



Общая геохимия

Лекция 25

Геохимия почвы

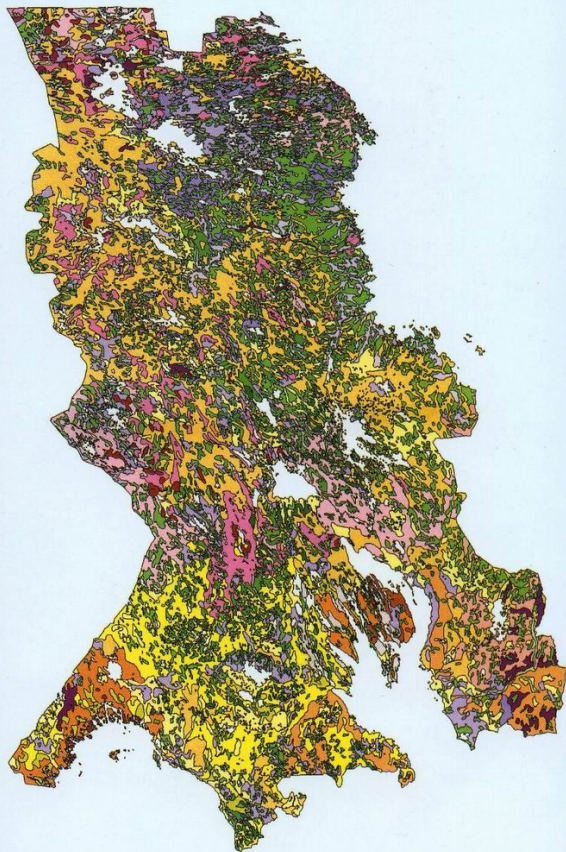
Геохимическая миграция

Геохимия ПОЧВЫ

Н.Г. Федорец
О.Н. Бахмет
А.Н. Солодовников
А.К. Морозов

Почвы Карелии

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АТЛАС



2008

НАУКА

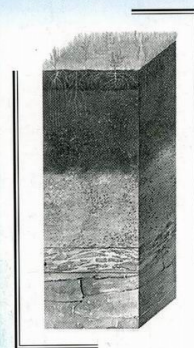
Д.С. Орлов
Л.К. Садовникова
Н.И. Суханова

Химия почв

Г. В. Мотузова

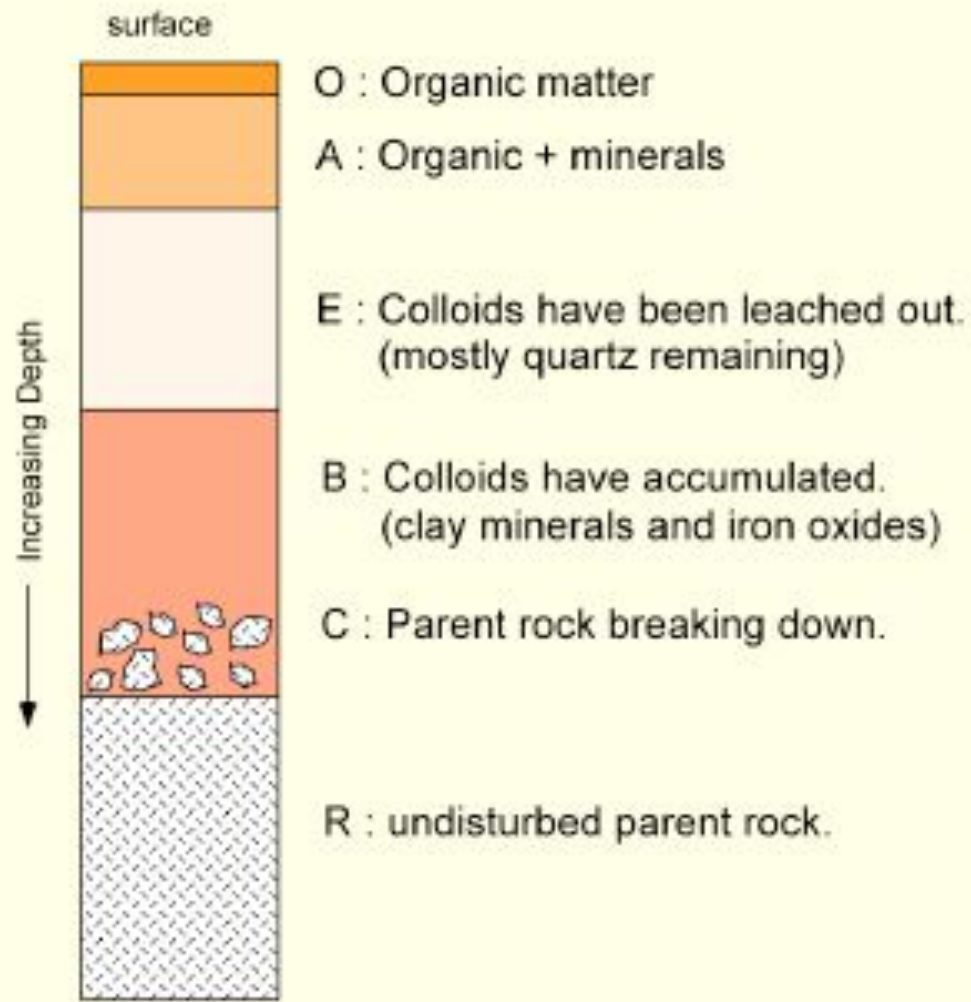
СОЕДИНЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ 2009

Системная организация,
экологическое значение, мониторинг



2005





О: Органическое вещество;
А: Органика и минералы;
Е: Коллоиды выщелочены (главным образом, остается кварц);
В: Зона накопления коллоидов (глинистые минералы и оксиды Fe);
С: Разрушенные исходные породы;
Р: Неразрушенные исходные породы.

Почва состоит из продуктов выветривания материнских пород, разделяется по горизонтам, которые отражают перемещение коллоидных частиц.

Как образуется почва?

Суммарное количество органики < 5 %.

О-слой:
Останки органики

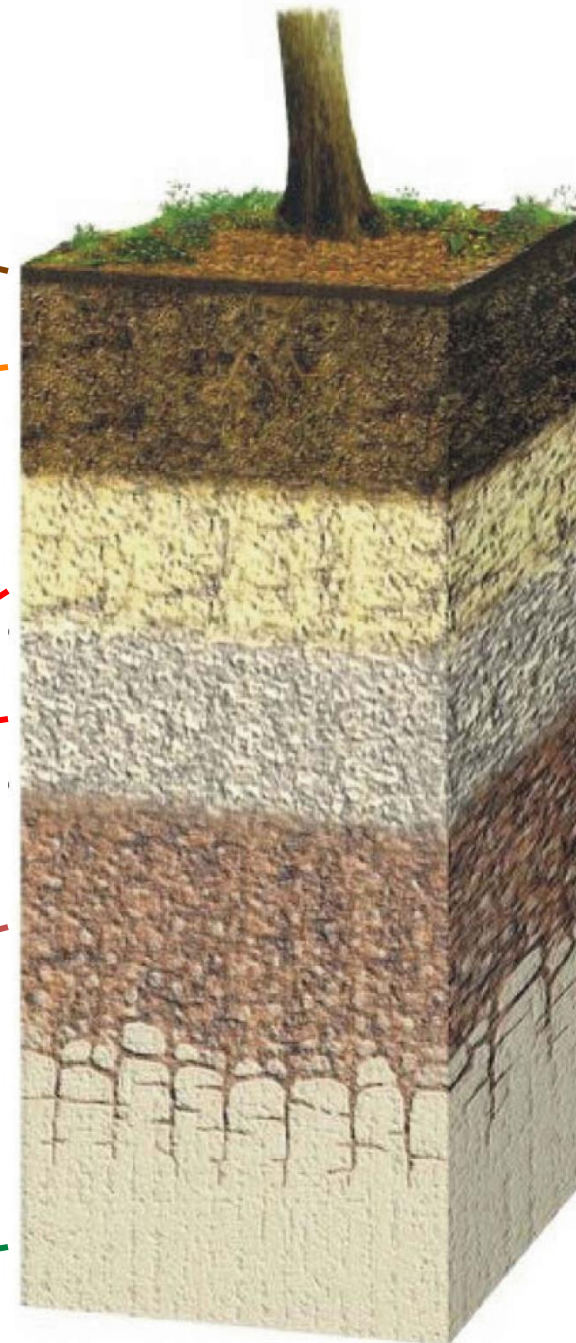
А-слой:
Органика

Глины, обедненные катионами
Устойчивые минералы

В-слой:
Первичные и вторичные минералы

С-слой:
Сильно выветрелая порода (“сапролит”)

Исходная неизменная порода



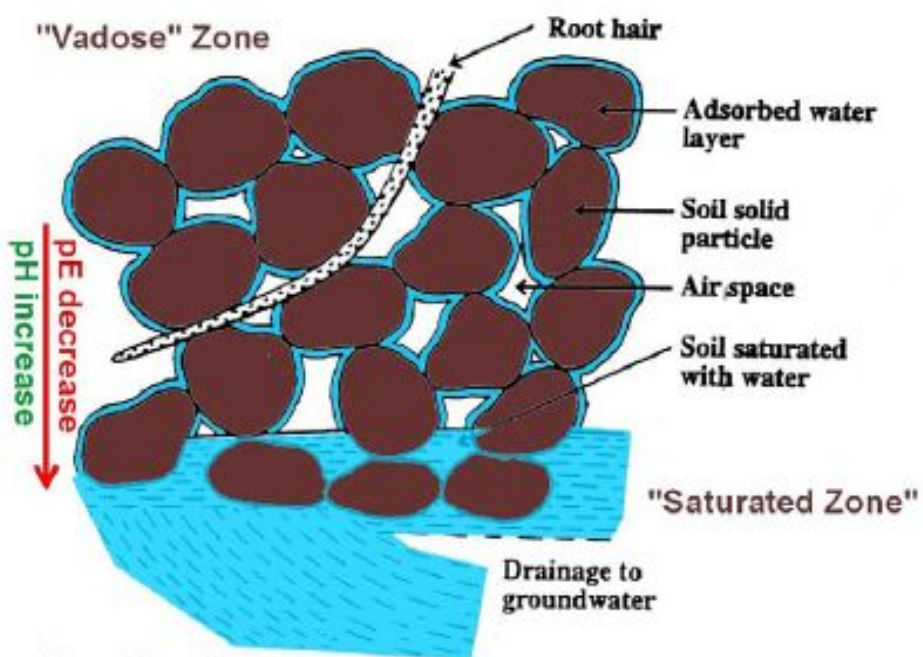


Figure 16.1. Fine structure of soil, showing solid, water, and air phases.

A-зона минимально напоминает по составу исходную для почвы породу.
C-зона максимально напоминает по составу исходную для почвы породу.
B-зона по составу промежуточна между A и C.

