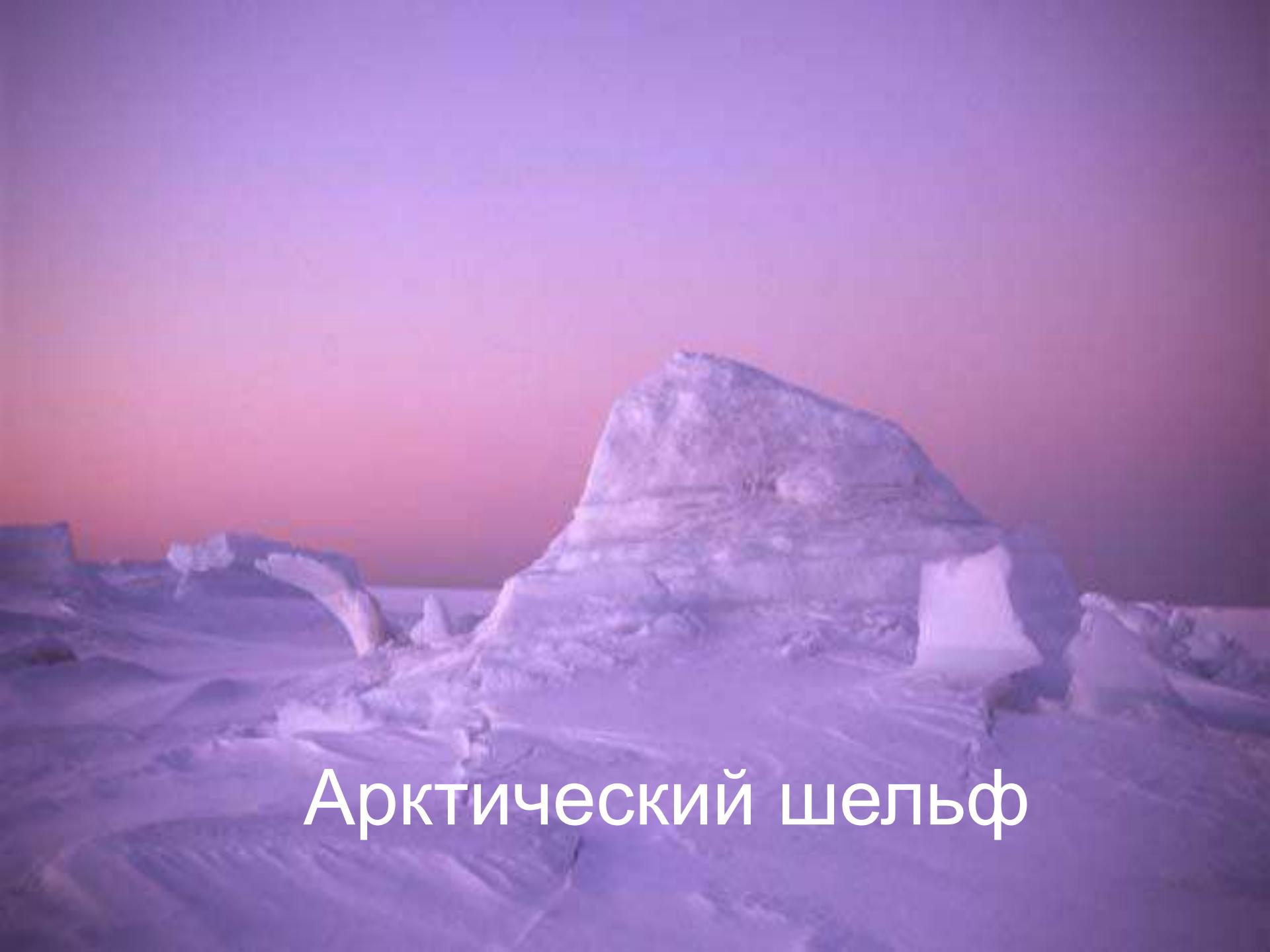
15 Геотехнический мониторинг при строительстве и эксплуатации сооружений на многолетнемерзлых грунтах

15.1 Геотехнический мониторинг (далее 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.

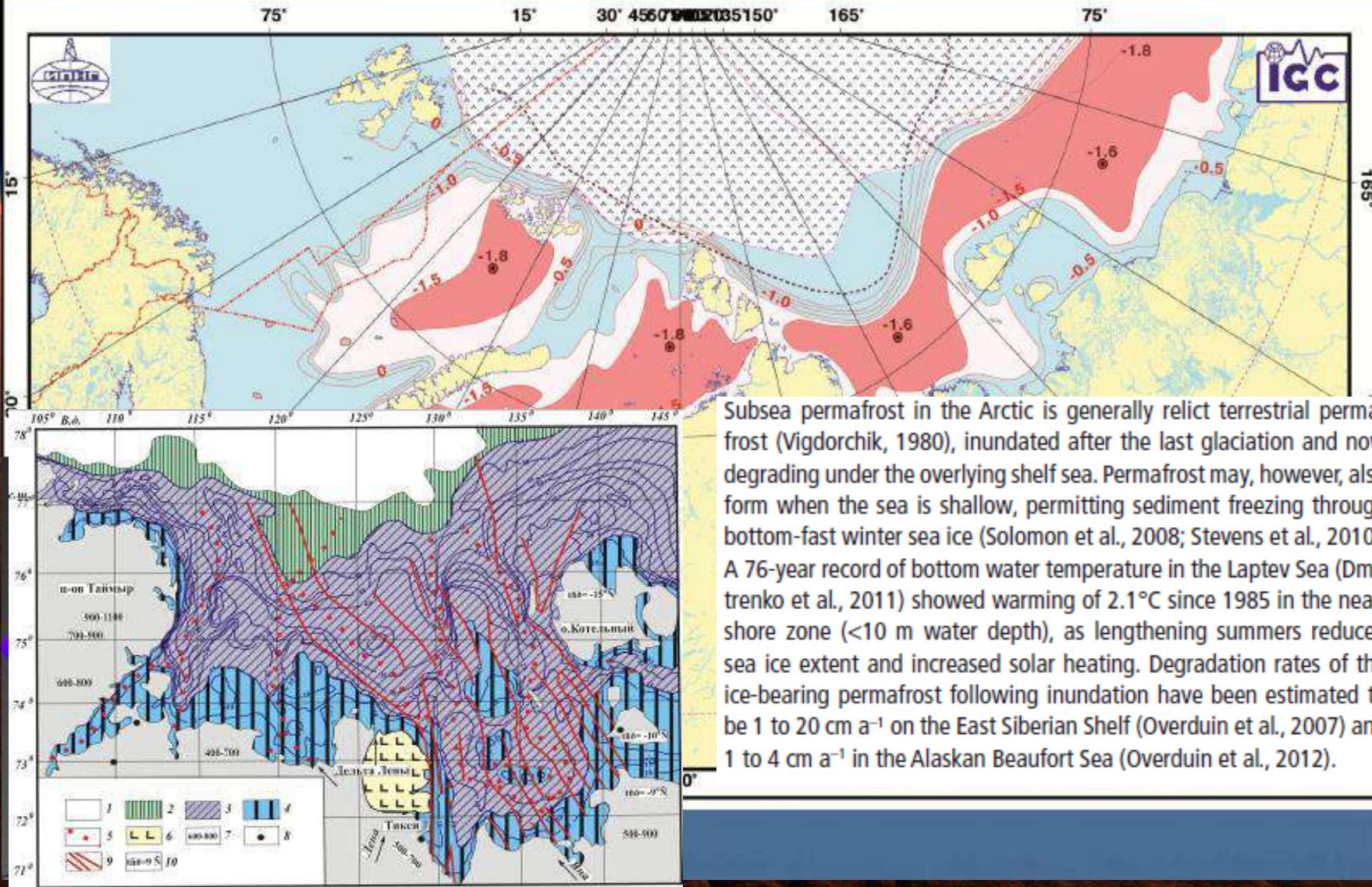
15.2 В районах распространения многолетнемерзлых грунтов мониторинг необходимо проводить для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций.

15.3 Мониторинг осуществляется в соответствии с проектом, который разрабатывается в процессе проектирования.



A photograph of a massive, multi-tiered iceberg. The main structure is a light blue-grey color with darker, textured patches. It has several sharp, angular edges and a complex internal structure visible through its translucent layers. In the background, another smaller iceberg is partially visible. The sky above is a deep, reddish-pink hue, suggesting either a sunset or sunrise. The overall scene conveys a sense of the scale and beauty of Arctic icebergs.

Арктический шельф

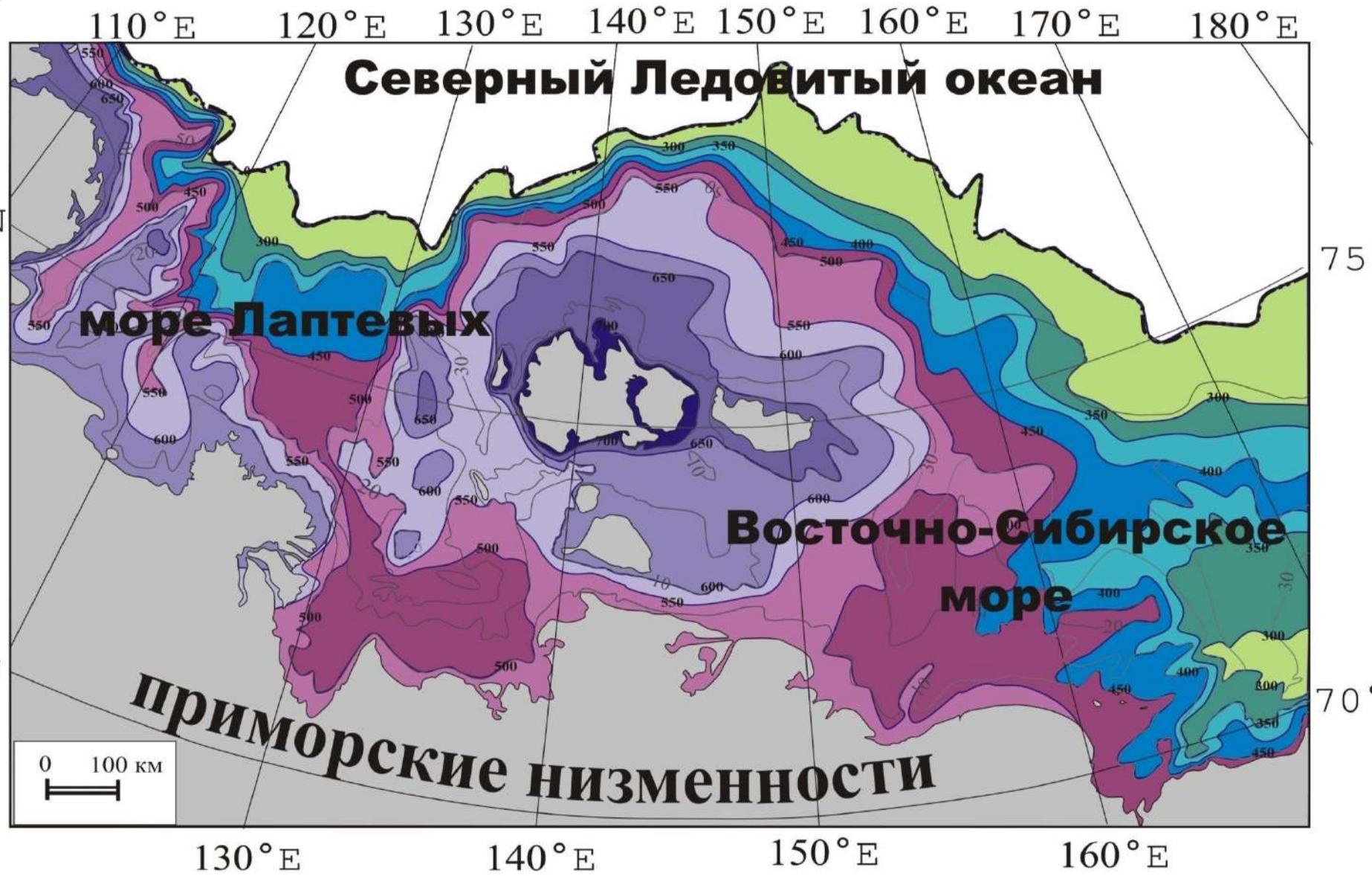




Схематическая карта мощности мерзлых толщ

(вариант при величине теплового потока 50 мВт/м²)

МГУ



600

Мощность мерзлых толщ, м

Более 700 650 600 550 500 450 400 350 300 Метр

The background of the slide features a close-up photograph of a large, light-colored rock or ice formation with a rough, crystalline texture. The lighting is dramatic, with a bright, warm glow from behind the rock, creating a strong silhouette and casting deep shadows. The sky in the background is a rich, reddish-orange color, suggesting either a sunrise or sunset. The overall mood is mysterious and geological.

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 вечномерзлых грунтах (СНиП 2.02.04-88)
- СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

1	Предпроектные стадии: информационное сопровождение инженерных изысканий (инженерно-геологических, инженерно-экологических) и проектирование на основе составления альбомов тематические карты	1 этап – опережающий отчет по фондовым материалам. 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, физико-механических и теплофизических свойств грунтов: талых, мерзлых, охлажденных и оттаивающих грунтов
4	Пространственно-временной прогноз инженерно-геокриологических условий и теплотехнические расчеты В зависимости от стадии изысканий	<ul style="list-style-type: none">• С учетом изменения климата (потепление, похолодание, изменение снежного покрова и т.п.)• При нарушении естественных покровов на поверхности пород (снятие растительного покрова, насыпи, выемки и т.п.)• Взаимодействие инженерных объектов с мерзлыми породами Изменение температурного режима грунтов, формирование ореолов оттаивания, осадка и пучение грунтов и т.п.

СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» (Приказ Минстроя России от 30 декабря 2016 г. № 1033/пр)

4.33 Инженерные изыскания для подготовки проектной документации объектов капитального строительства при достаточности материалов и данных о природных условиях территории предполагаемого строительства и факторах техногенного воздействия на окружающую среду, заданном местоположении зданий и сооружений (в том числе на застроенной территории), типах и глубинах фундаментов, **могут выполняться в один этап** и обеспечивать получение необходимых материалов в соответствии с [4.32](#).

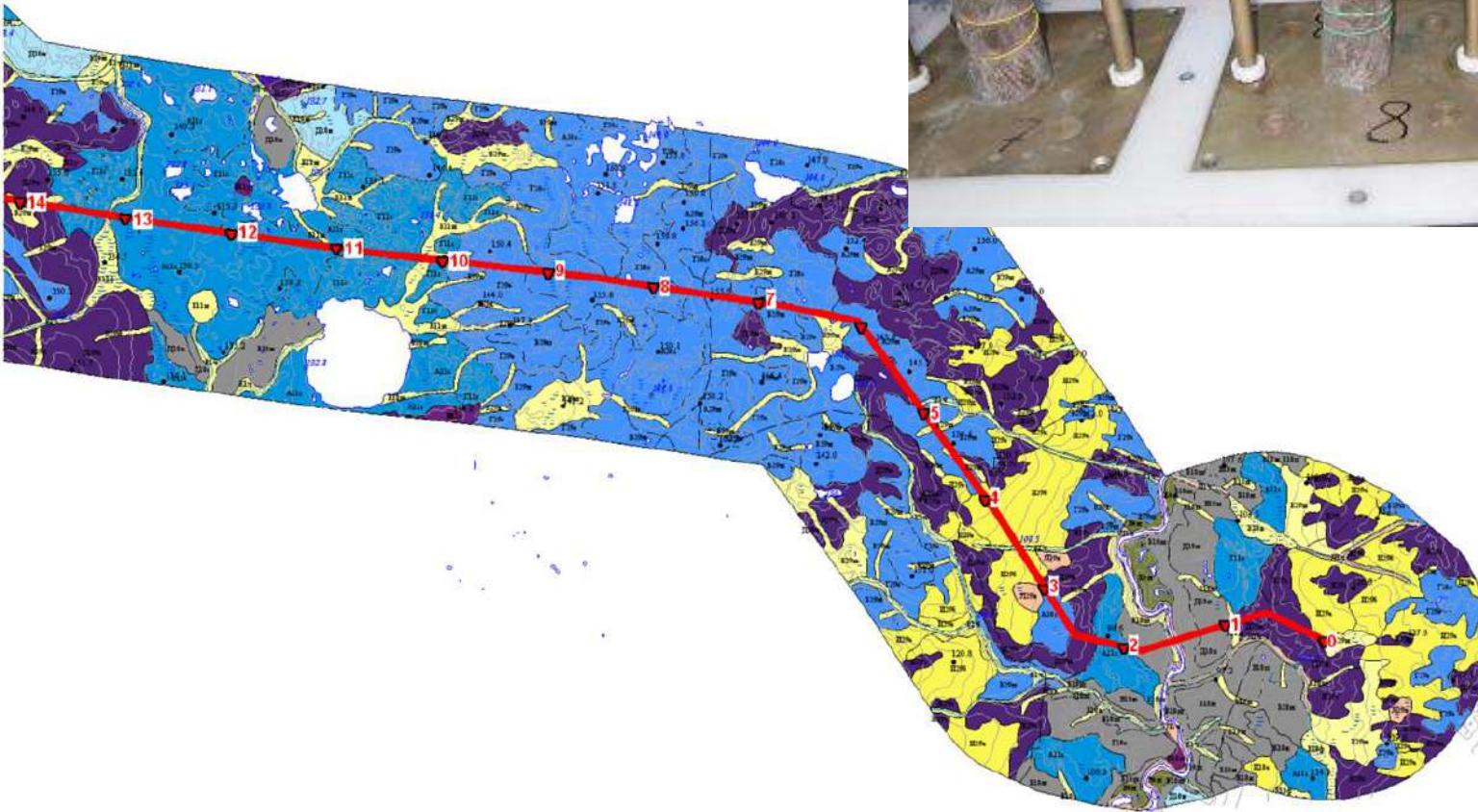


6.3.3.1 При инженерно-геологических изысканиях в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) следует устанавливать и дополнительно к 6.3.1.5 отражать в техническом отчете:

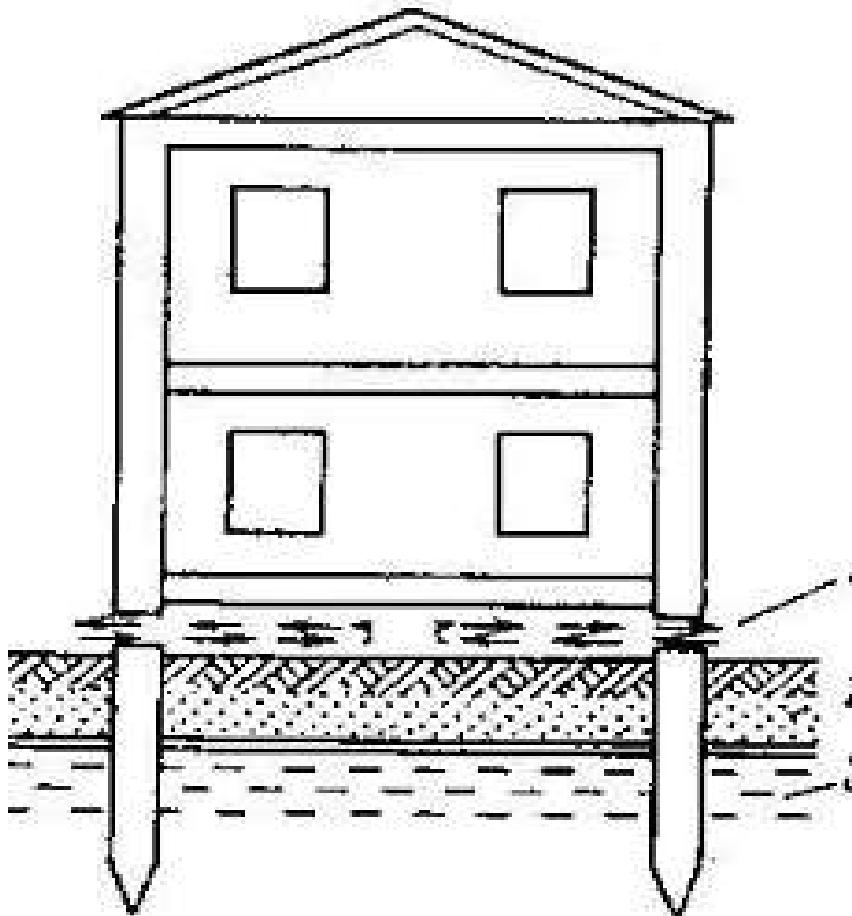
- характер распространения, особенности формирования, условия залегания, мощность ММГ, криогенную текстуру ММГ с указанием количественных характеристик (толщины шлиров и расстояния между ними);
- разновидности грунтов по льдистости, засоленности и типу засоления, пучинистости;
- наличие подземного льда 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 (сезонномерзлых и сезонноталых);**
- наличие, границы распространения, условия формирования и интенсивность развития криогенных процессов и образований (пучинистость грунтов в слое сезонного промерзания/оттаивания, морозное пучение грунтов, термоэррозия, термоабразия, солифлюкция, термокарст, наледеобразование, курумообразование, морозобойное растрескивание); количественную характеристику степени пораженности территории этими процессами и образованиями;
- состав, состояние, криогенное строение и свойства грунтов сезонноталого и сезонномерзлого 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 в 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.

