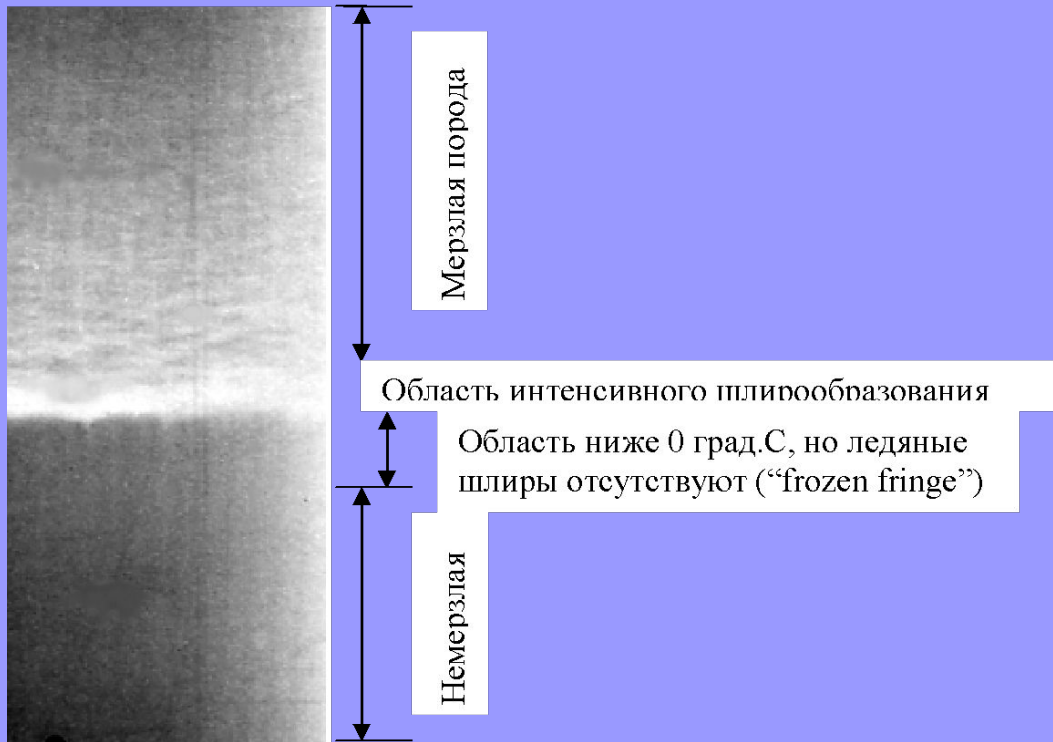
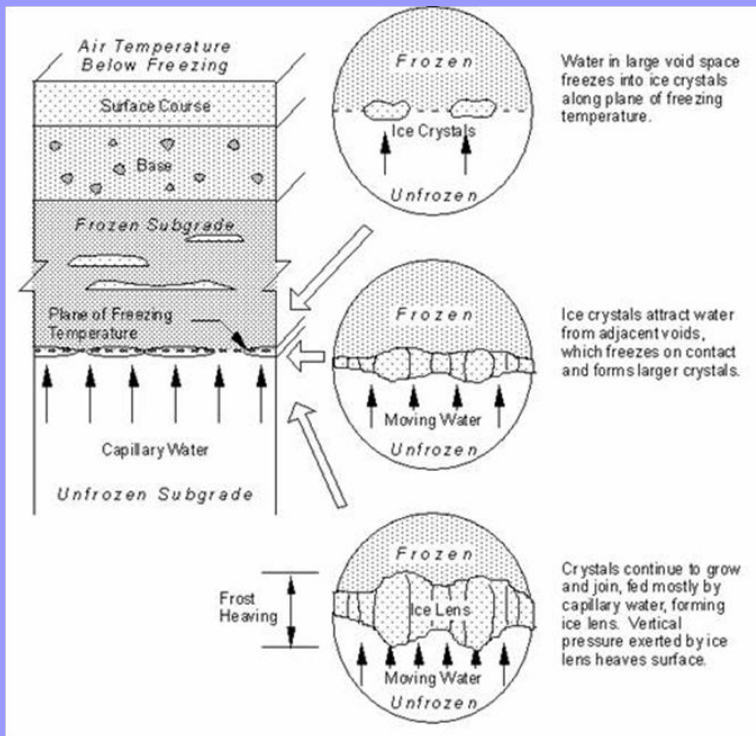


A photograph of a large, layered rock formation in a desert landscape. The rock is light-colored with distinct horizontal strata. The sky is a gradient of orange and red, suggesting a sunset or sunrise. The foreground is a sandy, undulating desert floor. The text "Общая геокриология" is overlaid in white at the bottom.

# Общая геокриология



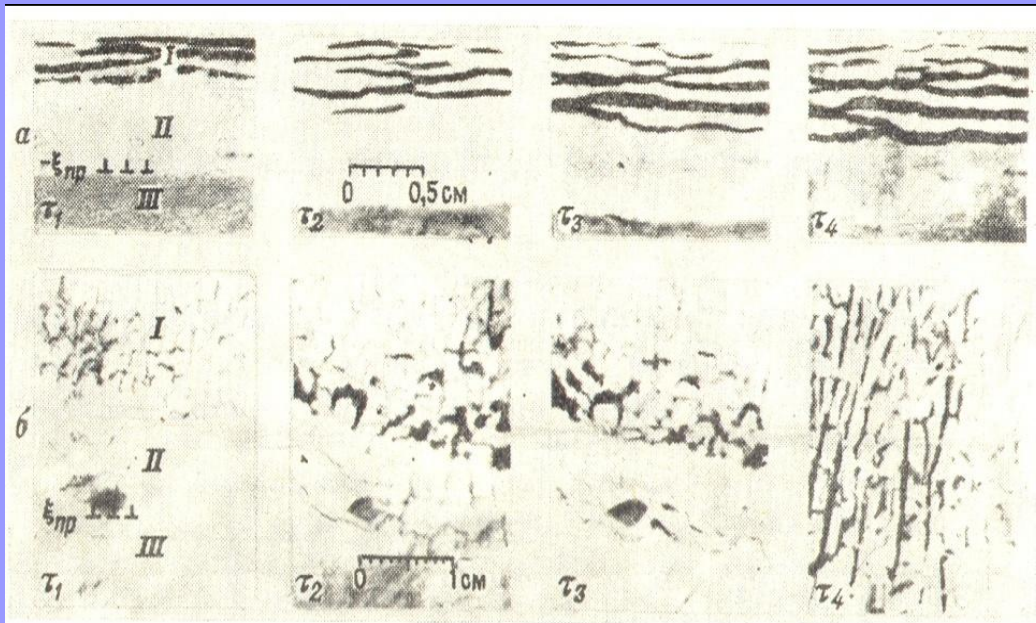
Аллювиальный суглинок при промерзании при температуре около  $-6^{\circ}\text{C}$ ; строение переходной промерзающей области («зоны промерзания»); вертикальный размер образца 10 см. Фото С.Акагава



Представление о **протяженной зоне промерзания** с отдельными центрами кристаллизации является основополагающим для понимания строения мерзлых пород. В англоязычной литературе для обозначения такого объемного промерзания вблизи нулевой изотермы используется термин «fringe», означающий в переводе «бахрома», или «кайма».

**Криогенное строение** определяется первичным строением отложений и условиями промерзания.

# Зарождение и рост шлиров льда в промерзающих глинах каолинитового (а) и монтмориллонитового (б) состава

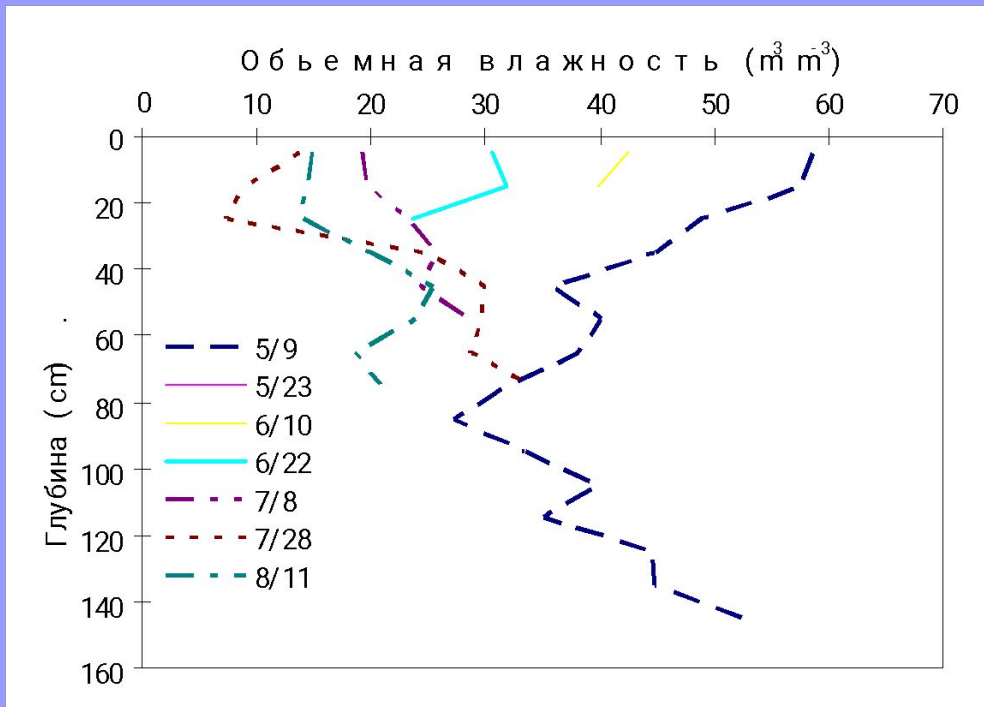


- 1 – мерзлый участок со сформировавшейся ранее шлировой криотекстурой, льдовыделение в данный момент уже почти отсутствует
- 2 – промерзающий участок («зона промерзания»), куда происходит миграция влаги и где происходит зарождение микропрослоев льда и их развитие
- 3 – талая обезвоживающаяся часть грунта

# Включения в лед

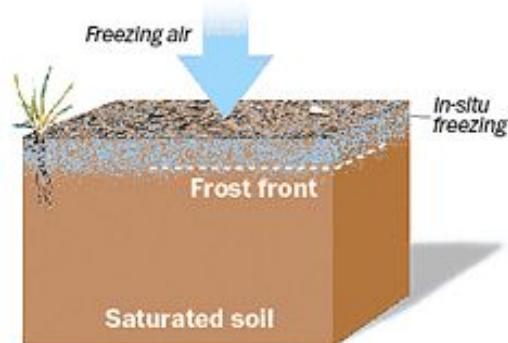


# Изменение влажности при промерзании

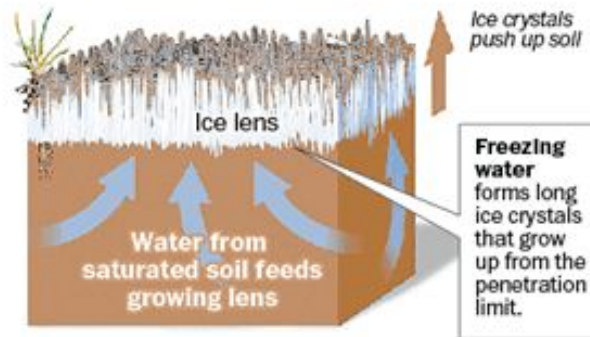


# Миграция влаги

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.

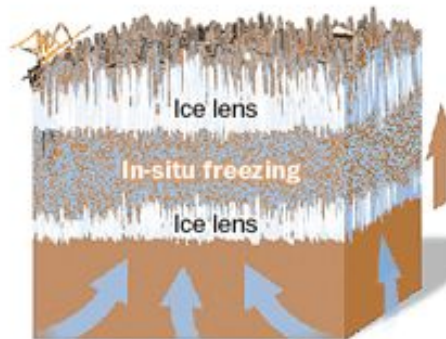


The heavy lifting begins when the frost front reaches a **penetration limit**. Fed by water from the saturated ground below, an **ice lens** forms and pushes upward, displacing and lifting the in-situ frozen soil.



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 1/2 feet into the ground to protect them from heaving frost.



СКОЛЬКО ВОДЫ  
ПЕРЕДВИГАЕТСЯ?

$$dq = kdG = k \left[ -Q \frac{dT}{T} - (v_{ice} - v_w) dp \right]$$



# Передвижение воды

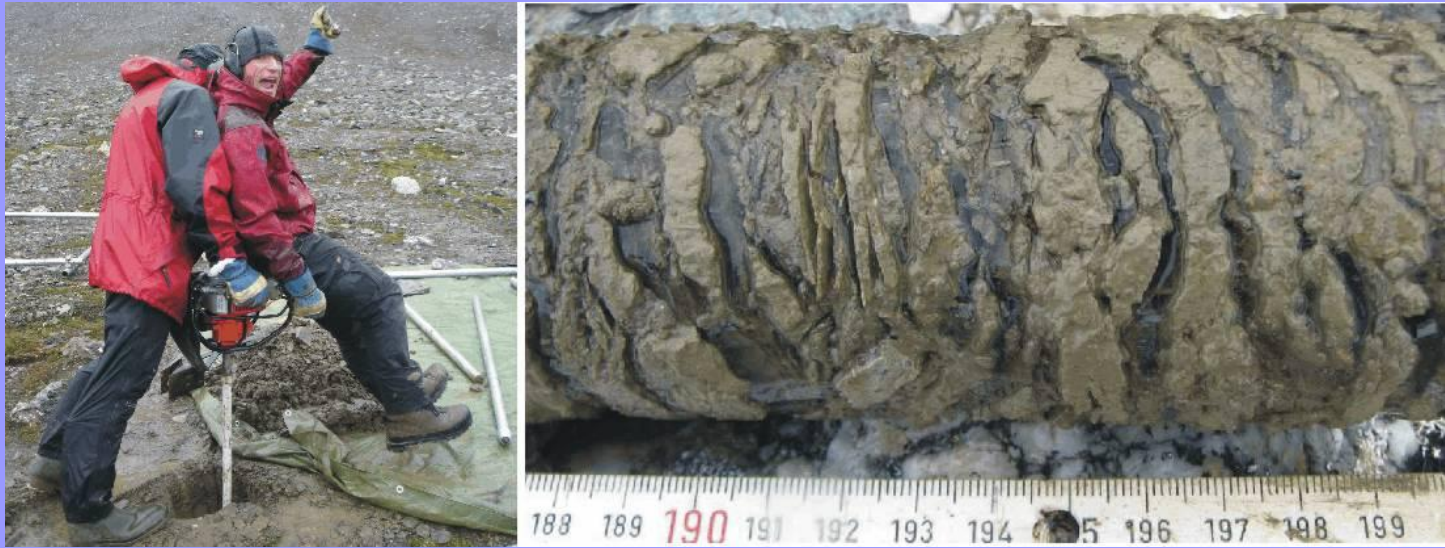
$$q_s = \alpha_{11} \left( \Delta P + \rho_s Q \frac{\Delta T}{T} \right)$$