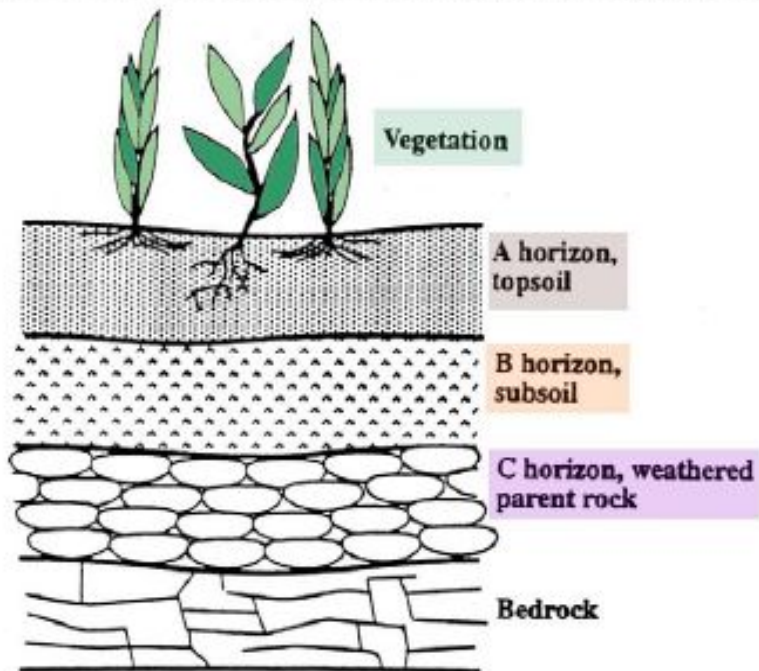
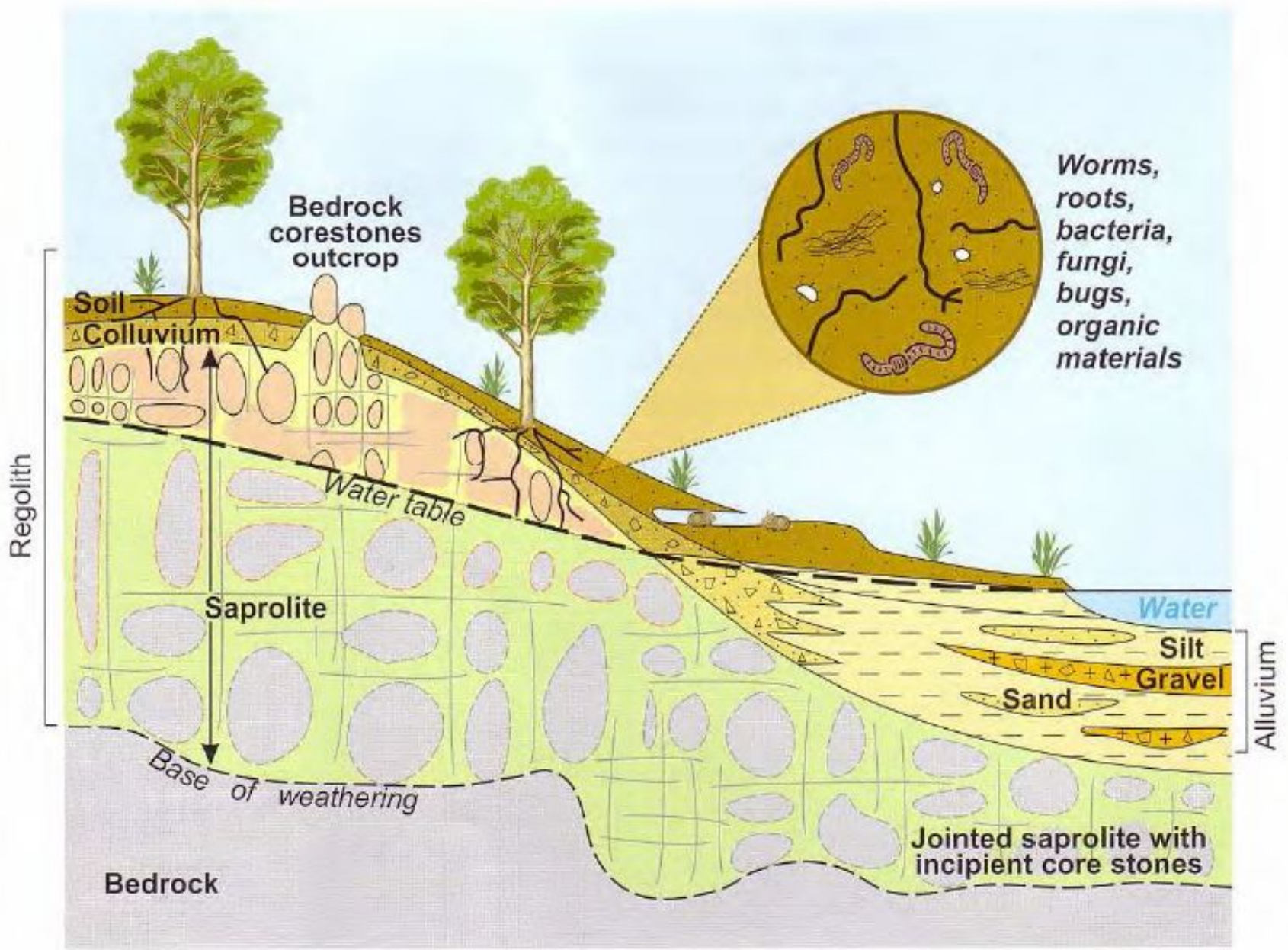


Figure 16.2. Soil profile showing soil horizons.

- 1) Устойчивые минералы (например, кварц) не растворяются.
- 2) Алюмосиликаты превращаются в глины.
- 3) Растворимые элементы переходят в водный раствор.
- 4) Некоторые из них осаждаются ниже в почве или в виде осадочной породы (оксиды Fe, карбонаты).

В результате получается **реголит** – «одеяло», состоящее из **почвы (с органикой), осадков и продуктов выветривания горных пород.**



From CRC-LEME newsletter

Существуют сотни классификаций и типов почв

Тип почвы зависит от:

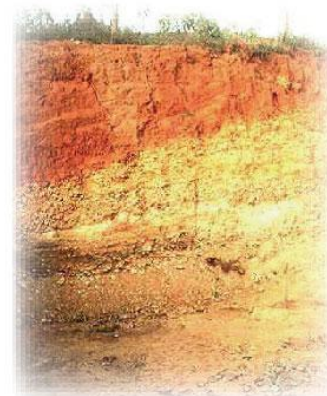
- климата
- состава (минералогии) пород
- условий образования



Temperate:
Stratified



Arid:
No Layering



Tropical:
Extreme
Leaching

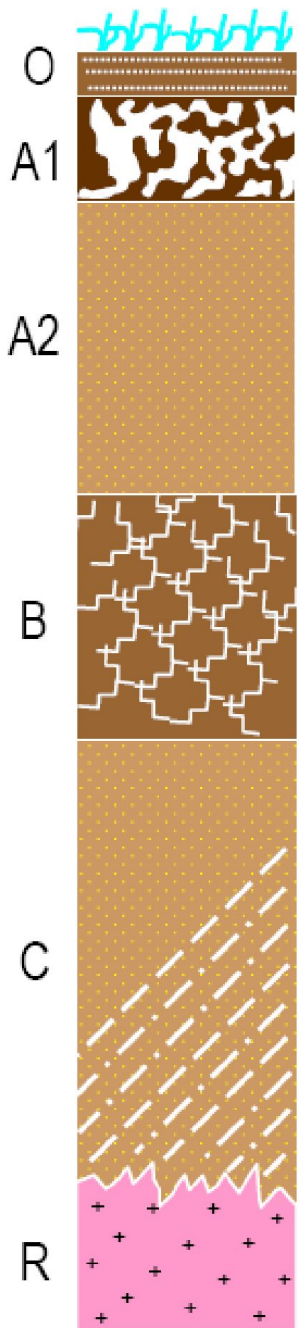
“Латерит”

Почвы служат источником информации:

Палеоклимат - недавний (почвы) и древний (палеопочвы)

Датирование тектонической активности

Стратиграфия почв (активно используется в археологии)



Many soils, such as this one, show a classic “topsoil” horizon but this is not always the case.

разлагающаяся органика

“O” Horizon - decomposing organic matter

гумусовый слой (перегной)

“A₁” Horizon - brown humic-rich, some mineral matter.

«ПОДЗОЛ»

“A₂” Horizon - light grey, intensely leached; including loss of Fe & Al; mostly residual SiO₂.

“B” horizon -brown horizon, accumulation of clays & Fe-oxides



Почвы тропических и субтропических регионов, как правило, продукт глубокого выветривания.

Они представляют собой смесь кварца, каолина, свободных оксидов, органического вещества.

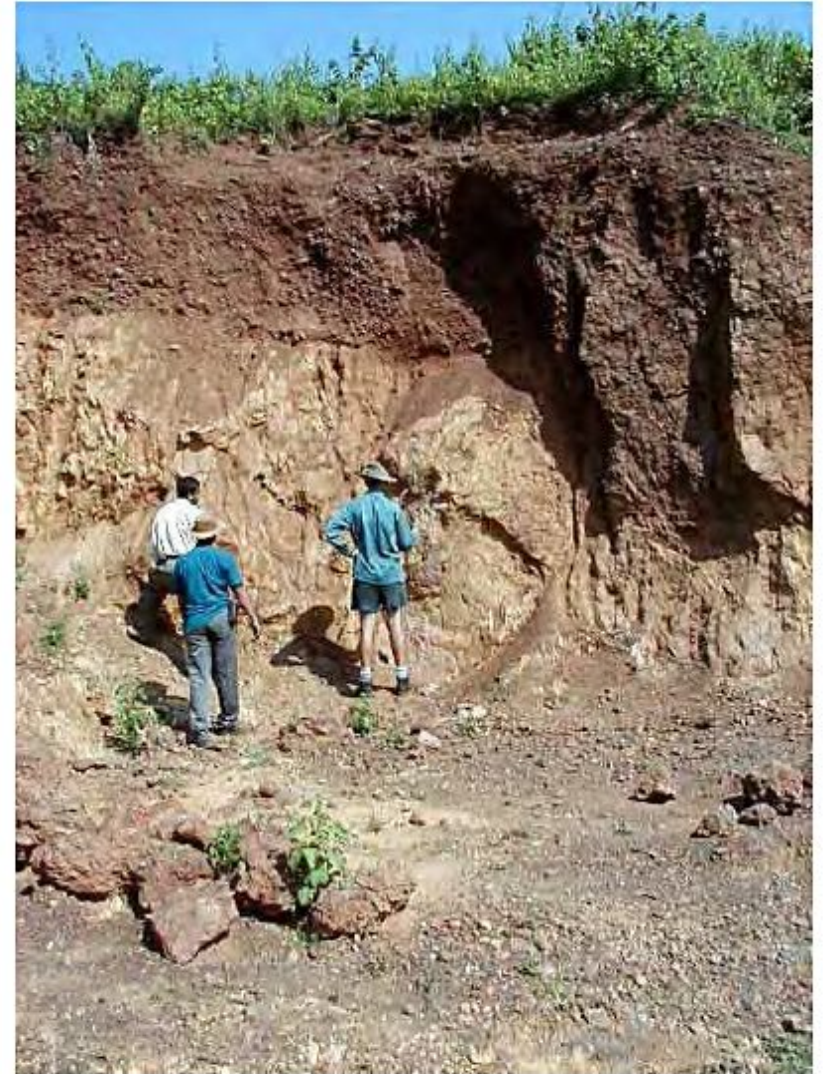
Как правило, у них нет четко определенных почвенных горизонтов.

Крайняя степень выветривания может привести к образованию почв, которые в значительной степени состоят только из просто Al- и Fe- гидроксидов и оксидов.

Example Soil Types – Tropical Soils



Ferruginous Soil



Laterite

В гумидном (влажном) климате в почвах образуются зоны, богатые глинами и органикой.





Почвы районов с очень засушливым климатом не способствуют росту растений.

Характерно осаждение минералов - простых солей: кальцит, гипс.