Карта районирования по величине расчетных давлений R под нижним концом сваи
(для свай, заглубленных на 10м)



Хозяйственная деятельность в криолитозоне



- Дома стоят на бетонных сваях, забитых в многолетнемерзлые породы, ниже деятельного слоя:
 - 1 - отверстия для циркуляции воздуха,
 - 2 – слой сезонного протаивания,
 - 3 – многолетнемерзлые породы

6.3 Устройство оснований и фундаментов при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I

6.3.1 При использовании многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований сооружений по принципу I для сохранения мерзлого состояния грунтов основания и обеспечения их расчетного теплового режима в проектах оснований и фундаментов необходимо предусматривать: **устройство вентилируемых подполий или холодных первых этажей зданий** (6.3.2), укладку в основании сооружения вентилируемых труб, каналов или применение вентилируемых фундаментов (6.3.3), **установку сезоннодействующих охлаждающих устройств жидкостного или парожидкостного типов - СОУ** (6.3.4), а также осуществление других мероприятий (**теплозащитные экраны** и др.) по устраниению или уменьшению теплового воздействия сооружения на мерзлые грунты основания.

Выбор одного или сочетания нескольких мероприятий должен производиться **на основании расчетов: прогнозного** (на весь период эксплуатации) теплотехнического, устойчивости и несущей способности с учетом конструктивных и технологических особенностей сооружения, опыта местного строительства и экономической целесообразности.

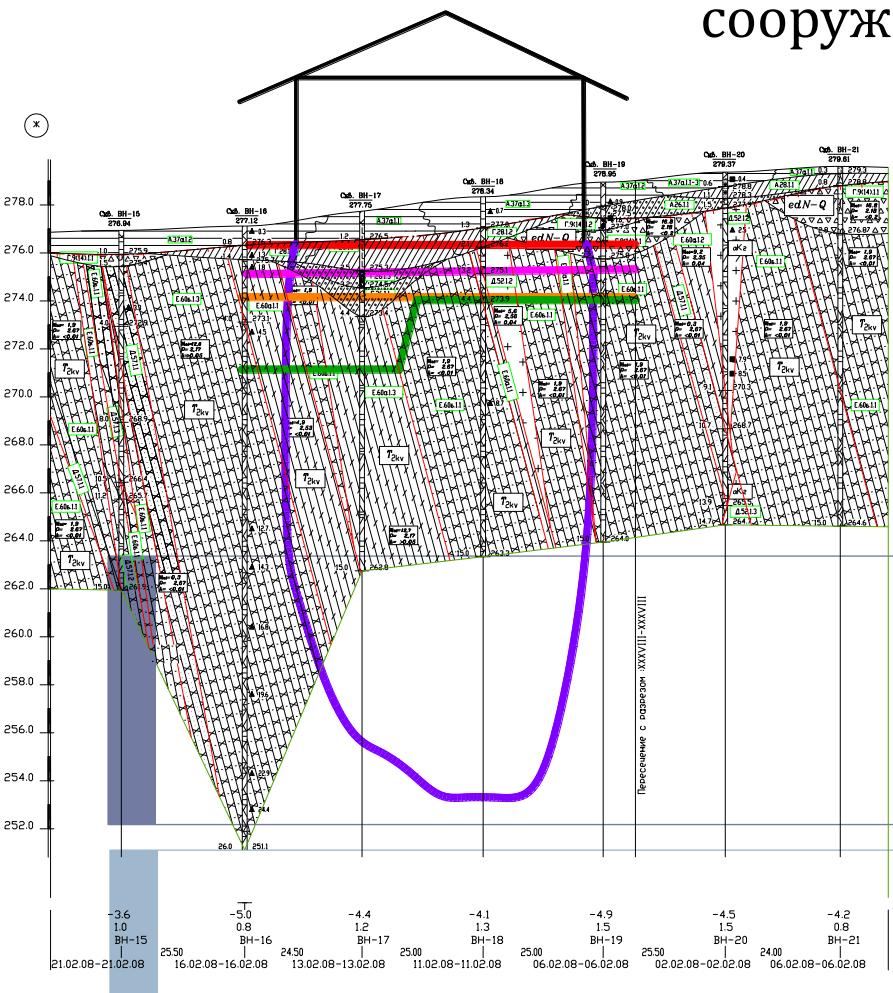


6.4 Устройство оснований и фундаментов при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу II

6.4.1 При проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых с использованием многолетнемерзлых грунтов **по принципу II**, следует предусматривать мероприятия по уменьшению деформаций основания (6.4.2) или мероприятия по приспособлению конструкций сооружения к восприятию неравномерных деформаций основания (6.4.5), назначаемые по результатам расчета основания по деформациям.

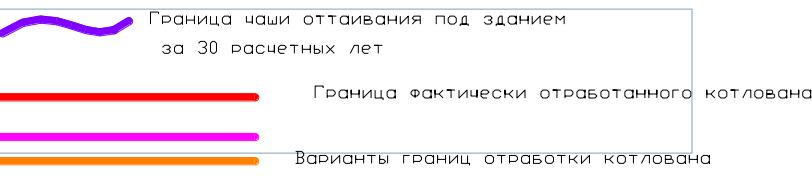
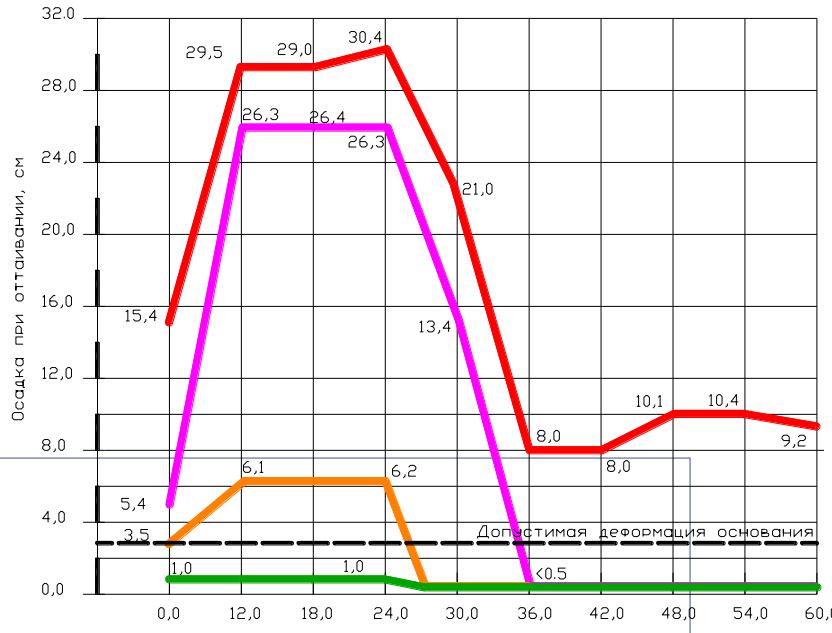


Расчет величин осадки при оттаивании по результатам прогноза формирования чаши оттаивания под сооружением по данным испытаний



Чаша оттаивания под зданием обогатительной фабрики на 30-й год эксплуатации по центральному профилю, проходящему по линии 8 строительной сетки

Результаты расчета величины осадки при оттаивании под зданием за 30 расчетных лет



7 Расчет оснований и фундаментов

7.1 Общие указания

7.1.1 При проектировании оснований и фундаментов сооружений, возводимых на многолетнемерзлых грунтах, следует выполнять теплотехнические расчеты основания и расчеты основания и фундаментов на силовые воздействия. В расчетах основания и фундаментов надлежит учитывать принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания, тепловое и механическое взаимодействие сооружения и основания.

7.1.2 Основания и фундаменты следует рассчитывать по двум группам предельных состояний: по первой - по несущей способности, по второй - по деформациям (осадкам, прогибам и пр.), затрудняющим нормальную эксплуатацию конструкций сооружения, а элементы железобетонных конструкций - и по трещиностойкости.

7.1.3 Расчет оснований следует производить:

а) при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I: по несущей способности - для твердомерзлых грунтов; **по несущей способности и деформациям - для пластично-мерзлых и сильнольдистых грунтов, а также подземных льдов;**

б) при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу II: по несущей способности - в случаях, предусмотренных [СП 22.13330](#); по деформациям - во всех случаях, при этом для оснований, оттаивающих в процессе эксплуатации сооружения, расчет по деформациям надлежит производить из условия совместной работы основания и сооружения.



Осадки оснований фундаментов, возводимых на пластично-мерзлых грунтах, следует определять:

- а) для ленточных и столбчатых фундаментов - в соответствии с указаниями [СП 22.13330](#), применяя расчетную схему в виде линейно-деформируемого полупространства или линейно-деформируемого слоя конечной толщины;
- б) **для одиночных свайных фундаментов - по данным полевых испытаний свай статической вдавливающей нагрузкой**, а для кустов или групп свай - согласно указаниям [СП 24.13330](#) с использованием расчетных схем, основанных на модели грунта как линейно-деформируемой среды.



Натурные испытания свай



Лабораторные испытания мерзлых грунтов



Крупнообломочные и полускальные мерзлые грунты



GOT 33
9.33 - 9.47



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, всплытием трубопроводов и термоэррозией (термоабразией), 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°C , а также буровыми скважинами.
- Происходящее изменение климата и природной среды под влиянием техногенной деятельности человека и вследствие естественных причин



Аэрофотоснимок. Курум на пологом склоне



Аэрофотоснимок. Нарушение естественного стока (подтопление)



Аэрофотоснимок. Курумы на пологом склоне



Аэрофотоснимок. Наледь в долине реки



Аэрофотоснимок. Термоэрозионные промоины на пологом склоне

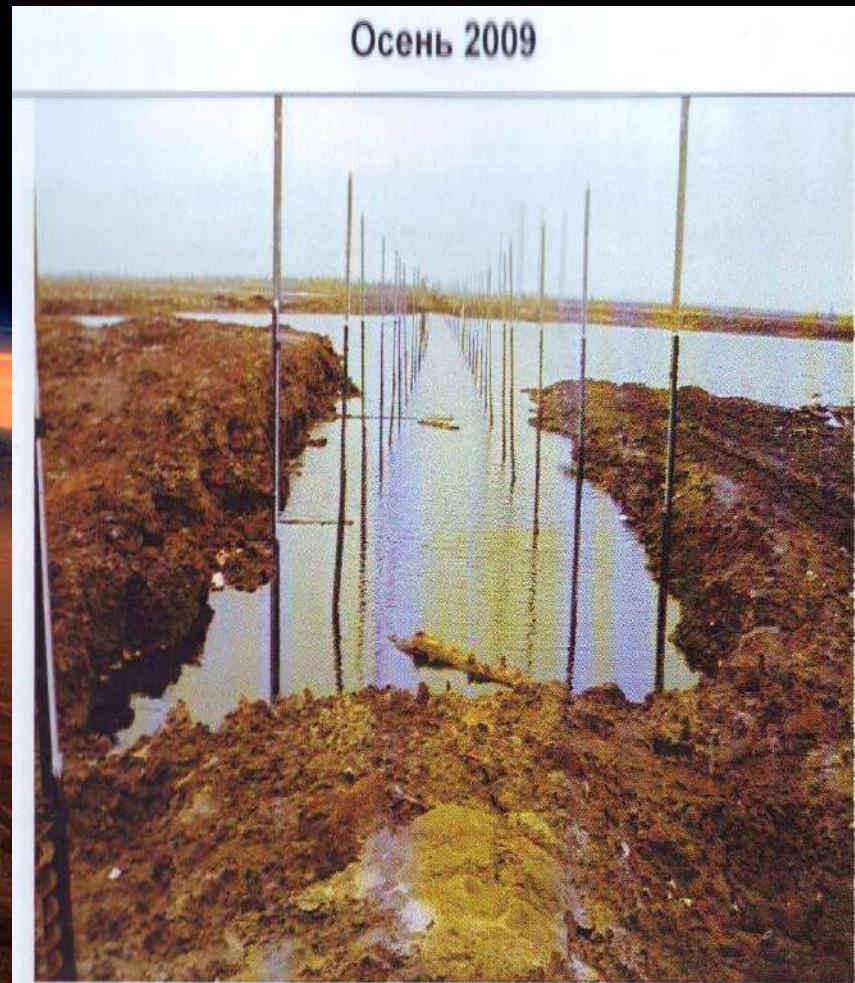
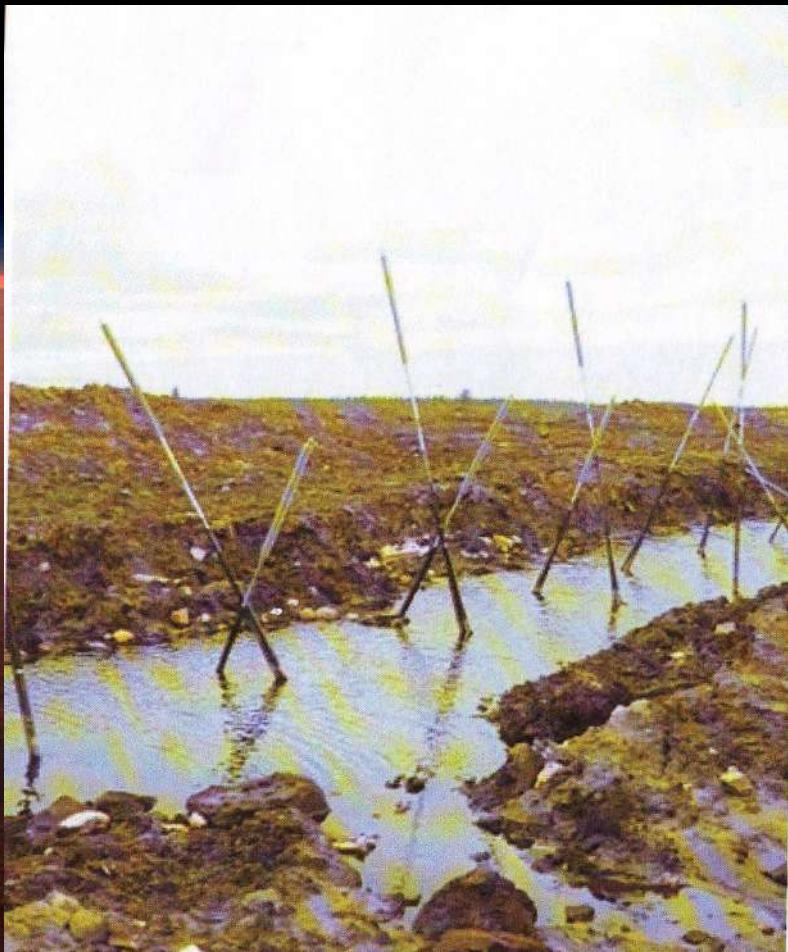




Деформации магистральных трубопроводов диаметром 1420 мм вследствие оттаивания и потери несущей способности грунтов основания на участке КС Ямбургская – КС Ныдинская.

Формирование термокарстовых озер.

388 км нефтепровода «Ванкорское месторождение – НПС «Пурпे»



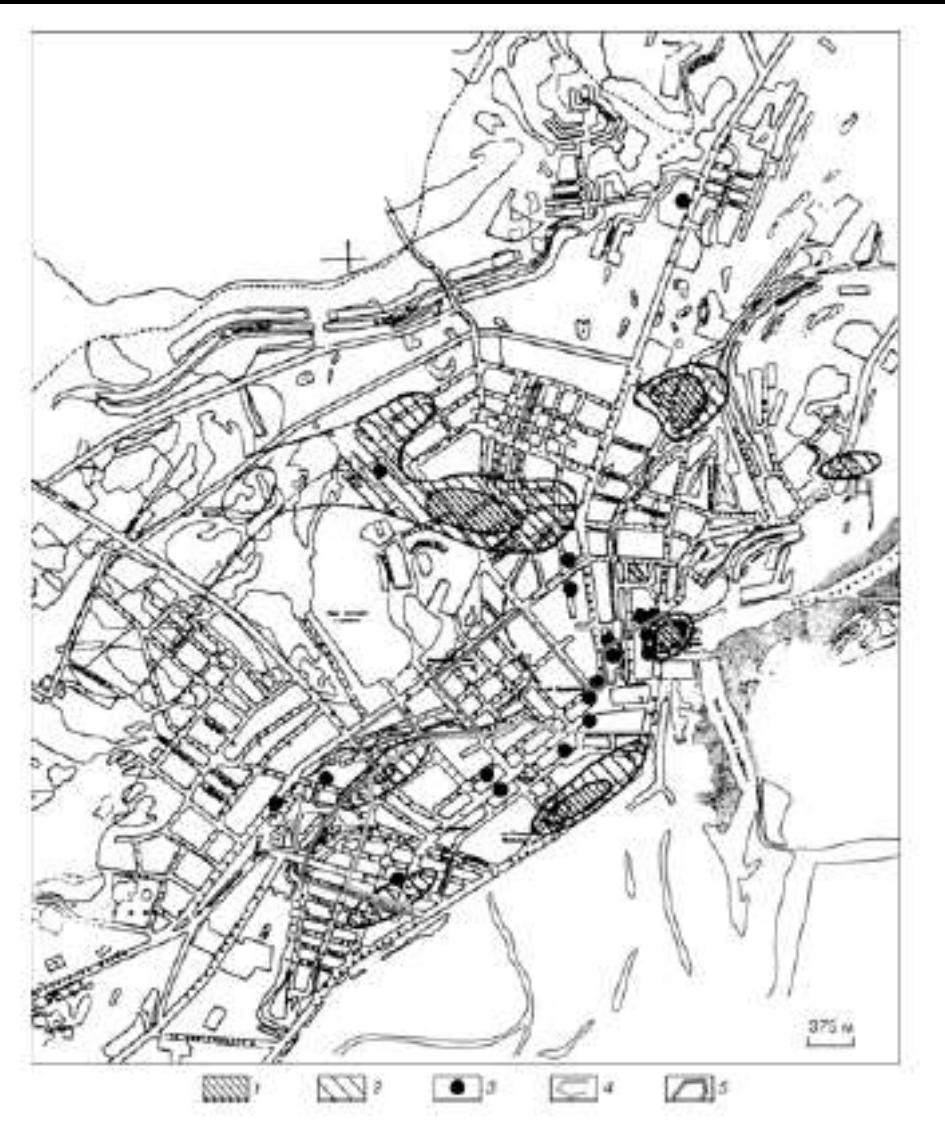
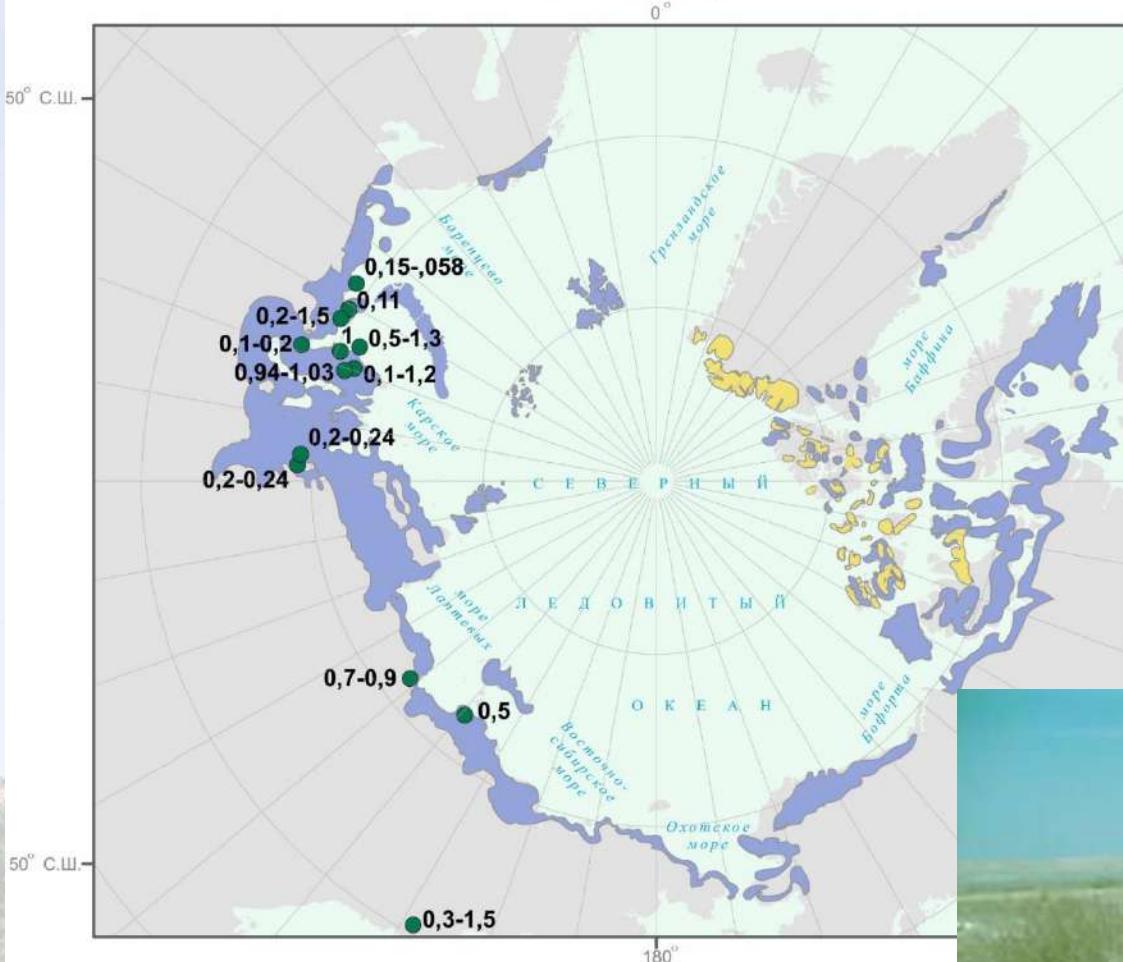