Формула Б.В.Дерягина (1987) для миграции влаги

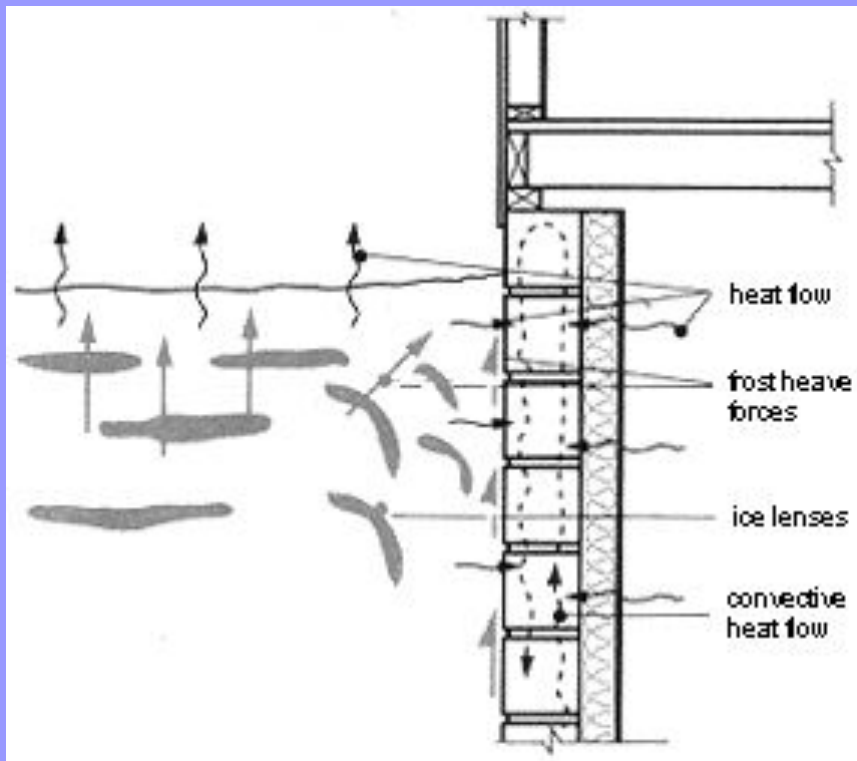
# Передвижение пара

$$V = \frac{K}{P} * \frac{P_H - P_B}{l} = \frac{K * \Delta a}{l}$$

Формула А.Т.Морозова (1938) для миграции парообразной влаги



Происхождение слоистой  
криогенной текстуры:  
миграция воды к горизонтальному  
фронту (1)  
и унаследованность текстуры (2)

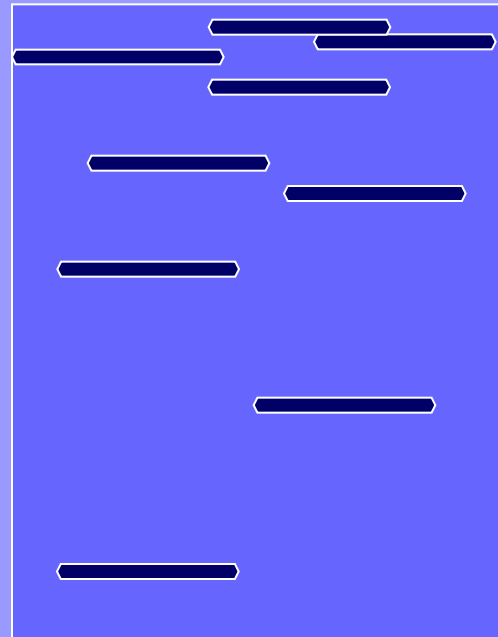


Происхождение слоистой  
криогенной текстуры:  
миграция воды к горизонтальному  
фронту



Происхождение слоистой  
криогенной текстуры:  
унаследованность текстуры

# Слоистые криогенные текстуры: разряжение с глубиной





Слоистые  
криогенные  
текстуры:  
строение  
контакта с  
жильным  
льдом



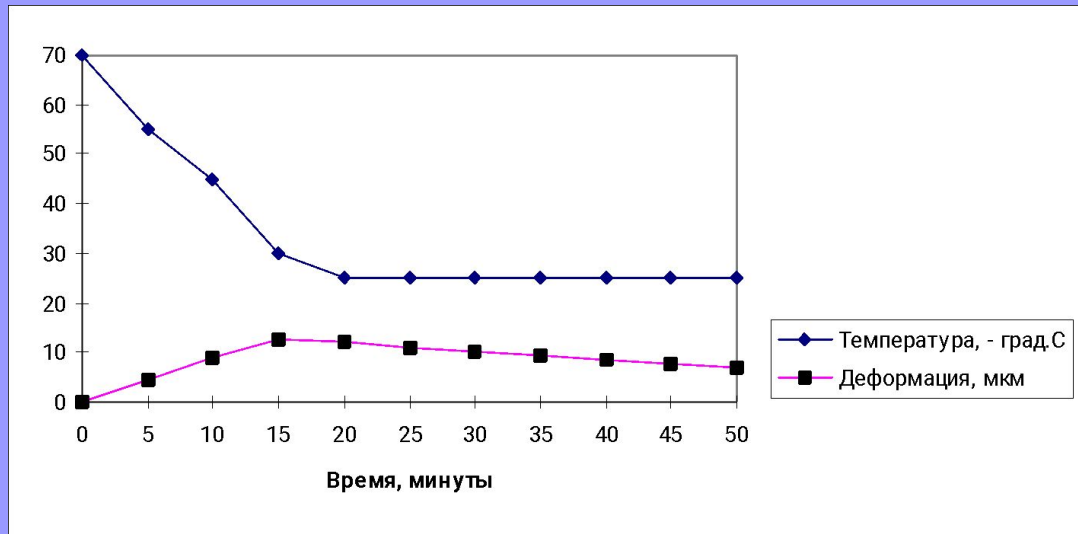
Слоистые  
криогенные  
текстуры: как  
долго могут  
расти  
ледяные  
включения?





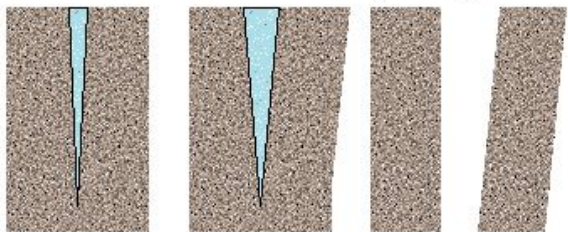
Усадка в  
талой  
зоне

# Температурные деформации



Температурные деформации образца мерзлого суглинка длиной 20 мм при повышении температуры

## Frost Wedging

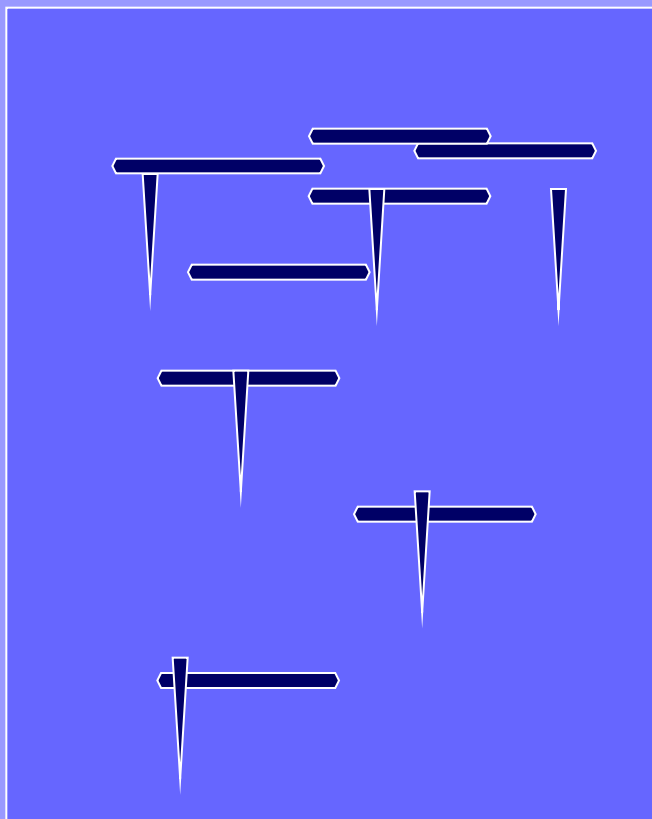


Water-filled  
crack

Freezes to  
ice

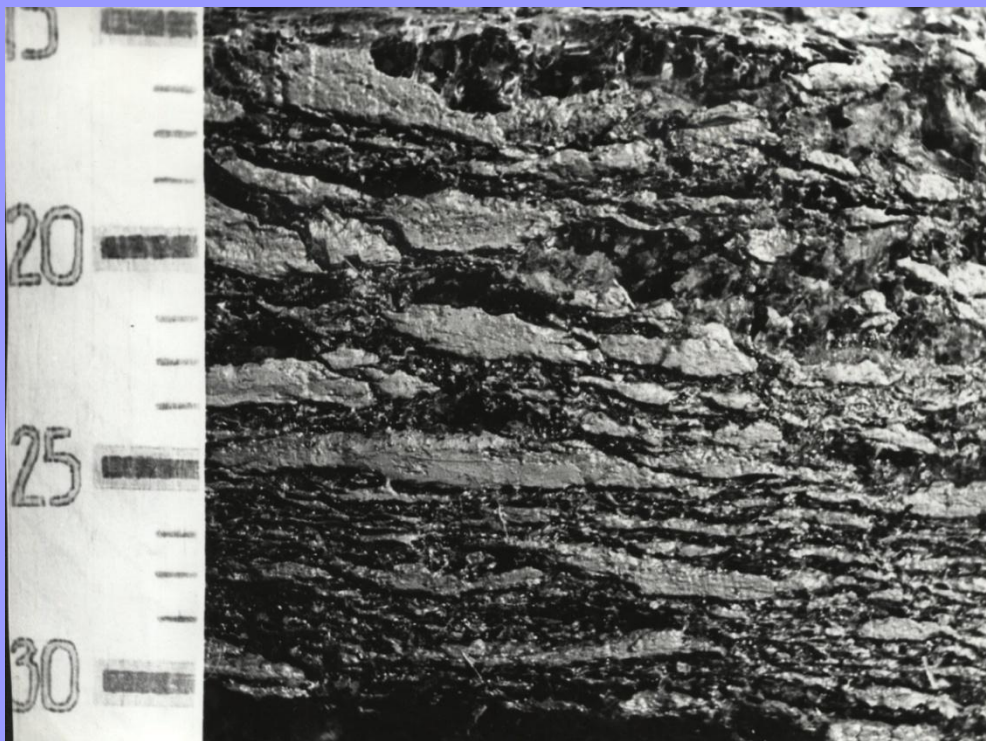
Breaks  
Rock

# Происхождение сетчатой текстуры



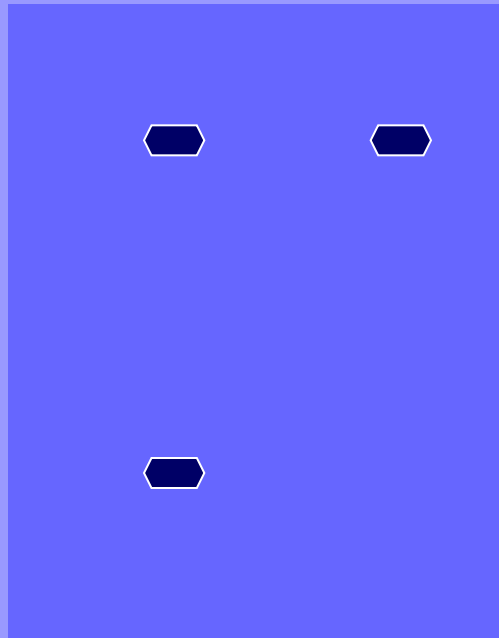
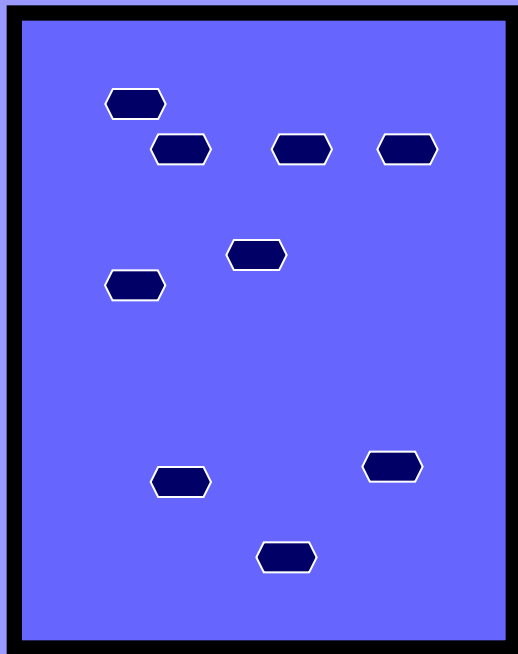


Происхождение сетчатой текстуры

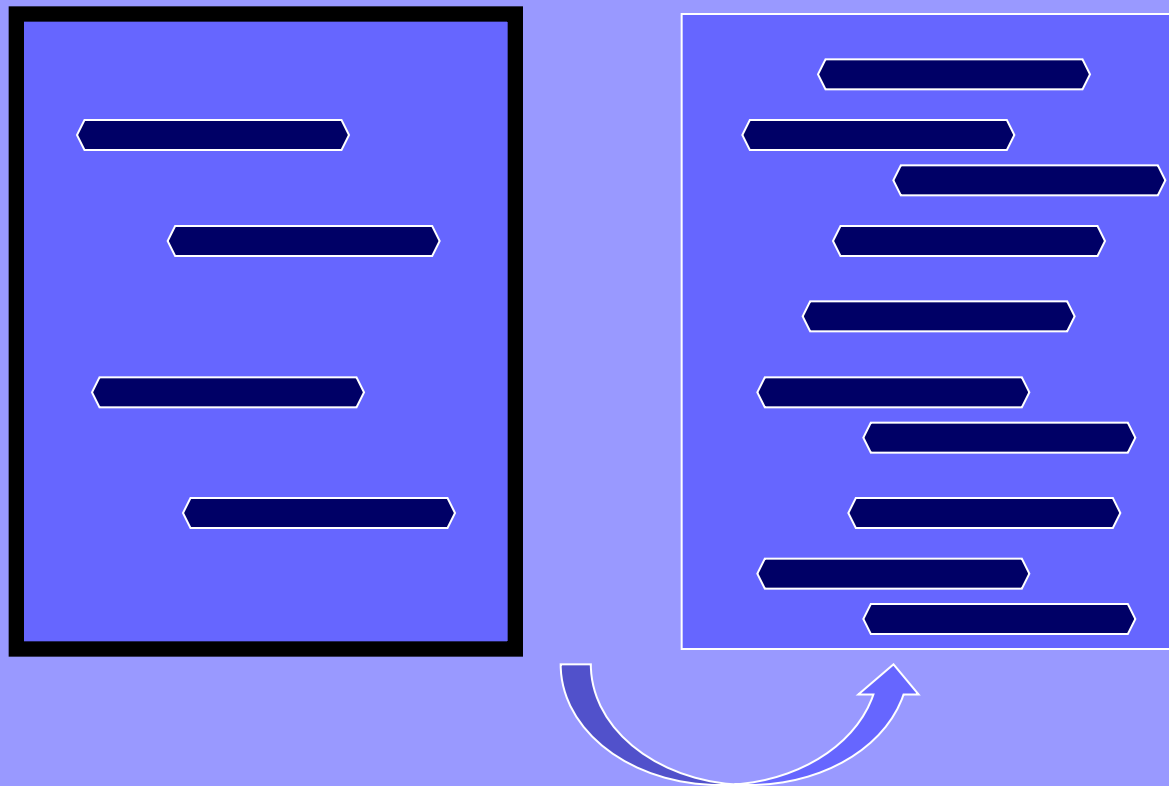


Сетчатые  
криогенные  
текстуры:  
почему столько  
льда?