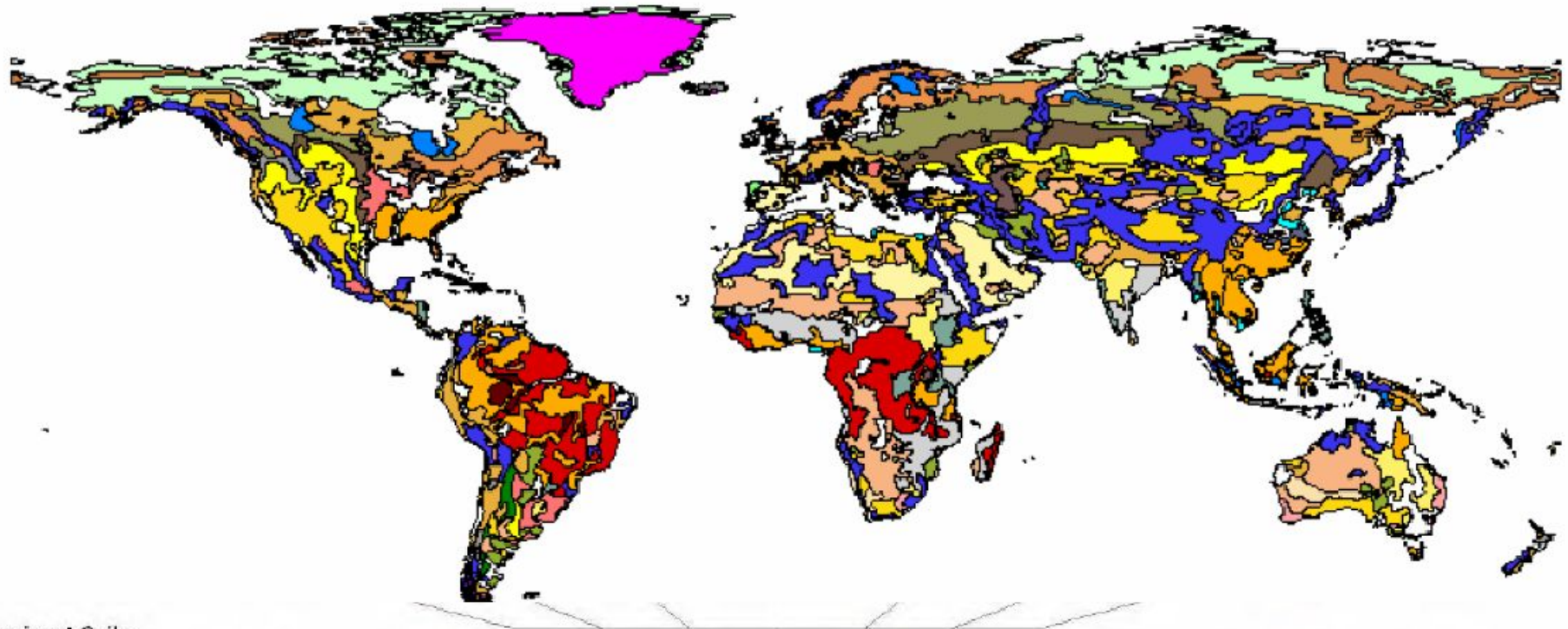
Эти почвы, как правило, с низким содержанием органических веществ.



Каличе, горизонт обызвесткования, образующийся вблизи поверхности в результате концентрации карбоната кальция, поступающего с грунтовыми водами (путем капиллярного поднятия) и с инфильтрующимися атмосферными водами.

Major Soil Groups of the World

FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS



Dominant Soils

- Acrisols, Alisols, Plinthosols (AC)
- Albeluvisols, Luvisols (AE)
- Andosols (AN)
- Anthrosols (AT)
- Arenosols (AR)
- Calcisols, Cambisols, Luvisols (CL)
- Calcisols, Regosols, Arenosols (CA)
- Cambisols (CM)

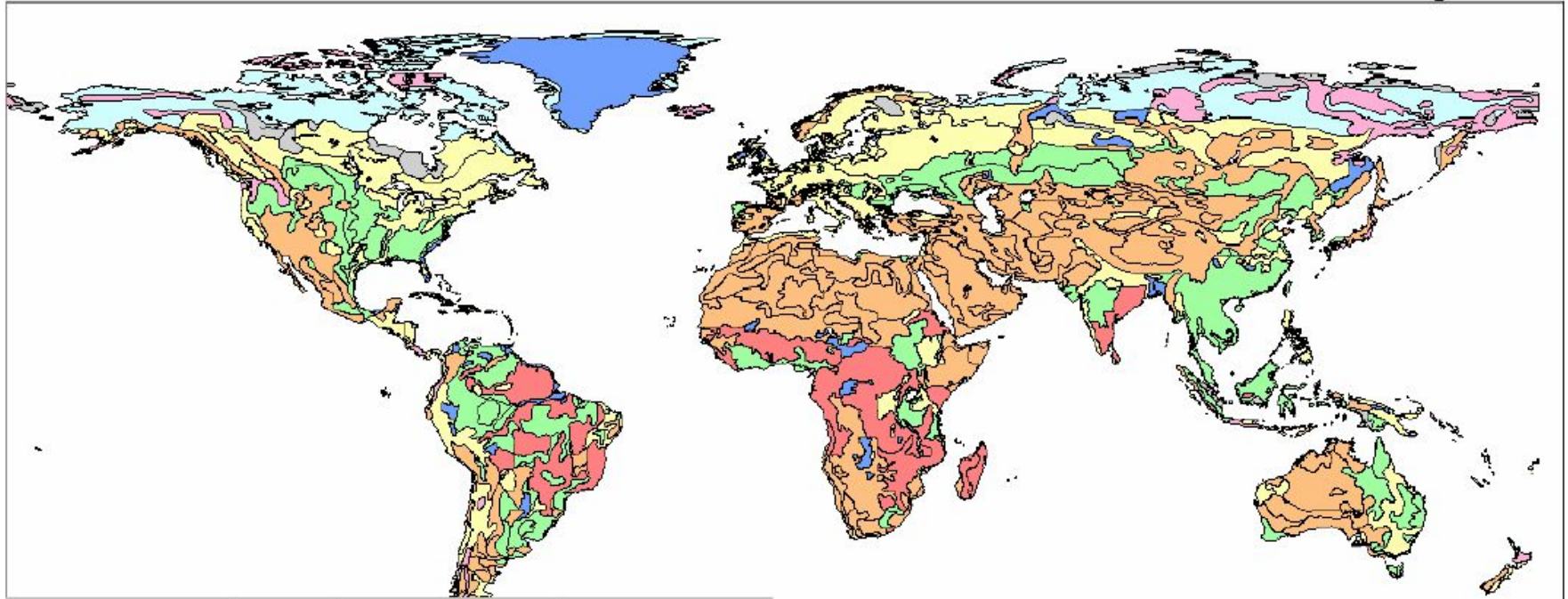
- Chernozems, Phaeozems (CH)
- Cryosols (CR)
- Dunsols (DU)
- Ferrisols, Acrisols, Nitisols (FR)
- Fluvisols, Gleysols, Cambisols (FL)
- Gleysols, Histosols, Fluvisols (GL)
- Gypsisols, Calcisols (GY)
- Histosols, Cryosols (HR)

- Histosols, Gleysols (HS)
- Kastanozems, Solonetz (KS)
- Leptosols, Regosols (LP)
- Leptosols, Cryosols (LR)
- Lixisols (LX)
- Luvisols, Cambisols (LV)
- Nitisols (NT)
- Phaeozems (PH)

- Planosols (PL)
- Plinthosols (PT)
- Podzols, Histosols (PZ)
- Regosols (RG)
- Solonchaks, Solonetz (SC)
- Umbrisols (UM)
- Vertisols (VR)
- Glaciers (gl)

- Waterbodies
- Limit of aridity
- Steep lands
- Country boundaries

Geochemical Version on the FAO Soil Map*

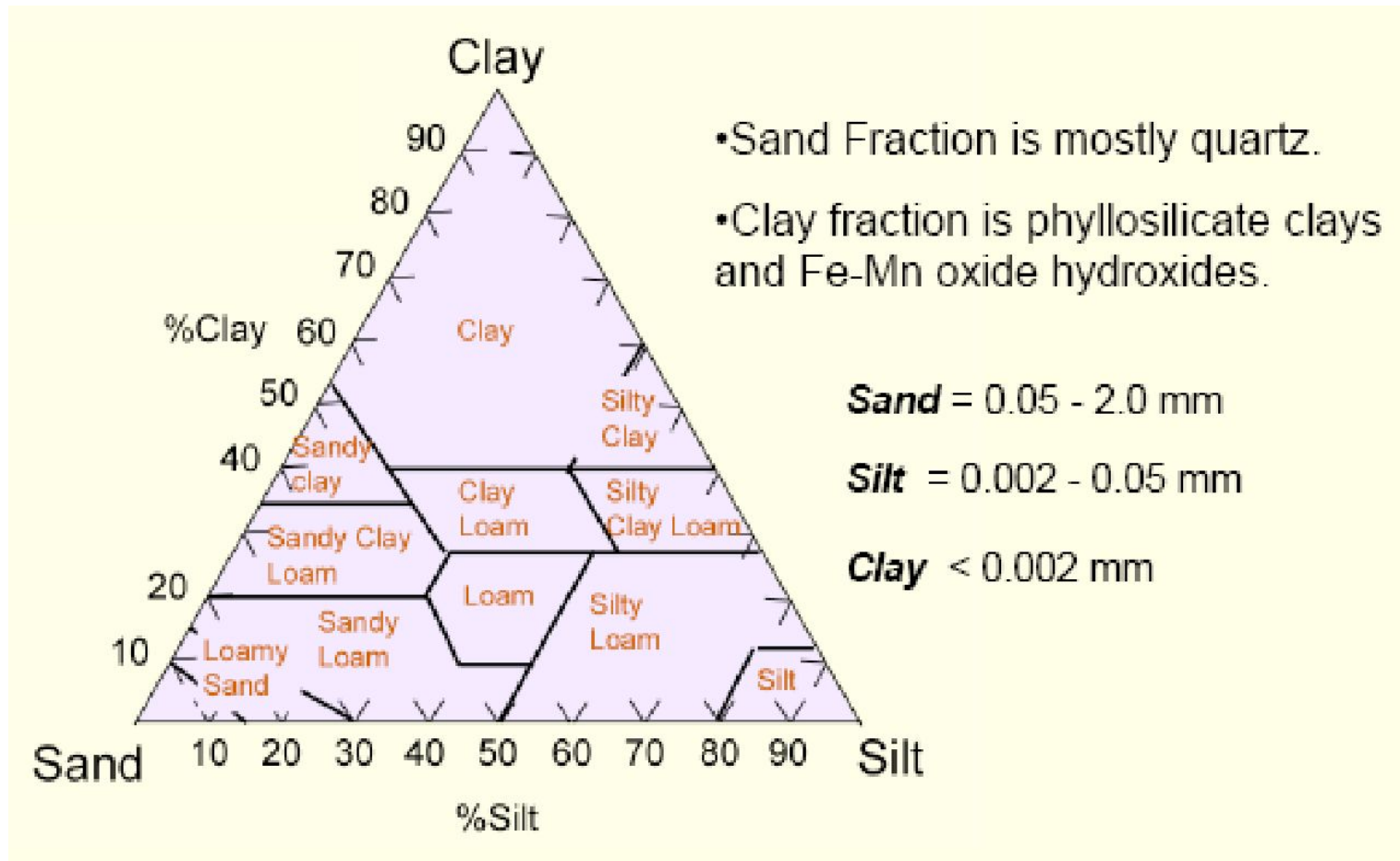


<i>Dry cold</i>				<i>Wet Cold</i>	
Arctic Soils					
Desert Soils	Grassland Soils		Podzolic Soils		
				Tropical Soils	
<i>Dry Hot</i>				<i>Wet Hot</i>	
Calcareous		Aluminous & Ferruginous			

