

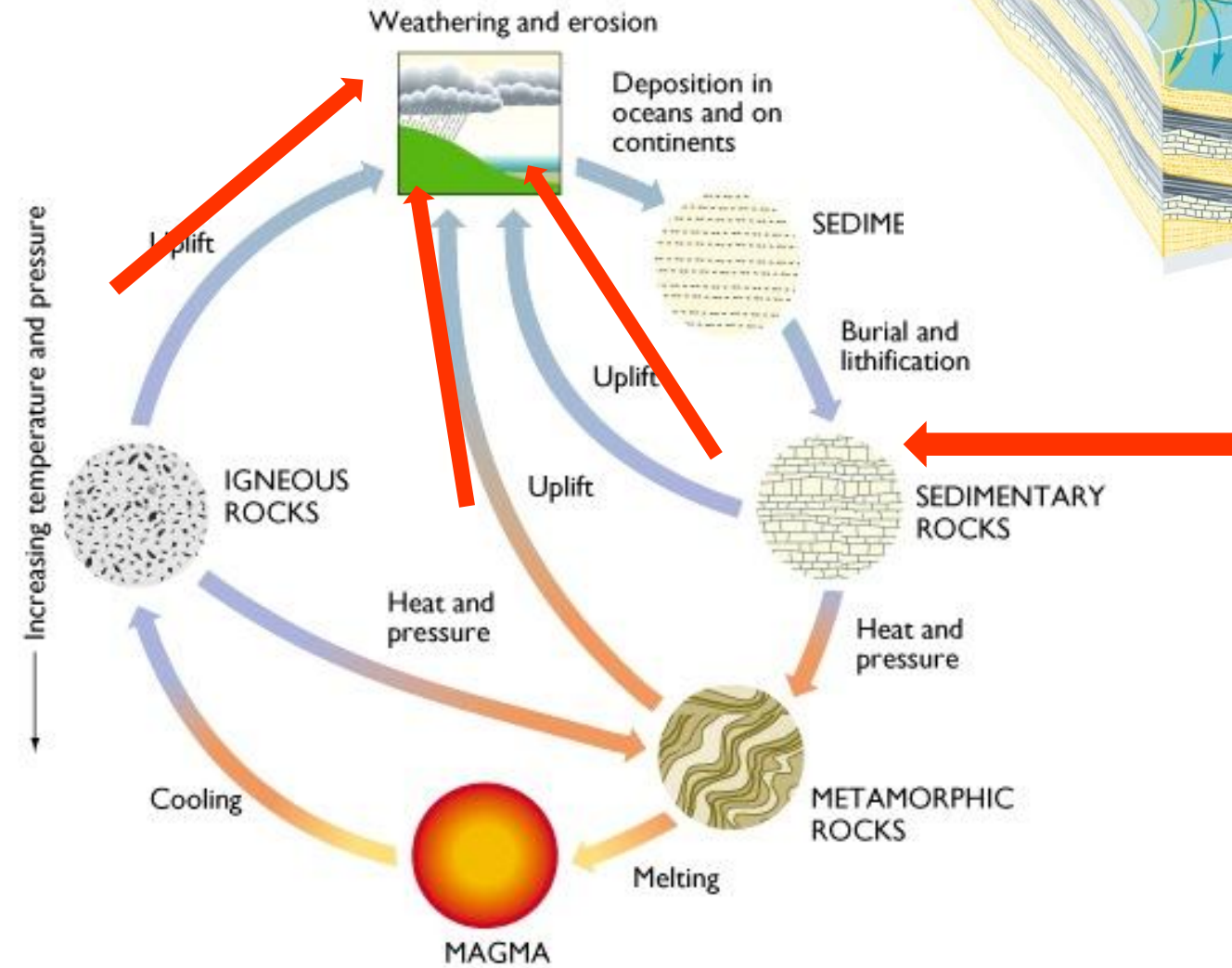
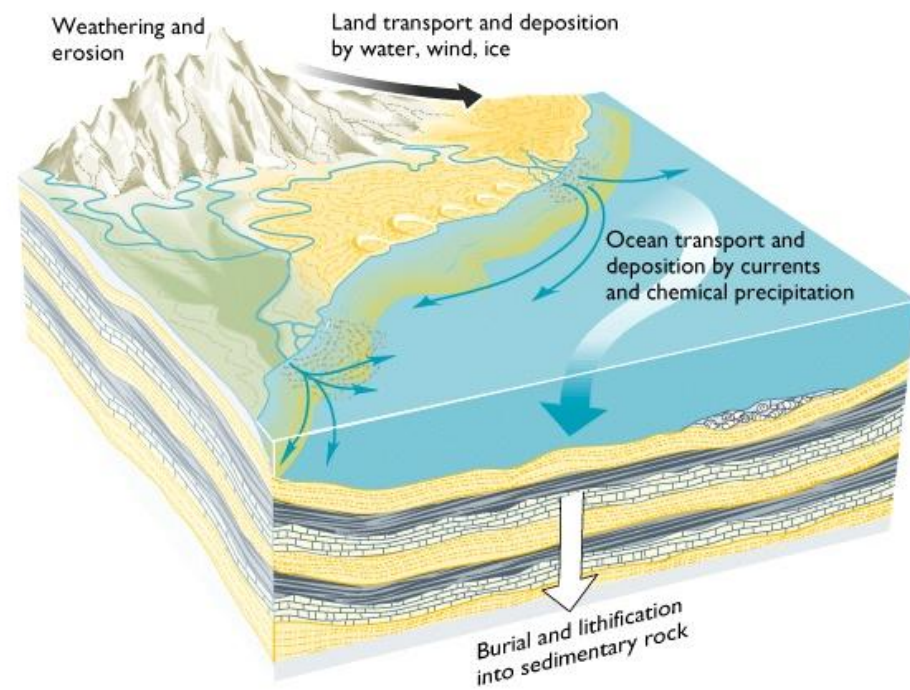


Общая геохимия

Лекция 20

Геохимия гипергенных процессов

Гипергенные (экзогенные) процессы



Осадочные
процессы

- **Экзогенные процессы** - геологические процессы, обусловленные внешними по отношению к Земле источниками энергии (преимущественно солнечное излучение) в сочетании с силой тяжести.
- Экзогенные процессы протекают на поверхности и в приповерхностной зоне земной коры в форме механического и физико-химического её взаимодействия с гидросферой и атмосферой.
- Факторы экзогенных геохимических процессов – T , влажность, Eh , живое вещество. P – атмосфера и глубины океанов

Основные типы экзогенных процессов

- собственно ГИПЕРГЕНЕЗ – преобразование пород и руд, формирование кор выветривания, зон окисления и т.д.;
- ПЕДОГЕНЕЗ – почвообразование на суше;
- СИНГЕНЕЗ – водное осадкообразование;
- ДИАГЕНЕЗ – преобразование осадков, приводящее к их уплотнению;
- КАТАГЕНЕЗ – совокупность геохимических и минералогических процессов, происходящих в осадочных породах при повышенных температурах с участием воды, углекислого газа и других компонентов;

- ГАЛОГЕНЕЗ – осаждение солей из водных растворов;
- ГИДРОГЕНЕЗ – совокупность процессов, вызываемых проникновением природных вод в литосферу (карст и т.д.);
- МЕХАНОГЕНЕЗ – процессы механического переноса и осаждения вещества;
- БИОГЕНЕЗ – совокупность биогеохимических процессов;
- ТЕХНОГЕНЕЗ – совокупность геохимических процессов, вызываемых различной деятельностью человека;
- Криогенез – отрицательные температуры;
- Атмогенез – процессы в атмосфере.