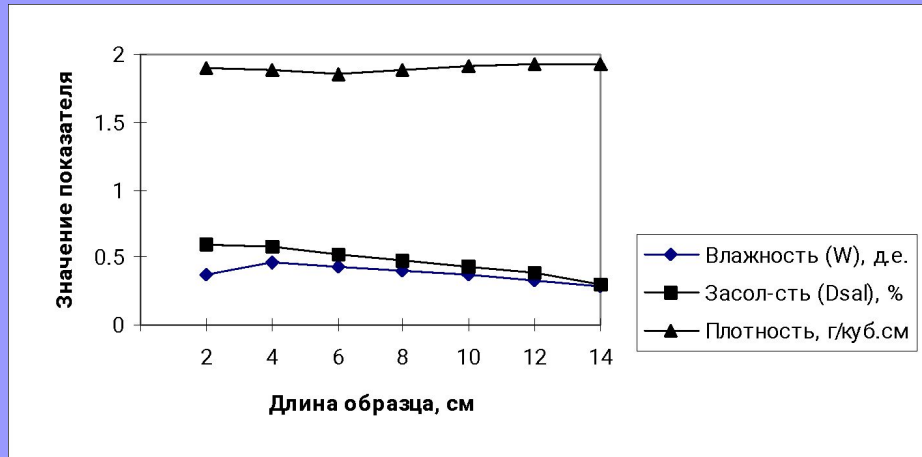
# Открытая и закрытая система: песок - поршневой эффект



# Открытая и закрытая система: глина - миграция влаги к фронту промерзания



# Соли

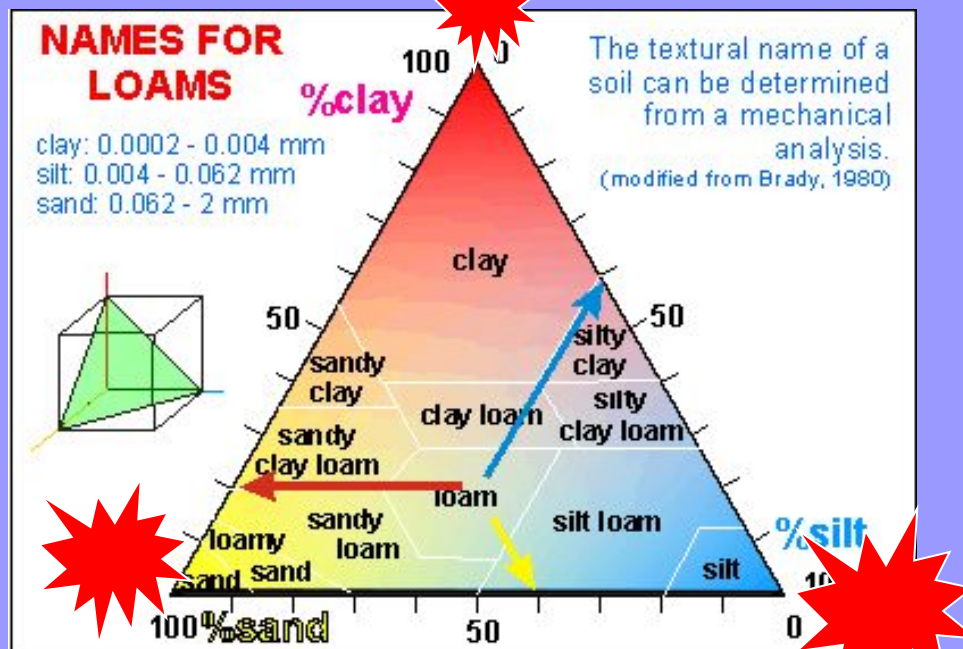


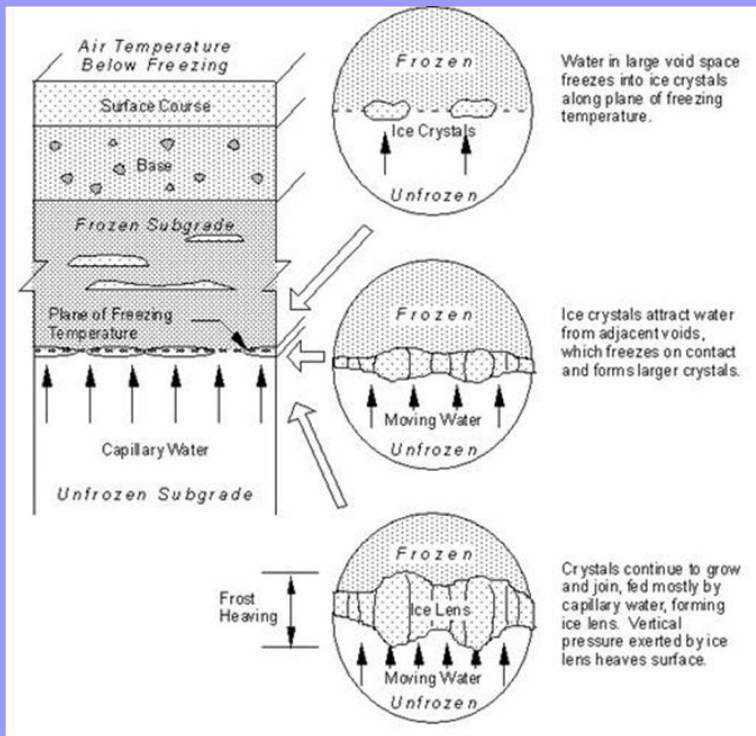
Распределение влажности, солей (засоление морской солью) и плотности по длине образца мерзлого суглинка, промерзавшего сверху (на рисунке слева) в закрытой системе при  $-3.5^{\circ}\text{C}$  при заданной начальной засоленности 0.5%



# Влияние дисперсности в глинистых породах:

Суглинок > супесь > глина

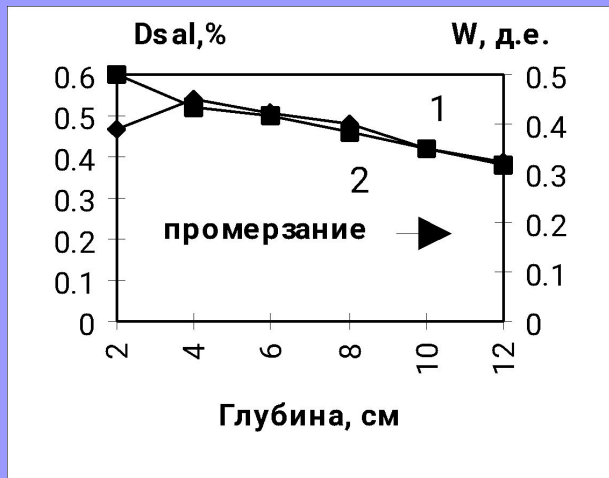




Представление о **протяженной зоне промерзания** с отдельными центрами кристаллизации является основополагающим для понимания строения мерзлых пород. В англоязычной литературе для обозначения такого объемного промерзания вблизи нулевой изотермы используется термин «fringe», означающий в переводе «бахрома», или «кайма».

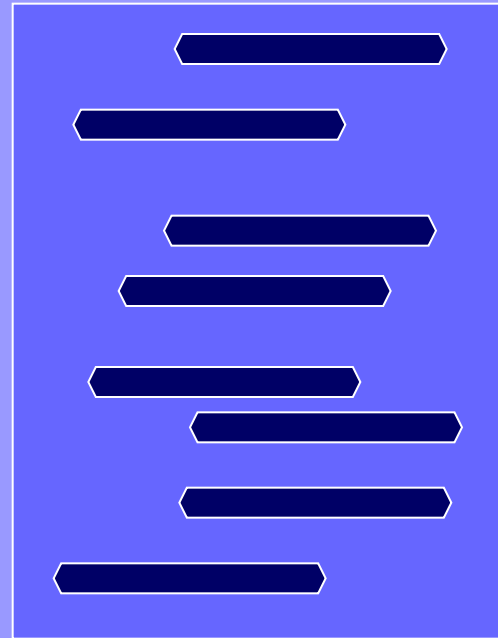
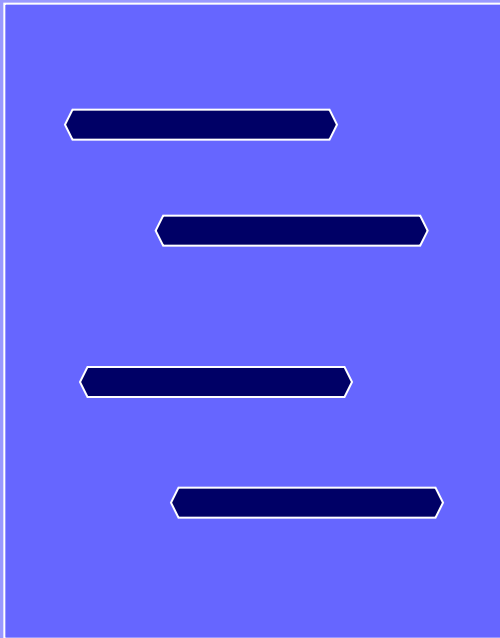
**Криогенное строение** определяется первичным строением отложений и условиями промерзания.

# Влияние состава: дисперсность



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

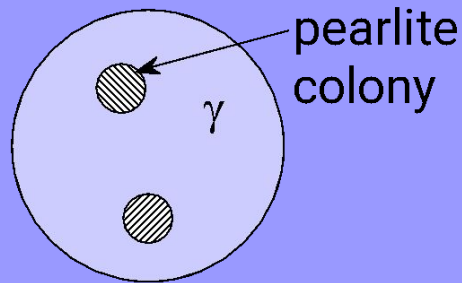
# Влияние влажности



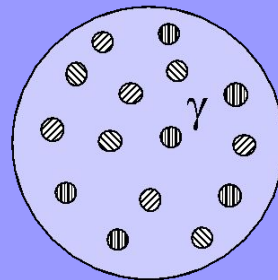
# Влияние минерального состава

*Каолин > гидрослюда >  
монтмориллонит*

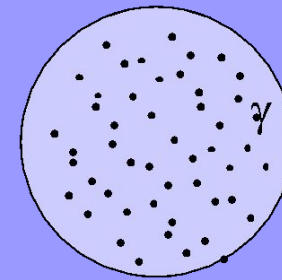
# Влияние скорости промерзания



T just below  $T_E$   
Nucleation rate low  
Growth rate high

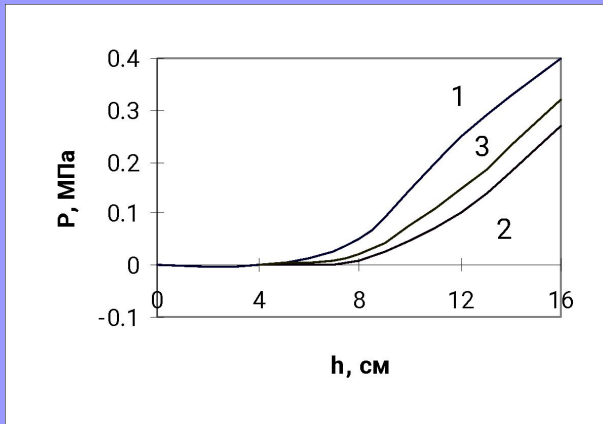


T moderately below  $T_E$   
Nucleation rate med  
Growth rate med.

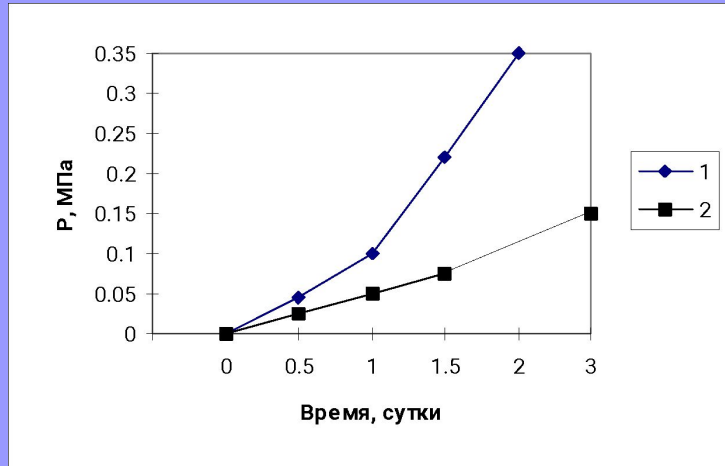


T way below  $T_E$   
Nucleation rate high  
Growth rate low

# Давления и напряжения



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

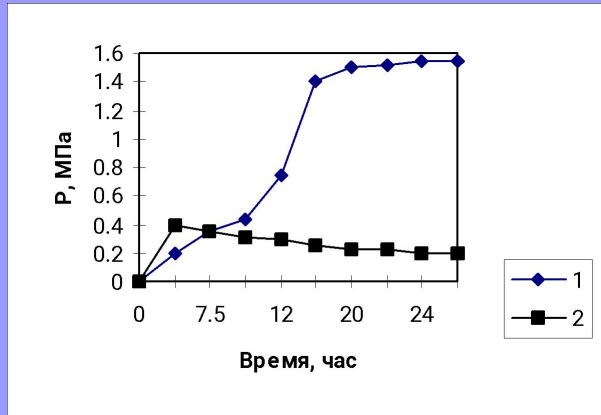


## Открытая и закрытая система

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



# Одностороннее и всестороннее промерзание

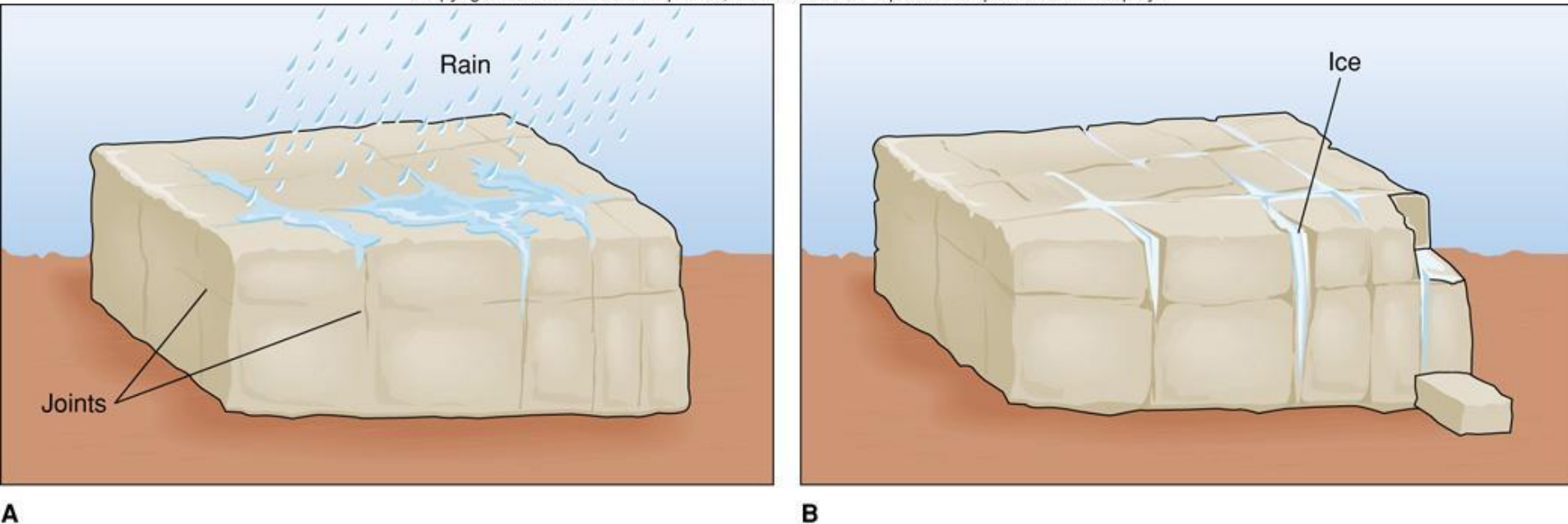


Напряжения пучения при промораживании при  $-5^{\circ}\text{C}$  пятисантиметрового образца суглинки: 1 - одностороннее промерзание; 2 - всестороннее промерзание. Жесткость датчика  $K_d=1500$  МПа/м.

# Mechanical Weathering

**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 1.0–2.0cm	Cycles at 5.0cm	Cycles at 20cm	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) Vilyusk, 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.