***Climate based**
 Modified from Rose, Hawkes and Webb 1979

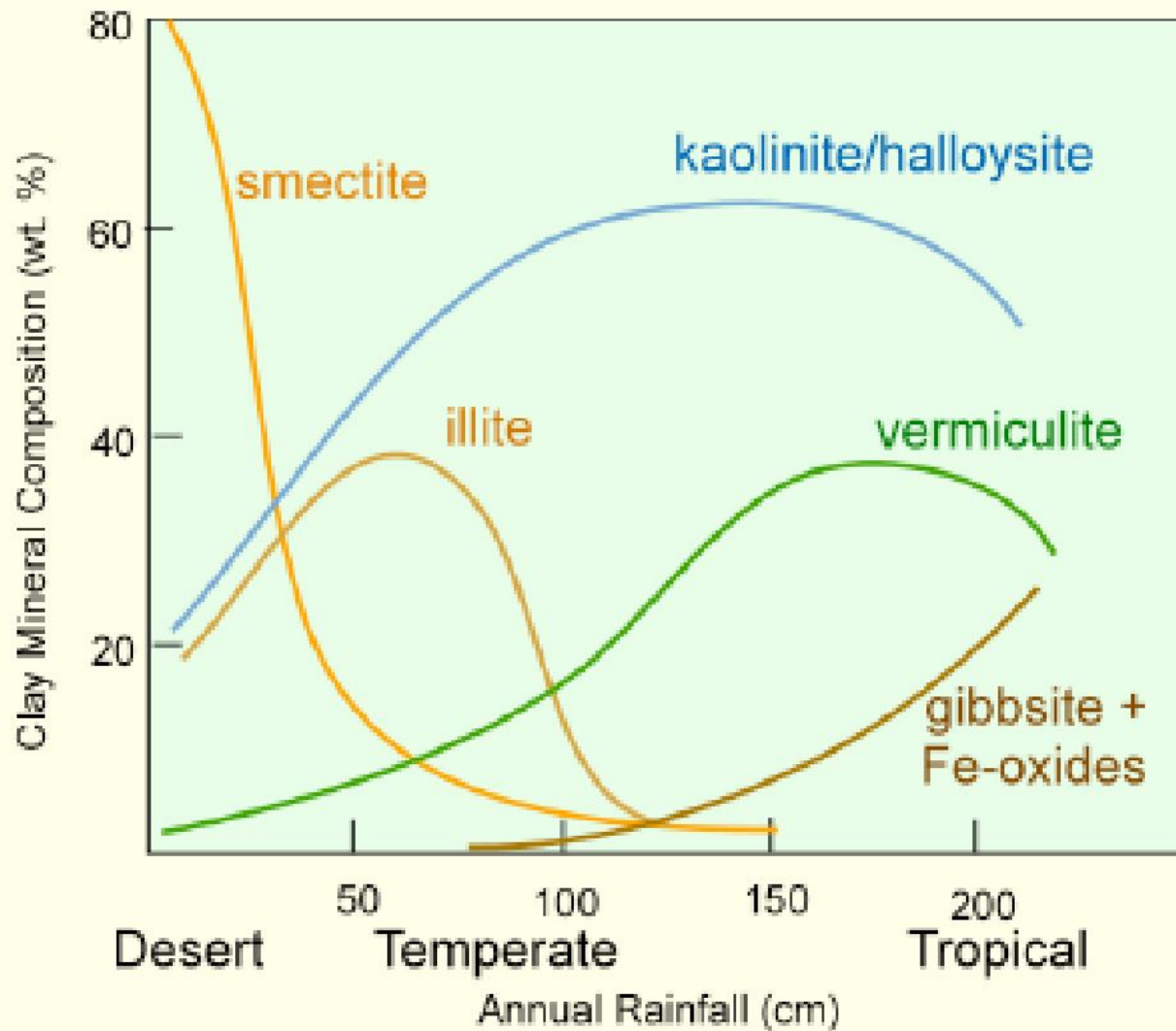
- Arctic Soils
- Desert Soils
- Glaciers
- Grassland Soils
- Hydromorphic
- Mountain Soils
- Podzolic Soils
- Tropical Soils

Текстура и минералогия почвы

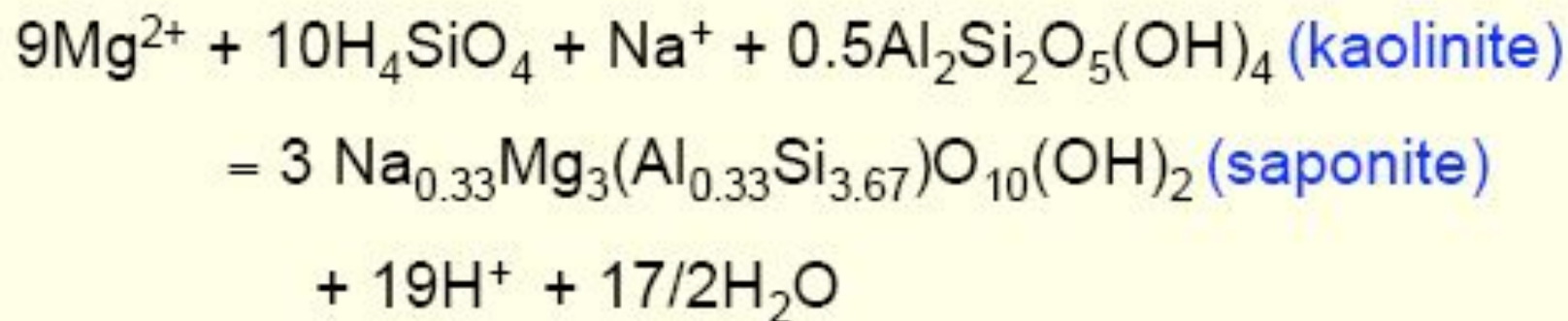
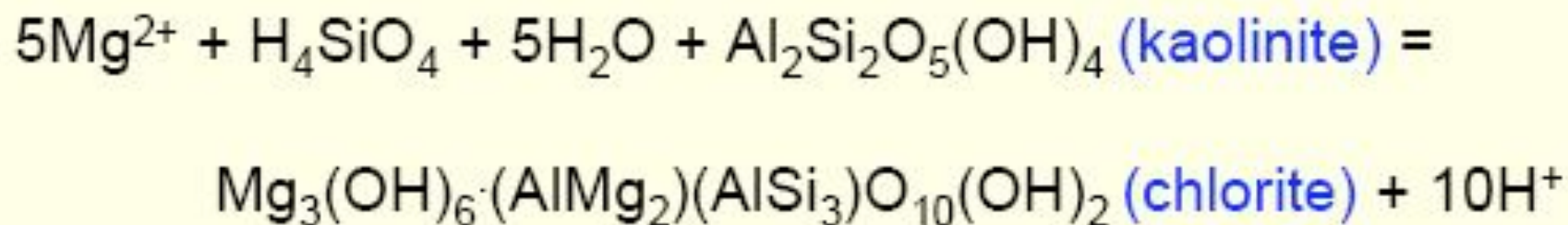


silt – «ил» 20-50 мкм; алеврит – 10-100 (5-50) мкм.

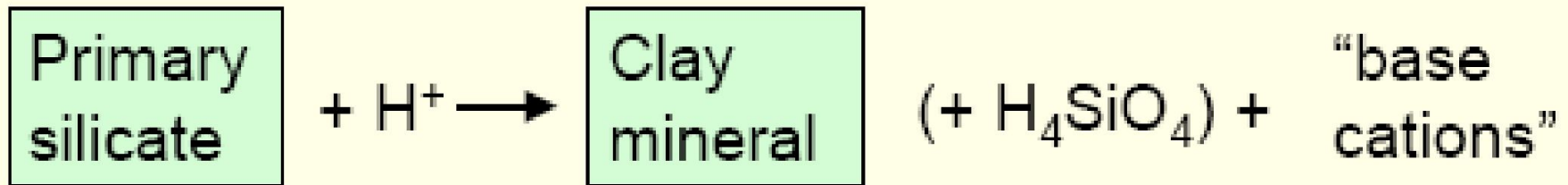
Минералогия глинистой фракции почвы



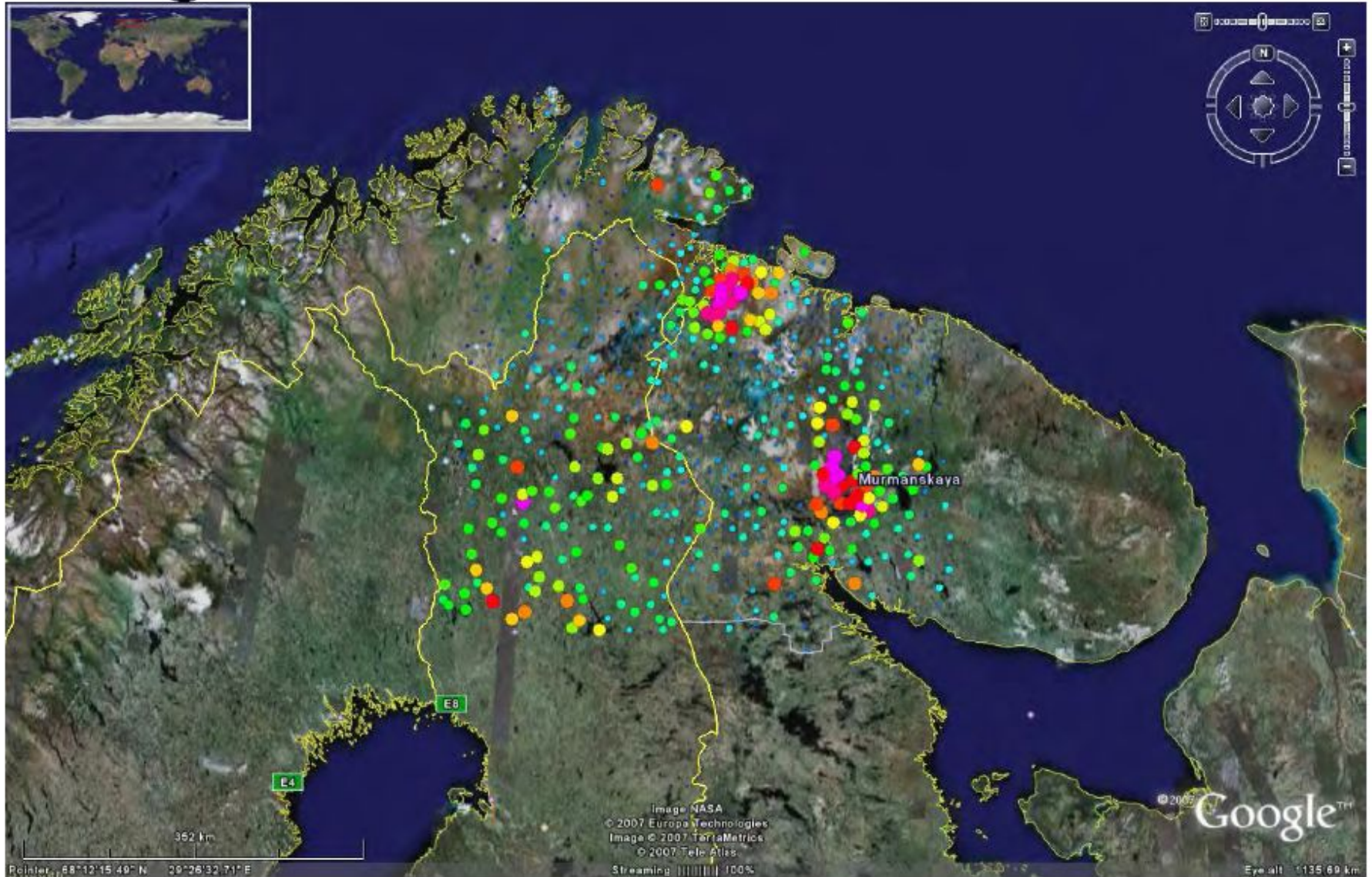
Transformations of Clay Minerals



1. Первичные минералы горных пород нестабильны на дневной поверхности.
2. Минералы, содержащие Al, инконгруэнтно (до конца) растворяются, образуя Al-содержащие глины и растворенные катионы.
3. Реакции выветривания расходуют CO_2 в атмосфере. Однако скорости реакции слишком малы, чтобы влиять на антропогенную составляющую.