Рис. 11. Карта современной застройки Якутска на 2003 г. с нанесенными областями распространения засоленных грунтов (1,2), зданиями, находящимися в аварийном состоянии (3), и границами исторической городской застройки 1821г. (4) и 1908 г. (5) (Алексеева и др., 2007).



МЕРЗЛЫЕ ЗАСОЛЕННЫЕ ПОРОДЫ

Схема распространения мерзлых засоленных пород
в Северном полушарии



Город	Здания в опасном состоянии
Норильск	10%
Тикси	22%
Дудинка	55%
Диксон	35%
Певек, Амдерма	50%
Чита	60%
Воркута	80%

(Анисимов и Белолуцкая, 2002)



Якутск, июль 2006 г.



ΔT_s	Уменьшение несущей способности фундаментов, %	
	домов	Опор трубопроводов
0.5	5	10
1.0	15	20
1.5	20	30
2.0	50	60

(Хрусталев, 2005)



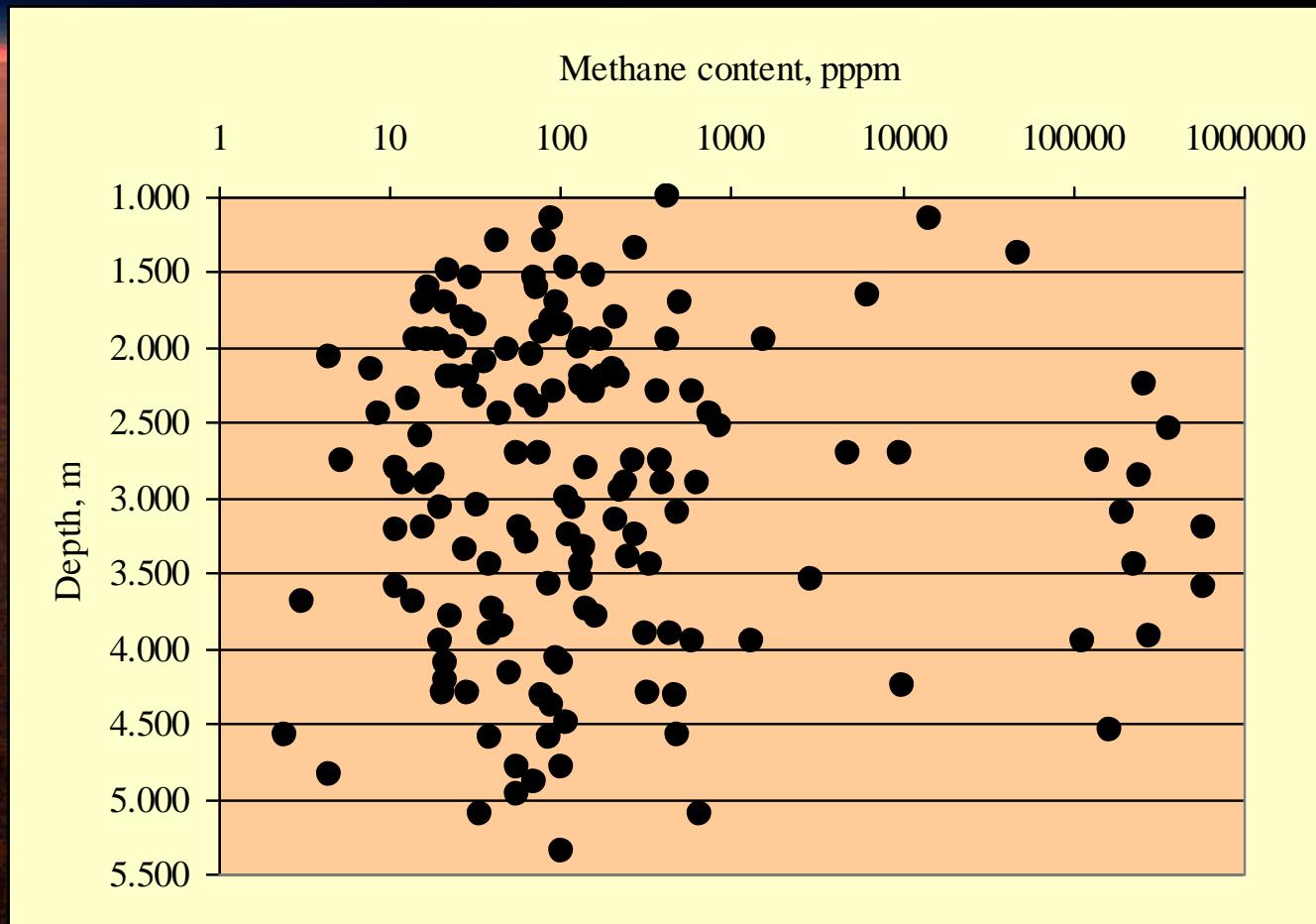
Фрагмент застройки 202 микрорайона на намытом массиве (Якутск)

A photograph of a large, light-colored rock formation, possibly sandstone or limestone, with prominent horizontal sedimentary layers and vertical weathering streaks. The rock is set against a dramatic, reddish-pink sky, suggesting either a sunrise or sunset. The lighting creates strong highlights and shadows on the rock's surface.

Газ и газовые гидраты в криолитозоне

Сколько метана в вечной мерзлоте?

Исследования биогенных газов: содержание метана с глубиной в мерзлых отложениях Якутии

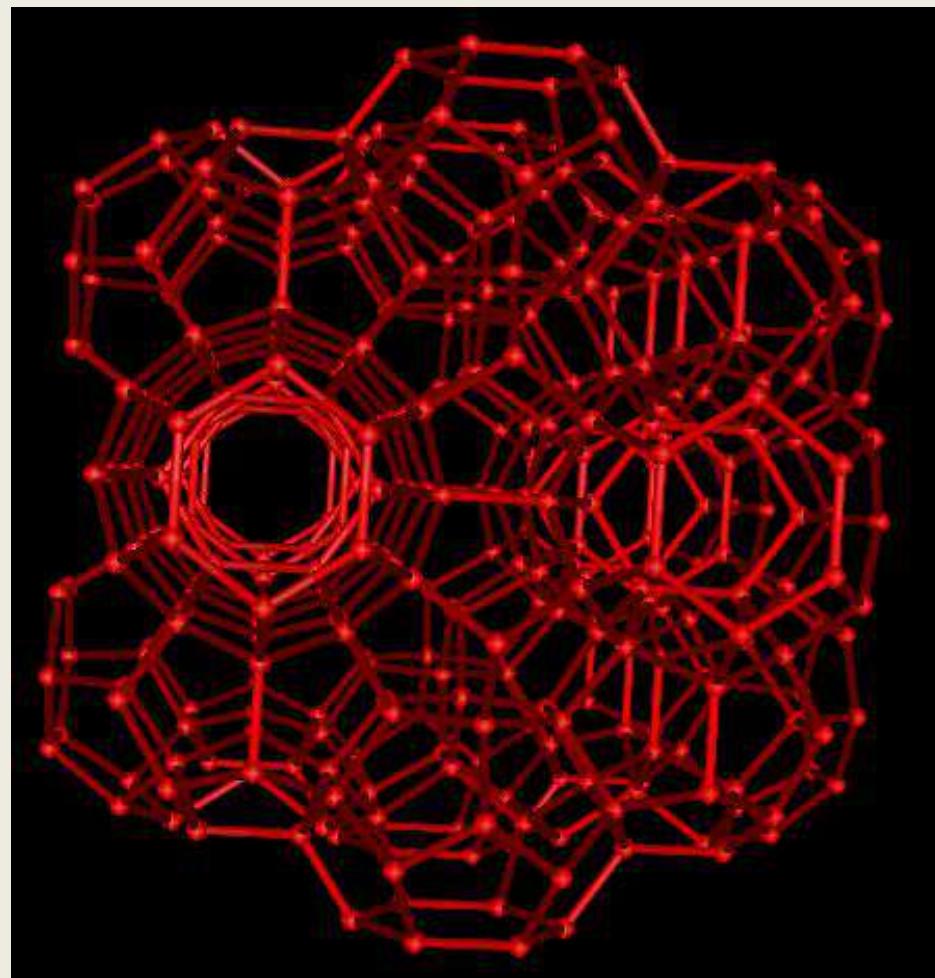
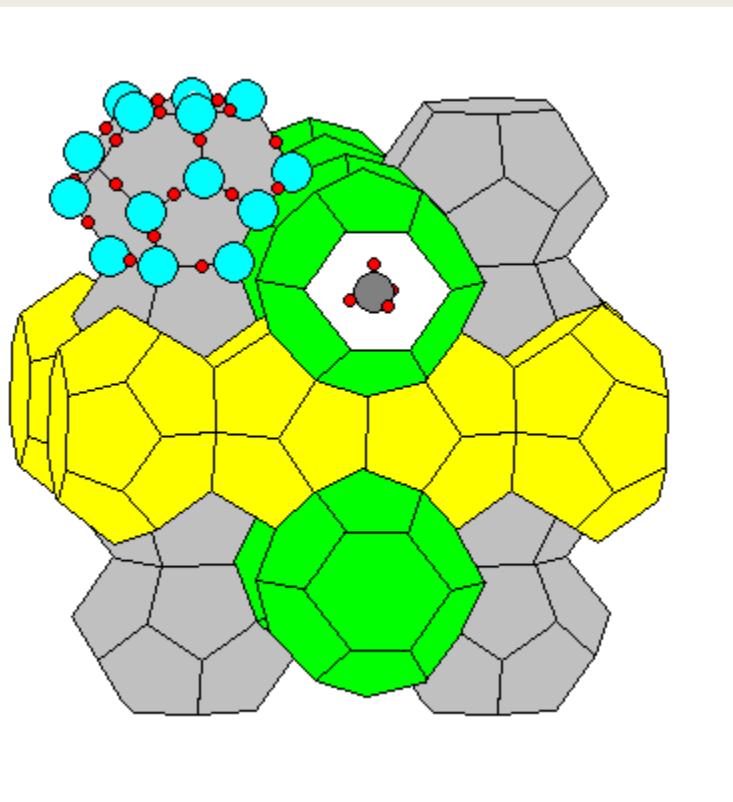


Кристаллы газовых гидратов состоят из молекул газа, встроенных в каркас из молекул воды. Фото О. Хлыстова



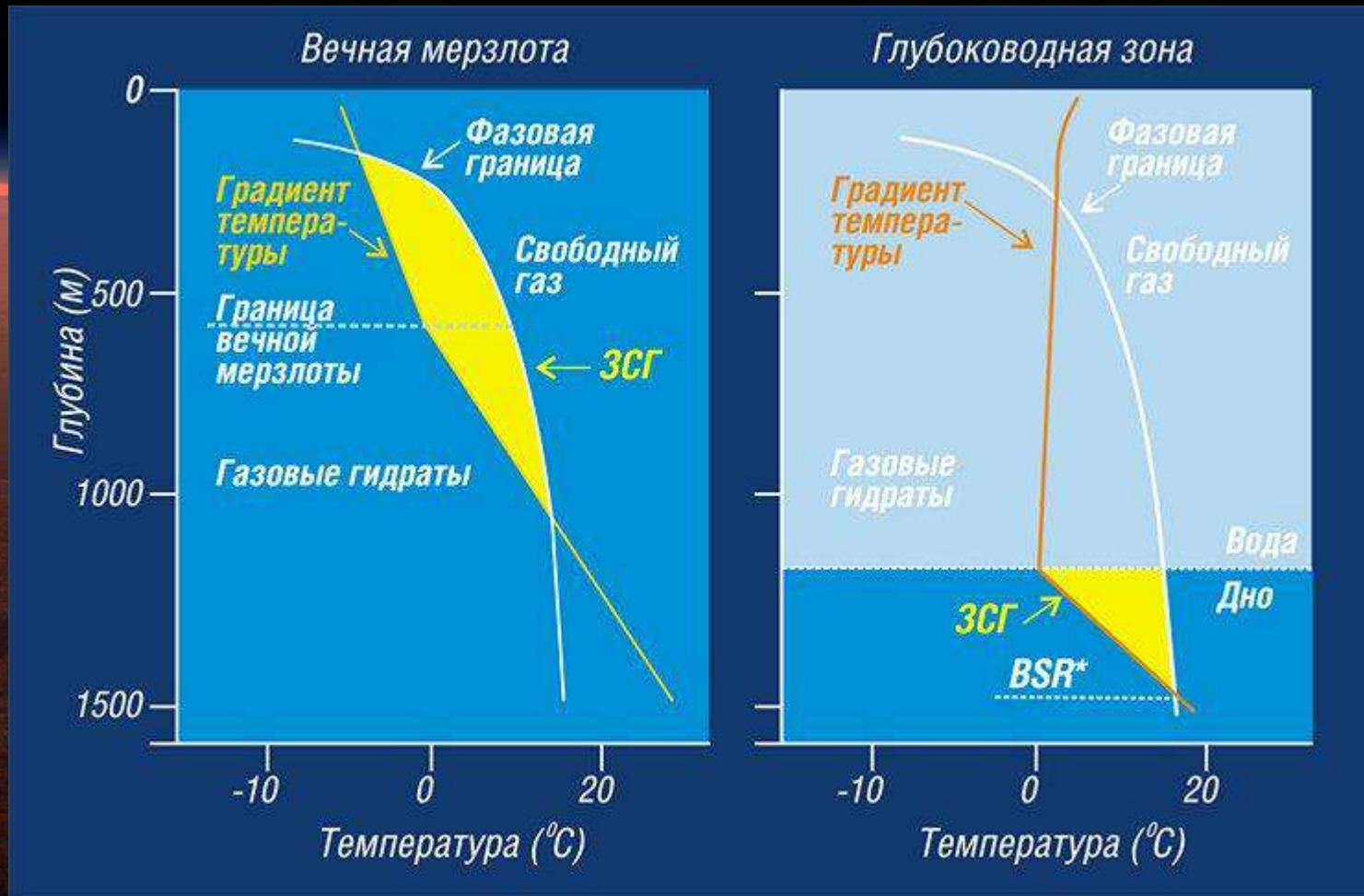
De Batist M., Klerkx J., van Rensbergen P., Vanneste M., Poort J., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O. & P. Krinitsky. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia // Terra Nova. 2002. 14(6). P. 436—442. D

Гидраты газов

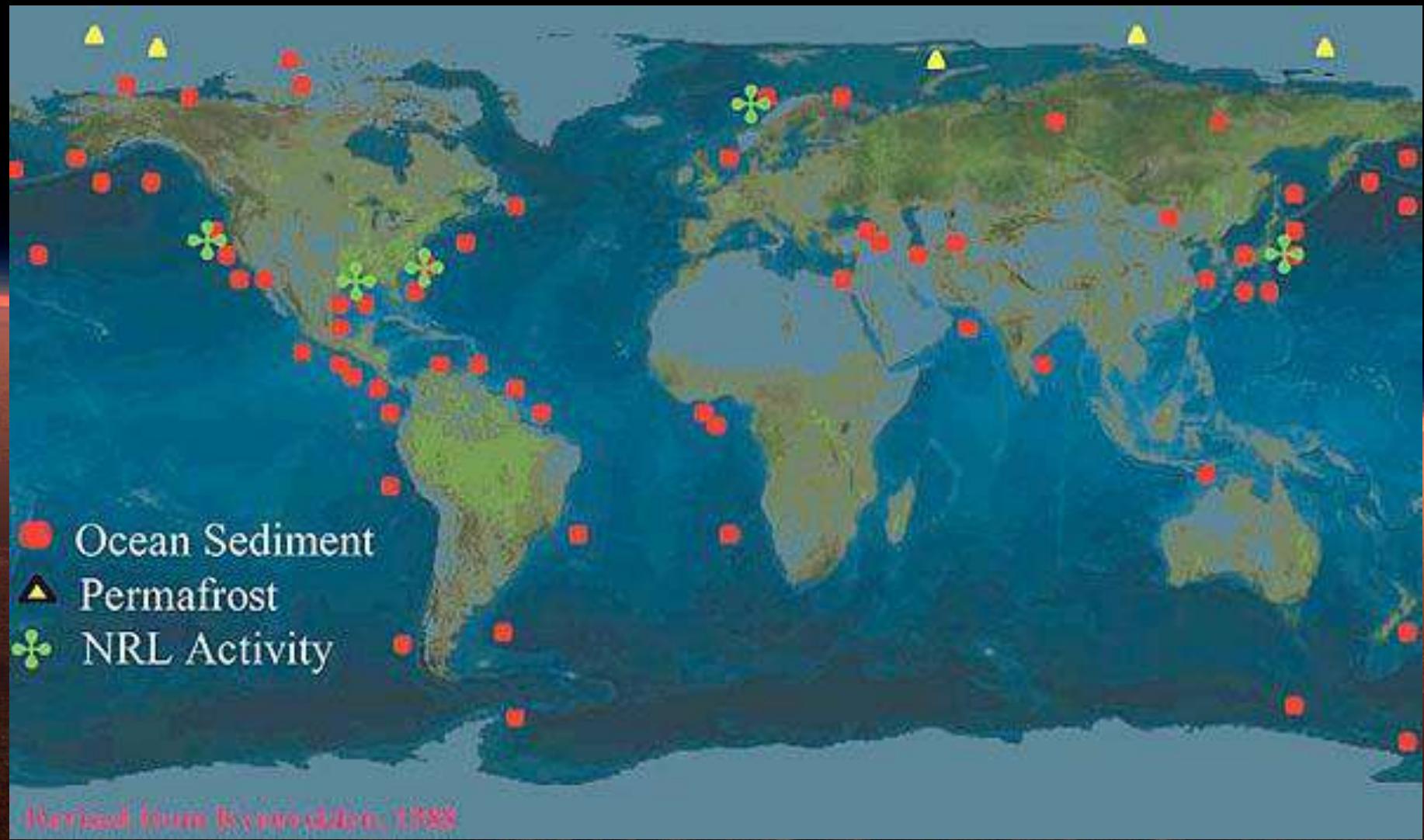


TETRAKAIDECAHEDRON: Weaire & Phelan, 1993

Зоны стабильности гидратов газов



De Batist M., Klerkx J., van Rensbergen P., Vanneste M., Poort J., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O. & P. Krinitzky. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia // Terra Nova. 2002. 14(6). P. 436—442. D