ГИПЕРГЕНЕЗ

- **ГИПЕРГЕНЕЗ** - совокупность процессов химического и физического преобразования минеральных веществ в верхних частях земной коры и на ее поверхности под действием атмосферы, гидросферы и живых организмов.
- Весь комплекс физико-химических явлений, происходящих на поверхности Земли, А.Е. Ферсман назвал гипергенезом .

Процессы в зоне гипергенеза

В зоне гипергенеза, соответствующей приповерхностной биокосной части литосферы, выведенные на поверхность либо на дно морского бассейна горные породы стремятся прийти в равновесие с окружающей средой. Основными источниками энергии здесь являются солнечное тепло и в значительно меньшей степени внутренне тепло Земли. Важнейшую роль в гипергенных процессах играют органическое вещество и вода.

Процессы в зоне гипергенеза

- Верхней границей служит земная поверхность. Нижняя граница соответствует уровню затухания воздействия на горные породы фотосинтезирующей жизни, что сопровождается резким сокращением содержания кислорода и соответственно изменением условий среды (Eh, pH, угнетение процессов окисления, гидролиза, коллоидообразования).
- Обычная мощность зоны гипергенеза не превышает десятков метров, но иногда гипергенные процессы проявляются на глубинах в сотни и даже первые тысячи метров.

- Их проявление в глубинных зонах приурочено к зонам трещиноватости, карстовым полостям, поверхностям контактов пород, подземным горным выработкам, сохраняющим связь с земной поверхностью и служащим путями проникновения гипергенных агентов.
- В зависимости от условий процессы гипергенеза можно разделить на три группы:
- **поверхностный (или наземный) гипергенез** – комплекс явлений и процессов, происходящих непосредственно на поверхности суши или связанных с проникающими в толщу пород

- **глубинный (или подземный) гипергенез** - комплекс явлений и процессов, происходящих ниже земной поверхности и связанных с воздействием подземных вод, движущихся по водоносным горизонтам или восходящих по проницаемым зонам (заметим, что эти воды также имеют поверхностное происхождение);
- **подводный гипергенез (или гальмиролиз)** - комплекс явлений и процессов, происходящих на дне морей и океанов при взаимодействии морских вод с горными породами.
- Формирование продуктов поверхностного гипергенеза связано с процессами

Выветривание

- Выветривание – это процесс изменения и разрушения минералов и горных пород на земной поверхности под воздействием физических, химических и органических факторов.
- В зависимости от того, какие факторы обуславливают процессы преобразования пород, выветривание можно подразделить на физическое (или механическое) и на химическое.
- Биогенные процессы, очень широко проявленные в процессах выветривания, проявляются как в механическом, так и в химическом воздействии на минеральный субстрат.

- Механическое разрушение пород при биогенном выветривании осуществляется, например, корнями растений, расширяющими трещины, или роющими организмами (черви, муравьи, термиты, суслики, кроты и др.).
- Биохимические процессы активно воздействуют на минеральное вещество как в процессе жизнедеятельности (лишайники извлекают минеральные вещества из минералов), так и поставляя химически активные соединения в процессе разложения (органические кислоты, возникающие при разложении листвы и пр.).
Взаимодействие минерального и органического



Химическое выветривание – растворение или изменение первичных минералов обычно при реакции с водными растворами.

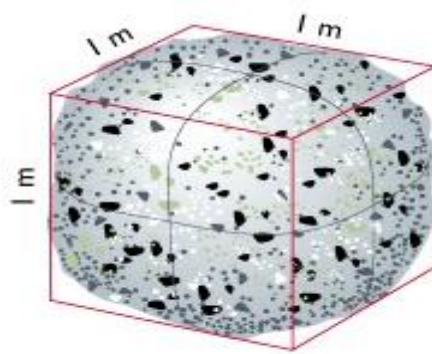
Физическое

выветривание – дезинтеграция породы на более мелкие частицы (*обнажение – валуны – обломки пород и минералов – «песок»*). Не приводит к



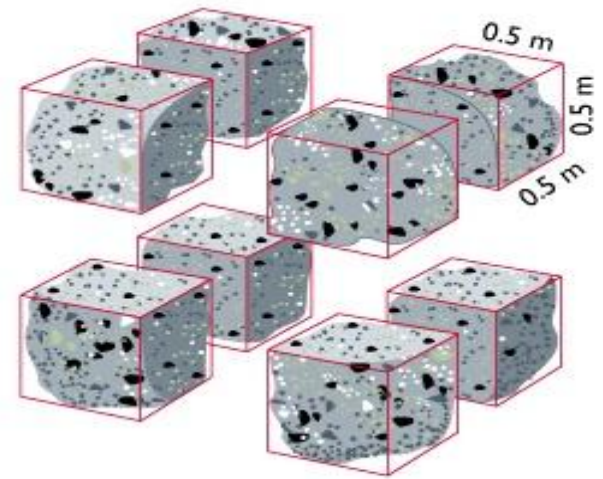
- Основные физические факторы – колебания температуры, давление водных пленок, ветер – приводят к растрескиванию пород, превращению их из плотных низкопористых в рыхлые пористые образования с большой удельной поверхностью.
- Физическое выветривание подготавливает почву для химического. Увеличение пористости и удельной поверхности резко улучшает контакт породы с водой и кислородом воздуха – главными агентами химического выветривания.





Single boulder, approximately 1 m on a side
 Volume = 1 m^3
 Surface area = 6 m^2

Breakup along fractures

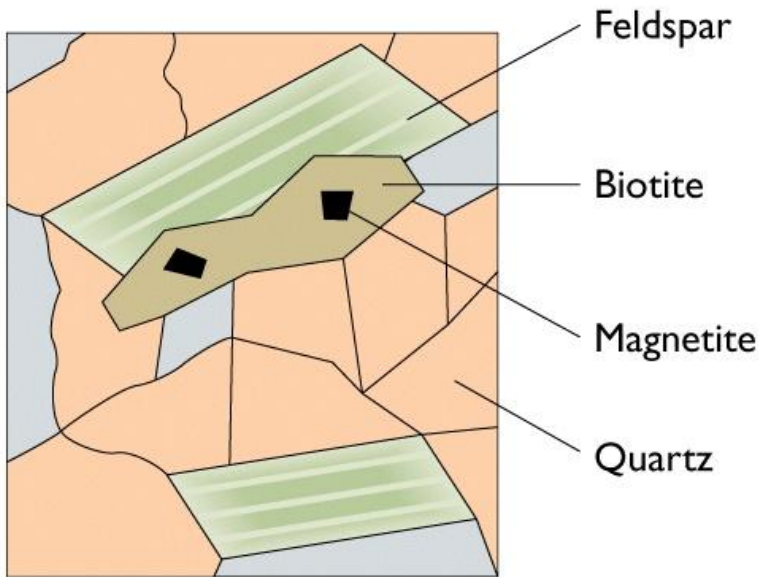


8 fragments, each approximately 0.5 m on a side
 Volume = $(0.5)^3 \times 8 = 1 \text{ m}^3$
 Surface area = 12 m^2

Физ. выветривание увеличивает S
 поверхности, облегчая хим.