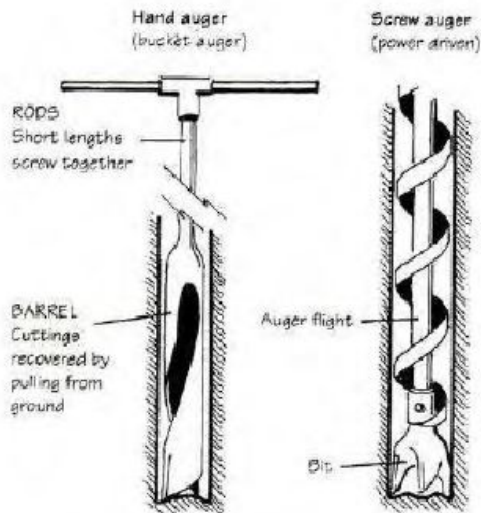


Regional Soil Data - As in humus



Data From: Reimann, Clemens (2000): Kola-Atlas, Humus, *PANGAEA*, doi:10.1594/PANGAEA.56279

Sampling Protocols



Sample depth/horizon

Type of sample bags

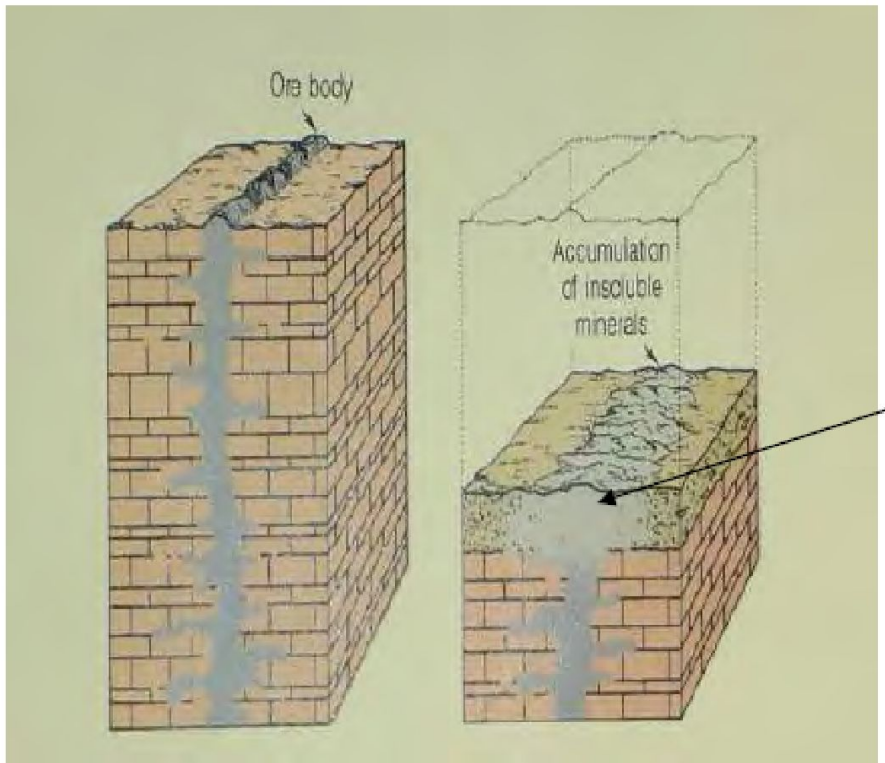
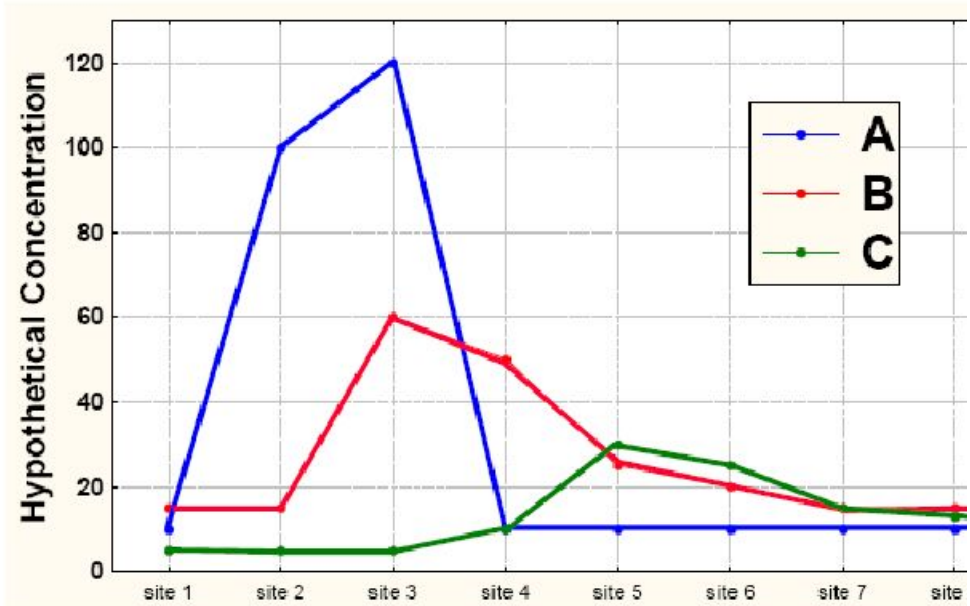
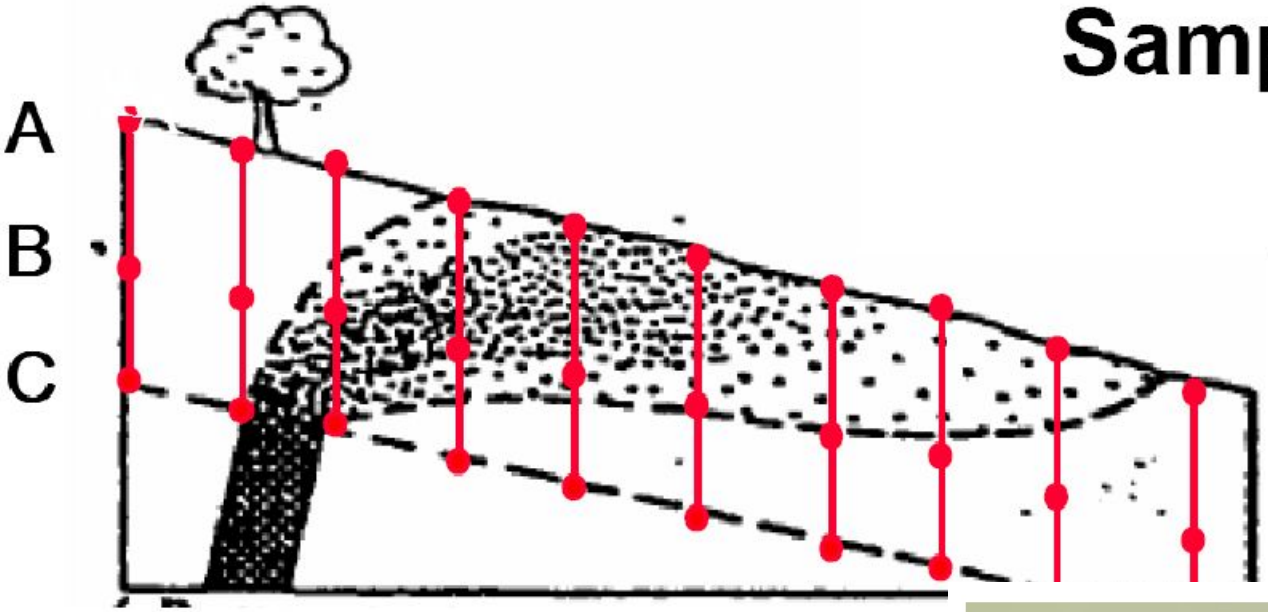
Sample weight