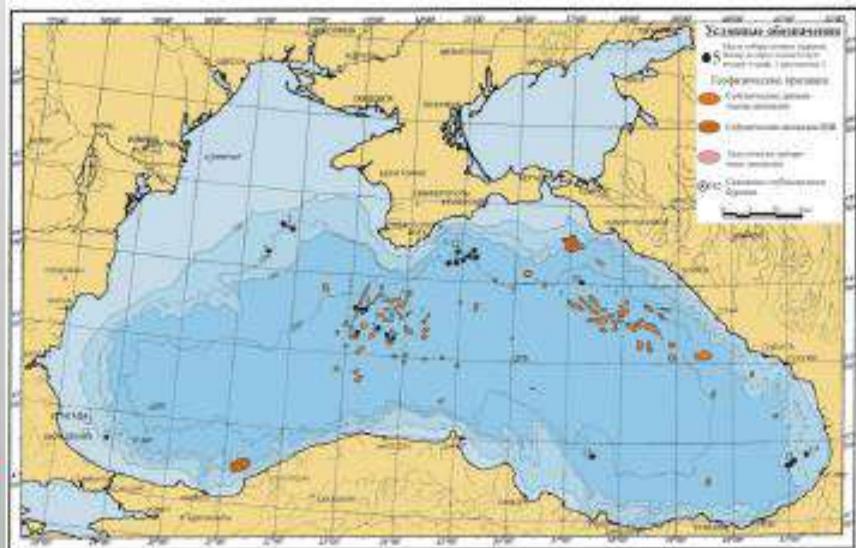
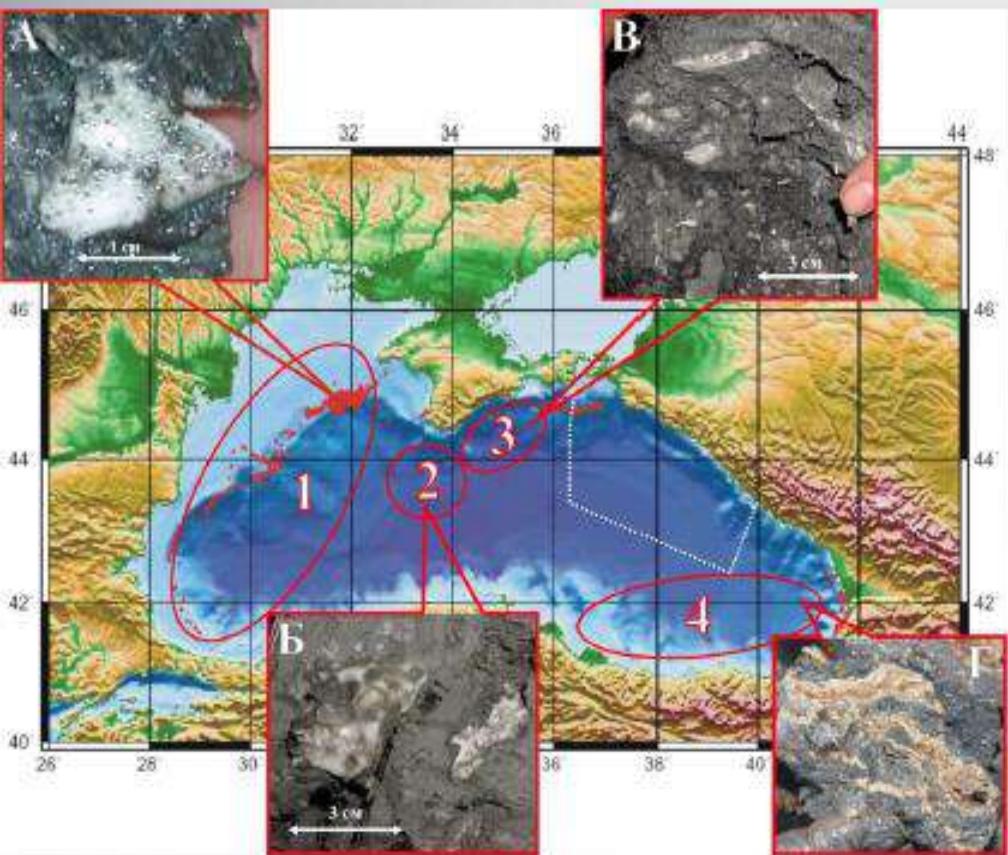


Исследования ВНИИОкеангеологии в области газовых гидратов



ВНИИОкеангеология - UNESCO-IOS (МГУ им. Ломоносова)

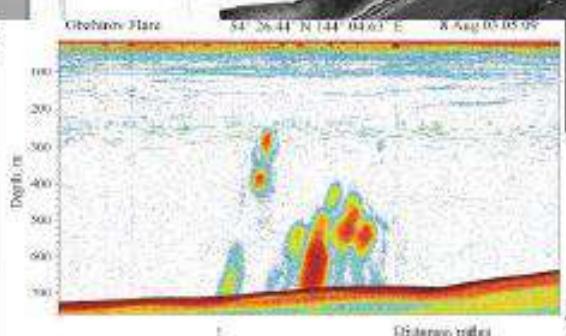
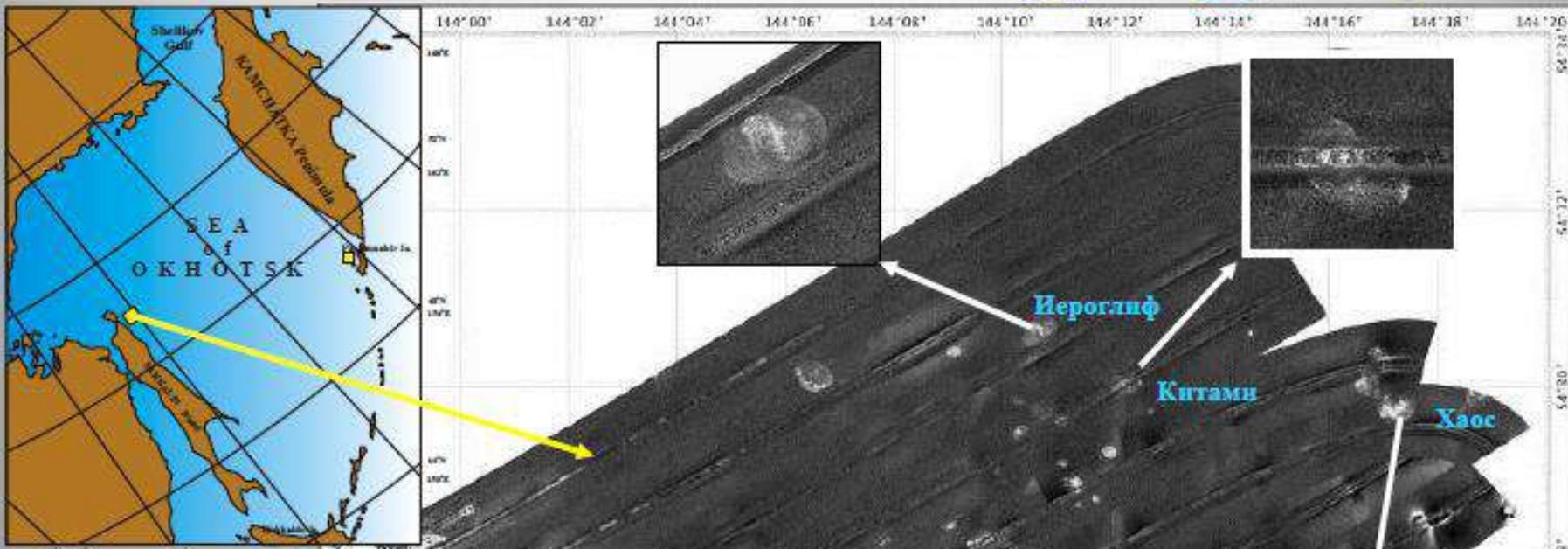
Черное море



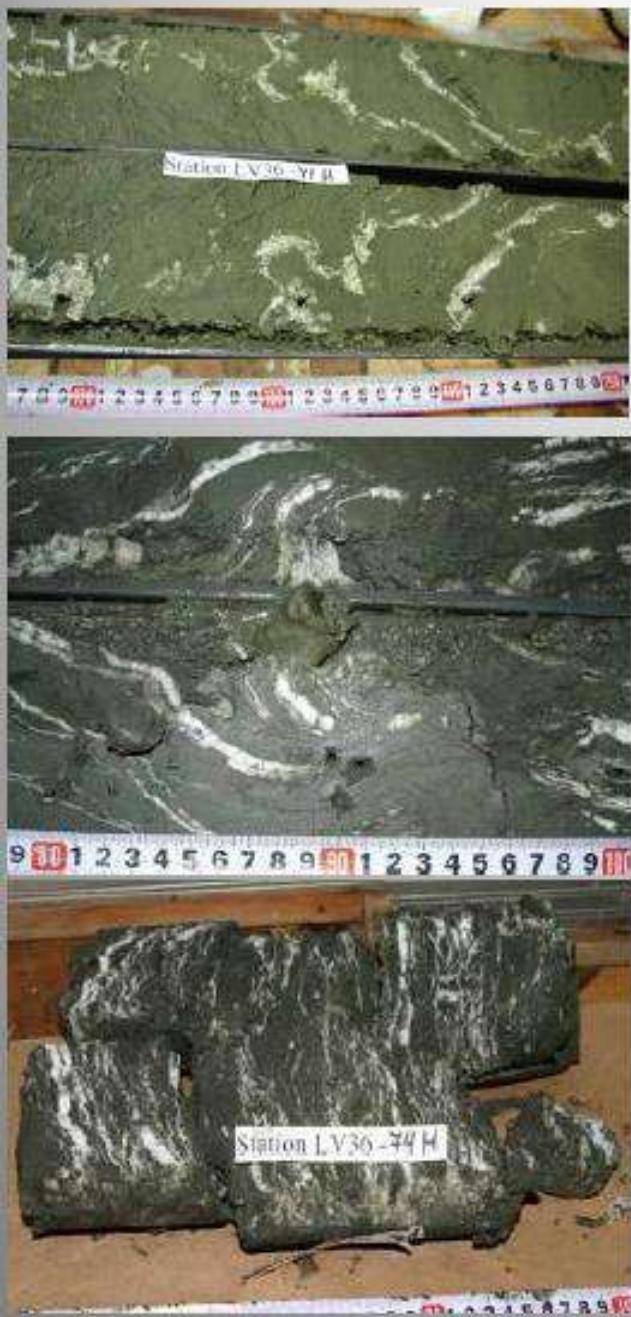
Карта изученности газогидратопроявлений Черного моря

Охотское море

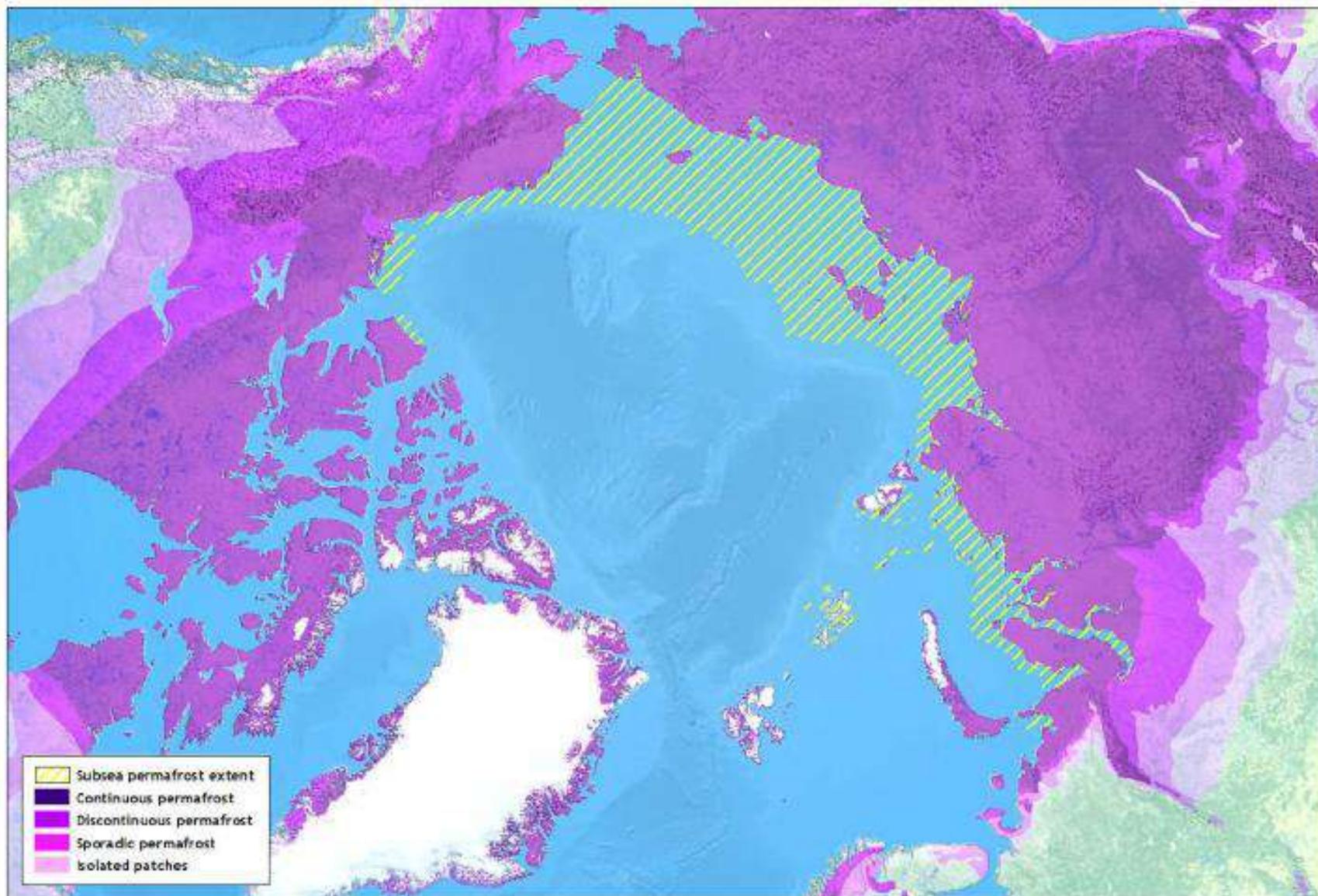
ВНИИО-ТОИ ДВО РАН-Япония (КИТ)



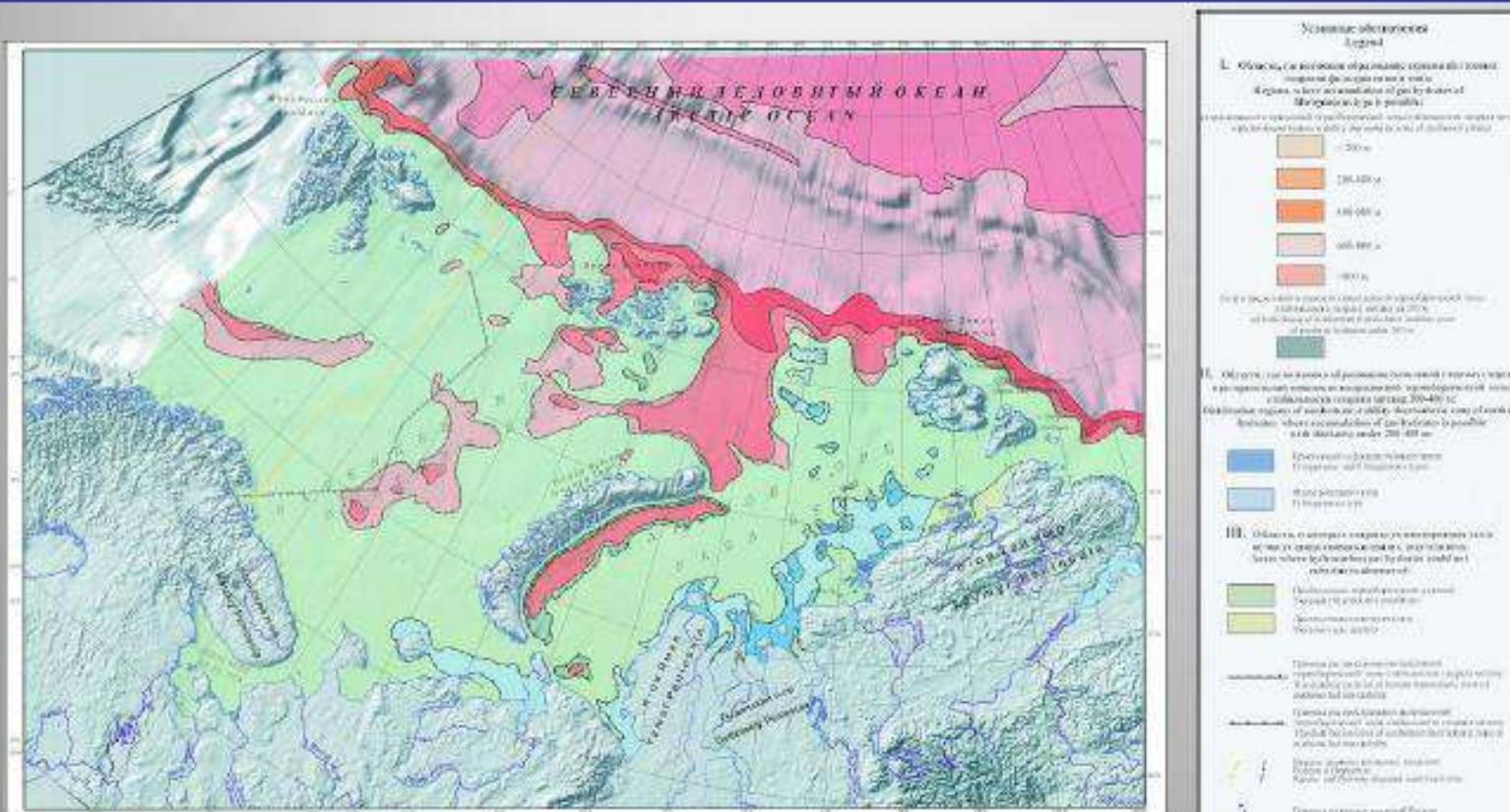
Текстурообразующие газовые гидраты (Охотское море)