# Mechanical Weathering

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

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



B

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

Frost wedging



# Криогенное выветривание

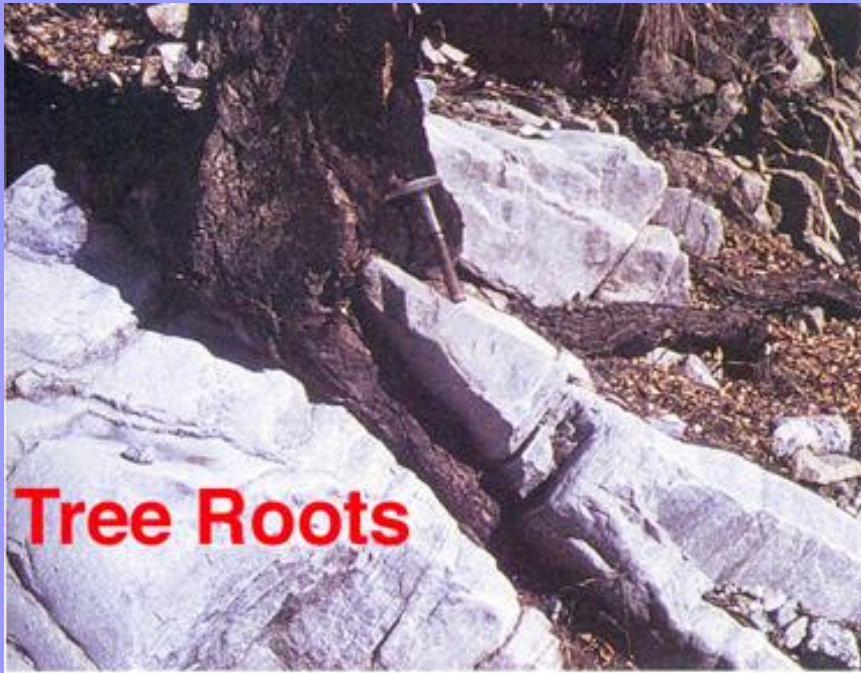
**Table 4.7.** Some experimental data that demonstrate the instability of quartz particles when subject to cryogenic weathering.

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	1
		Calcite	6	1	20	30	29
		Biotite	98	–	1	–	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.

# Mechanical Weathering

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

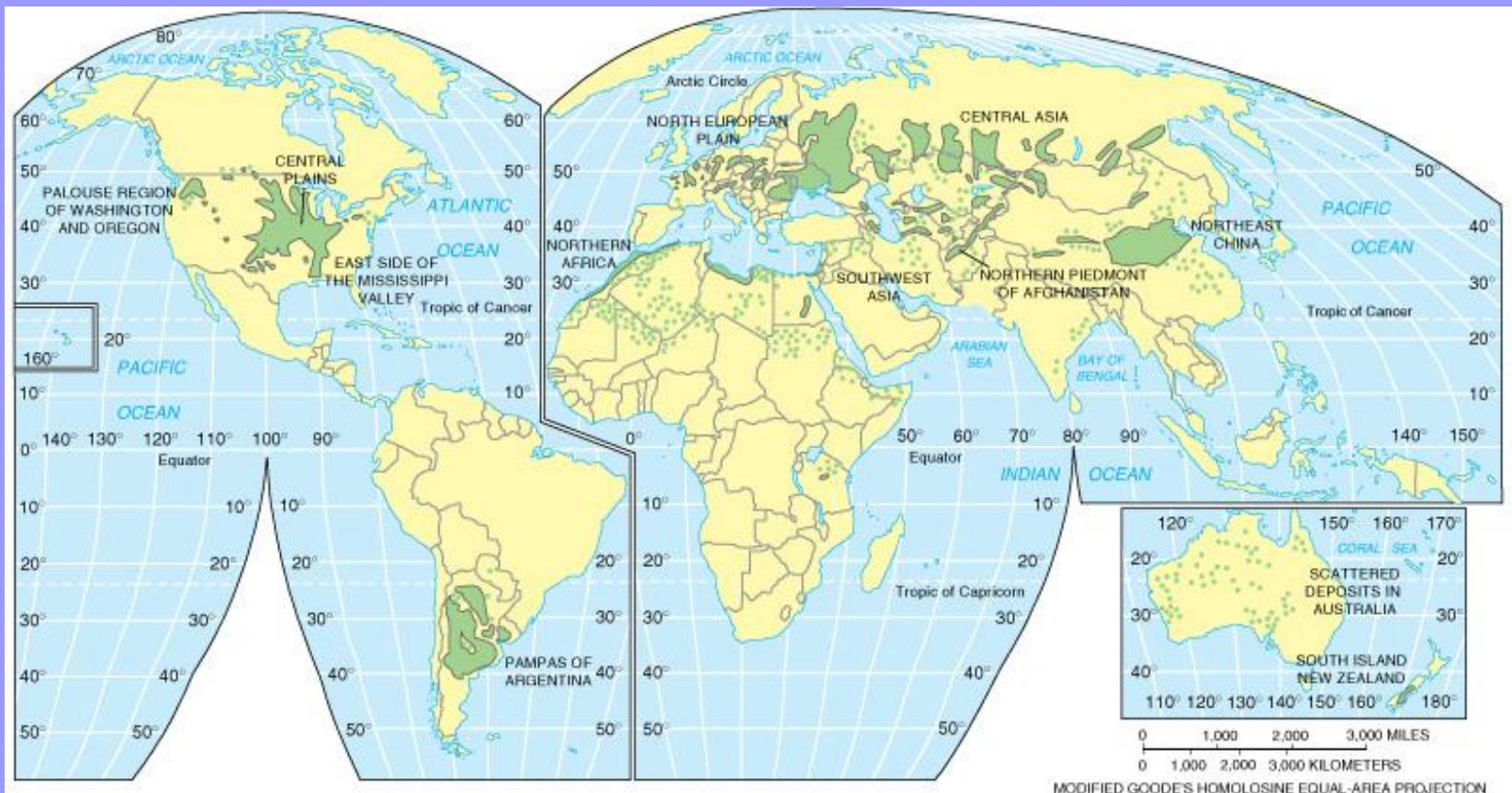


**Root Systems:** dominant in cold/dry climates.



Name a few examples of significant loess deposits on Earth.

**Answer:** 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 km<sup>2</sup>, are thought to be derived from desert rather than glacial sources.





## LAST GLACIAL MAXIMUM DUST SOURCES: MODELED

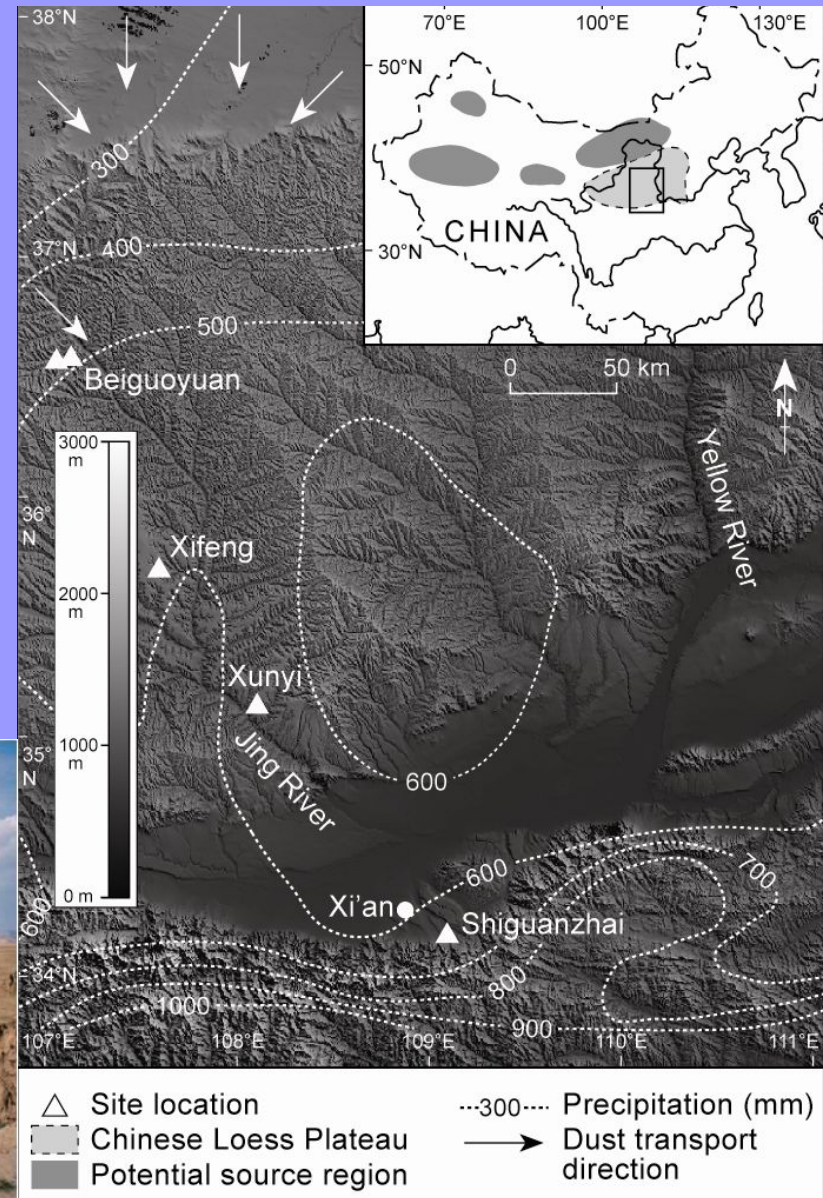


FROM: Mahowald et al. (1999), *JGR*  
Kohfeld & Harrison (2000), *QSR*

# Chinese loess

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

Terrestrial equivalent of ocean sediments'



Грунт	Наименование по В.В. Охотину по ГОСТу	Гранулометрический состав, % Размер частиц, мм								Плотность	W <sub>p</sub> %	W <sub>f</sub> %	I <sub>p</sub>	Возраст	Место отбора, описание
		1-0,05	0,05-0,25	0,25-0,075	0,075-0,05	0,05-0,025	0,025-0,01	0,01-0,005	<0,005						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Супесь (Еркута-Яха)	Супесь тяжелая пылеватая _____ супесь	-	-	-	25	63	5	7	-	2.66	22	27	5	III <sup>2-3</sup>	На трассе проектируемой железной дороги, из отложений 3-й морской террасы,
Супесь (п. Бованен-ково)	Супесь легкая пылеватая _____ супесь	-	-	2	7	68	13	8	2	2.75	30	35	5	IV	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 лессовых 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..

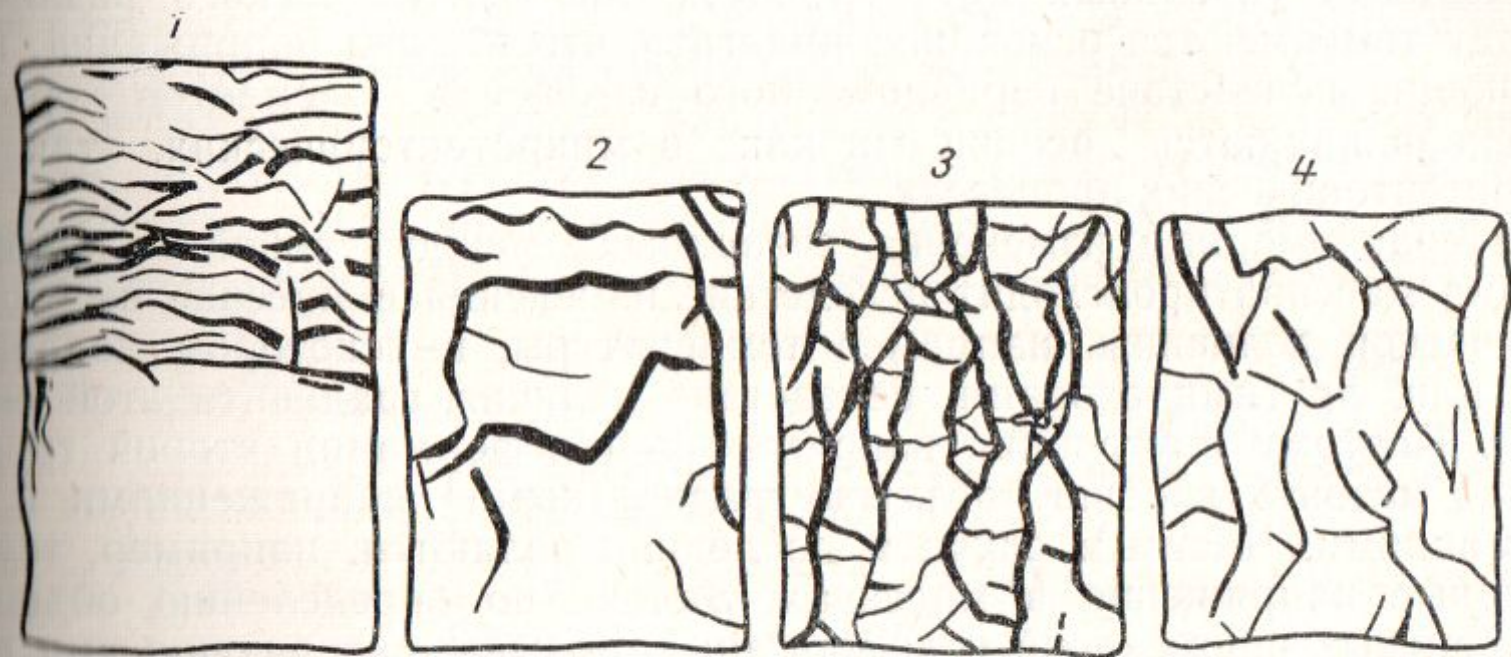
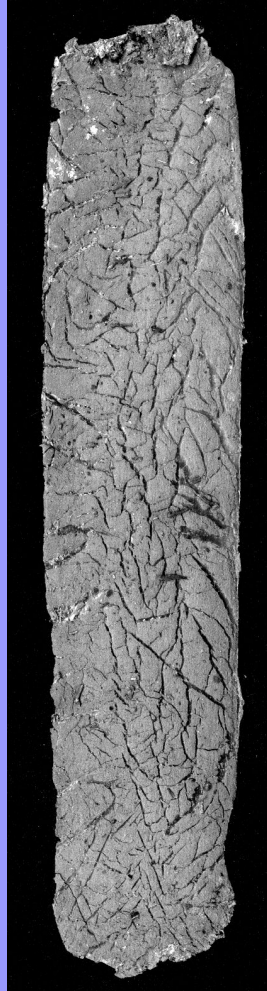
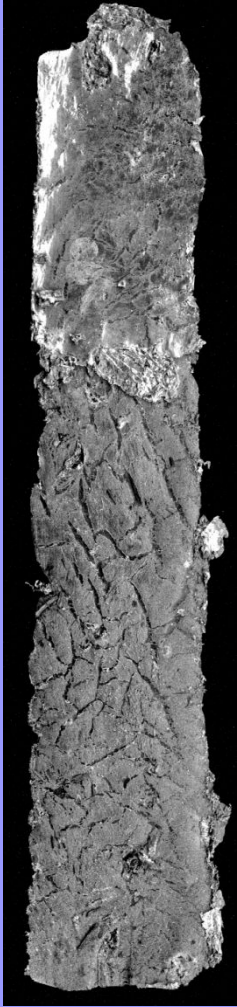
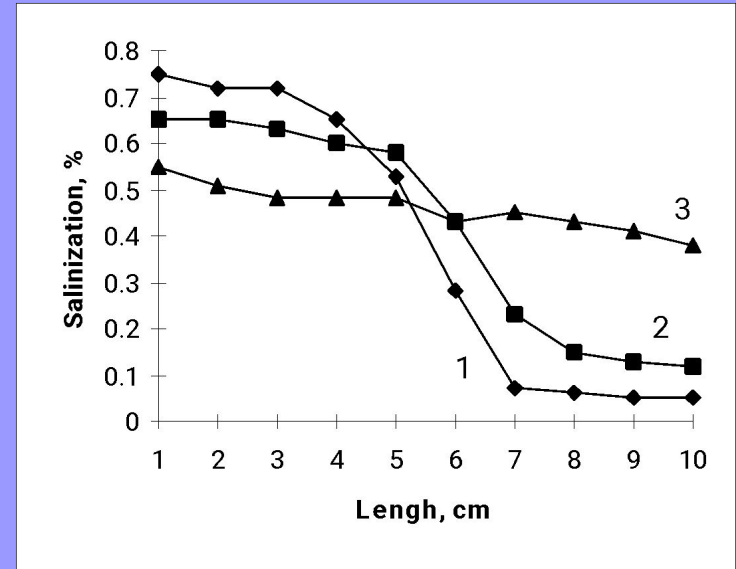
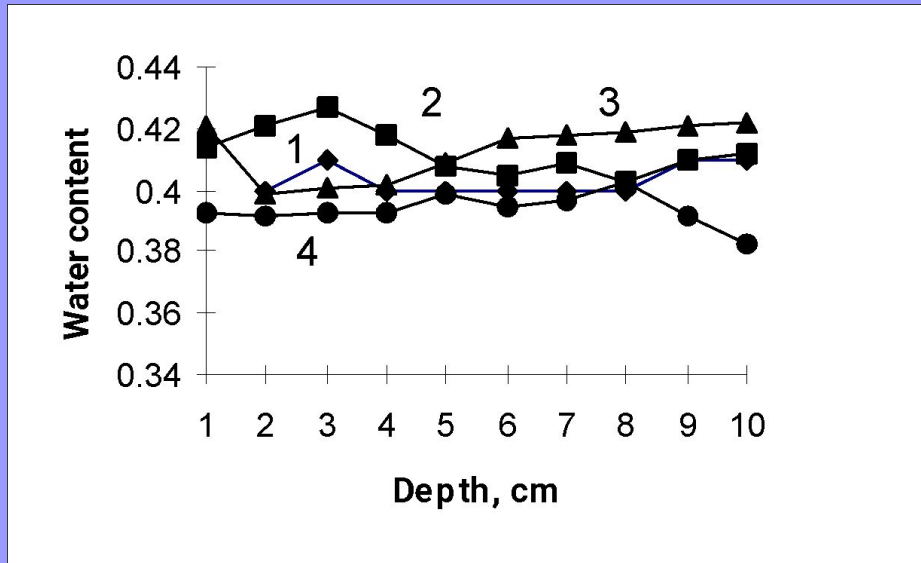