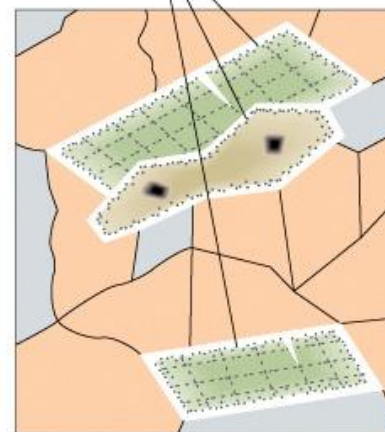
выветривание

- Развитие глинистых минералов по трещинам облегчает физическое выветривание



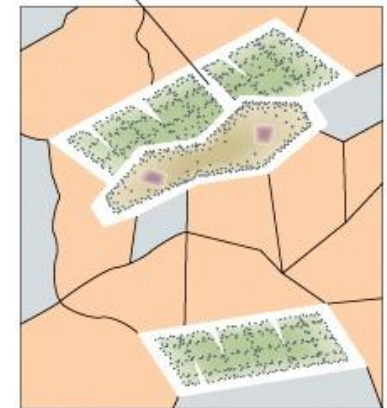
(a) Fresh granite

Incipient cracks form along crystal boundaries, and feldspar, biotite, and magnetite start to decay

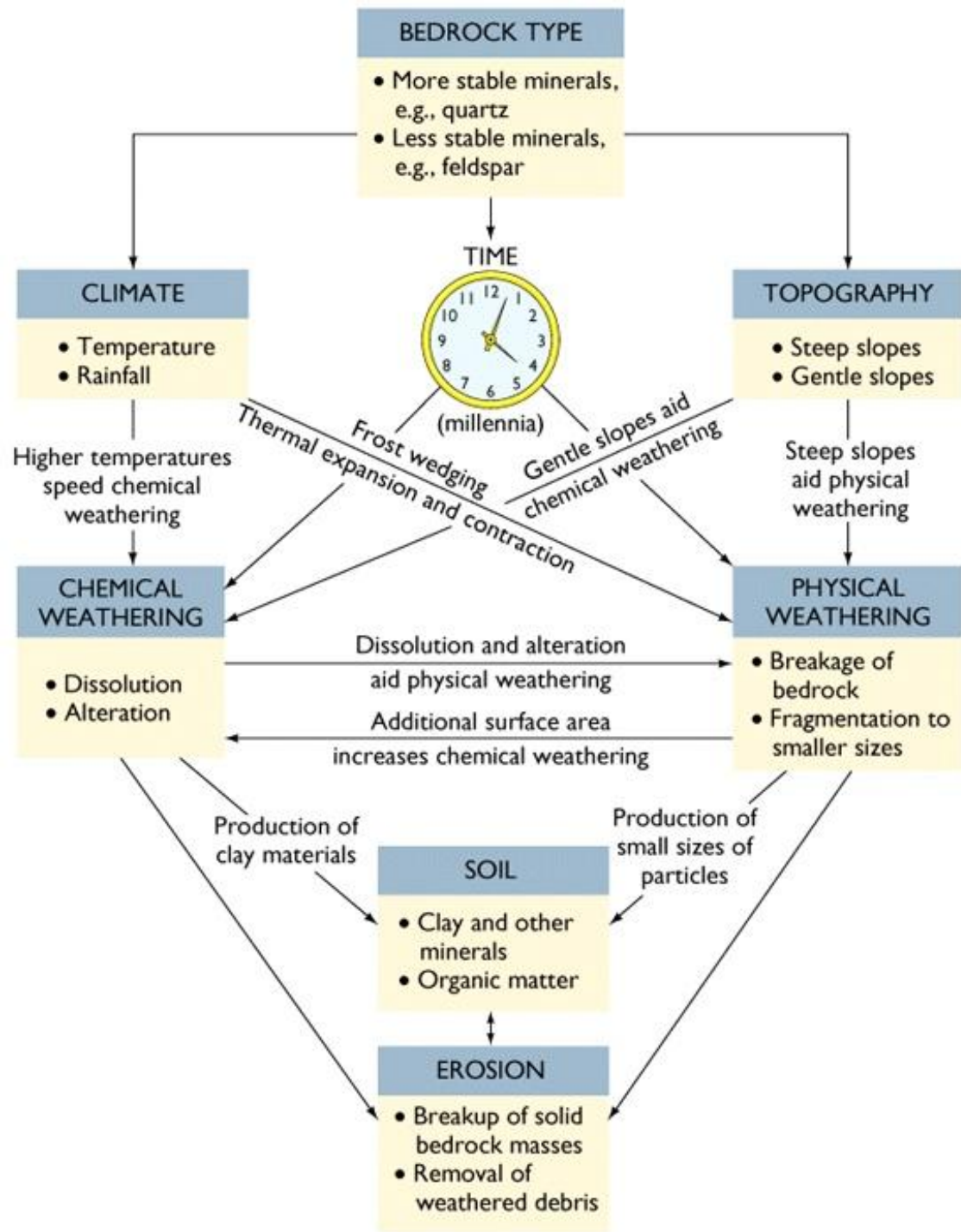


(b) Granite starting to weather

Decay of feldspar, biotite, and magnetite progresses: as cracks open, rock weakens and is easily disintegrated



(c) Granite extensively weathered



Различные процессы гипергенеза, как правило, протекают совместно. Но интенсивность каждого из них не одинакова и, зависит прежде всего от климата, т.е. от количества осадков и температуры. Также зависит от рельефа.

Физическое выветривание

- Физическое выветривание подразделяется на температурное и морозное.
- **Температурное выветривание** – разрушение горных пород и минералов на поверхности Земли под влиянием колебаний температуры. Известно, что при нагревании и охлаждении твёрдые тела изменяют свой объём. В результате суточных колебаний температуры горных породах возникают напряжения двух типов.
- Напряжения первого типа (объёмно-градиентные) связаны с неравномерным нагреванием поверхностной и более глубоких частей массива; различие температур в этих частях массива приводят к образованию трещин, направленных параллельно его поверхности. Вследствие этого происходит шелушение и осыпание пород.

- Второй тип напряжений в пределах объёма породы и минерала связан с различием коэффициентов теплового расширения-сжатия минералов. Напряжения этого типа приводят к раскалыванию до уровня минеральных зёрен и далее, по трещинам спайности, до образования частиц размером до сотых долей мм.
- Быстрее разрушаются темноокрашенные минералы, а также крупнокристаллические породы с большими различиями коэффициентов расширения составляющих их минералов.
- Так в процессе температурного выветривания массив пород разрушается с образованием обломочных пород различного размера – от щебня до алевритового материала. Суточные колебания температуры проявляются до глубины 1 м, что определяет максимальную мощность возникающих таким путём обломочных отложений.

- Наиболее активно температурное выветривание протекает в пустынях и, в несколько меньшей степени, в нивальных областях и в высокогорных районах, не покрытых снегом. Этому способствует сочетание двух факторов: 1) резкие суточные колебания температуры, достигающие 50°C и 2) обнажённость горных пород ввиду отсутствия растительного покрова и почвенного слоя.

- **Морозное выветривание** – разрушение горных пород в результате периодического замерзания попадающей в трещины воды.
- Попадая в трещины, в холодное время суток вода замерзает – превращается в лёд, объём которого больше. Кристаллизующийся лёд оказывает на стенки трещин весьма существенно давление, достигающее 1000 кг/см^3 и более, что значительно выше прочности большинства горных пород. Давление льда приводит к расширению трещин и раскалыванию пород на крупные обломки размером от десятков сантиметров до метров в диаметре. Отсутствие более мелкого материала обусловлено тем, что свободная вода не способна проникать в микротрещины.

- В результате физического выветривания образуются особые формы ландшафта. Если выветривание происходит в горной области, где имеются плоские, горизонтальные поверхности, то продукты выветривания накапливаются на них в виде глыб и более мелкого дресвяного материала. В результате создаются элювиальные россыпи и ландшафты беспорядочного нагромождения глыб, получившие название «каменных морей».
- Характерным ландшафтом зон физического выветривания являются каменистые пустыни, или, как их называют в Сахаре, гаммады.
- Гаммады представляют собой нагромождения глыб и щебня, образующиеся за счёт выветривания горизонтально лежащих платов горных пород и выноса ветром пылеватых и песчаных продуктов их разрушения.