Вечная мерзлота в Арктике



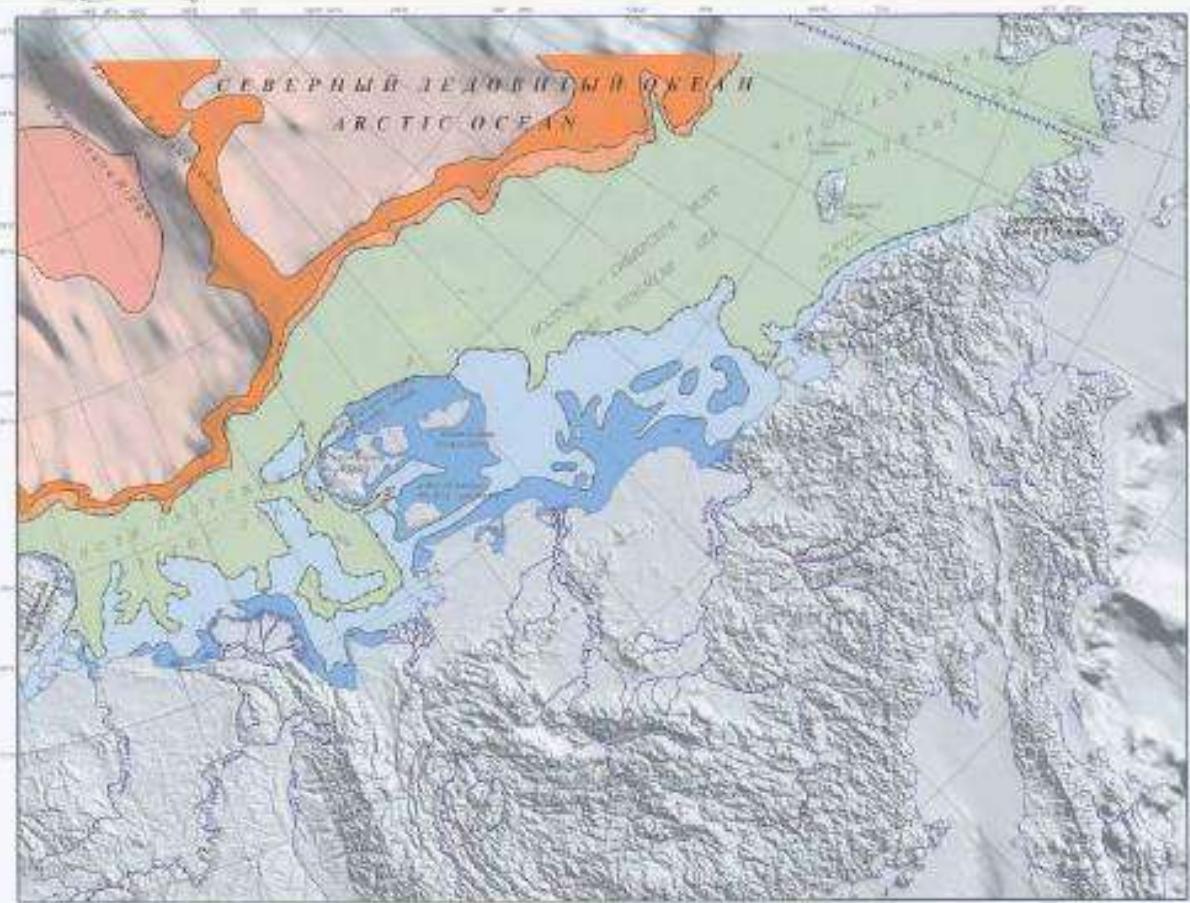
Условия гидратообразования и потенциально газогидратоносные акватории



Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России» ГИН РАН, Соловьев, Гинсбург, 2004

Западно-арктический шельф России характеризуется преимущественным развитием немерзлой криолитозоны и относительно ограниченным распространением субмаринной мерзлой зоны. На шельфе Баренцева моря выделены границы распространения различных временных типов – сезонный, эпизодический и многолетний. Практически на всем шельфе Карского моря криолитозона многолетняя. Температура немерзлой криолитозоны меняется в интервале от 0 до $-1,8^{\circ}\text{C}$, предполагаемая мощность от 25 м до 50 м и более.

Условия гидратообразования и потенциально газогидратоносные акватории

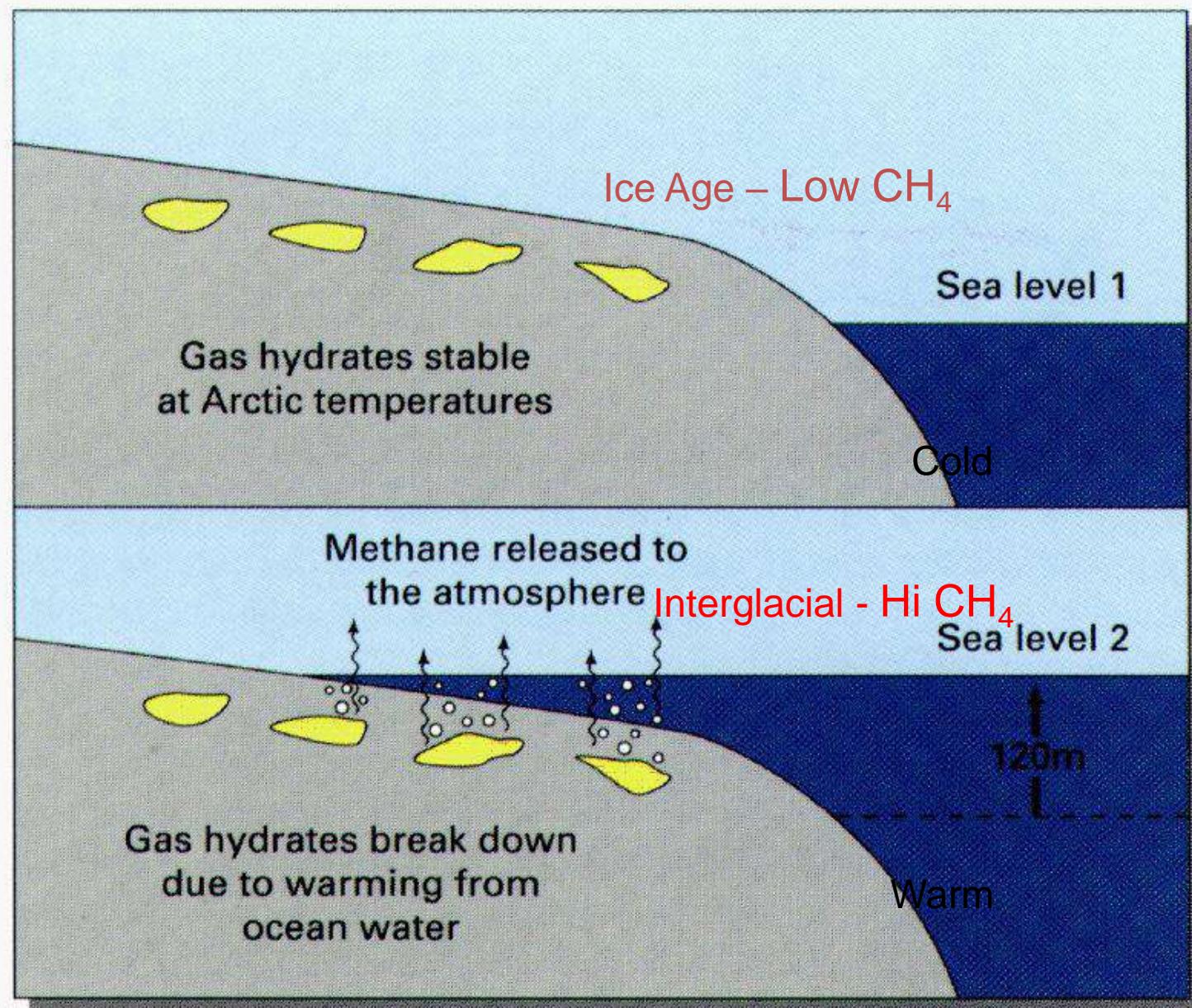


Соловьев, Гинсбург, 2004

На восточно-арктическом шельфе России, в границах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, весьма широко распространение реликтовой субмаринной мерзлой зоны. Здесь можно выделить сплошную (прерывистую), переходящую в островную, и островную, реликтовые мерзлые зоны различной мощности, первая может быть как реликтовой, так и новообразованной, а островная – только реликтовой.

Объем зоны стабильности газовых гидратов в недрах Северного Ледовитого океана

Основные морфоструктуры	Типы зоны стабильности и гидратов	Площадь, тыс. км ² (% от общей площади)	Пределы изменения мощности (средняя мощность в м)	Объем, м ³
Ложе океана	Придонный	3431	200-1000 (700)	$2,4 \times 10^{15}$
Континентальный склон	Придонный	950	200-800 (560)	$5,3 \times 10^{14}$
Арктический шельф России	Придонный	977	0-600 (200)	$1,95 \times 10^{14}$
	Криогенные гидраты	250 (125)	0-400 (200)	$2,5 \times 10^{13}$
		606 (121)	0-400 (200)	$2,4 \times 10^{13}$
	Непридонный, вне акваторий с реликтовой мерзлой зоной	24	0-200 (100)	$2,4 \times 10^{12}$
Всего:				$3,18 \times 10^{15}$



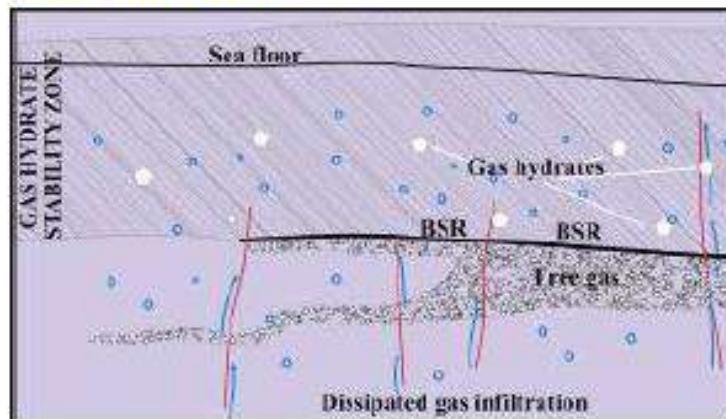
Sea-level rise causes relatively warm ocean water to cover cold Arctic strata. The resulting breakdown of stable gas hydrates within the sediment releases gas into the atmosphere.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ СКОПЛЕНИЙ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Фильтрогенные



Глубоко залегающие
В условиях рассредоточенной
фильтрации УВ



Придонные в очагах разгрузки УВ

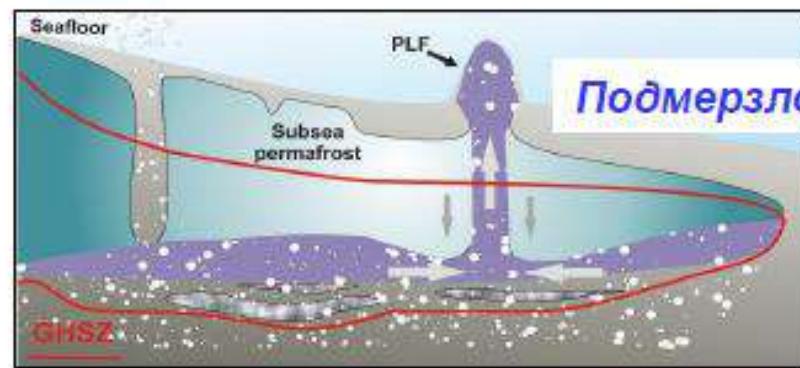
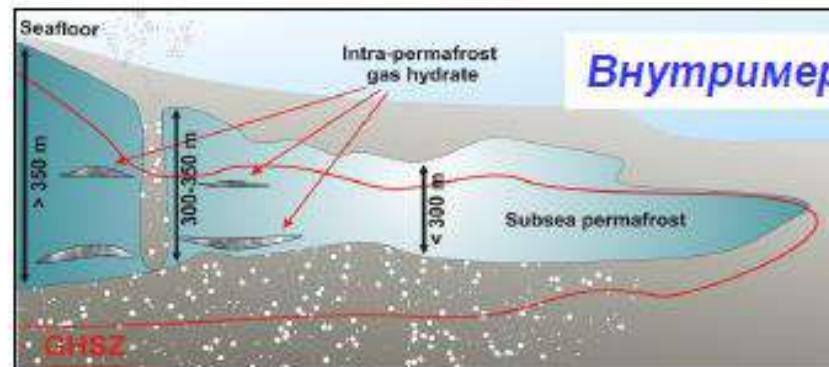


Всероссийский научно исследовательский
институт геологии и минеральных
ресурсов Мирового океана
им. академика И.С. Грамбера

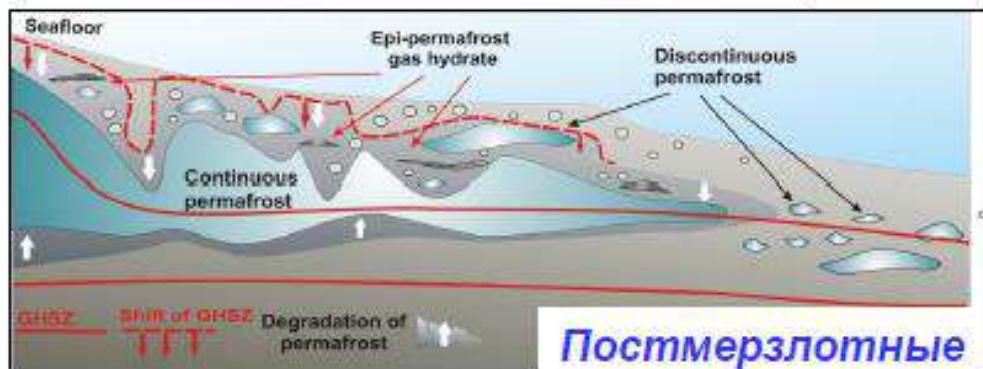
Криогенетические



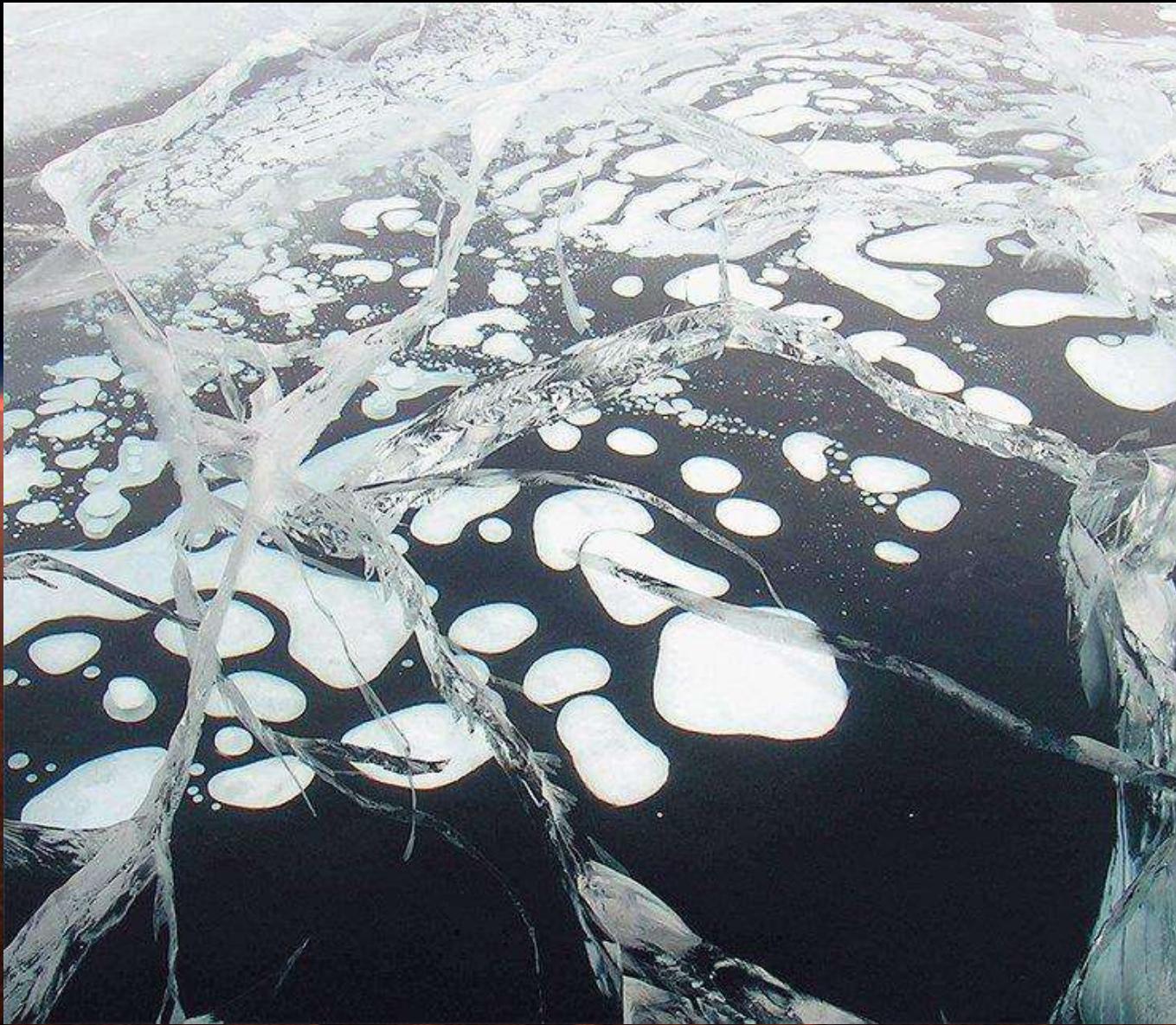
Внутримерзлотные



Подмерзлотные



Постмерзлотные



В зимнее время пузырьки газа, выделяющегося над донными источниками, вмерзают в лед. Фото Н. Гринина

De Batist M., Klerkx J., van Rensbergen P., Vanneste M., Poort J., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O. & P. Krinitsky. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia // Terra Nova. 2002. 14(6). P. 436—442. D

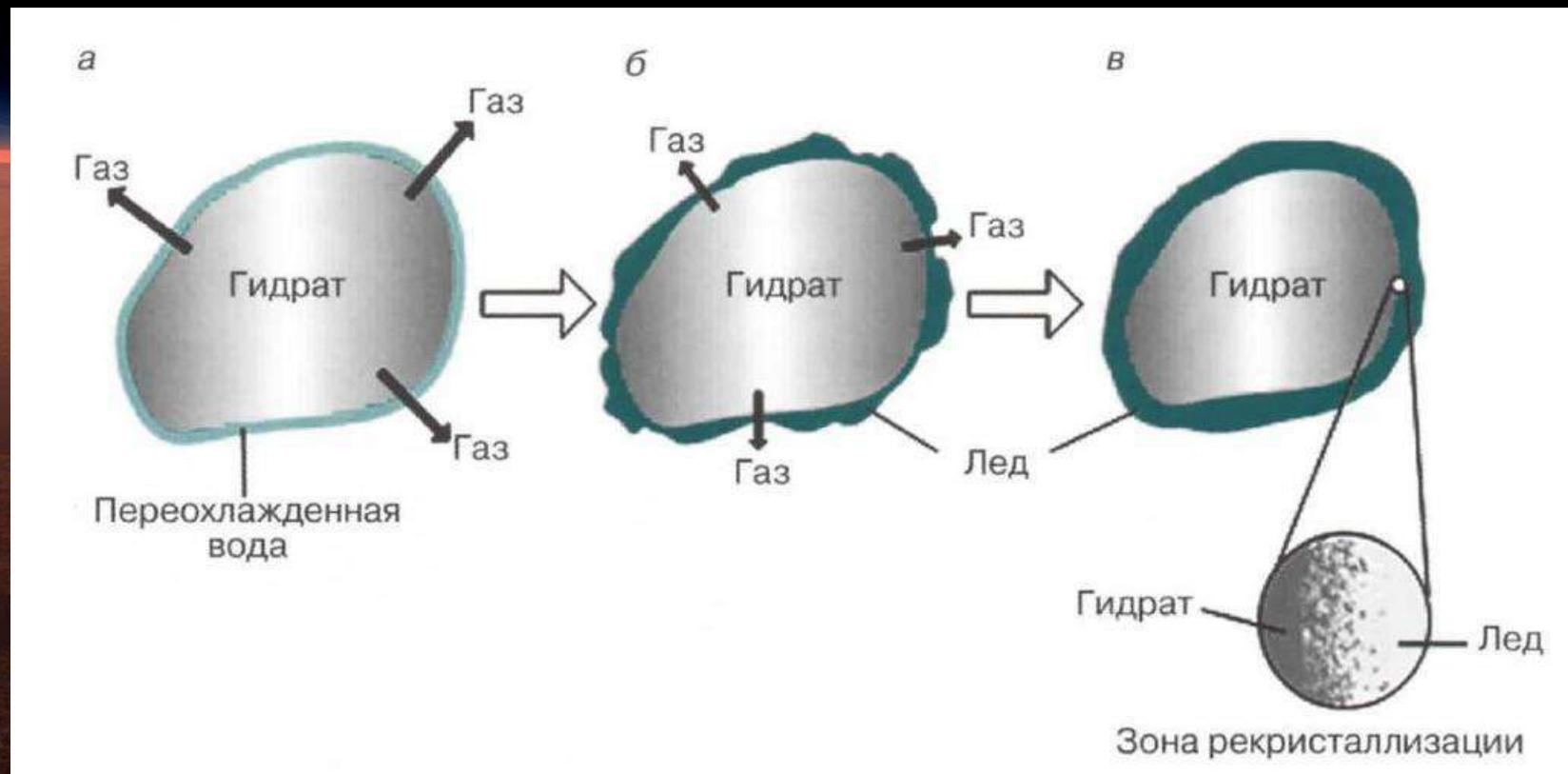


Факелы природного газа, скопившегося подо льдом озера в районе дельты реки Селенги. Фото О. Хлыстова

De Batist M., Klerkx J., van Rensbergen P., Vanneste M., Poort J., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O. & P. Krinitsky. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia // Terra Nova. 2002. 14(6). P. 436—442. D

Эффект самоконсервации гидратов газов

©ДРАЧУК А. О.