Рис. 55. Криогенная текстура образцов покровного суглинка (1, 2, 3, 4), насыщенных соответственно катионами  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  после их промерзания сверху (по З. А. Нерсесовой)



Миграция в  
мерзлых породах

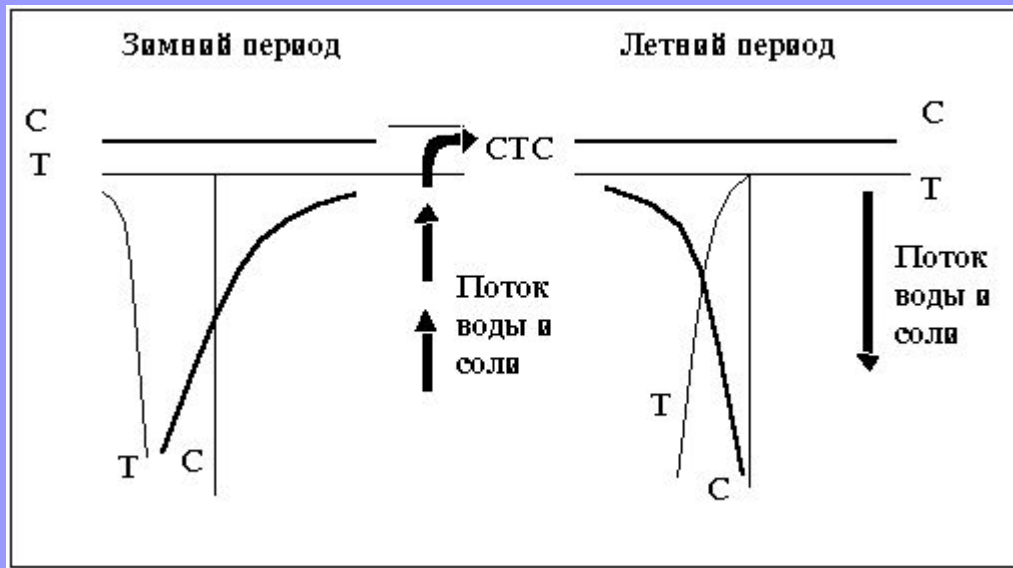
# Изменения содержания солей и влаги во времени в мерзлых породах



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

Salinization distribution in the marine silt at the temperature  $3^{\circ}\text{C}$ : 1 - initial; 2 – after 7 months; 3 – after 11 years of experiment

# Сезонная миграция в мерзлых породах



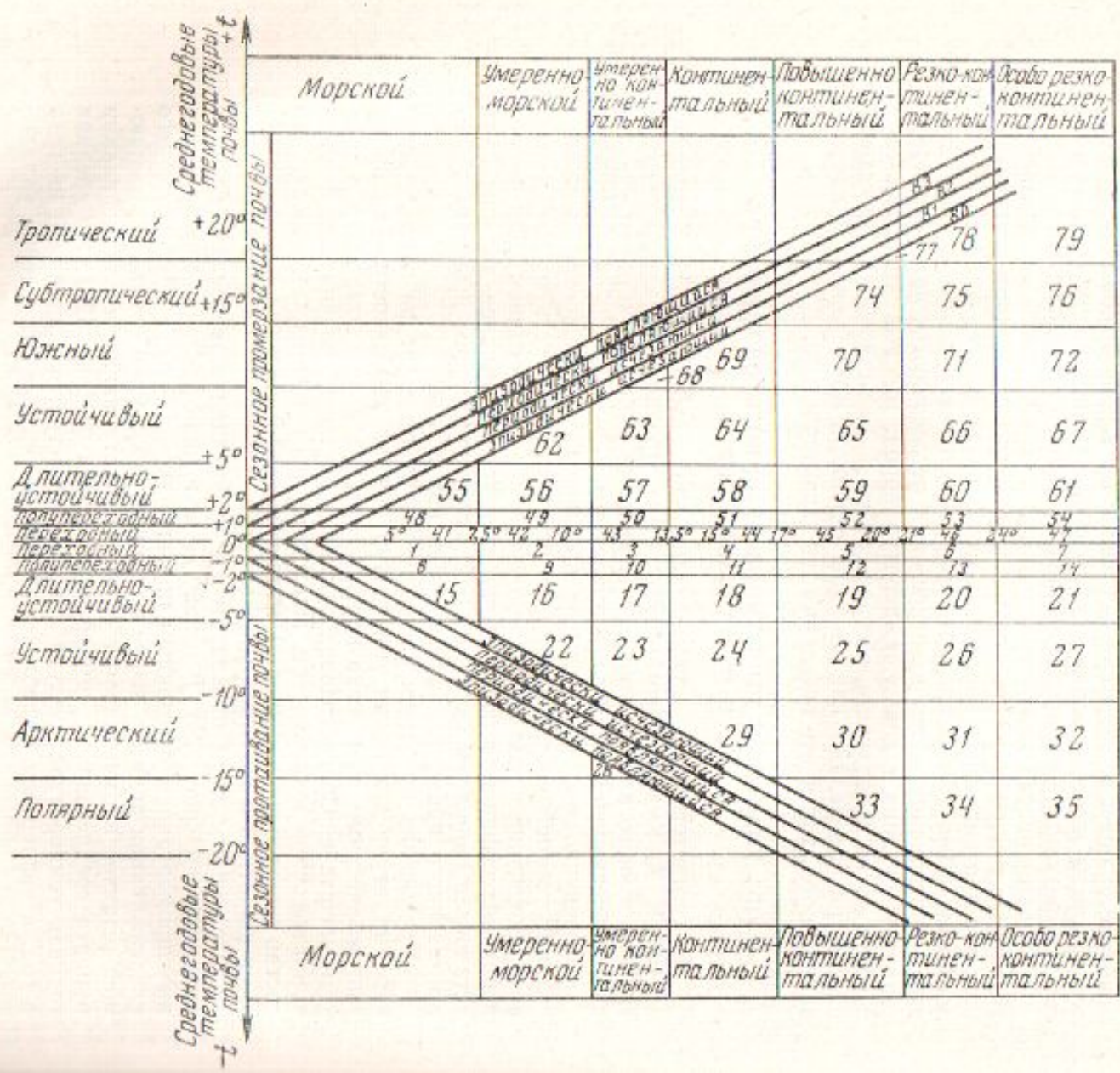


мерзлая  
порода

лед

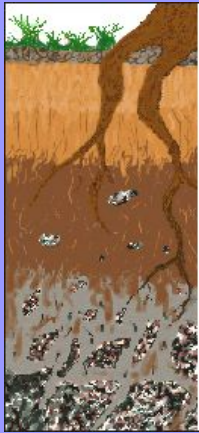
лед





Амплитуды температур на поверхности почвы

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



### SOIL STRUCTURE

**O-horizon:** leaf litter, organic material

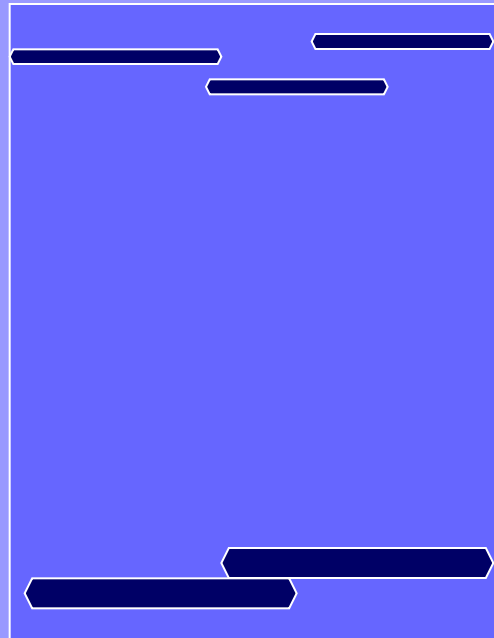
**A-horizon:** plough zone, rich in organic matter