Причины физического выветривания (дезинтеграции)

- 1. Дилатация (расширение, растяжение) - разрушение горных пород, связанное с их расширением. Это происходит, когда горные породы сформировавшиеся в условиях высоких давлений, попадают на поверхность.
- 2. Температурное разрушение - вызвано суточными и сезонными колебаниями температуры.
- 3. Механическое разрушение пород растениями - корневая система проникает по трещинам, расширяя их.

Химическое выветривание

- Химическое выветривание представляет собой процесс химического преобразования минералов и горных пород под воздействием воды, кислорода, углекислого газа, органических кислот, а также вследствие биогеохимических процессов.
- Необходимо отметить ещё одну функцию воды, без которой невозможно химическое преобразование пород: вода обеспечивает «доставку» агентов химического выветривания и вынос продуктов реакций.
- Транспортировка веществ происходит почвенно-грунтовыми водами в виде истинных и коллоидных растворов.
- Важное значение в процессах химического выветривания имеют органические кислоты, активно способствующие разложению минералов. Процессы химического выветривания протекают

- Необходимыми условиями глубоко химического выветривания являются:
- климат, при котором достигается сочетание высоких температур и влажности (гумидный тропический);
- обилие и характер растительности (при её разложении образуются органические кислоты, активно разрушающие минералы);
- выровненный рельеф, обеспечивающий неподвижность продуктов разрушения;
- продолжительность выветривания.
- относительно легкорастворимые соединения.

- Роль ландшафтных условий:
- В гумидных ландшафтах развита лесная растительность, обладающая огромной биомассой. Почвенные воды гумидных ландшафтов обладают кислой реакцией и активно воздействует на минералы горных пород; в таких условиях выветривание протекает под воздействием постоянного промывания пород кислыми растворами.
- В аридных ландшафтах, отличающихся недостаточной увлажнённостью, распространена травянистая растительность. Её биомасса в десятки раз меньше биомассы лесов. Почвенные воды имеют нейтральную или слабощелочную реакцию, поэтому интенсивного промывания выветривающейся толщи агрессивными водами не происходит, и в ней постепенно сохраняются

Химическое выветривание

- В поверхностных условиях происходят химические реакции, которые приводят к образованию новых минералов, устойчивых в этих условиях.
- Химическими реагентами являются поверхностные и подземные воды, часто минерализованные и содержащие O_2 , CO_2 и т.п.
- Основные типы химического разрушения-растворение, окисление, гидратация и гидролиз.

Основные процессы химического

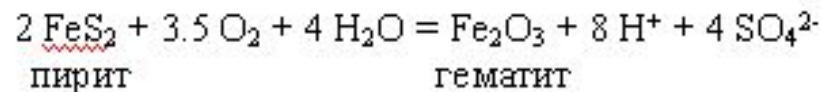
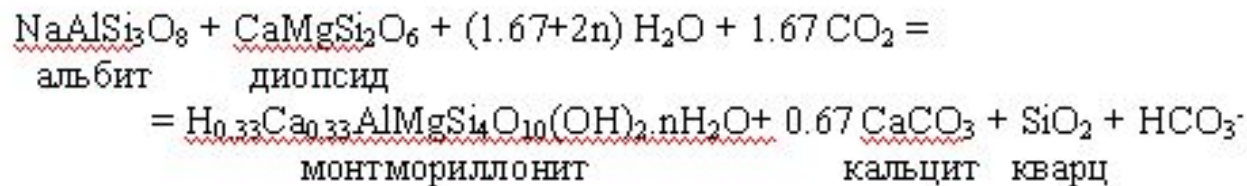
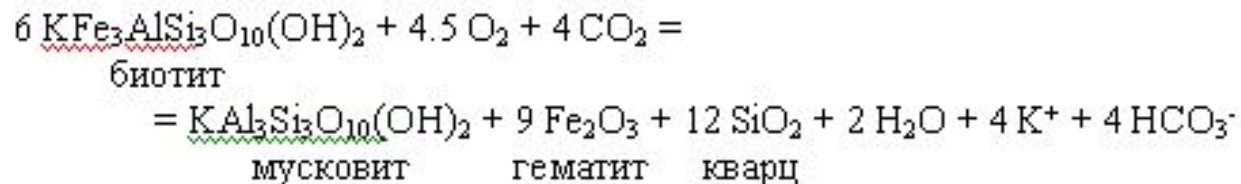
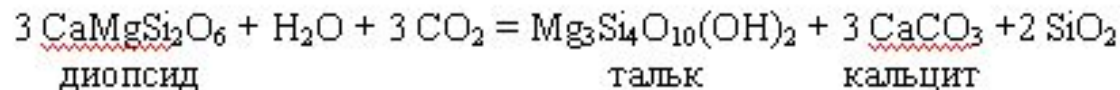
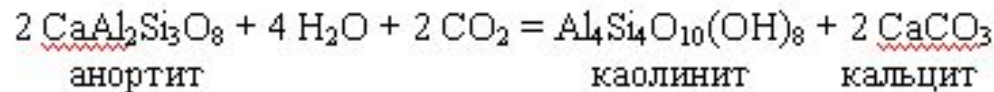
выветривания

TABLE 2.2 Principal processes of chemical weathering

Name of process	Nature of process	Examples	Principal types of rock materials affected
Hydrolysis	Reaction between H ⁺ and OH ⁻ ions of water and the ions of silicate minerals, yielding soluble cations, silicic acid and clay minerals (if Al present)	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mg}^{+2} + 4\text{OH}^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$ (fosterite) (silicic acid) $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9 + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{K}^+$ (orthoclase) aq (kaolinite) (silicic acid) aq $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 9\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9 + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{Na}^+$ (albite) aq (kaolinite) (silicic acid)	Silicate minerals
Hydration and dehydration	Gain or loss of water molecules from a mineral, resulting in formation of a new mineral	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (gypsum) (anhydrite) $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{FeOOH}$ (hematite) (goethite)	Evaporites Ferric oxides
Oxidation	Loss of an electron from an element (commonly Fe or Mn) in a mineral, resulting in the formation of oxides or, if water is present, hydroxides	$4\text{FeSiO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SiO}_2$ (pyroxene) (hematite) (quartz) $\text{MnSiO}_3 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 + \text{H}_4\text{SiO}_4$ (rhodonite) $2\text{FeS}_2 + 15/2 \text{O}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+$ (pyrite) (hematite)	Iron and manganese-bearing silicate minerals, sulfur
Solution	Dissolution of soluble minerals, commonly in the presence of CO ₂ , to yield cations and anions in solution	$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ [carbonation] (calcite) (bicarbonate) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ [direct solution] (gypsum)	Carbonate rocks Evaporites
Ion exchange	Exchange of ions, principally cations, between solutions and minerals	Na-clay + H ⁺ → H-clay + Na ⁺	Clay minerals
Chelation	Bonding of metal ions to organic molecules having ring structures	Metal ions (cations) + chelating agent [excreted by lichens] → H ⁺ ions + chelate [in solution]	Silicate minerals

Хелаты - клешневидные комплексные соединения, образуются при взаимодействии ионов металлов с молекулами некоторых органических соединений.