Sieving (or not) & sieve size

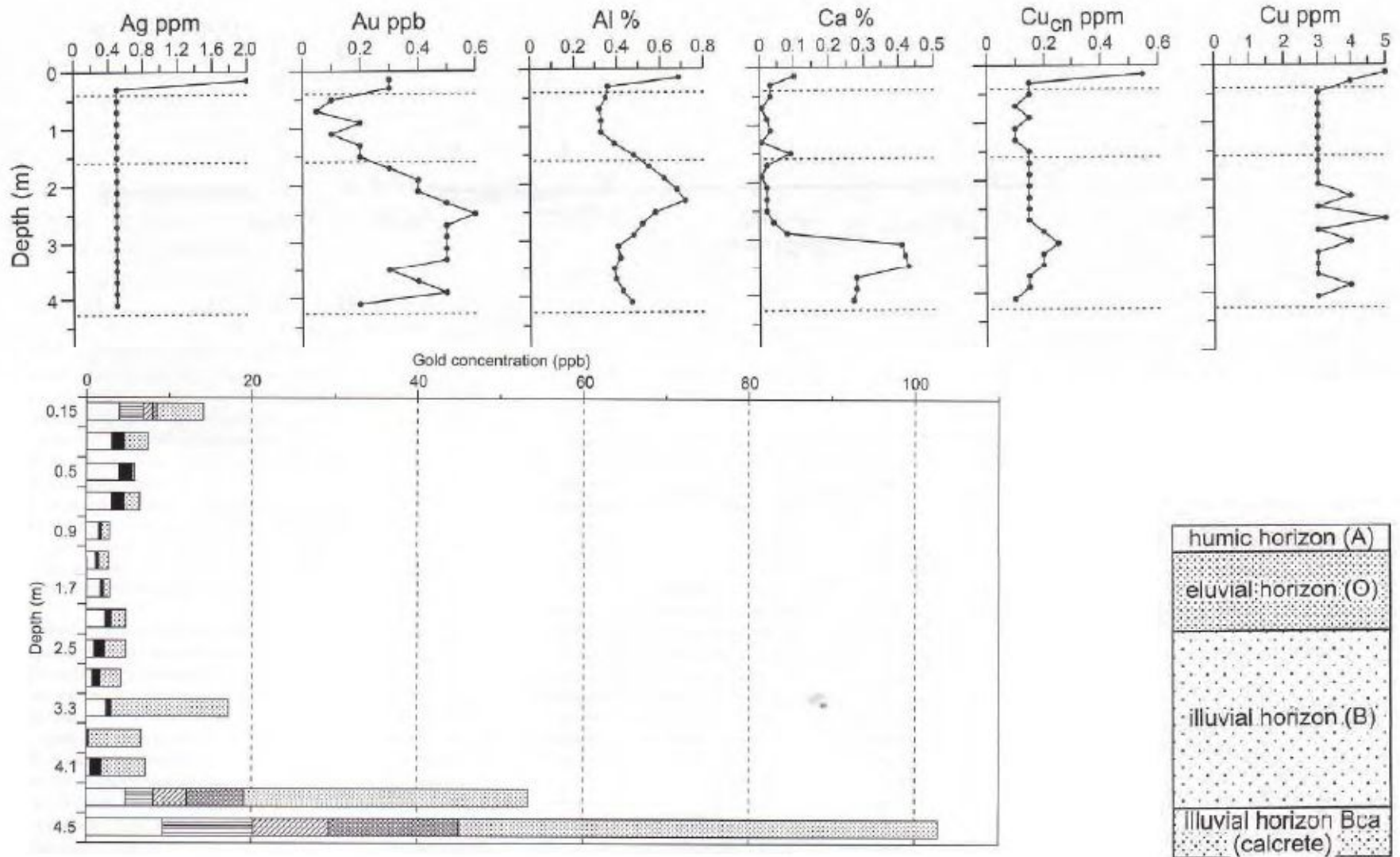
No Jewelry

Coords and observations

Sample Depth



Sample Depth



MLF037-05

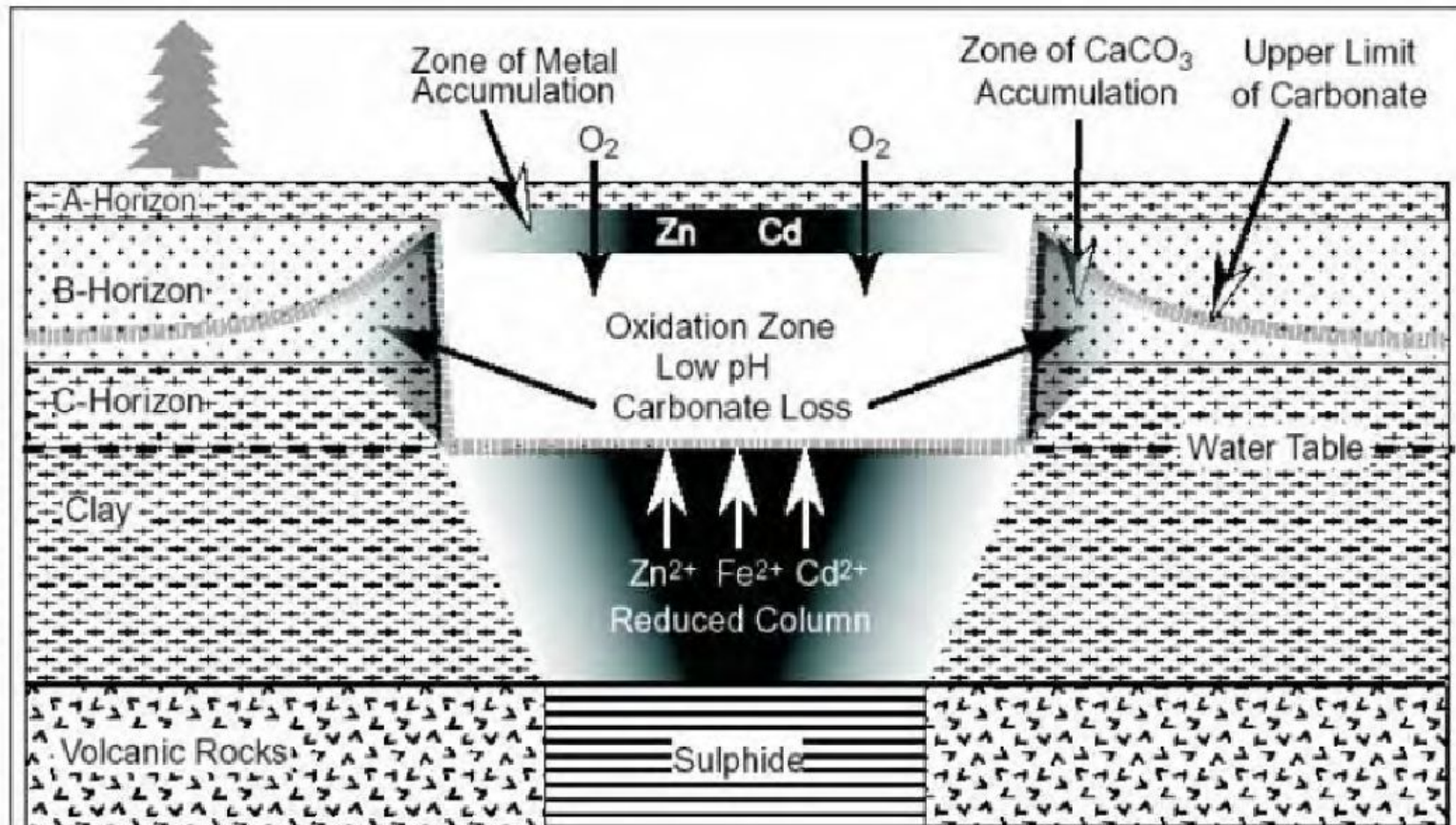
From: M. J. Lintern (2007) Vegetation controls on the formation of gold anomalies in calcrete and other materials at the Barns Gold Prospect, Eyre Peninsula, South Australia, GEEA, Vol 7, Num 3

Examples From Wet Glaciated Areas

Secondary geochemical signatures in glaciated terrain

G.E.M. Hall¹, S.M. Hamilton², B. McClenaghan¹, E.M. Cameron³

¹Geological Survey of Canada 65CA, 601 Booth St, Ottawa, Ontario K1A 0E8, Canada
²Ontario Geological Survey (OGS), 971 Ramsey Lake Road, Wellesley, Ontario, P1E 6B3, Canada
³East Cameron Geochemical Inc., 163 Spruce Ridge Road, Gory, Ontario, Canada K2K 1L6



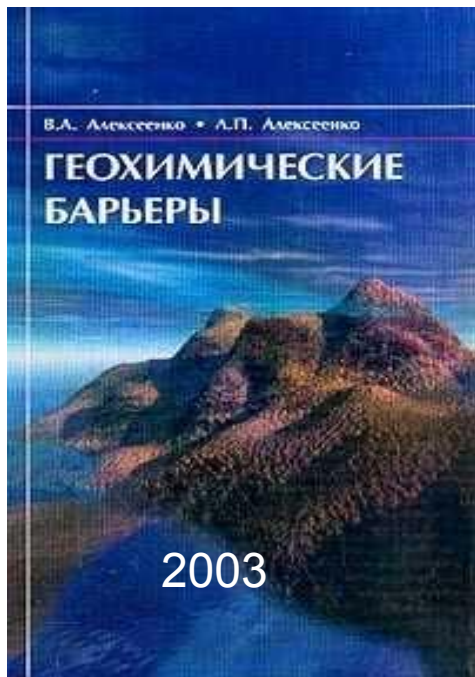
Concluding Remarks

Regolith Control Elements	Target and Pathfinder Elements			
	High Abundance	Moderate Abundance	Low Abundance*	Trace Abundance*
Fe Mn Ca Mg (K, Na, Org C, Al)	Ni Co Zn S Ba Cr Sr	Cu Pb Th As U Sn	Sb Bi Mo Se Ag Hg Cd Tl	Au Pt Pd Te

*These elements may now be determined routinely to virtually their crustal abundance

Миграция химических элементов

Геохимические барьеры



Перельман Александр Ильич (1916-1998)

Российский физико-географ, доктор геолого-минералогических наук (1954), профессор МГУ (с 1966). Основные труды по геохимии ландшафтов и геохимии гипергенных процессов. Автор учебника «Геохимия». (2 изд. 1989). Гос. премия СССР (1986).



Основные факторы миграции элементов в земной коре

**Типы и виды миграции
химических элементов**

Выделяются 4 основных **вида** миграции:

- 1 – механический;
- 2 - физико-химический;
- 3 – биогенный;
- 4 – техногенный, вызываемый антропогенной деятельностью.

Основные **типы** миграции выделяют при рассмотрении связи перемещения химических элементов с основными формами их нахождения в природе.

- **Первый тип миграции представляет собой изменение формы нахождения элементов без их существенного перемещения,**
например, переход элементов из минеральной формы в раствор или из почв в растения.
- **Второй тип характеризует перемещение элементов без изменения форм их нахождения,**
например, перемещение аэрозолей в атмосфере или обломков минералов в поверхностных водах.

- Третий тип миграции объединяет два предыдущих и состоит **в перемещении элементов с изменением форм их нахождения.**

Например, при техногенном поступлении в поверхностные воды тяжелых металлов их значительная часть может находиться в форме растворов (первые км). Потом они продолжают миграцию на расстоянии до сотен км в минеральной и коллоидной форме.

Миграция элементов может прекращаться на время, а на отдельных участках при этом возможна существенная концентрация части элементов.

Внутренние факторы миграции

- Электростатические свойства ионов
- Свойства связи соединений
- Химические свойства соединений
- Гравитационные свойства атомов
- Радиоактивный распад

Электростатические свойства ИОНОВ

Ионный потенциал Картледжа

$$K = Z/R_j$$

где Z — заряд;

R_j — радиус иона, в ангстремах

Энергетические коэффициенты Ферсмана

$$\text{ЭК анионов} = W^2/2R$$

$$\text{ЭК катионов} = (W^2/2R) [0.75(R+ 0.20)], \text{ где}$$

W – валентность иона

R – радиус иона в ангстремах

Внешние факторы миграции

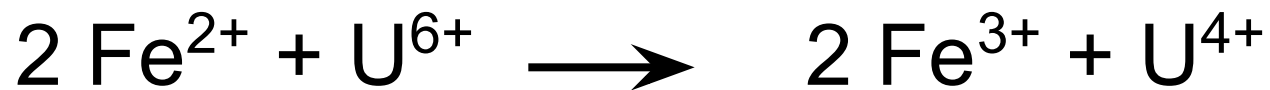
- Температура
- Давление
- Степень электролитической диссоциации
- рН
- Окислительно-восстановительный потенциал (обстановка)
- Поверхностные силы природных коллоидных систем

pH

В щелочной среде:



В кислой среде:



Поверхностные силы природных КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ

*Активно сорбирующиеся (+) заряженные
частицы:*

Al, Fe (III), Cr (III), Th (III), Ti (IV), Zr (IV),
оксида Mn (II)

*Активно сорбирующиеся (-) заряженные
частицы:*

кремнезем, большинство сульфидов,
гидроксидов V (V), Mn (IV), Fe (II),
гуминовые коллоиды.

Природные сорбенты

- Коллоиды оксида Mn (IV) [Ni, Co, K, Ba, Cu, Zn, Hg, Au, W]
- Гидроксид Fe (III) [As, V, P, Sb, Se]
- Кремнезем [радиоактивные элементы]
- доломит [Pb, Zn]

2-е правило Пескова-Фаянса

на твердой поверхности адсорбируется тот ион, знак которого противоположен по знаку поверхности и который может образовывать с одним из ионов решетки мало растворимое соединение.

1. поливалентные ионы сорбируются лучше

2. $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$;

$\text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^-$

**В окислительной обстановке
накапливаются:**

катионогенные элементы переменной
валентности (Fe, Mn, Co)

**В окислительной обстановке
растворяются:**

Анионогенные элементы (V, Mo, Se, S, U, Re)

Все химические элементы, составляющие земную кору, атмосферу и гидросферу, находятся в постоянном движении, которое и представляет их **миграцию**.

Интенсивность миграции $I = m/(tC_k)$

m – масса мигрирующего элемента

t – промежуток времени существования миграции

C_k – кларковое или фоновое содержание элемента в рассматриваемой геохимической системе.

Общие закономерности физико-химической миграции

Химические элементы мигрируют в земной коре в виде:

- **Ионов**
- **Недиссоциированных молекул**
- **Коллоидных мицелл**
отдельных частиц дисперсной фазы золя, т. е. высокодисперсной коллоидной системы с жидкой дисперсионной средой
- **Свободных радикалов**

Миграция в ионной форме характеризуется:

- Потенциалом ионизации**
- Потенциалом возбуждения**
- Ионным радиусом**
- Электроотрицательностью**
- Энергетическим коэффициентом**

Изоморфизм возможен при:

- Радиусы ионов и атомов различаются не более 15%**
- Химическая индифферентность**
- Одинаковые поляризационные свойства атомов**
- Ионы одного знака**
- Сходная природа межатомной связи**

Химическая индифферентность

Au (0,144нм) и **Al** (0,143нм) образуют **Au Al₂** и другие соединения.