**B-horizon:** zone of accumulation

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

**R-horizon:** unweathered parent material

# Промерзание СТС



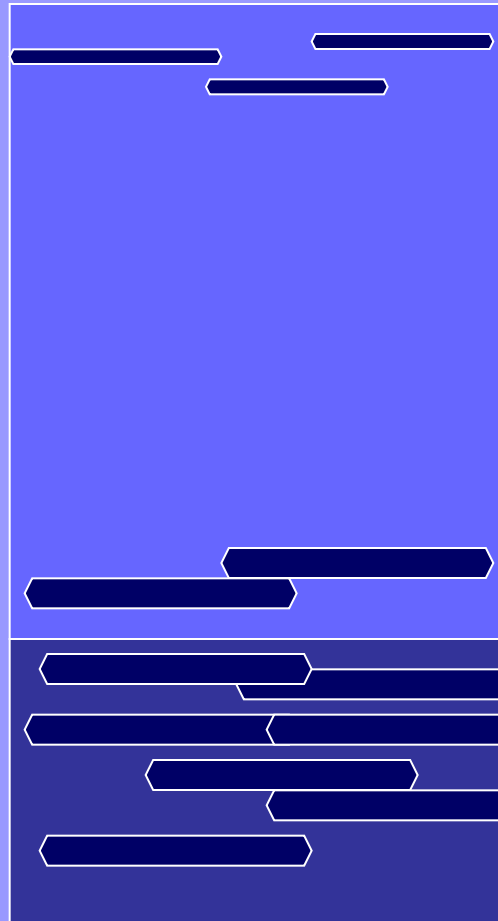
BBC

# СТС и льдистый горизонт в кровле мерзлоты

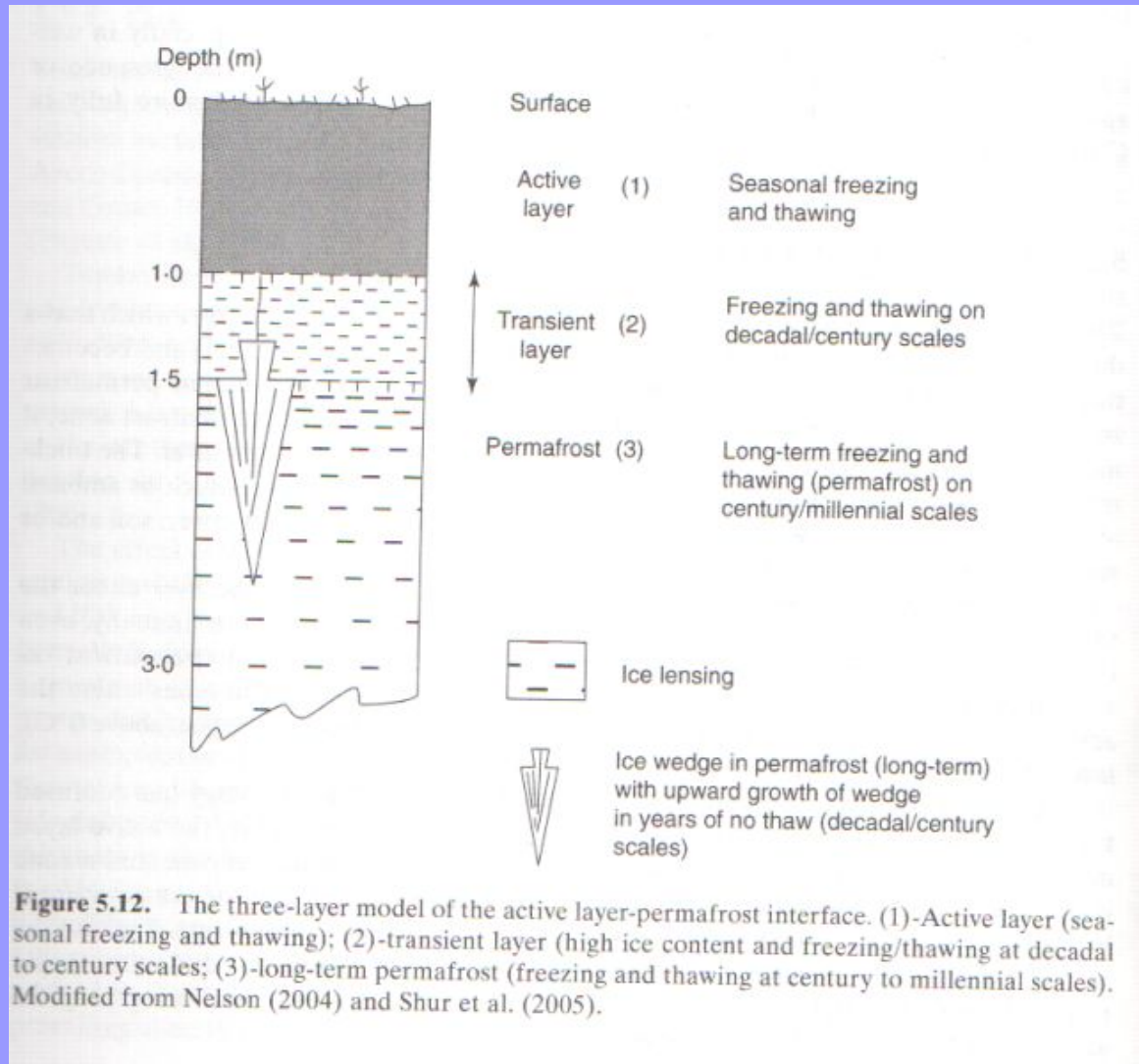
СТС - сезонноталый слой

---

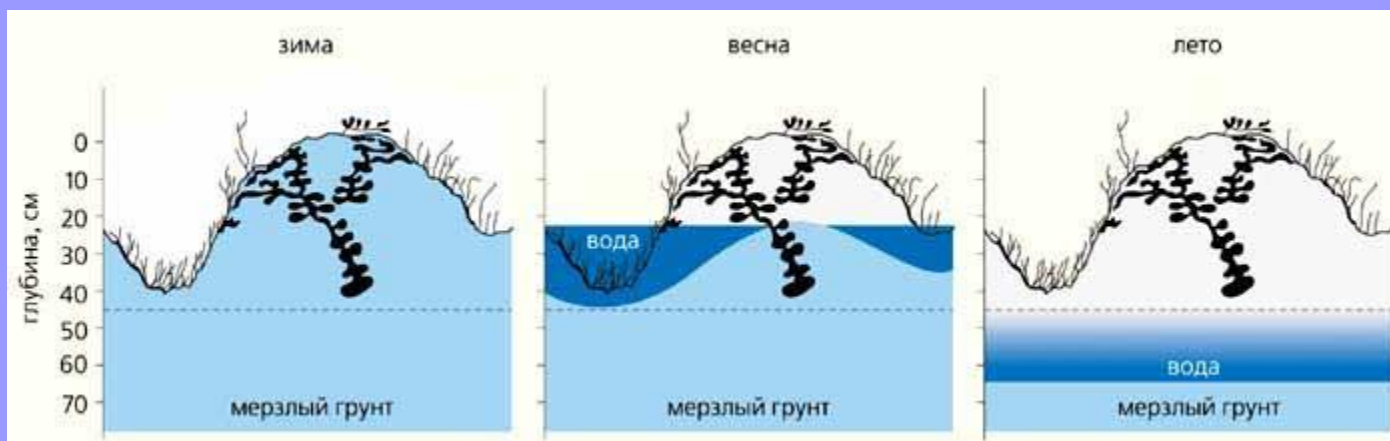
ММТТ -  
многолетнемерзлые  
породы



# СТС и переходный слой



# Промерзание СТС: неравномерность





Бугор пучения

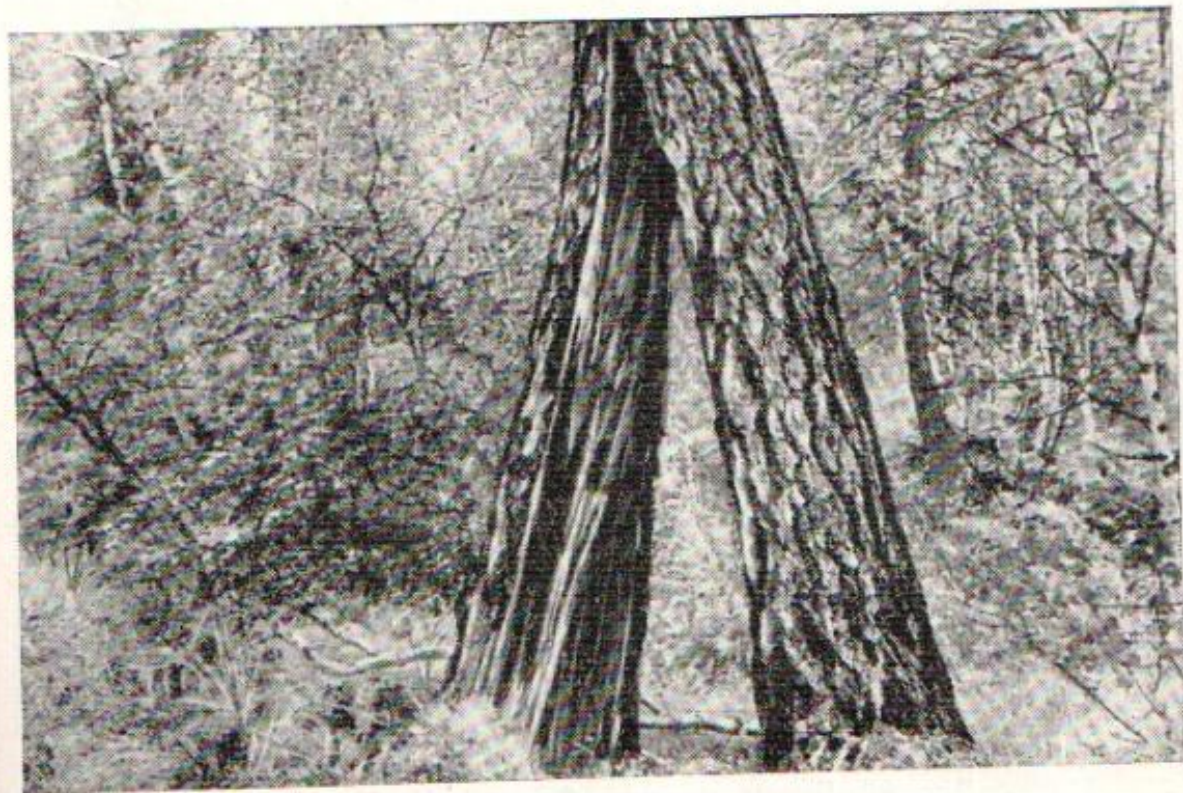


Рис. 85. Лиственница, разорванная снизу растущей линзой льда, расширяющей почву. Фото А. П. Тыртикова



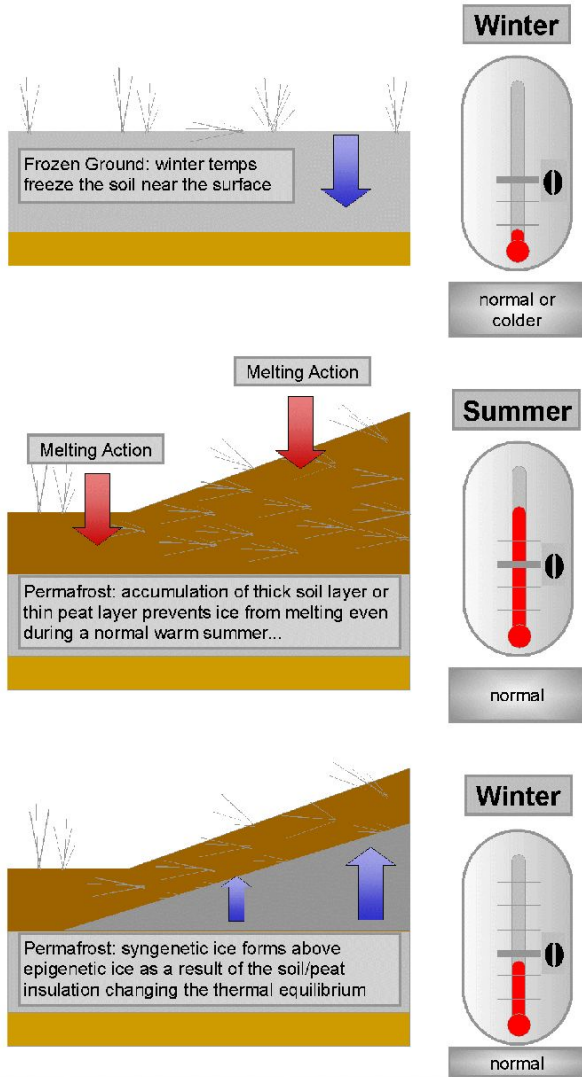
# Разрушение покрытия дорог



# Осадка при оттаивании



## Syngenetic Permafrost (Bottom Up)



# Сингенез и эпигенез

# Сингенез

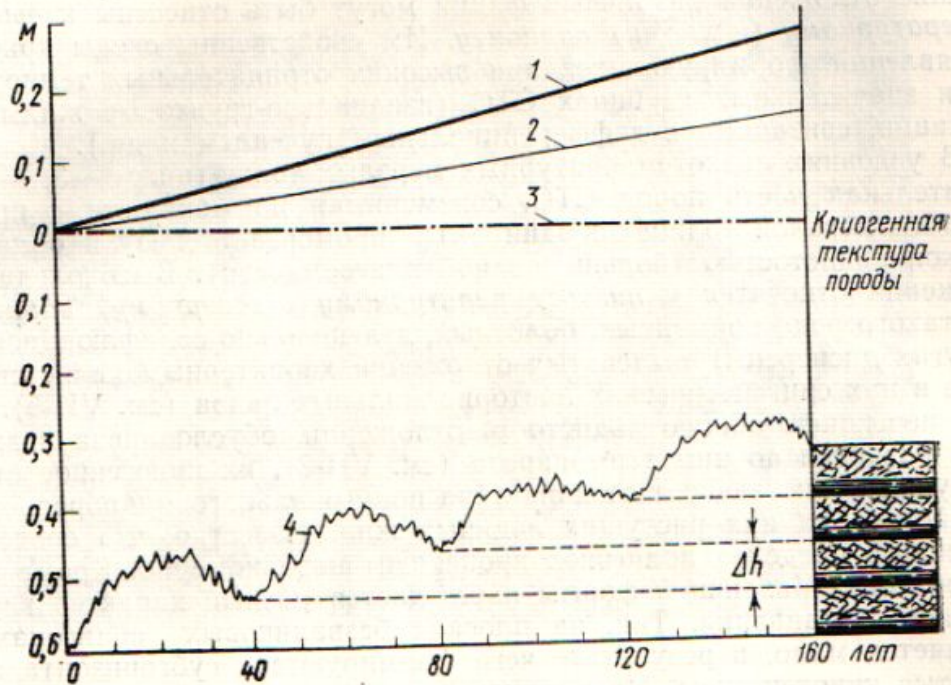


Рис. 156. Схема сингенетического накопления и промерзания осадков при периодических изменениях глубин сезонного оттаивания (период колебания 40 лет, скорость накопления осадков 1 мм в год): 1 — суммарное изменение уровня земли вследствие накопления осадков и сегрегационного льдообразования; 2 — изменение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

# Сингенез

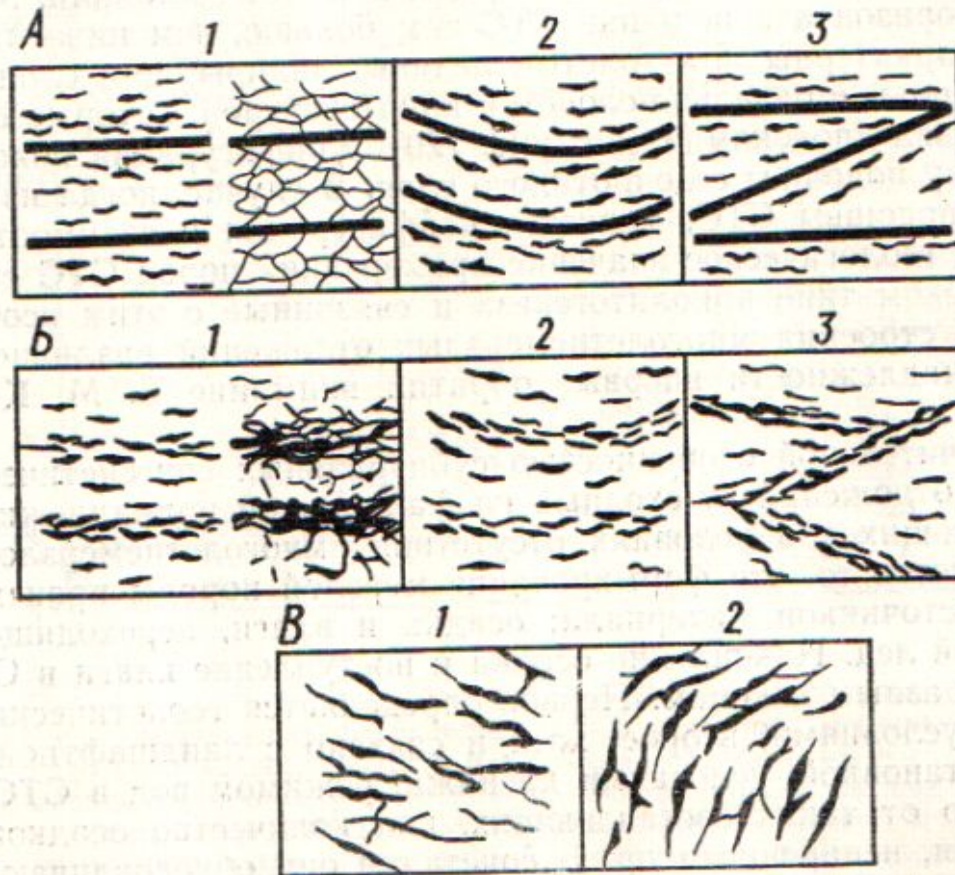
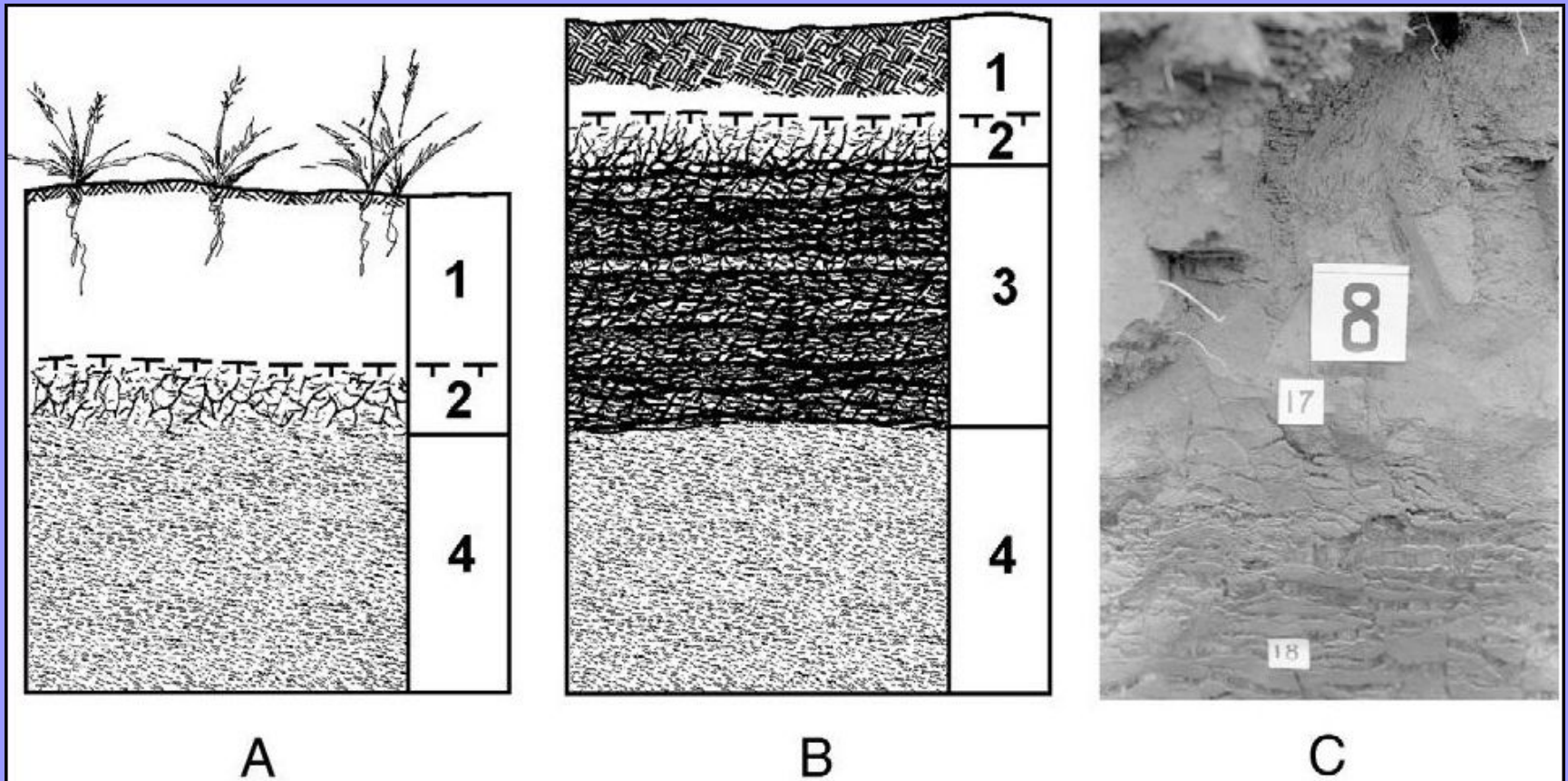


Рис. 155. Основные (руководящие) виды криотекстур, образующиеся при сингенетическом промерзании отложений сезонного слоя снизу (А, Б) и водных осадков (В): А — слоистые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые); Б — поясковые (1 — горизонтальные, 2 — вогнутые, 3 — волнистые); В — решетчатые и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



The nature of the active layer and the upper permafrost. (A). The three-layer model (Shur et al., 2005). Legend: 1 — active layer, 2 — transient layer, 3 — permafrost. (B). The four-layer model of the active layer-permafrost interface with two layers in the transition zone originally proposed by Shur (1988). Legend: (1) — Active layer (seasonal freezing and thawing); 2 — Transient layer (due to variations during about 30 years (the period defining the contemporary climate)); 3 — Intermediate layer formed from part of the original active layer due to environmental changes, primarily organic accumulation, containing aggradational ice. Together, the transient layer and intermediate layer comprise the Transition Layer (4) Permafrost (freezing and thawing at century to millennial scales). (C).