Примеры реакций выветривания



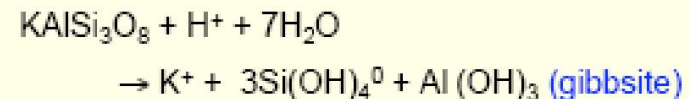
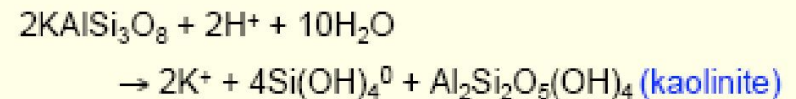
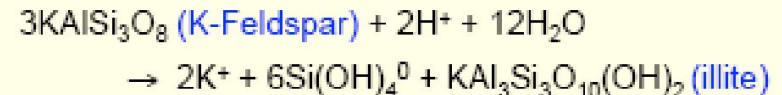
Weathering Rates of Crustal Minerals

(-log rate in mole/m²/s at pH 5 and 25 °C)

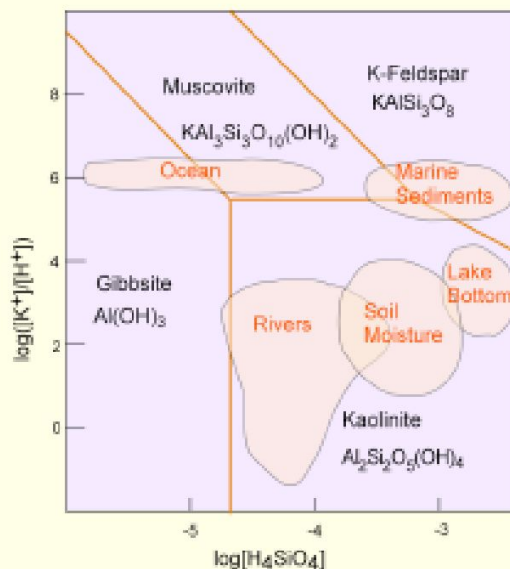


Dissolution of Primary Minerals (cont.)

Minerals containing Al tend to dissolve *incongruently* because Al³⁺ is very insoluble at pH 6-7.



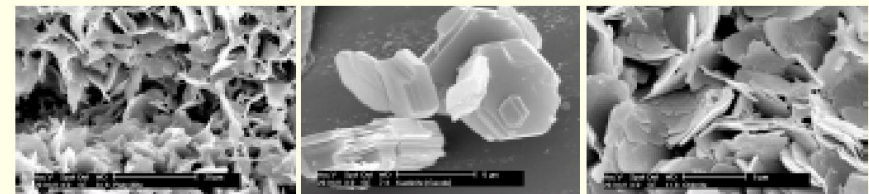
Minerals buffer Water Composition



- Phase Rule: $f=c-p+2$
- $c = 4$ (H₂O, K, Si, Al)
- P and T are fixed.

Clay Minerals

The aluminosilicate which form by incongruent dissolution occur as very small particles (< 0.002 mm) and are part of a group of phases known as *clay minerals*. Aside from quartz, clay minerals are the dominant phase in soils and sediments.

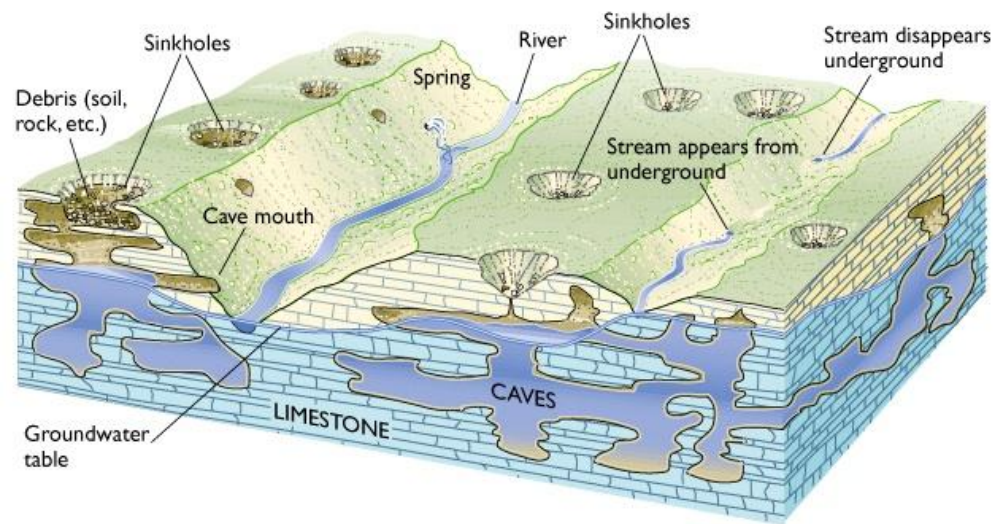


$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (illite)

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (kaolinite)

$\text{Mg}_3(\text{OH})_6(\text{AlMg}_2)(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (chlorite)

- **Растворение** происходит под действием воды минералов и горных пород. Наиболее растворимы-карбонаты, галоиды, сульфаты. Образующиеся при этом пустоты в массиве горных пород приводят к обвалам и разрушению.
- Установлено, что химические элементы, входящие в состав горных пород, обладают разной способностью растворяться и выноситься, т.е. подвижностью.
- Элементы: энергично выносятся **Cl, Br, I, SO₄**
- легко выносятся **Ca, Na, Mg, K**
- подвижные **SiO₂ (силикатов), Mn, P, Cu, Ni, Co**
- инертные **Al, Fe, Ti**
- практически неподвижные: **SiO₂ (кварц).**



карстовая воронка



В кислотных водах
кальцит
растворяется без
остатка:

$$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$$

- Окисление** происходит под действием кислорода и воды на минералы, в формулу которых входят Fe, Cu, Mn, Al . Наиболее интенсивно окисление наблюдается в сульфидах. Так для минерала пирита реакция проходит:
- $FeS_2 + mO_2 + nH_2O \rightarrow Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (лимонит), большое количество которого над сульфидными месторождениями называют “железная шляпа”.
- $CuFeS_2 + H_2O + O_2 + CO_2 \rightarrow Cu_2O + Cu_2(CO_3)(OH)_2 + Fe_2O_3$
 nH_2O
 халькопирит □ куприт-малахит-лимонит
- Гидратация** - процесс вхождения в кристаллическую решетку минералов молекулы воды.
- Типичный пример- превращение ангидрита в



Вкрапленность малахита в кальците.
Еланское проявление.
Иркутская область



- **Гидролиз** - процесс разрушения кристаллической решетки под действием воды и ионов в силикатах и алюмосиликатах. Например, у полевых шпатов: каркасная структура превращается в слоистую ,
- из кристаллической решетки выносятся растворимые соединения K, Na, Ca;
- Процесс гидролиза проходит в несколько стадий, количество которых как и конечный продукт зависят от климатических условий.
- Так при умеренном климате ортоклаз превращается в каолинит, и на этом процесс завершается. Но если эта реакция происходит при жарком и влажном климате, то процесс гидролиза продолжается и каолинит переходит в боксит (окислы и гидроокислы Al).

- В последние десятилетия геологи большое значение стали придавать процессам гипергенеза, происходящих под водой, с общим названием **гальмиролиз**. В результате образуются Fe-Mn-Si руды, глауконит и глины.
- **Продукты гипергенеза** - минералы и горные породы. Они могут оставаться на месте или перемещаться в условиях расчлененного рельефа.
- **Элювий** - это продукты физического разрушения, оставшиеся на месте после своего образования. Они представляют собой обломочный материал разного размера - от глыб (курумы) до элювиальных песков и глин.
- **Делювий** - это скопление рыхлых продуктов выветривания у подножия и у нижних частей возвышенностей. Делювий образуется в результате переноса этих продуктов дождевыми потоками, талыми водами (плоскостного смыва). Немаловажную роль в этом играет сила тяжести.
- **Коллювий** - те же продукты физического разрушения,

Эрозия и транспорт

- Изменение минералов с увеличением дистанции переноса похоже на продолжение обычного химического выветривания. Наиболее химически стабильные минералы транспортируются дальше.
- Облик частиц изменяется абразией при переносе ветром или в водной среде. Ближе к источнику частицы остроугольны, далеко от источника — округлены.