Ga(0,062нм) и **As**(0,058нм) образуют **Ga As**

Одинаковые поляризионные свойства атомов

Изоморфизма нет между:

- Na^{+1} (0,97А) Cu^{+1} (0,96А)

- Si и P

Валентная компенсация

$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ – апатит

Ca^{2+} изоморфно замещается REE^{3+}

Одновременно

F^{-1} изоморфно замещается O^{-2}

$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$

$\text{TR}_5(\text{PO}_4)_3\text{O}$

Сходная природа межатомной связи

NaCl – галит и PbS – галенит

У обоих кубические кристаллические решетки

Ионные радиусы близки у

Na (0,98 нм) и Pb(1,3 нм)

Cl (1,81 нм) S (1,74 нм), но

Связь NaCl **ионная**, а

PbS **ковалентная**

Изоморфные ряды Вернадского

Al · Fe · Cr · Mn · Ti · B · Y · Ce · V

⏟

I

⏟

II

⏟

III

Ba · Ca · Sr · Pb

⏟

I, II

⏟

I

Br · J · Cl · F · OH

⏟

I

⏟

II, III

Важнейшие окислители:

O_2 , SO_4^{2-} , CO_2 , NO_3^- , NO_2^- , Fe^{3+} , Mn^{+4}

Mn^{+3} , Ti^{4+} , Cu^{2+} , CrO_4^{2-} , Cr^{3+}

Важнейшие восстановители

- Гидратированный электрон – образующийся при радиолизе воды (поглощении излучения)

Сольватированный электрон – электрон, захваченный средой в результате поляризации окружающих его молекул (гидратированный – в воде). Голубой цвет воды в солнечный день обусловлен именно наличием гидратированных электронов со временем жизни 10^{-5} с

- Атомарный и молекулярный водород
- Сероводород
- CH_4 , CO , органические соединения, Fe^{2+} , Mn^{+2}

Ультраокислительная обстановка

$\text{Cr}^{6+}, \text{V}^{5+}, \text{Mn}^{+4}, \text{Mo}^{+6}, \text{Fe}^{+3}, \text{N}^{+5}, \text{U}^{+6}$
(степи, пустыни, содовые озера)

Окислительная обстановка

$\text{Fe}^{+3}, \text{Mn}^{+4}, \text{Cu}^{+2}, \text{U}^{+6}$
(океаны, реки, озера)

Слабоокислительная обстановка

Fe^{+3} , Mn^{+2} , Cu^{+2} , U^{+6}

(трещинные воды скальных пород)

Слабовосстановительная обстановка

Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+2} (магма)

Восстановительная обстановка

Fe^{+2} (сероводородные гидротермы и илы морей, соляных озер, болота тайги, тундры, влажных тропиков)

Ультравосстановительная обстановка

Fe^0 (земное ядро, нижняя мантия, железные и каменные метеориты)

Механизмы массопереноса:

- Диффузия
- Конвекция

Геохимические барьеры – те участки земной коры, где на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. Играют важную роль в экзогенных процессах рудообразования.

В пределах большинства барьеров довольно резко изменяется форма нахождения элементов в мигрирующем потоке (изменение типа миграции), а затем происходят связанные с ней изменения интенсивности миграции и осаждение (концентрация определенных химических элементов или их соединений).

- Концепция геохимических барьеров основывается на 3 эмпирических правилах:
 1. Геохимические аномалии формируются на геохимических барьерах (прежде всего, физико-химических).
 2. Геохимические барьеры формируются на границах сопряженных ландшафтов (*природных географических комплексов*) или подсистем ландшафтов – «*эффект опушки*».
 3. На более контрастных геохимич. границах образуются самые емкие геохимические барьеры.

Принцип классификации геохимических барьеров



Рис. 1. Принцип классификации геохимических барьеров

- **Физико-химические барьеры.** Классификация разработана для случая осаждения х.э., мигрирующих в ионной форме в водах с различными окислительно-восстановительными и щелочно-кислотными условиями.
- **Механические барьеры.** Форма нахождения элементов не меняется. Перемещение в пределах биосферы. Второй тип миграции.
- **Биогеохимические барьеры.** Изменяется форма нахождения без значительного перемещения. Первый тип миграции. По сути накопление х.э. растительными и животными организмами.

**Типы концентрации элементов на физико-химических барьерах биосферы
(по данным А.И. Перельмана)**

Физико-химические условия	Состав вод, поступающих к геохимическому барьеру											
Окислительно-восстановительные	Кислородные				Глеевые				Сероводородные			
Щелочно-кислотные	I. Сильнокислые	II. Кислые и слабокислые	III. Нейтральные и слабощелочные	IV. Сильнощелочные (содовые)	V. Сильнокислые	VI. Кислые и слабокислые	VII. Нейтральные и слабощелочные	VIII. Сильнощелочные	IX. Сильнокислые	X. Кислые и слабокислые	XI. Нейтральные и слабощелочные	XII. Сильнощелочные
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Границы рН в зоне гипергеза	<3	3—6,5	6,5—8,5	>8,5	<3	3-6,5	6,5—8,5	>8,5	<3	3—6,5	6,5—8,5	>8,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Элементы, подвижные в водах любого состава	Na, K, Rb, Cs, N, Cl, Br, I											
Парагенная ассоциация	Li, Tl, F, Mg, Ca, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, Be, Al, Ga, In, Sc, Y, Tr, Si, Ge, Sn, Ti, Zr, Th, Cr, Mo, W, U, P, As, V, Nb, Ta	Li, Tl, F, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Ag, Au, Be, Al, Ga, In, Sc, Y, TR, Si, Ge, Sn, Ti, Zr, Th, Cr, Mo, W, U, P, As, V, Nd, Ta	Li, Tl, Mg, Ca, Sr, Zn, Se, Cr, Mo, W, U, Re	Li, F, B, Zn, Cu, Ag, Be, Al, Sc, Y, Si, Ge, Sn, Ti, Zr, Th, Cr, Mo, W, U, Re, V, Nb	Li, Tl, F, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Ag, Au, Be, Al, Ga, In, Sc, Y, Si, Ge, Sn, Ti, Zr, Th, Cr, Mo, W, U, P, V, Nb, Ta	Li, Tl, F, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Ag, Au, Be, Al, Ga, In, Sc, Y, Si, Ge, Sn, Ti, Zr, Th, Cr, Mo, W, U, P, V, Nb, Ta	Li, Tl, Mg, Ca, Sr, Ba, Mn, Fe, Co, Ni, Hg, Mo, W, U	Li, Tl, F, B, Mn, Cu, Zn, Cd, Hg, Be, Al, Sc, Ga, Y, Si, Ti, Ge, Zr, Sn, Mo, W, U	Li, Ti, F, Mg, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd, Hg, Be, Al, Ga, Sc, Y, TR, Ge, Sn, Zr, Th, Cr, P, As	Li, F, Tl, Mg, Ca, Sr, Ba	S, Se	Li, F, Be, B, Al, Sc, Y, TR, Zr

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>A</i> — кислородный барьер	<i>A1</i> Fe	<i>A2</i> Fe, Mn, Co	<i>A3</i> Mn	<i>A4</i> —	<i>A5</i> Fe	<i>A6</i> Fe, Mn, Co	<i>A7</i> (Fe), Mn, Co	<i>A8</i> (Mn)	<i>A9</i> S, Se, (Fe)	<i>A10</i> S, Se	<i>A11</i> S, Se	<i>A12</i> S, Se
<i>B</i> — сульфидный (сероводородный и др.) барьер	<i>B1</i> Ti, Cu, Hg, Pb, Cd, Bi, Sn, As, Sb, Mo, W, U	<i>B2</i> Ti, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Sn, Cr, Mo, U	<i>B3</i> Ti, Cr, Mo, U, Se, Re, V	<i>B4</i> Cu, Ag, Zn, Cr, Mo, U, V, As	<i>B5</i> Ti, Pb, Cd, Bi, Sn	<i>B6</i> Ti, Fe, Co, Ni, Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, U	<i>B7</i> Ti, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, (Mo), (U)	<i>B8</i> Ti, Cu, Zn, Cd, Hg, Mn, (Fe, Co, Ni, U)	<i>B9</i> —	<i>B10</i> —	<i>B11</i> —	<i>B12</i> —
<i>C</i> — глеевый барьер	<i>C1</i> Cu, U, Mo	<i>C2</i> Cu, U, Mo	<i>C3</i> Cu, Cr, U, Mo, Re, Se, V	<i>C4</i> Cu, Ag, Cr, Mo, U, Re, Se, V, As	<i>C5</i> Cu, U, Mo	<i>C6</i> Cu, U, Mo	<i>C7</i> Mo, U	<i>C8</i> Mo, U	<i>C9</i> —	<i>C10</i> —	<i>C11</i> —	<i>C12</i> —
<i>D</i> — щелочной барьер	<i>D1</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb,	<i>D2</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg,	<i>D3</i> —	<i>D4</i> —	<i>D5</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb,	<i>D6</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb,	<i>D7</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Cd, Mn, Co, Ni	<i>D8</i> —	<i>D9</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Pb, Cd,	<i>D10</i> Mg, Ca, Sr, Ba	<i>D11</i> —	<i>D12</i> —

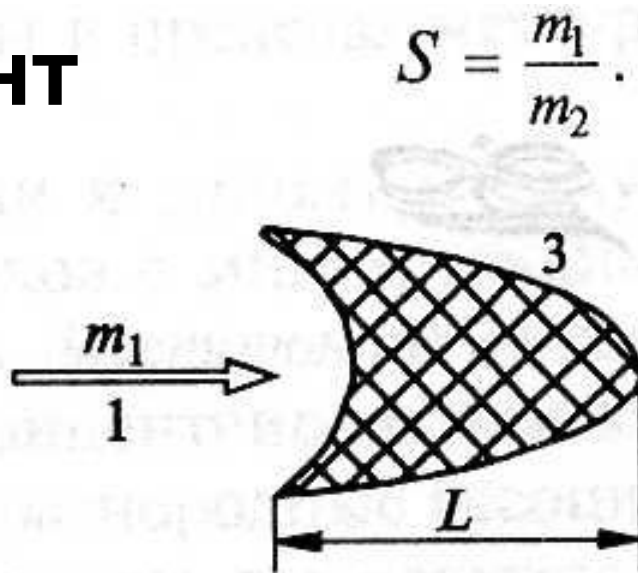
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, TR, Cr, P, As, U	Be, (U)			Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, TR, Cr, P, As, (U)	Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, TR, Cr, P, As, (U)			Be, Al, Ga, Y, TR, Cr, P, As			
<i>E</i> — кислый барьер	<i>E1</i> —	<i>E2</i> —	<i>E3</i> Si, Mo	<i>E4</i> (Cu), (Zn), Ag, Be, Al, Ga, Sc, Y, Tr, Si, (Ge), Zr, (Ti), Mo, Cr, V	<i>E5</i> —	<i>E6</i> —	<i>E7</i> Si, Mo	<i>E8</i> (Cu), (Zn), Be, Al, Ga, Sc, Y, TR, Si, Zr, (Ti), Mo	<i>E9</i> —	<i>E10</i> —	<i>E11</i> Si, Ge	<i>E12</i> Be, Al, Ga, Sc, Y, Tr, Si, Ge, Zr, (Ti)
<i>F</i> — ис- пари- тельный барьер	<i>F1</i> Na, K, Rb, Tl, Cl, Mg, Ca, Sr, S, Mn,	<i>F2</i> —	<i>F3</i> Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br,	<i>F4</i> Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br,	<i>F5</i> Na, K, Rb, Tl, Cl, Mg, Ca, Sr, S, Mn,	<i>F6</i> —	<i>F7</i> Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, Cl, Br, I,	<i>F8</i> Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br,	<i>F9</i> Li, Na, K, Rb, F, Cl, Br, I, Mg, Ca,	<i>F10</i> —	<i>F11</i> Li, Ma, K, Rb, F, Cl, Br, I, Mg, Ca,	<i>F12</i> Li, Na, K, Rb, N, B, F, Cl, Br, I

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Al, Mo, U		I, Mg, Ca, Sr, S, Zn, Mo, U, V, Se	I, Cu, Zn, Mo, U, Se	Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Al, Mo, U		Mg, Ca, Sr, S, Zn	I, Zn	Sr, S		Sr, S	
<i>G</i> — сорбционный барьер	<i>G1</i> Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	<i>G2</i> Si, Ba, Zn, Cd, Ni, Co, Pb, Cu, U, Cl, Br, I, F, S, P, V, Mo, As	<i>G3</i> Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, Zn, (Cl, Br, I, B, F, S, P, V, Mo, As)	<i>G4</i> Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, (Cl, Br, I, B, F, S, P, V, Mo, As)	<i>G5</i> Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	<i>G6</i> Si, Ba, Zn, Cd, Ni, Co, Pb, Cu, U, Cl, Br, I, F, S, P, Fe, Mn	<i>G7</i> Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, Zn, (Cl, Br, I, B, F, S, P)	<i>G8</i> Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, (Cl, Br, I, B, F, S, P)	<i>G9</i> Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	<i>G10</i> Sr, Ba, (Cl, Br, I, F, B, S, P)	<i>G11</i> Li, Na, K, Rb, Cs, (Cl, Br, I, F, B, S, P)	<i>G12</i> Li, Na, K, Rb, Cs, (Cl, Br, I, F, B, P)
<i>H</i> — термодинамический барьер	<i>H1</i> —	<i>H2</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Ni	<i>H3</i> (Li), Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Pb	<i>H4</i> Zn, (Cu), (U)	<i>H5</i> —	<i>H6</i> Mg, Ca, Sr, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Ni, Fe	<i>H7</i> (Li), Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Pb, Mn	<i>H8</i> Zn, (Cu), U	<i>H9</i> —	<i>H10</i> Mg, Ca, Sr, Ba	<i>H11</i> Mg, Ca, Sr, Ba	<i>H12</i> —