A photo showing the active layer (friable, at top, above large marker), the transient layer (compact, ice poor, below large marker) and the intermediate layer (ice-rich with crustal (ataxitic) cryostructure, near bottom, small markers). The sediments are Yedoma series, Kular, Northern Yakutia, Russia. Large marker is 5×5 cm, smaller markers are 2×2 cm. Photo: Y. Shur

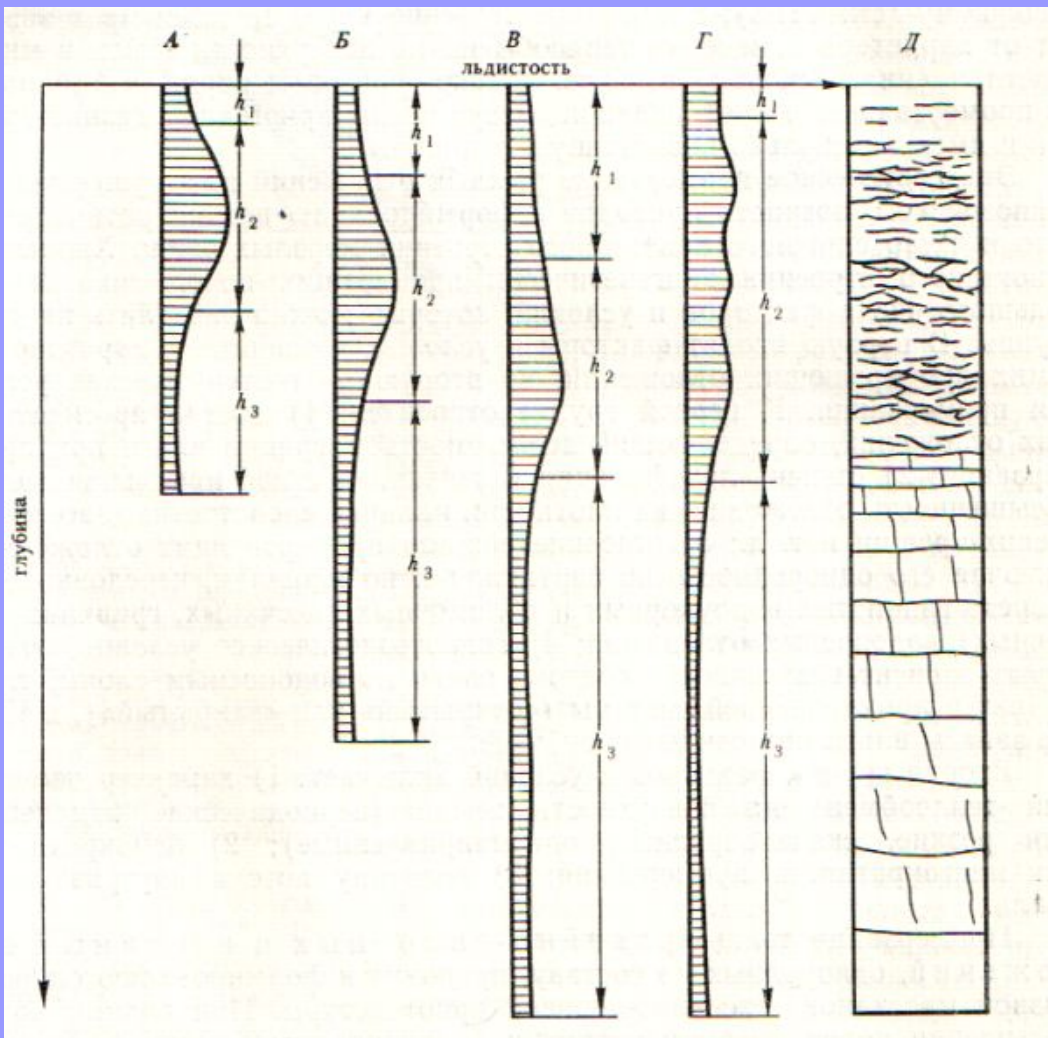
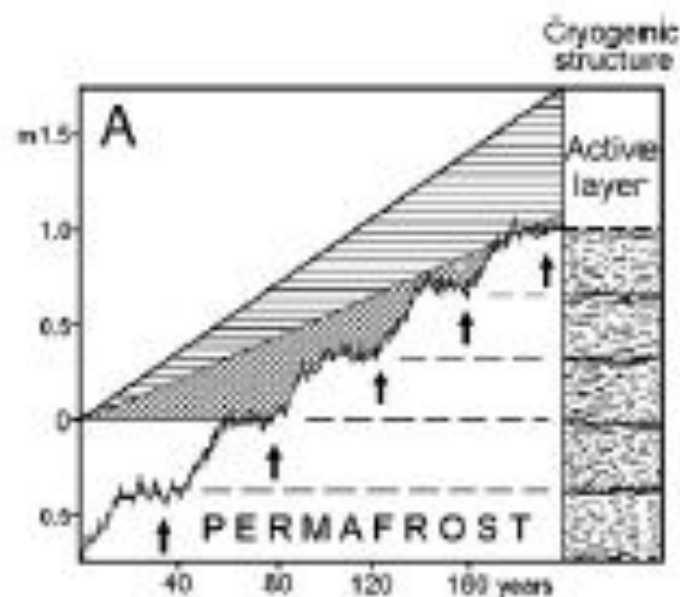





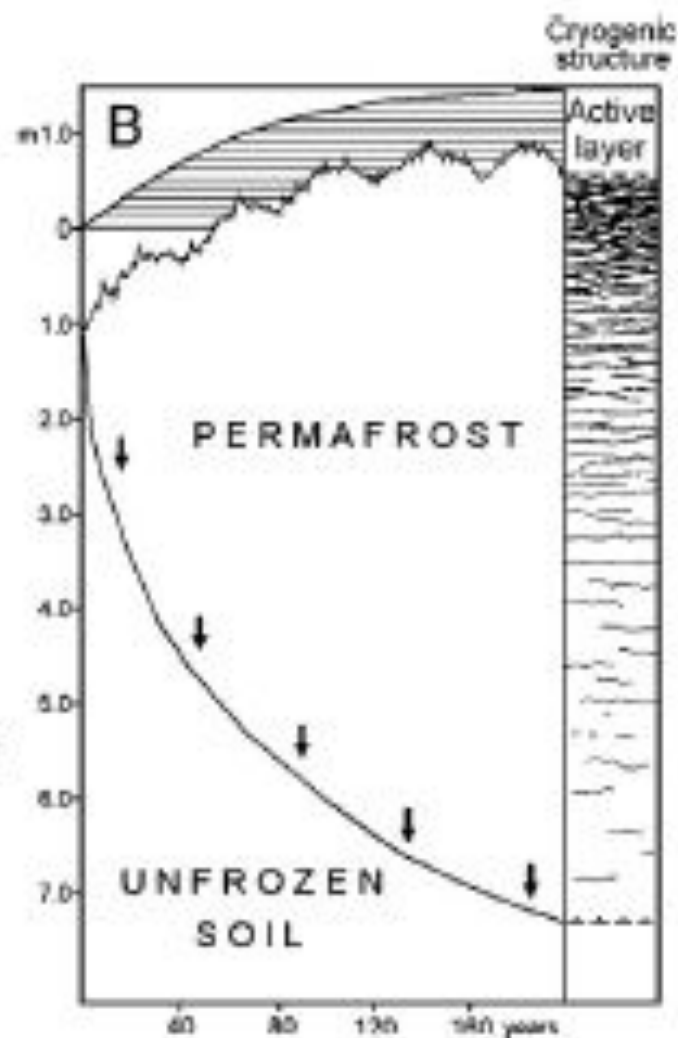


Рис. 159. Схема распределения льDISTости в однородной толще дисперсных многолетнемерзлых отложений в зависимости от длины периода колебаний температур на поверхности Земли ( $T$ ): А — для колебаний с  $T_1$ ; Б — то же с  $T_2$ ; В — то же с  $T_3$  при  $(T_1 < T_2 < T_3)$ ; Г — при наложении колебаний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

Эпигенез


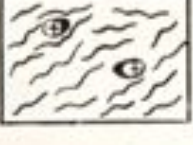
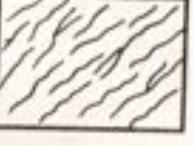







-  - rise of surface due to ice accumulation
-  - rise of surface due to sediment accumulation
-  - permafrost table
-  - direction of permafrost aggradation
-  - variations in the active layer depth





Криогенные текстуры многолетнемерзлых аллювиальных отложений (составил Е. М. Катасонов)

№ п/п	Схематическая зарисовка криогенных текстур	Мощность ледяных включений, мм	Название криогенных текстур	В каких породах, при каких условиях образуется данная криогенная текстура	Генетический тип породы	Название фаций, для которых характерна данная криогенная текстура	Влажность, % к сухой массе
1		до 1—1,5	Волнистая унаследованная	В пылеватых тонкослоистых мало увлажненных супесях	Русловой аллювий	Фация прирусловых отмелей	20—30
2		до 5—8	Косолизовидная	В пылеватых, иногда гравийно-галечных песках	То же	Пристрелевая фация	40—60
3		до 1,0	Косолизовидная	В заиленных суглинках, супесях (донные отложения)	Старичный аллювий	Фация постоянно обводненных стариц	60—80
4		до 20—25	Косословистая	То же	То же	То же	70—80

5		до 15	Смешанная (перистая)	В суглинках и супесях, промерзавших как донные осадки и как сезонноталый слой		Фация периодически обсыхающих пойменных ложбин	45—80
6		до 10	Горизонтально-параллельно-слоистая, линзовидная	В малозаторфованных лессовидных суглинках деятельного слоя	Пойменный аллювий	Фация средней поймы	35—55
7		до 20	Вогнуто-параллельно-слоистая, линзовидная	В заторфованных суглинках, супесях деятельного слоя	То же	Фация высокой поймы с полигональным микрорельефом	50—70
8		до 20	Вогнуто-параллельно-слоистая, сетчатая	В незаторфованных суглинках, супесях, пылеватых песках, деятельного слоя снизу	То же	Фация мокрого луга и вторичных водоемов	70—100 и более

# Физические свойства мерзлых пород

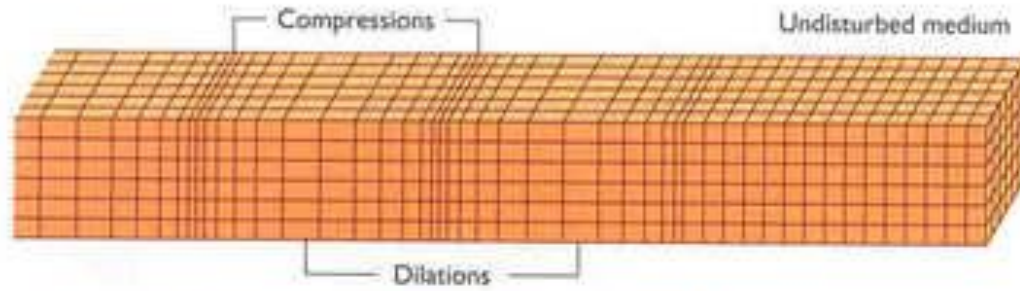
# Significance of Ice

- Ice has dramatically different physical properties than liquid water

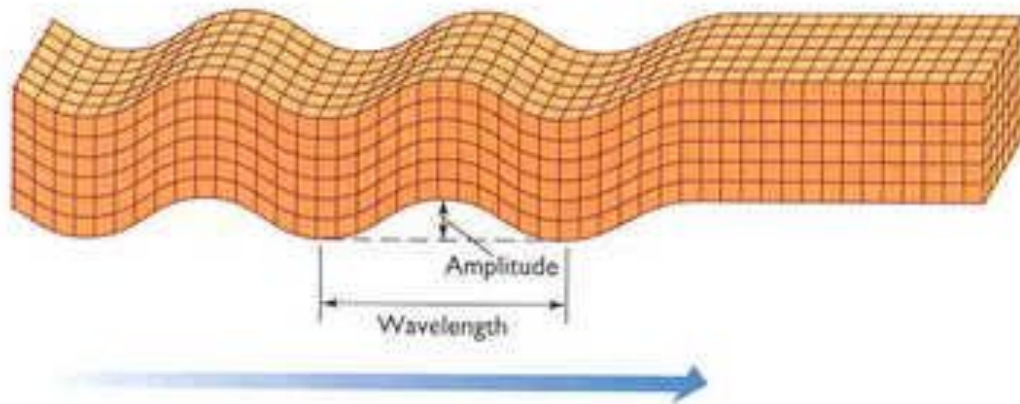
<b>Physical Property</b>	<b>Ice</b>	<b>Water</b>
Heat Capacity (J/kgK)	2100	4180
Thermal Conductivity (W/mk)	2.24	0.56
P-wave Velocity (km/s)	3-4	1.5
Electrical Resistivity (Ohm <sub>*</sub> m)	$10^4$ - $10^8$	$10^1$ - $10^2$
Dielectric Constant	3	81

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

P wave



S wave



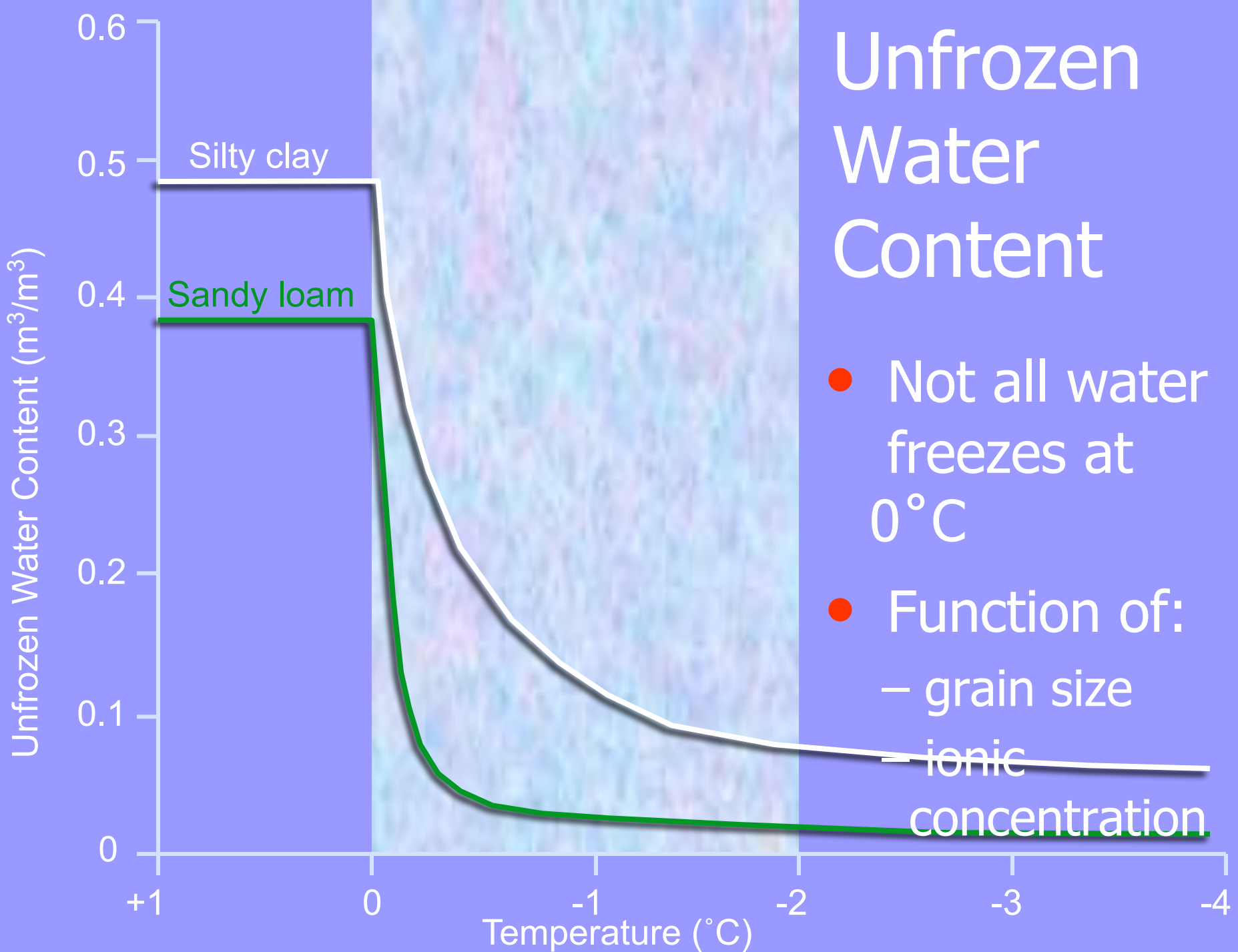
**Относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$**  — безразмерная физическая величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды.