Table 7.1

Minerals Remaining in Clastic Sediments Derived from an Average Granite Outcrop Under Varying Intensities of Weathering

Intensity of Weathering		
Low	Medium	High
Quartz	Quartz	Quartz
Feldspar	Feldspar	Clay minerals
Mica	Mica	
Pyroxene	Clay minerals	
Amphibole		

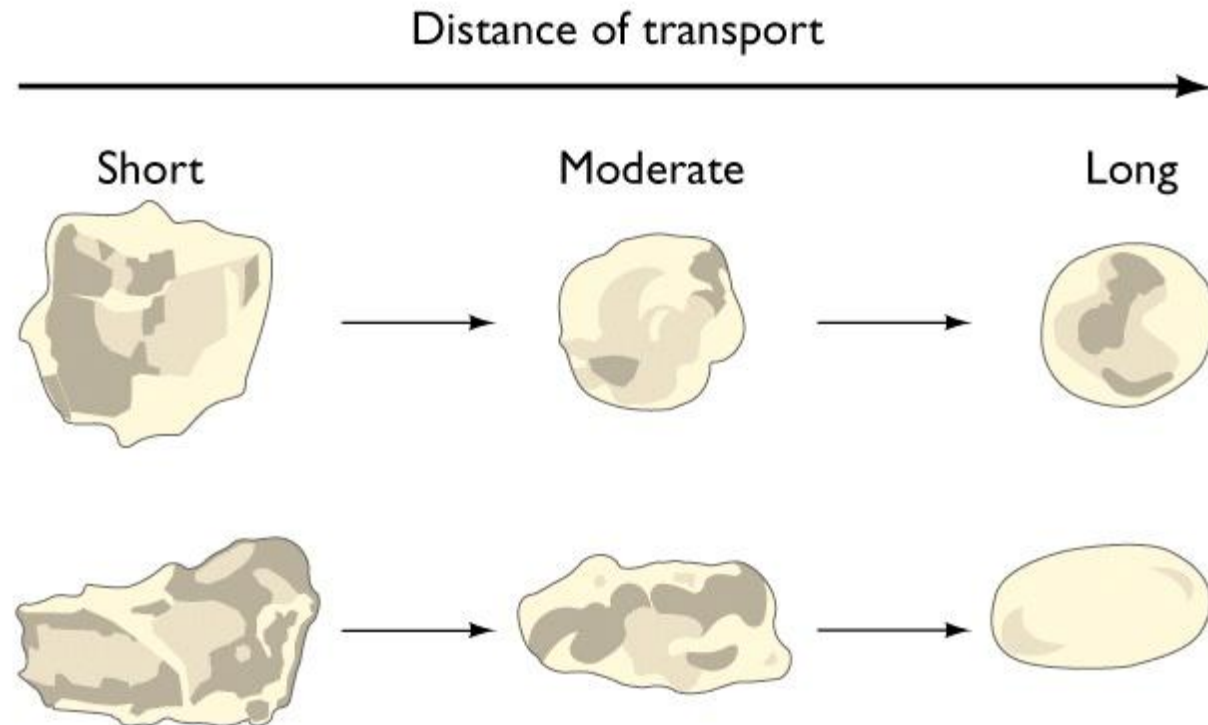


Table 6.2

Stability of Common Minerals Under Weathering

Stability of Minerals	Rate of Weathering
Most stable	Slowest
Iron oxides (hematite)	↓
Aluminum hydroxides (gibbsite)	
Quartz	
Clay minerals	
Muscovite mica	
Potassium feldspar (orthoclase)	
Biotite mica	
Sodium-rich feldspar (albite)	
Amphiboles	
Pyroxene	
Calcium-rich feldspar (anorthite)	
Olivine	
Calcite	
Halite	
Least stable	Fastest

- Химическое выветривание направлено к минимизации термодинамической энергии (как химические реакции при высокой температуре) и стремится к наиболее стабильным ассоциациям и фазам. Но:
 - 1. Кинетика реакций медленная и метастабильное состояние обычно.
 - 2. Стабильные минералы при влажных окружающих условиях другие, чем при высоких P и T.
 - 3. Растворимость в воде и зависимость от химизма воды (pH и др.) – главные факторы стабильности минералов при выветривании.

- При химическом выветривании первыми разрушаются те минералы, которые выделились первыми из магматического расплава (реакционные ряды Боуэна), т.е. минералы с минимальным запасом внутренней энергии для данных условий.
- **Последовательность увеличения устойчивости к химическому выветриванию: содалит-нефелин-оливин-ортопироксен-клинопироксен-амфибол-биотит-основной плагиоклаз-мусковит-кварц.**

**Относительная устойчивость важнейших породообразующих
и аксессуарных минералов при процессах выветривания**

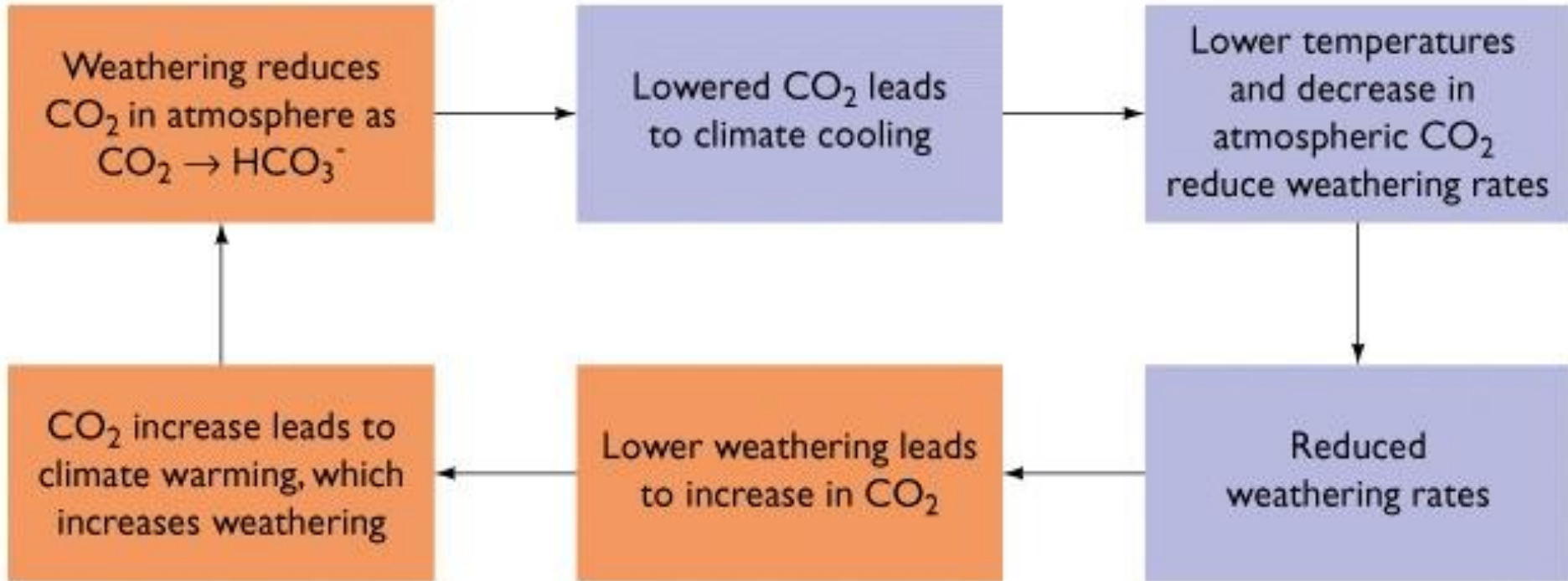
Быстро изменяются]	Медленно изменяются	Устойчивы
Фельдшпатоиды	Светлые слюды	Пироп
Оливин	Хлориты	Альмандин
Основные плагиоклазы	Актинолит	Титаномагнетит
Ромбические пироксены	Диопсид	Ильменит
	Эпидот	Турмалин
Скаполит	Са-гранаты	Топаз
Авгит	Ортит	Монацит
Щелочные амфиболы	Везувиан	Анатаз
	Вольфрамит	Рутил
Биотит	Шеелит	Брукит
Пирротин	Корунд	Циркон
Пирит	Магнетит	Шпинель
Сфалерит	Гематит	Золото
Халькопирит	Кианит	Платина
	Андалузит	Алмаз
	Силлиманит	
	Апатит	