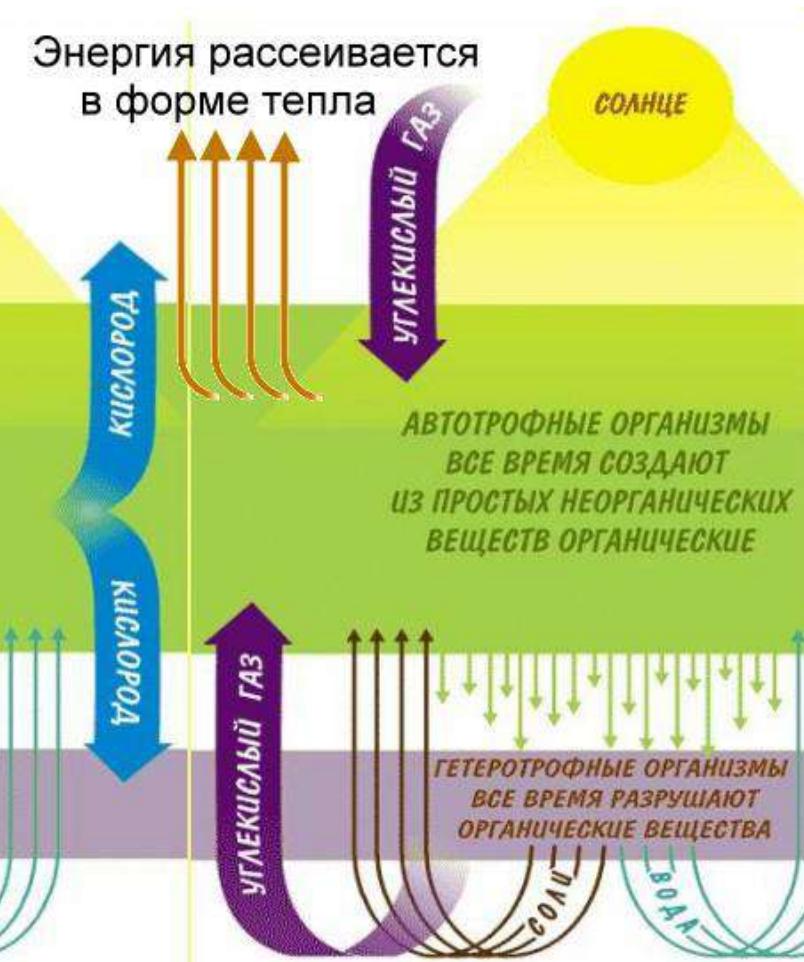
ЯМАЛЬСКИЙ КРАТЕР



A photograph of a large, light-colored rock formation, possibly sandstone or limestone, with prominent horizontal sedimentary layers and vertical weathering streaks. The rock is set against a dramatic sky that transitions from a deep red at the horizon to a lighter pink and then a pale yellow at the top. The lighting suggests either a sunrise or sunset.

Живое вещество в криолитозоне

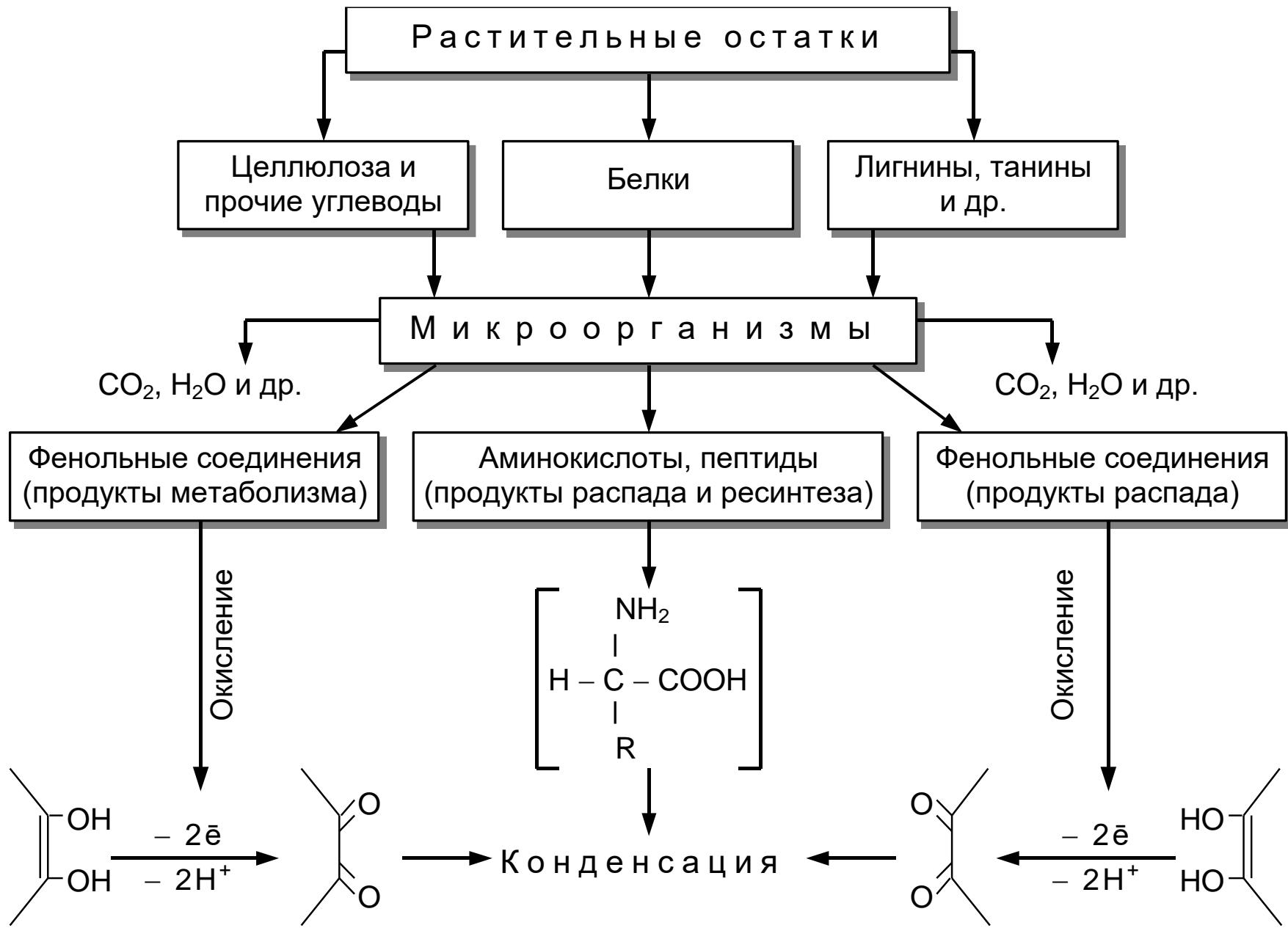
Круговорот углерода



В биосфере совершаются постоянный круговорот активных элементов, **биогенная миграция**.

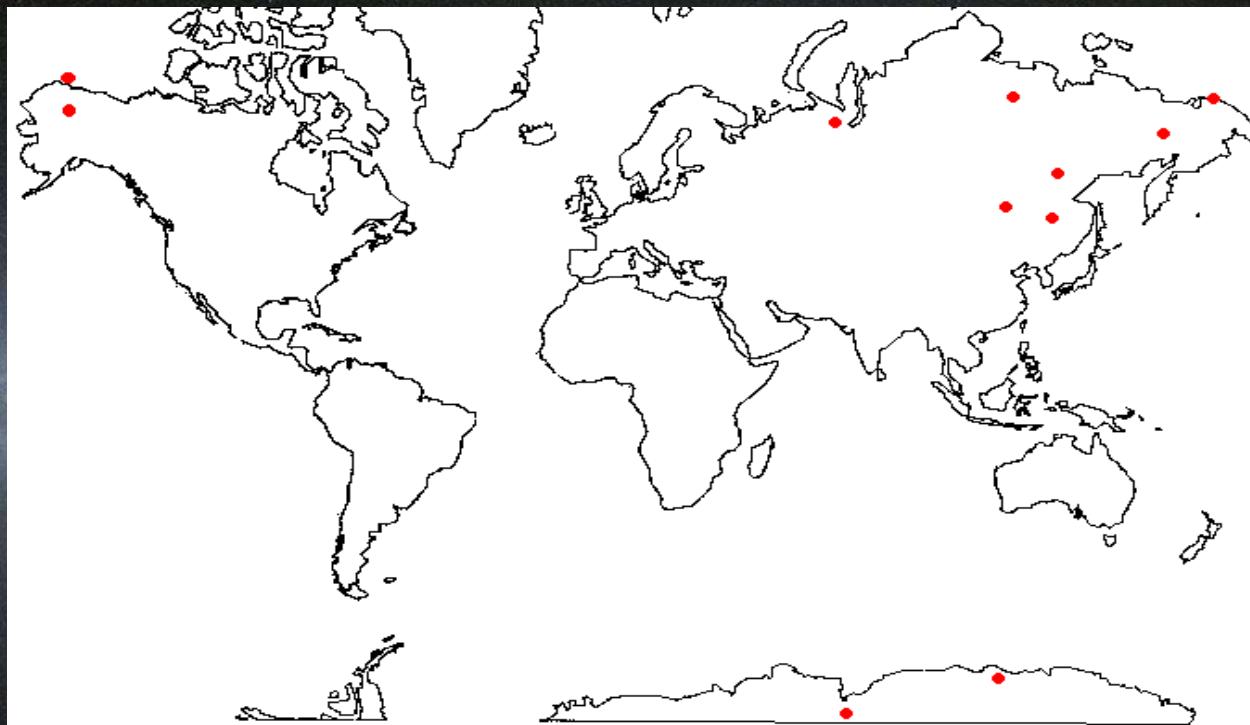
Различают биогенную миграцию **первого рода**, которая совершается микроорганизмами, **второго рода** – многоклеточными организмами. **Миграция первого рода превышает миграцию второго рода.**

Человечество осуществляет миграцию третьего рода.





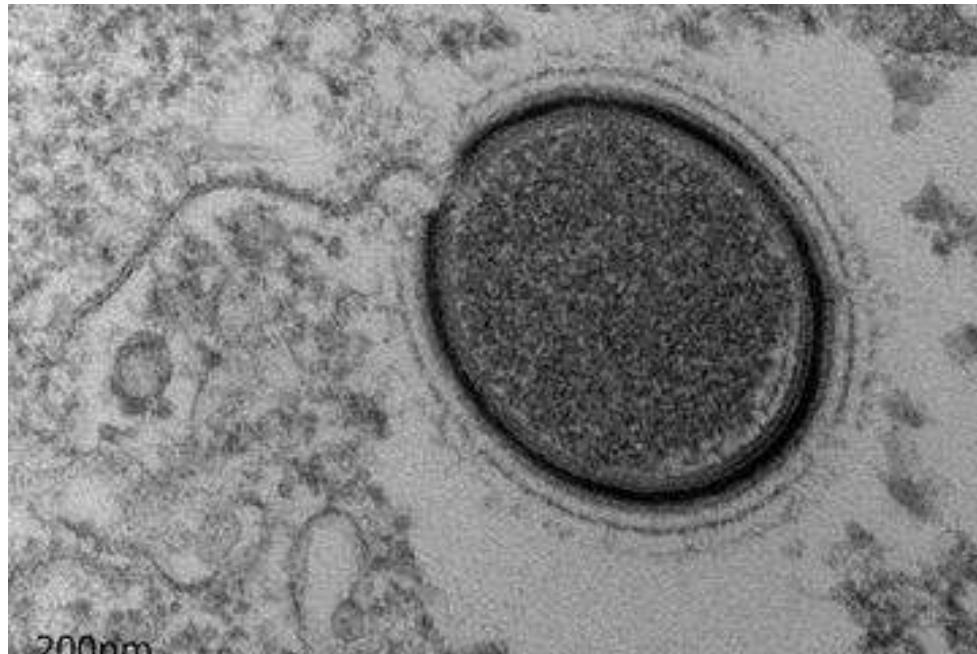
Живые микроорганизмы в вечной мерзлоте



Microorganisms were found in different places (red dots on the map, Gilichinsky and Wagener, 1994) in the world. Oldest ones (up to 3 000 000 years old) have been reported to be found in Kolyma region. Amount of viable cells is up to 10^8 cells in 1 g. They spreads up to 300 m deep in Alaska and exist at temperature -18 -27°C in Antarctic



Frozen Giant Virus from Siberian Permafrost Still Infectious After 30,000 Years



A giant virus recently discovered in the Siberian permafrost reveals that huge ancient viruses are much more diverse than scientists had ever known.

“They're also potentially infectious if thawed from their Siberian deep freeze, though they pose no danger to humans”, - Chantal Abergel from the National Center for Scientific Research at Aix-Marseille University in France

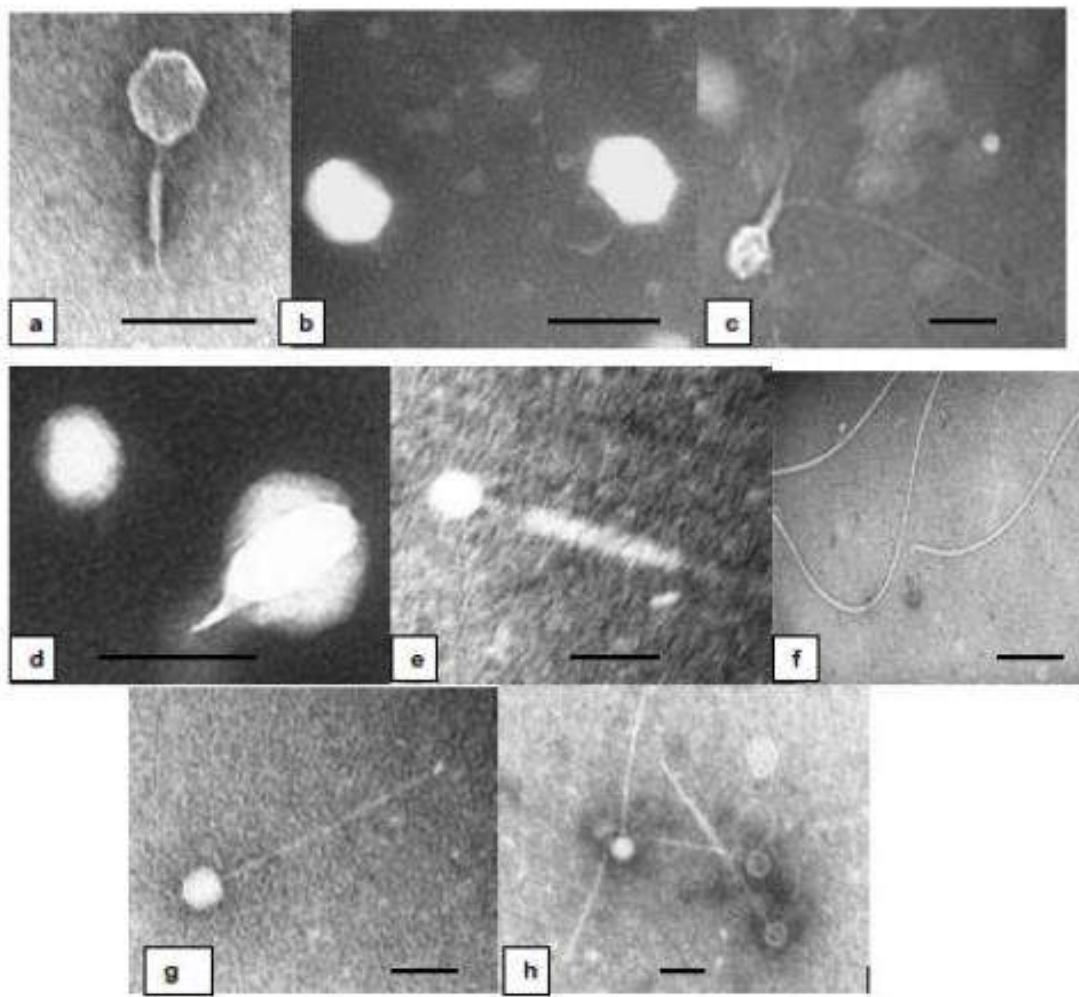
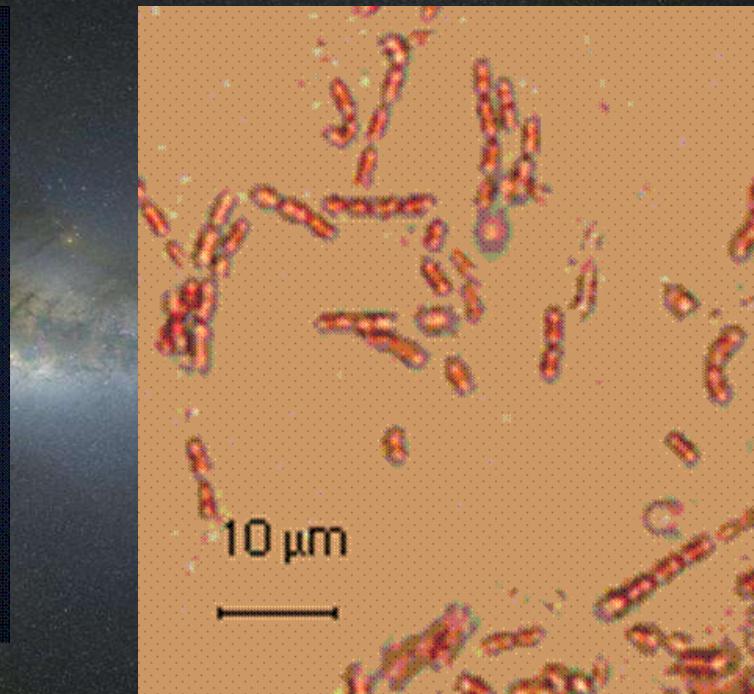
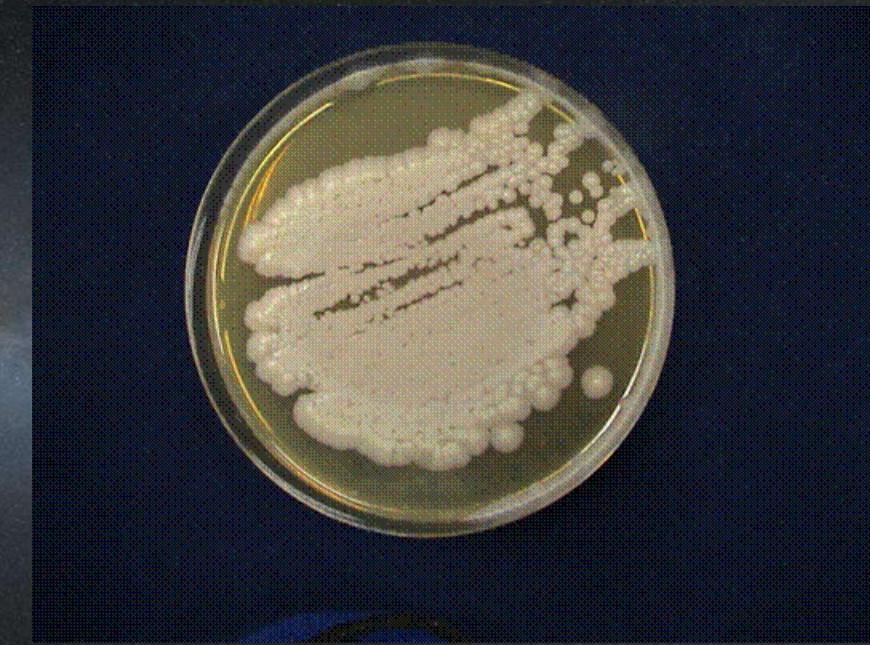