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

Величина  $\epsilon$  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.

# Unfrozen Water Content



# Important Geophysical Properties

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

## *Not So Important Geophysical Properties*

- Density
- Magnetism
- Другие

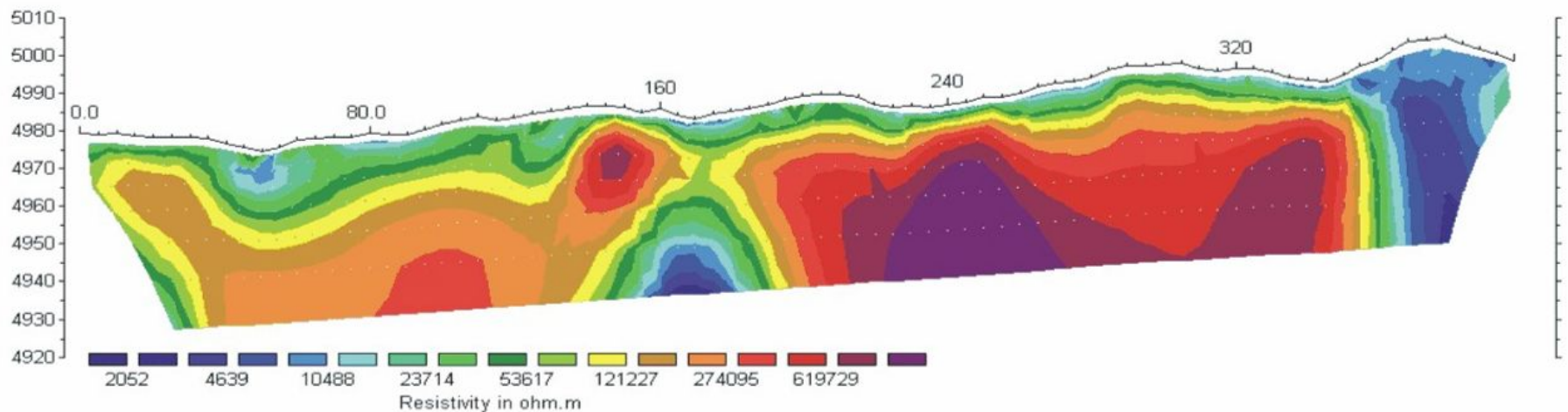


# Electrical Properties

<b>Material</b>	<b>Resistivity</b> (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)	$10^6-10^8$

# Electrical Resistivity

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



# *Electrical Resistivity*

- 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

# Time Domain EM Methods

(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 Properties - Dielectric Constant

<b>Material</b>	<b>Dielectric Constant</b>	<b>Velocity (m/ns)</b>	<b>Resolution</b>
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

# Ground-Penetrating Radar

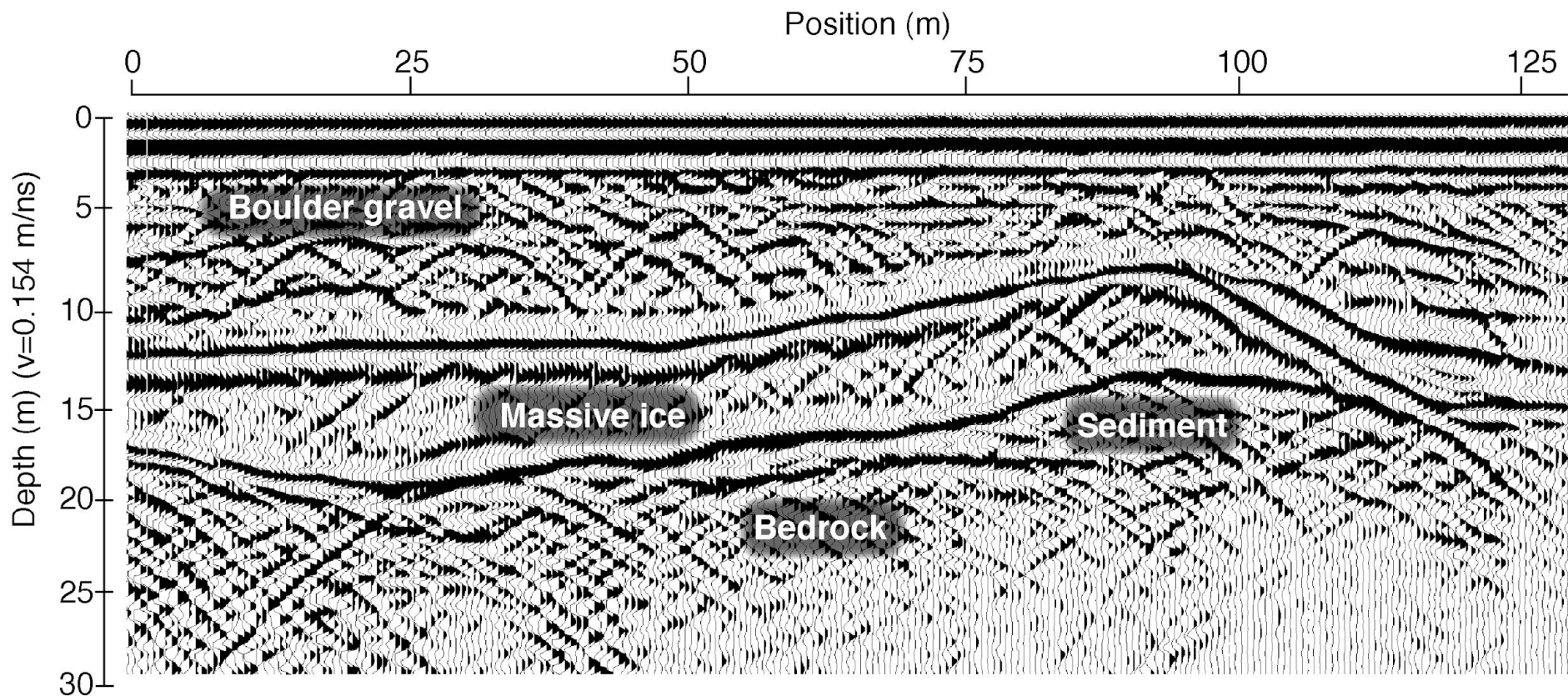
(high frequency, reflection method)

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



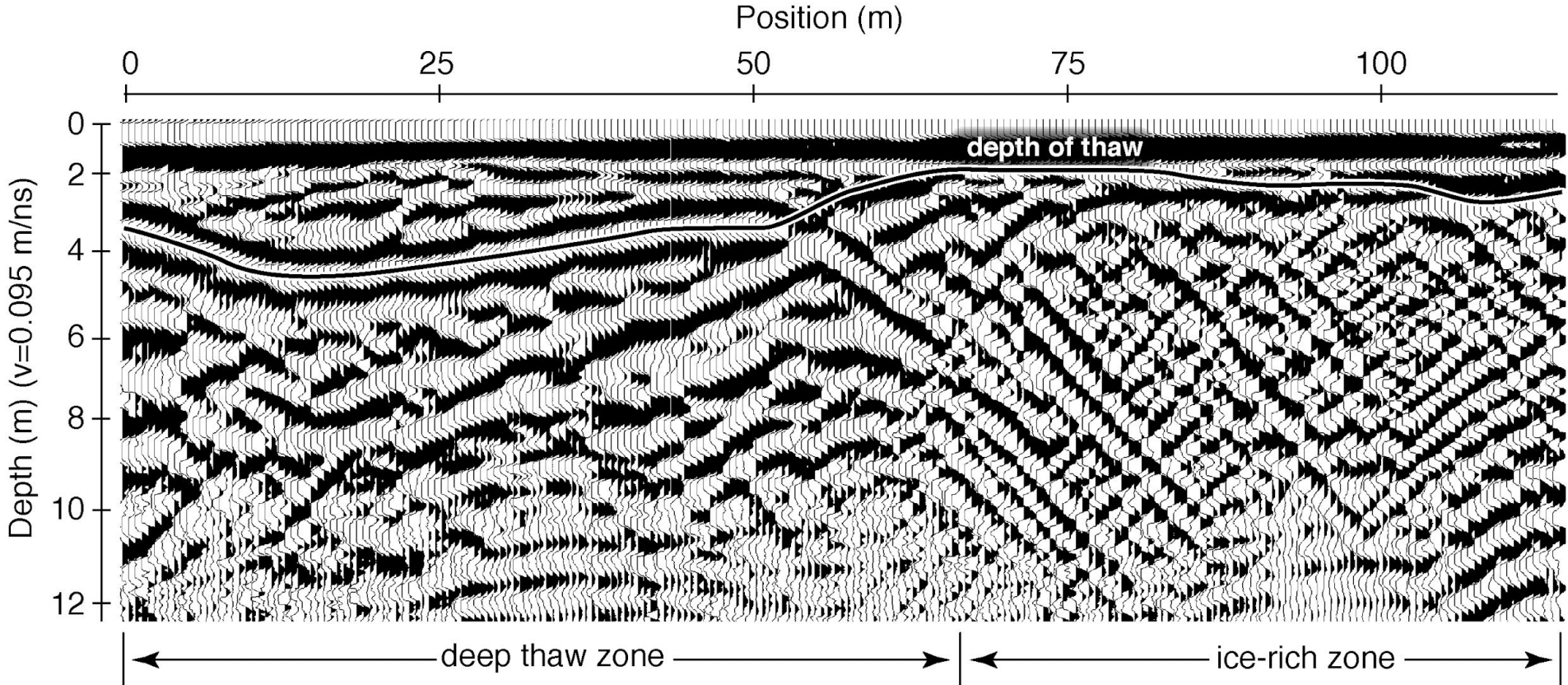
# GPR - Sedimentary Interfaces

- Units provide laterally coherent reflections
- Boulders or cracks generate diffraction hyperbolas



# GPR - Thermal Interfaces

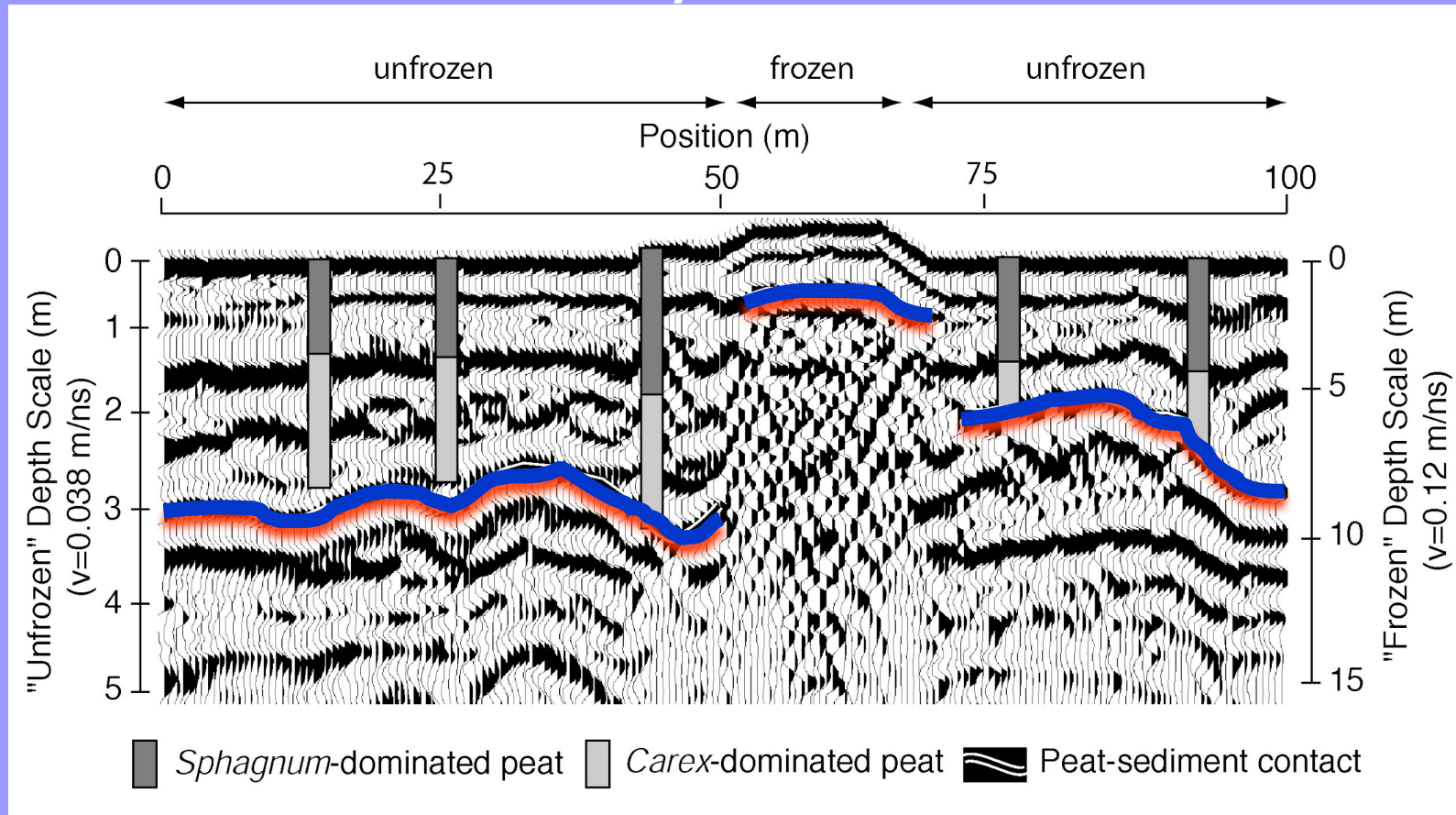
- Thermal interfaces can cut across sedimentary





# GPR - Velocity Variations

- Dramatic velocity variations can effect continuity of reflections



# Seismic Properties

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

\*strongly temperature dependent

# Seismic Imaging

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



# Seismic Limitations

- Refraction surveys cannot be used to detect the base of the permafrost due to the velocity inversion
- Higher velocities result in longer wavelengths in permafrost and thus poorer resolution
- Lateral permafrost thickness variations result in large static shifts and lateral positioning errors - aided by well-characterized near-surface model

# Verification

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