Реликтовые минералы материнских пород в осадочных породах

Кварцевые песчаники и кварциты	Аркозы, граувакки, полимиктовые песчаники	Глинистые и алевролит- песчаные породы	Карбонатные породы и эвапориты
Кварц* Корунд Гематит Ильменит Рутил Анатаз Брукит Шпинель Хромит Магнетит Циркон Альмандин Андалузит Дистен Ставролит Эпидот Актинолит Турмалин Монацит	Кварц* Гематит Ильменит Рутил Магнетит Титаномагнетит Циркон Гранаты Дистен Ставролит Сфен Цоизит Эпидот Ортит Пироксены Актинолит Роговая обманка Биотит Хлориты* Хлоритоид Монацит Апатит Барит* Dolomite*	Кварц* Гематит Рутил Циркон Апатит Пирит* Марказит* Пирролюзит* Лимонит* Барит* Сидерит* Родохрозит* Малахит*	Кварц* Барит* Celestine* Ангидрит* Магнезит* Сидерит* Dolomite* Стронцианит* Лимонит* Гематит* Пирит*

* Минералы, которые могут также являться в этих породах новообразованиями.

Скорость химического выветривания



- Ультраосновная неизменная порода (оливин+пироксены) □ глины и оксиды железа, остальные элементы уйдут в раствор.
- Кислая неизменная порода (полевые шпаты+кварц) □ глины и гидроксиды, кварц.

Кора выветривания

- **Кора выветривания** – это континентальная геологическая формация, образующаяся на земной поверхности в результате выветривания горных пород.
- Продукты изменения, оставшиеся на месте своего первичного залегания, называют **остаточной корой выветривания**, а перемещенные на небольшое расстояние, но не потерявшие связи с материнской породой — **переотложенной корой выветривания**. Некоторые геологи к коре выветривания относят продукты размыва и переотложения почв и остаточной коры выветривания, именуя их **аккумулятивной корой выветривания** (пролювий, делювий и т. д.).

- По форме залегания различают **площадную кору выветривания**, перекрывающую плащом коренные породы (мощность — десятки см — первые десятки м), и **линейную**, вытянутую в одном направлении и проникающую в глубь коренной породы по трещинам (выклиниваются на глубине нескольких десятков м от поверхности земли, реже достигают глубины 100-200-1500 м).
- Разложение большой массы органических веществ приводит к образованию CO_2 и органических кислот, которые, просачиваясь из почвы в кору выветривания, производят глубокое разложение горных пород и кислое выщелачивание растворимых продуктов выветривания.

- Из коры выветривания выносятся большинство подвижных элементов — Ca, Mg, Na, K, Si, многие редкие металлы.
- Кора выветривания относительно **обогащается наименее подвижными элементами** — Fe, Al, Ti, Zr и др. с образованием гидроокислов Fe и Al, каолинита, галлуазита и др. глинистых минералов.
- Гидроокислы Fe придают коре выветривания красную и бурю окраску. В условиях спокойного тектонического режима во влажных тропиках кора выветривания достигает мощности десятков метров, а в зонах разломов — сотен метров.
- В зависимости от минерального состава различают ряд типов выщелоченной коры выветривания (каолиновая, латеритная и т. д.).

Ряды миграции химических элементов в коре выветривания силикатных пород (по Б.Б. Польшину с упрощениями)

Интенсивность миграции	Химические элементы
Очень сильная	Cl, S, B, Br, I
Сильная миграция	Ca, Na, Mg, Sr, Zn, Mo, U, F
Средняя миграция	Si, K, Mn, Ba, Ni, Co, Cu
Слабая и очень слабая миграция	Al, Fe, Ti, Zr, Y, Nb, Ta, Sn, Pt

Ряды миграции химических элементов в коре выветривания
силикатных пород (А.И. Перельман)

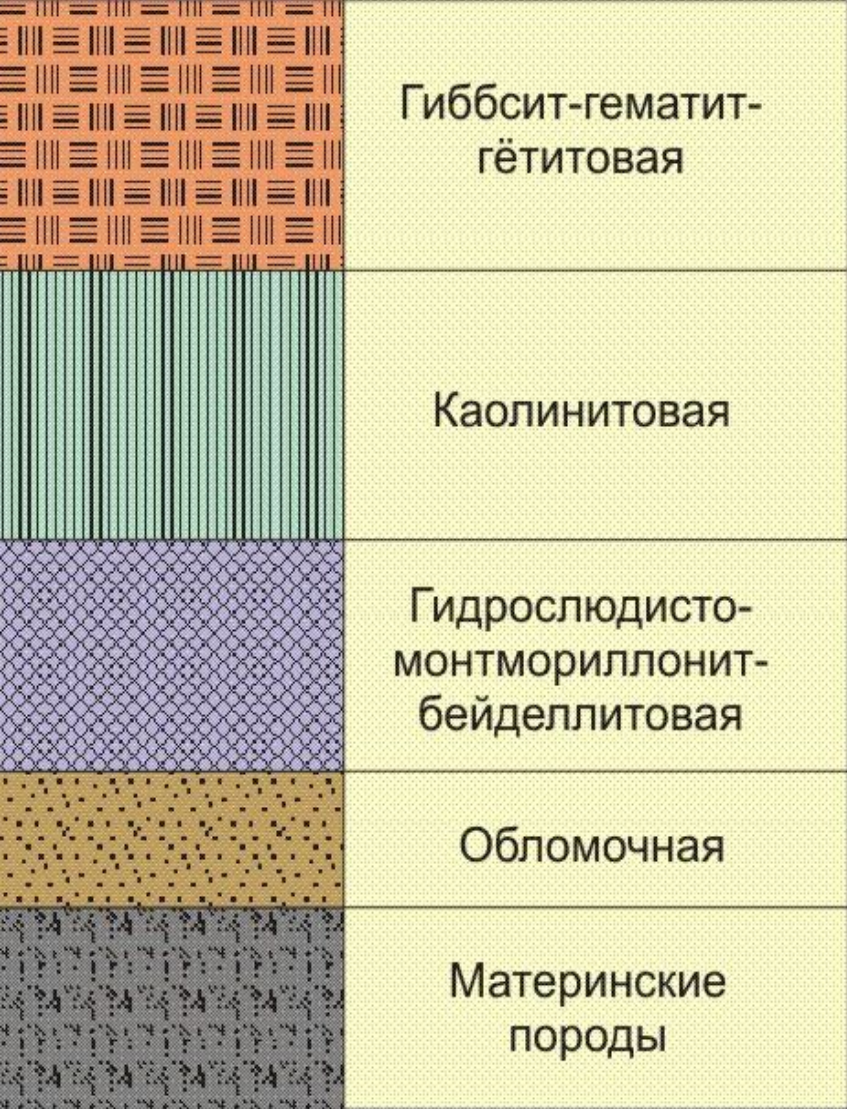
Интенсивность миграции	K_x^*				
	100	10	1	0,1	0,01
Очень сильная миграция	S, Cl B, Br J				
Сильная миграция		Ca, Na Mg, F Sr, Zn Sc			
Средняя миграция			Si, K, Mn P, Ba, Rb Ni, Cu, Xi CO, Cs, As Ni, Ra		
Слабая и очень слабая миграция				Al, Fe, Ti, Zr, Y, Nb, R, Th, Be Ta, Sn, Hf, Pd, Ru, Rh, Os, Pt	

* K_x – коэффициент водной миграции.