Figure 4. Morphological diversity of viruses attributed to five main types: miovirus (a,c,e), sifovirus(g,h), podovirus(d), spherical(b) and filamentous(f). Scale line 0,05 mkm

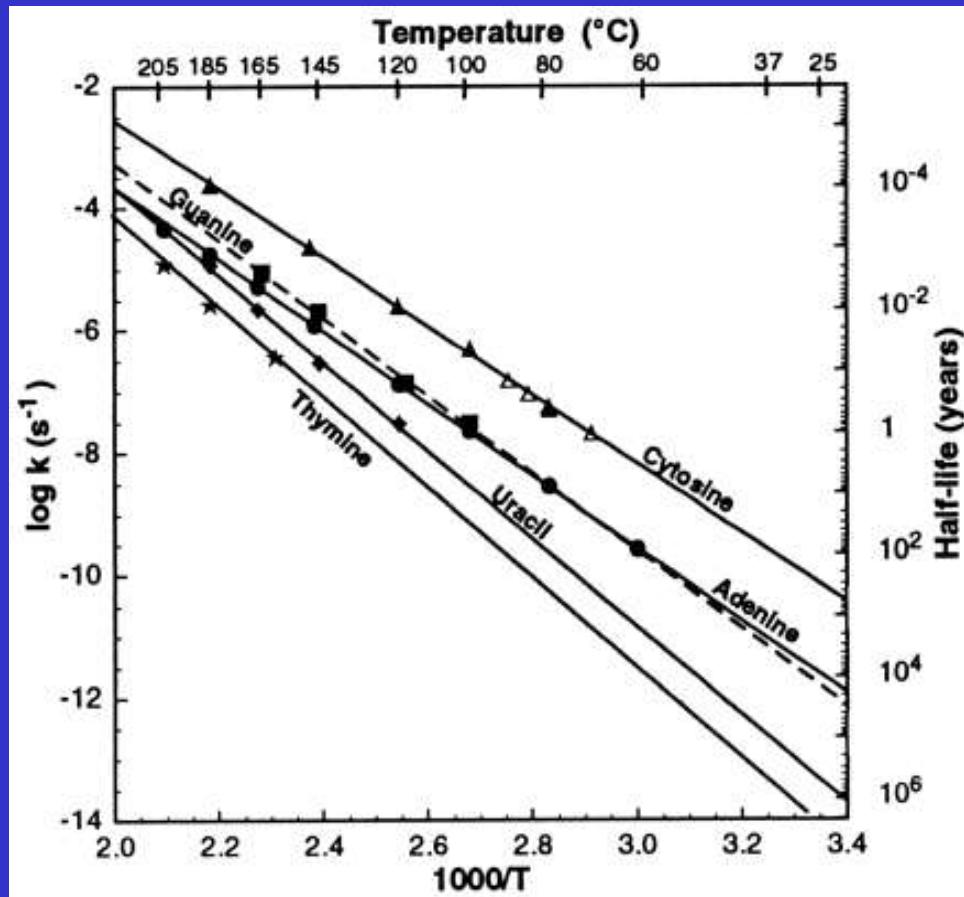


Некоторые из найденных
микроорганизмов, по-видимому,
имеют огромный возраст



Isolated strain of *Bacillus* sp.;
right - Gram staining; left - growth in Petri dish

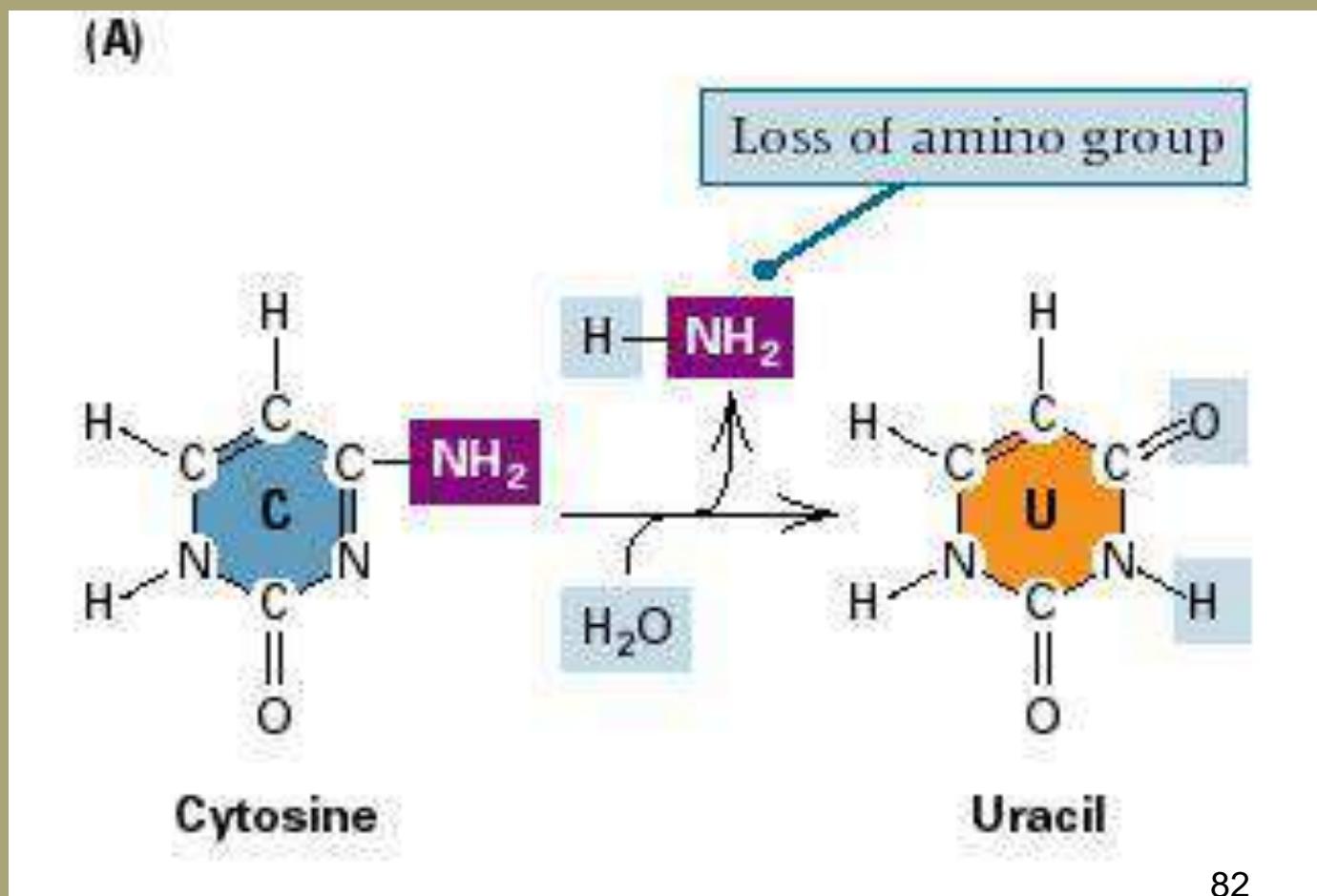
Нуклеотиды ДНК (А, У, Г, С) имеют ограниченное время жизни
(Levy & Miller, 1998)



Наиболее нестабильным оказывается цитозин со временем полураспада при температурах 0 - -10 градусов Цельсия около 300 лет.

Одно из типичных повреждений ДНК: деаминация цитозина в результате гидролиза

Spontaneous deamination is the hydrolysis of cytosine into uracil, releasing ammonia



Разрушение ДНК со временем

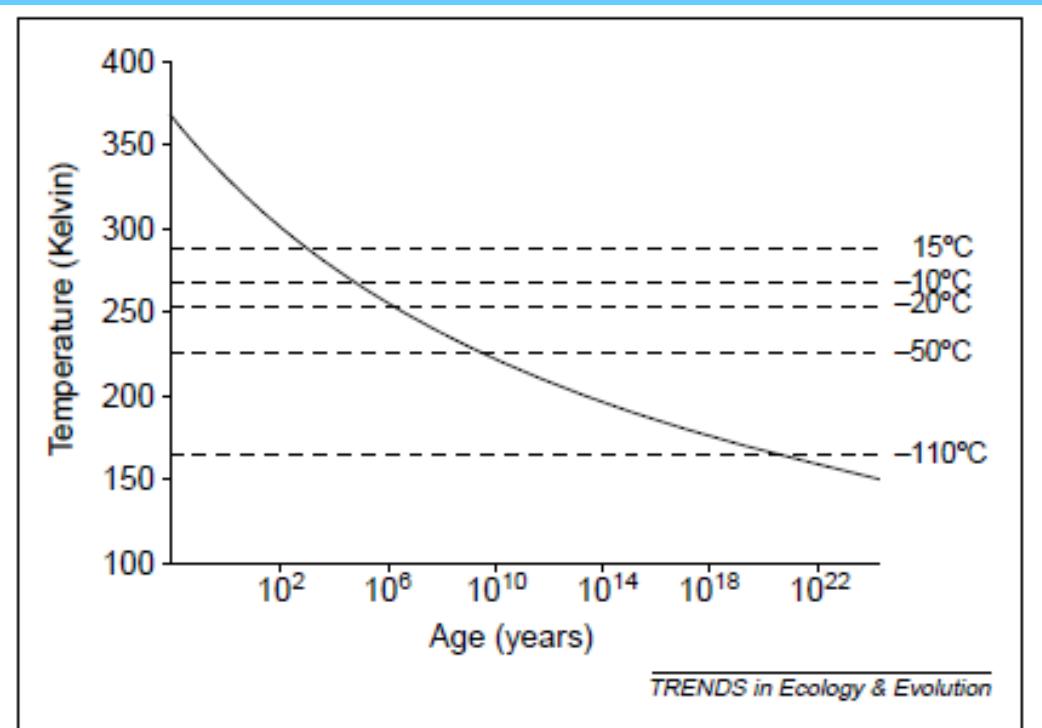


Figure 2. Long-term survival of 100 bp of DNA as a function of temperature. The calculations are based upon a genome size of 3.0×10^6 bp, the Arrhenius equation and depurination kinetics of Lindahl and Nyberg [39] (i.e. a depurination rate of 4×10^{-9} sites sec^{-1} at 70°C , pH 7.4, and a constant activation energy of 31 kcal mol^{-1}). We have simplified calculations assuming damage is distributed equally over the genome at all purine sites.

Выживание древней ДНК

Plants (*rbcL* about 130 bp):

- PCR products up to 300-400 kyr (including NZ cave site)
- No PCR products million year old samples

Animal (mtDNA 88-234 bp):

- PCR products up to 20-30 kyr
- no PCR products 300-400 kyr and million year old samples

Выживает сильнейший?



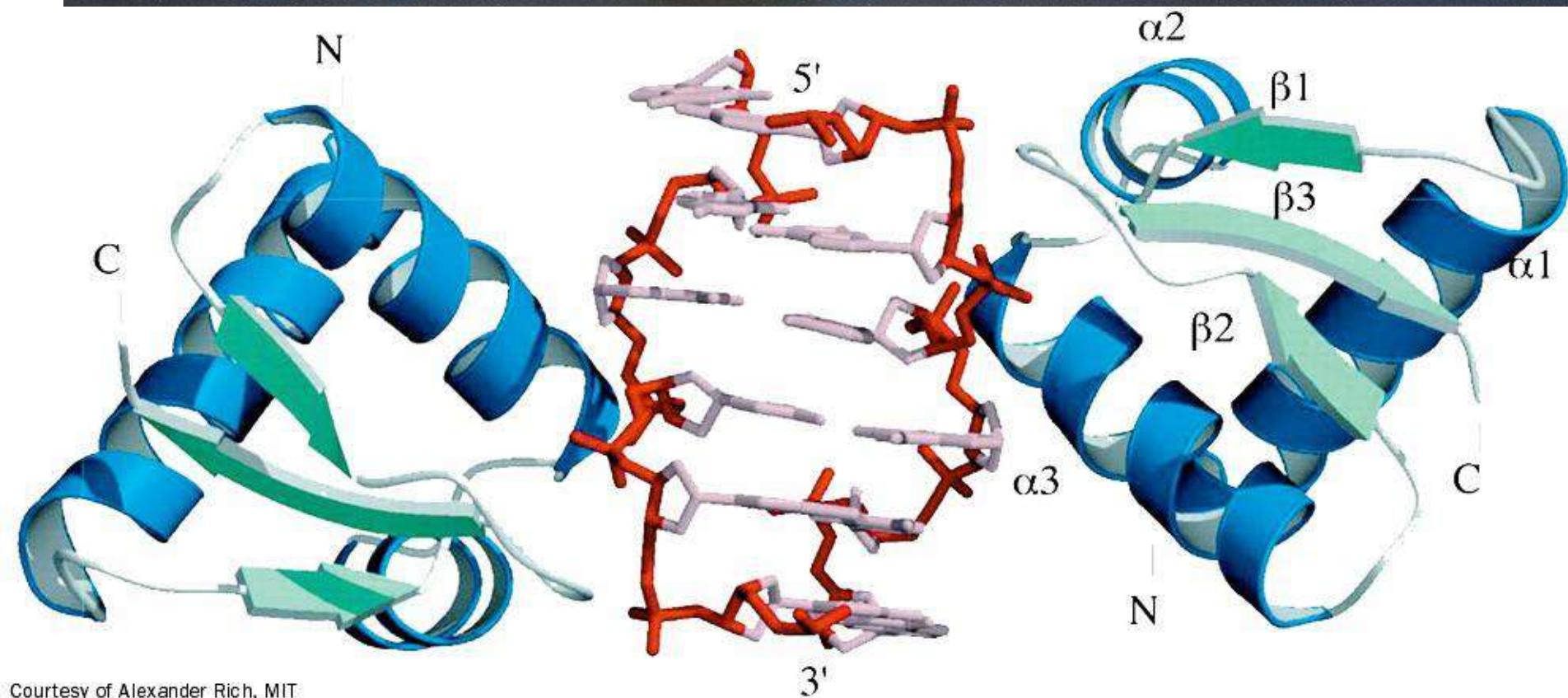
Вечная мерзлота – арена беспрецедентного естественного отбора. Биллионы клеток в ней не способны к передвижению, лишены пищи и пространства для размножения. После тысячелений существования в ее толщах могли выжить только клетки, обладающие механизмом поддержания их жизнеспособности в течение гигантских периодов времени.

Механизм репарации ДНК, далеко превосходящий известные?

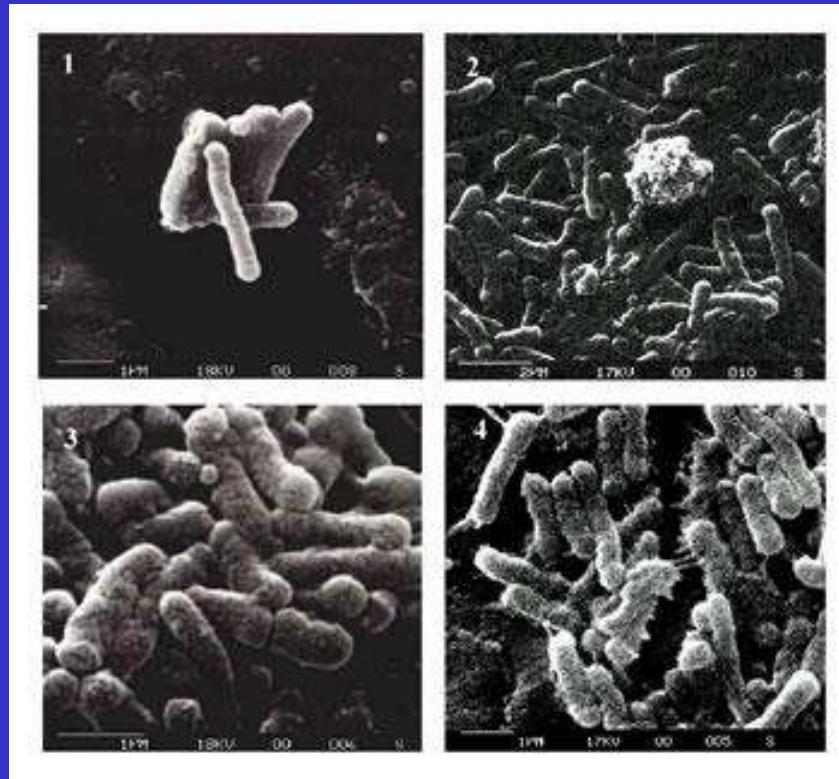
Ancient bacteria show evidence of DNA repair

Sarah Stewart Johnson^{*†}, Martin B. Hebsgaard[†], Torben Christensen^{*}, Mikhail Mastepanov[‡], Rasmus Nielsen[†], Kasper Munch[†], Tina Brand[†], M. Thomas P. Gilbert[†], Maria T. Zuber^{*}, Michael Bunce[§], Regin Ronn[†], David Gilichinsky[¶], Duane Froese[¶], and Eske Willerslev^{**}

Или способ консервации? Например, с помощью binding proteins?



Способны ли они выживать в космосе?