Количественные характеристики геохимических барьеров

G-градиент барьера

$(m_1 - m_2) / l$



S-контрастность барьера

m_1 / m_2

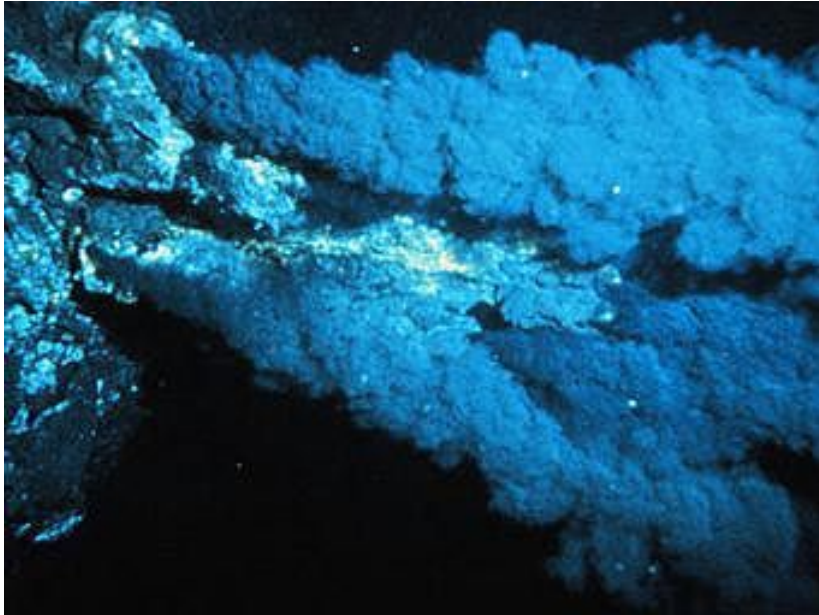
Рис. 4. Параметры геохимических барьеров (по А.И. Перельману): 1, 2 — направления миграции химических элементов соответственно до и после барьера; 3 — область концентрации элементов на барьере; L — длина барьера; m_1 и m_2 — геохимические характеристики среды соответственно до и после барьера

Окислительный барьер



- При разгрузке минерализованных вод на поверхности окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} (железо выпадает в виде гидроксида).
- Выпадение элементарной серы в газовых фумаролах при окислении сероводорода.

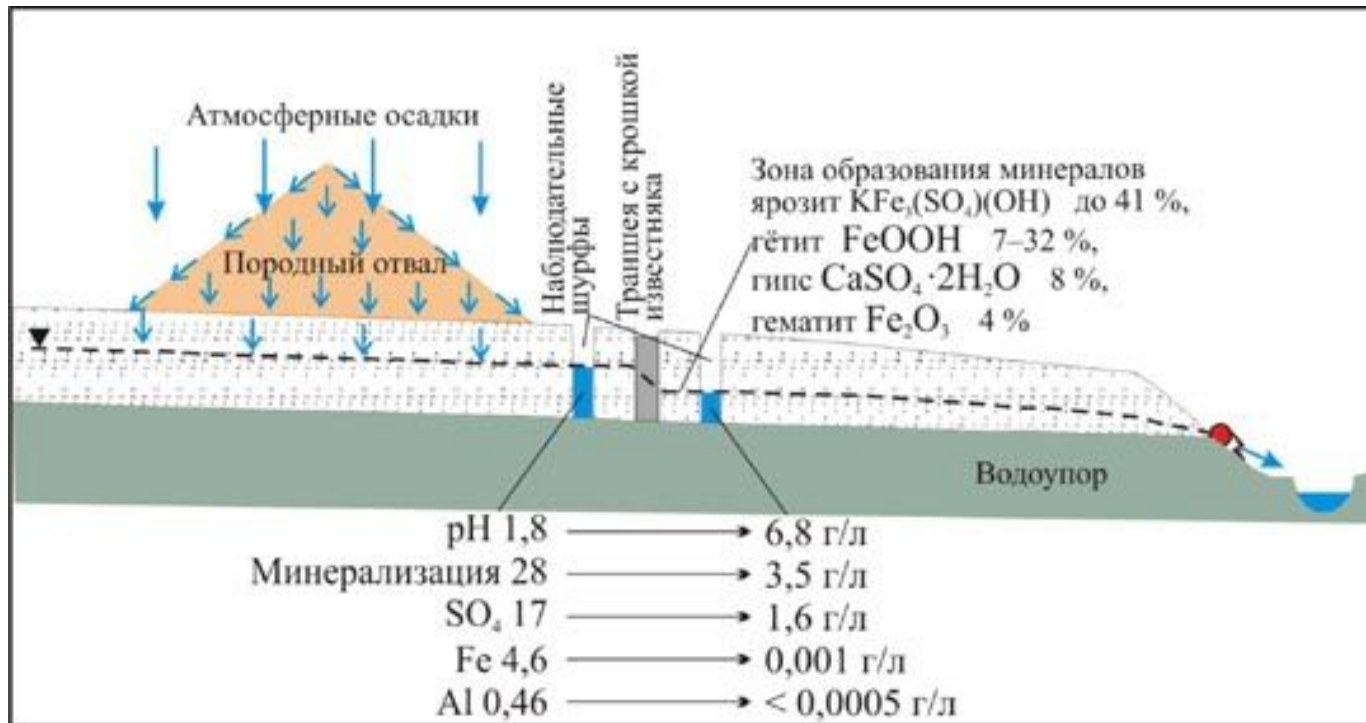
Восстановительный барьер



Наличие в системе сульфидной серы снижает подвижность халькофильных элементов («черные курильщики»).

Барьеры, где восстановитель органическое в-
во

Щелочной барьер



Увеличение pH водных растворов из-за их реакции с вмещающими породами.

Например, очистка стоков кислых вод через траншею с крошкой известняка.

Кислотный барьер (смешанный тип барьера)



В осадок выпадают элементы, подвижные в щелочных растворах.

Например, смешение щелочных вод (природных) с кислотами (серная кислота образуется при окислении руд).

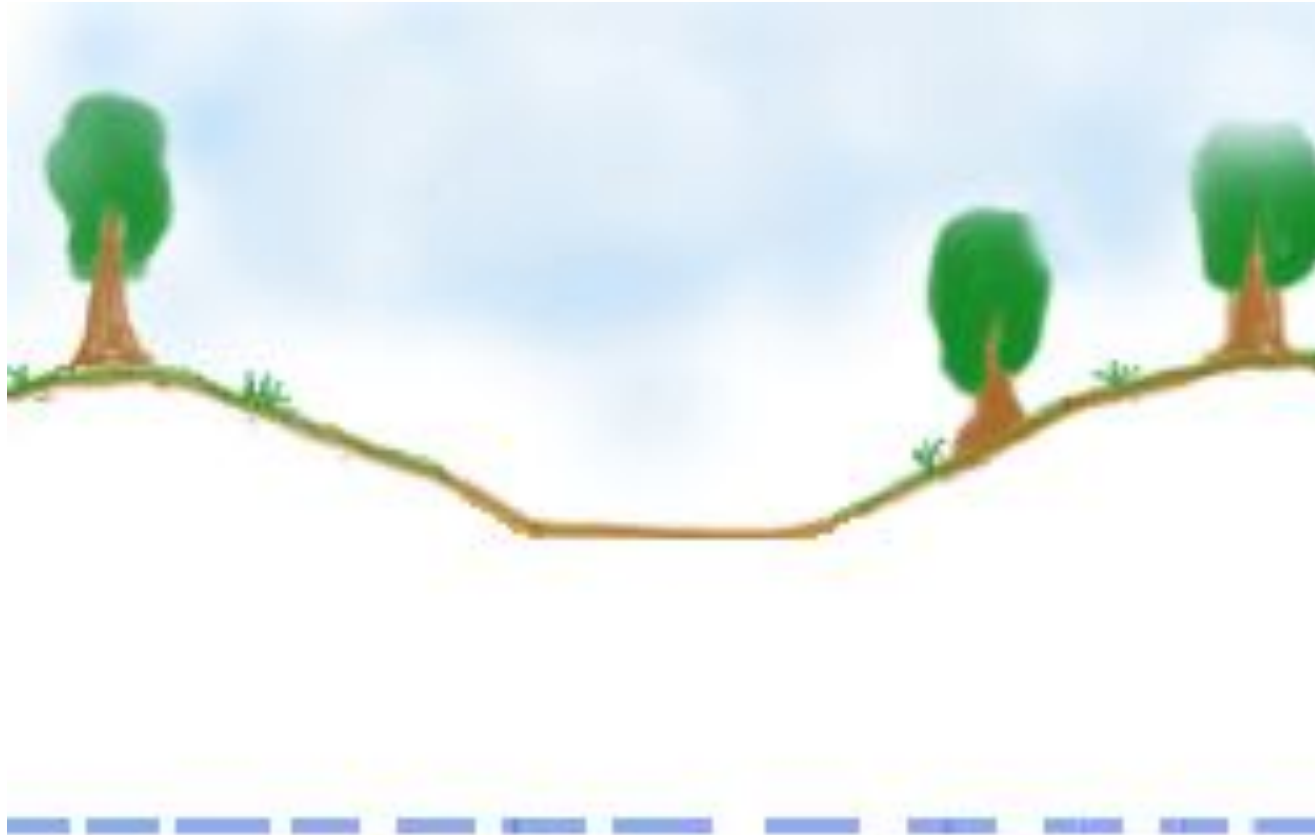
Сорбционный барьер



Где имеется активная и хорошо развитая минеральная поверхность.

Например, коры выветривания, почвы, донные осадки.

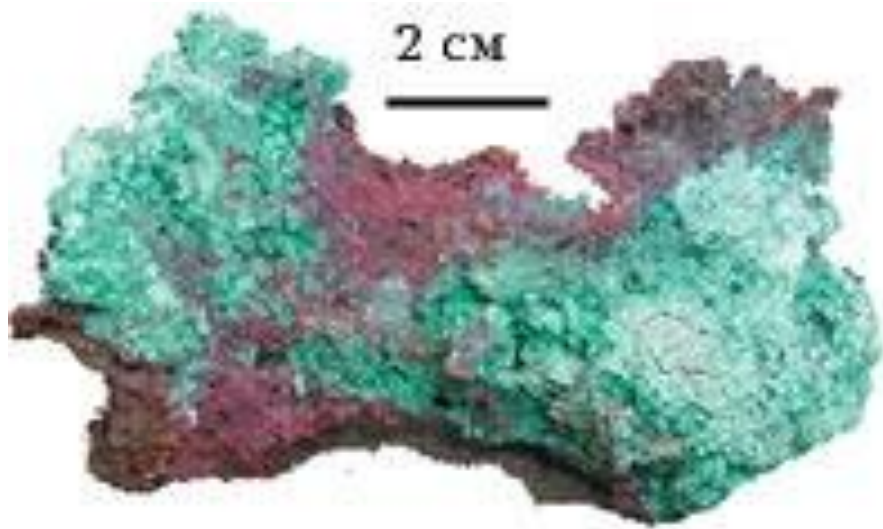
Испарительный барьер



уровень грунтовых вод

Формирование испарительного геохимического барьера при подъеме уровня грунтовых вод

Техногенный барьер



В отвале с искусственно созданными геохимическими барьерами образуется металлическая медь, покрытая слоем малахита $\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$.