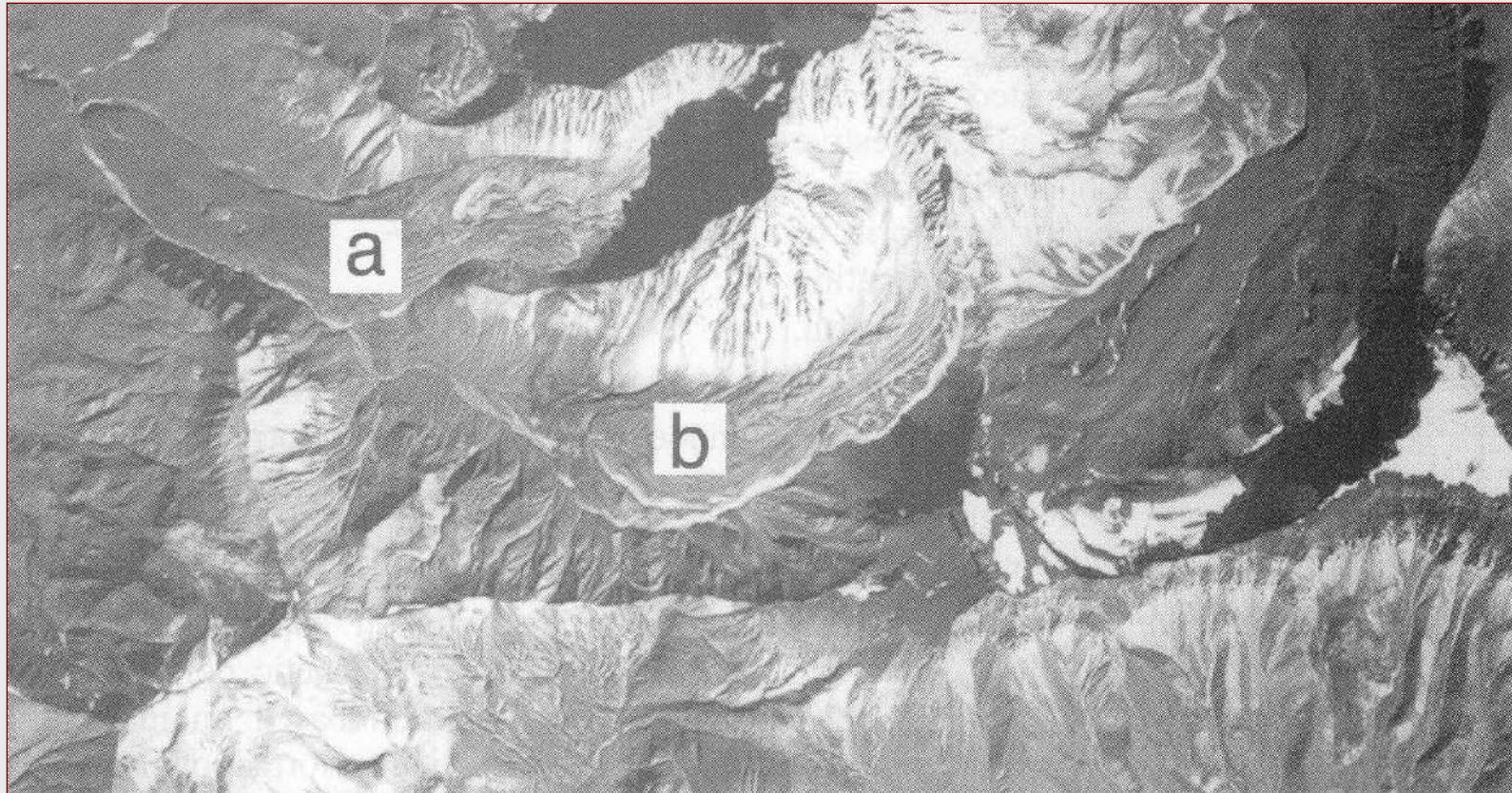


Предполагаемые остатки микроорганизмов из метеоритов MetA. Iperstenic chondrite, fallen on Feb. 3, 1882 at Mocs, Transilvania and MetC. Enstatitic olivinic chondrite, fallen in 1919 at Bur Hacaba, Somalia (kindly provided by Real Museo Mineralogico, Naples; from Giuseppe Geraci et al., Rendiconti Accademia Nazionale dei Lincei, s. 9 (Mat.) vol. 12, 51-64, 2001).

A photograph of a massive iceberg, likely from the Antarctic, shown from a low angle. The iceberg is a light blue-grey color and has a complex, textured surface with many ridges and grooves. It is set against a dark, almost black, background of water. In the upper portion of the image, there is a dramatic sky with a gradient from deep red at the horizon to dark purple and black at the top. The overall scene is one of cold desolation.

Криология планет

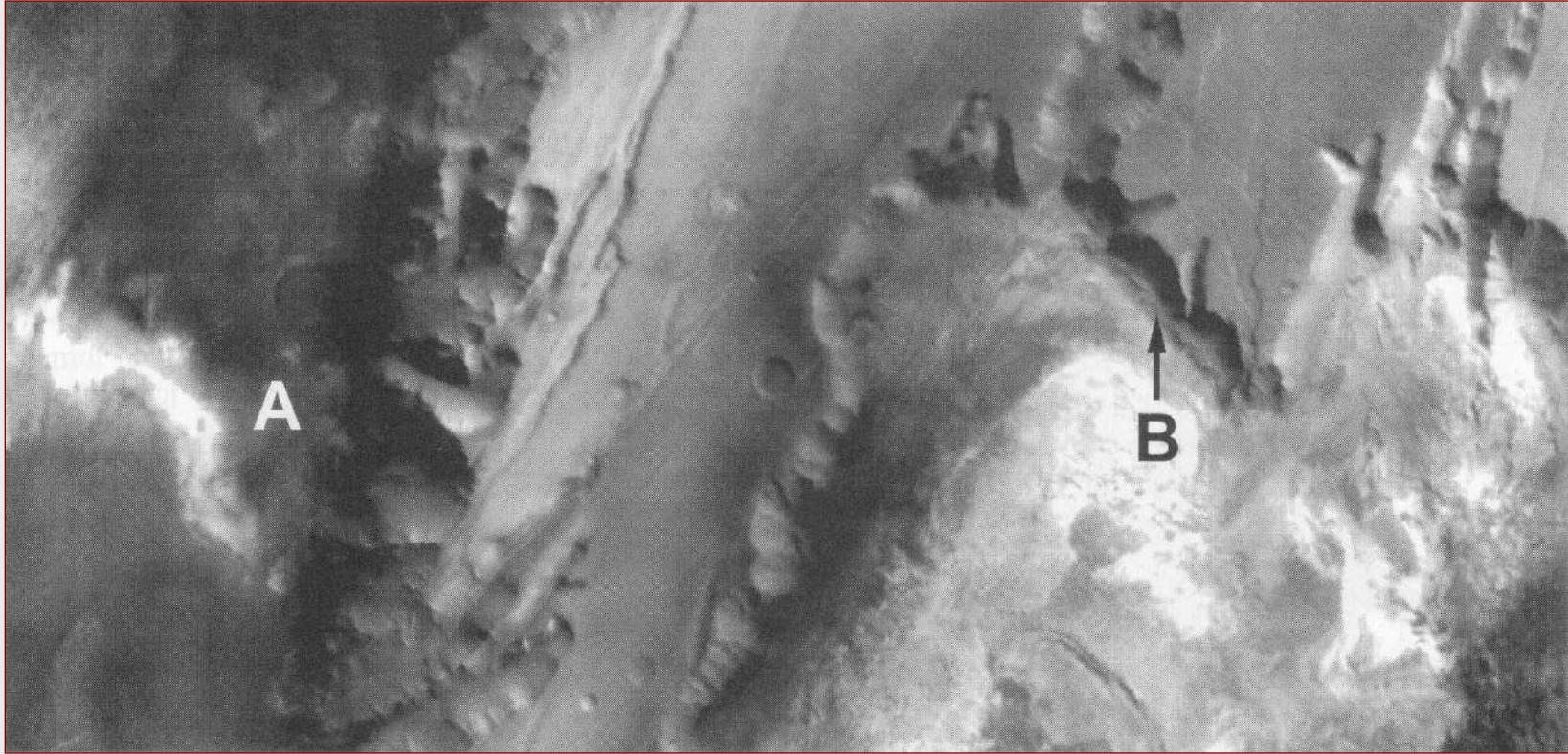
Каменные глетчеры *in* *Wrangell Mountains, Alaska*



Rock glacier "a" has a single lobe, and rock glacier "b" has a second lobe that appears to have advanced on top of another lobe that advanced at an earlier time

(Adapted from Whalley and Azizi, 2003)

Каменные глетчеры *in Candor Chasma, Mars*



Feature "A" resembles a rock glacier, and feature "B" resembles a protalus rampart

(Adapted from Whalley and Azizi, 2003;
After Malin et al., 2000)

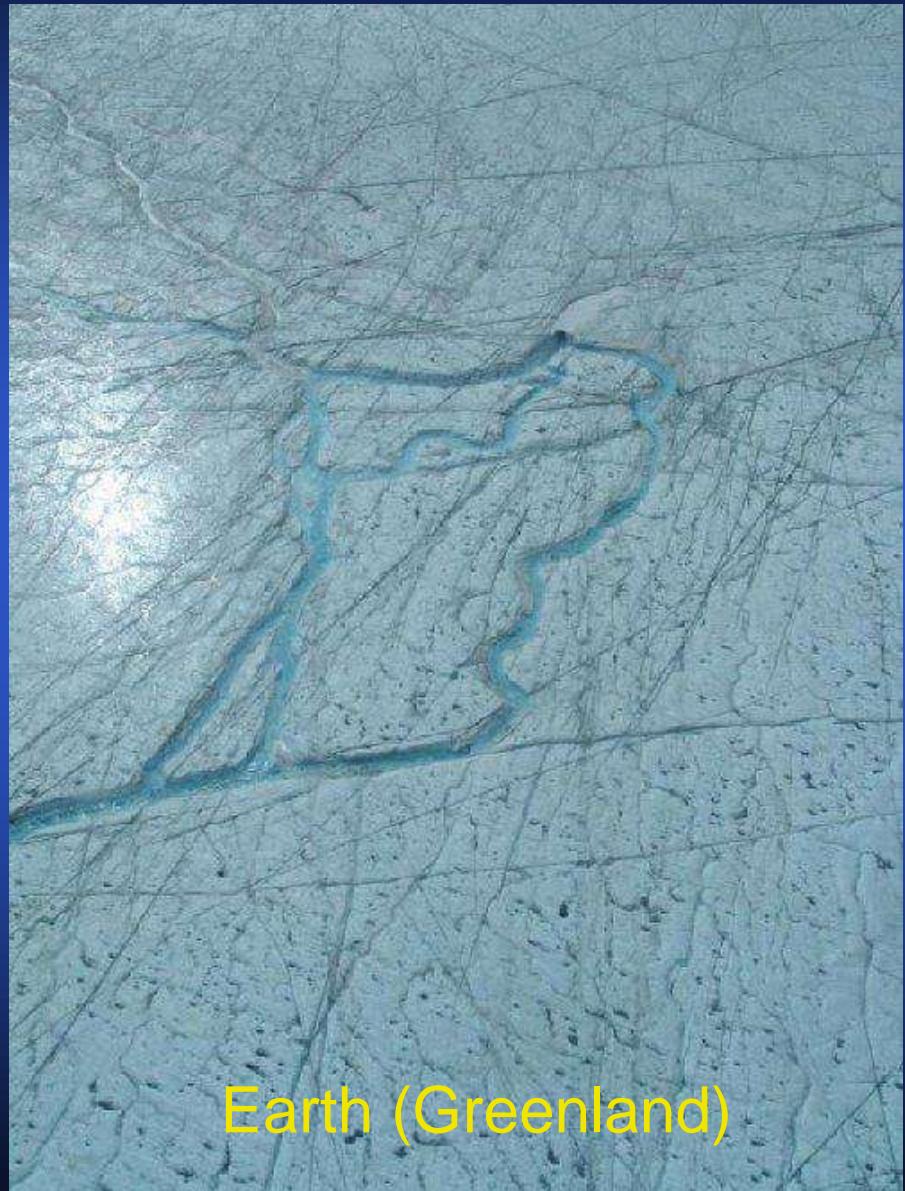
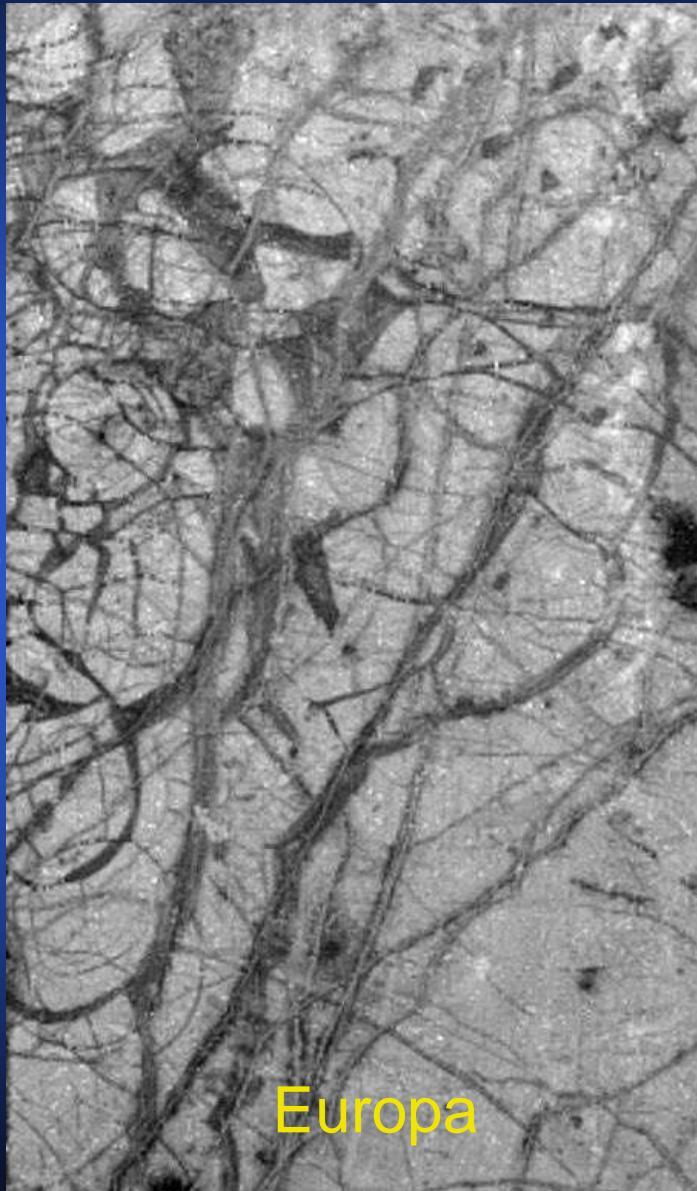
Приливы на Земле



<http://www.ps.missouri.edu/rickspage/Moon/Tides.html>

Трешины на Европе, спутнике Юпитера

<http://apod.nasa.gov/apod/ap960814.html>



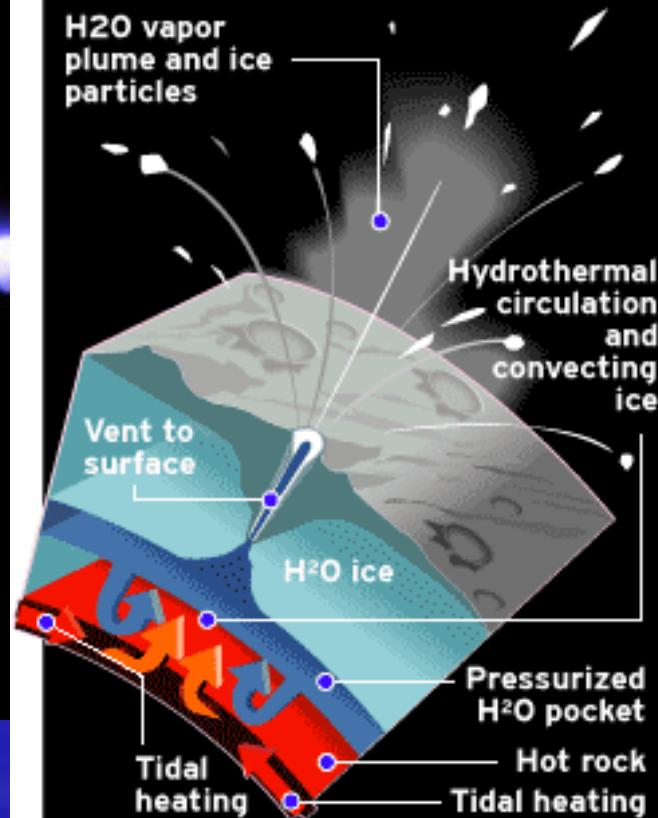
<http://www.scientencedaily.com/releases/2011/01/110126131538.htm>

Извержения на Энцеладе, спутнике Сатурна

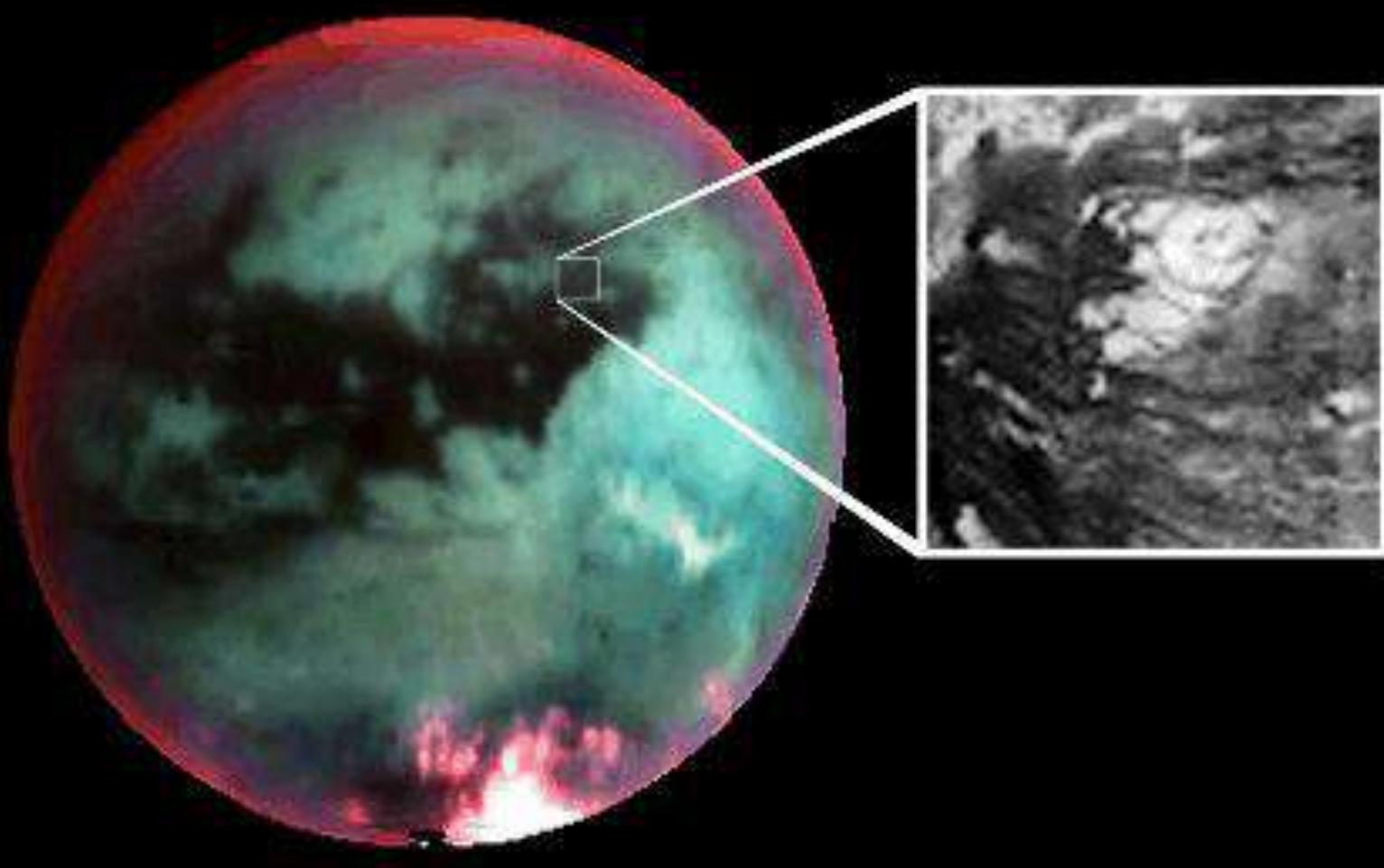


Enceladus erupts

Scientists say subsurface reservoirs of pressurized liquid water could fuel geysers on the Saturnian moon, sending jets of icy material into space.



Ледяной вулкан на Титане, спутнике Сатурна?



Криовулканизм на Тритоне, спутнике Нептуна?

- Bluish streaks – geysers of nitrogen?