Формирование коры выветривания

- Кора выветривания - это специфический продукт физического и химического процессов гипергенеза. Её формирование проходит в несколько стадий:
- 1. Обломочная - преобладает физическое разрушение горных пород (дезинтеграция).
- 2. Сиаллитная - преобладает гидролиз с образованием глинистых минералов (каолинит, нонтронит).
- 3. Аллитная - преобладает окисление глинистых минералов и оксидов и гидрооксидов Fe, Al, Mn, Si. Образуются минералы - лимонит, гематит, «боксит», пиролюзит, опал, халцедон. Продукты этой стадии окрашены в красно-бурый цвет и похожи на обожженный кирпич, поэтому их еще называют латеритами (later-высушенный кирпич).

- Развитие всех стадий зависит от климата, рельефа, состава материнских пород и т.д. В свою очередь минеральный состав коры выветривания зависит от того, сколько стадий гипергенеза протекало в массиве горных пород и каким был первичный химический состав этих исходных (или материнских) пород. Кора выветривания ультраосновных пород отличается минеральным составом от коры, образованной по породам кислого состава.
- Коры выветривания по времени своего образования делятся на **современные и древние**.



Профиль коры выветривания

Кора выветривания на гранитах
 1 - **горизонт щебенчатой, или обломочной, коры выветривания**, образованный дезинтегрированным в ходе физического выветривания гранитом;

2 - **гидрослюдистый горизонт**, слабосцементированная масса, прослеживается структура исходного гранита, но значительная часть щелочей и щелочноземельных элементов из минералов вынесена, и большая часть полевых шпатов замещена агрегатом гидрослюд

3 - **каолинитовый горизонт**, светлая глинистая масса с участками рыхлого щебнистого материала и бурые пятна от скопления гидрооксидов Fe. Гидрослюды замещены каолинитом

Подвижность пороодообразующих минералов в различных физико-химических условиях, естественно, определяет (наряду с составом субстрата) тип формирующейся коры выветривания. Для образования каолиновых кор выветривания необходимо, чтобы из пород были вынесены элементы, кроме Si и Al. Это возможно во влажном климате с умеренными температурами. При этом окислительный потенциал должен обеспечить выведение из системы железа: в окислительных условиях — в виде оксидов или гидроксидов, в восстановительной — в виде пирита или марказита.

В формировании монтмориллонитовой коры выветривания участвуют кроме кремния и алюминия также магний и железо. Поэтому циркуляция вод должна быть пониженной, рН среды щелочным, а окислительный потенциал — обеспечить подвижность железа в растворе. Это соответствует полузасушливому климату.

Для образования бокситовой коры выветривания необходимо, чтобы рН имел значение между 9 и 10, когда кремний подвижен, а алюминий инертен.

Для образования основных глинистых минералов необходимы следующие условия [Дегенс, 1967]:

- каолинит и галлуазит — кислая среда и наличие в системе Si, Al, K, Na, Ca;
- иллит — слабощелочная среда и тот же набор компонентов;
- монтмориллонит и хлорит — щелочная—околонейтральная среда и наличие Si, Al, Mg, Ca, Fe.

При увеличении влажности климата монтмориллонитовые глины сменяются каолиновыми, а затем — бокситами.

Таким образом, глубина переработки кристаллических пород и тип коры выветривания, образующейся в результате этого, зависят от климатических факторов. Однако физико-химические условия могут меняться не только в зависимости от климатических зон, но и в одном и том же разрезе по глубине.

Главные катионы металлов в системе, в которой формируются глинистые минералы
 pH порошка (Si, Al, K Na, Ca) (Si, Al, Mg, Ca, Fe)

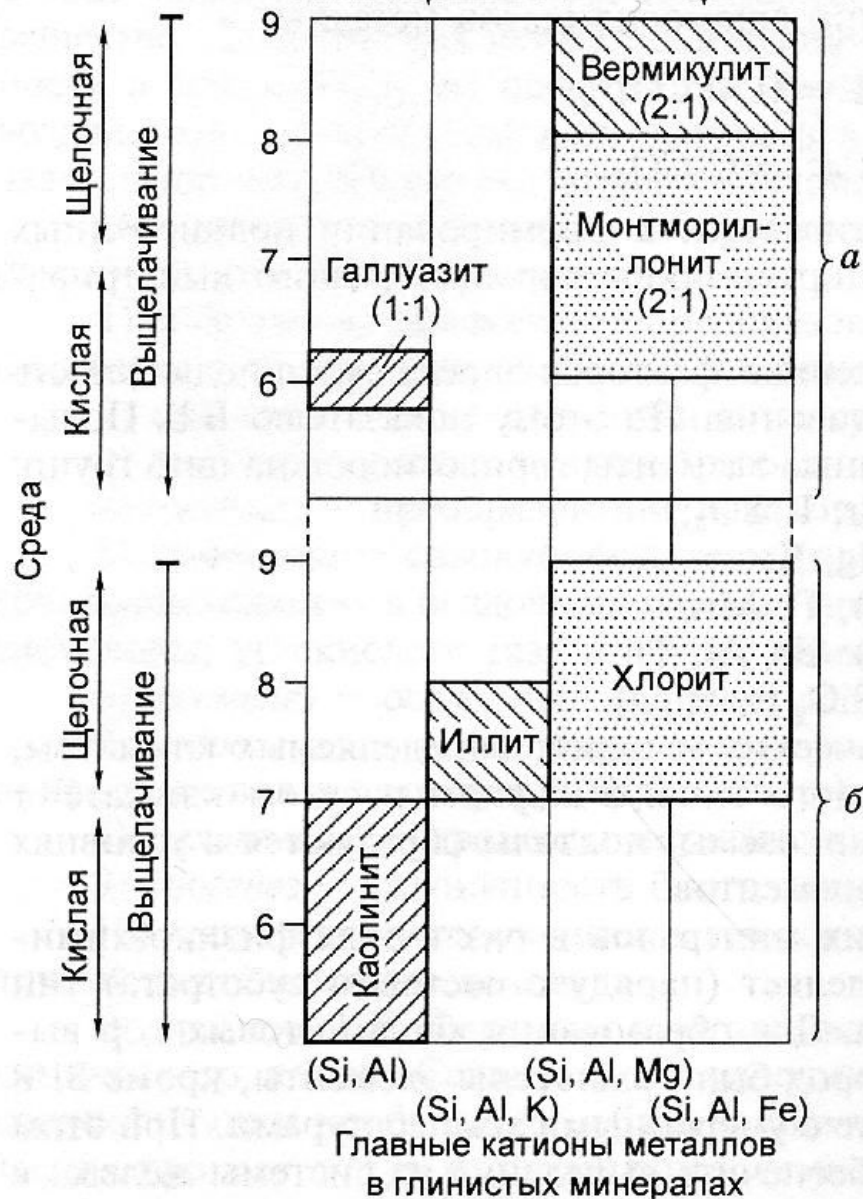


Рис. 3.16. Основные условия, необходимые для образования глинистых минералов [Дегенс, 1967].

Глинистые минералы: *a* – содержащие межслоевую воду, *b* – не содержащие межслоевую воду.

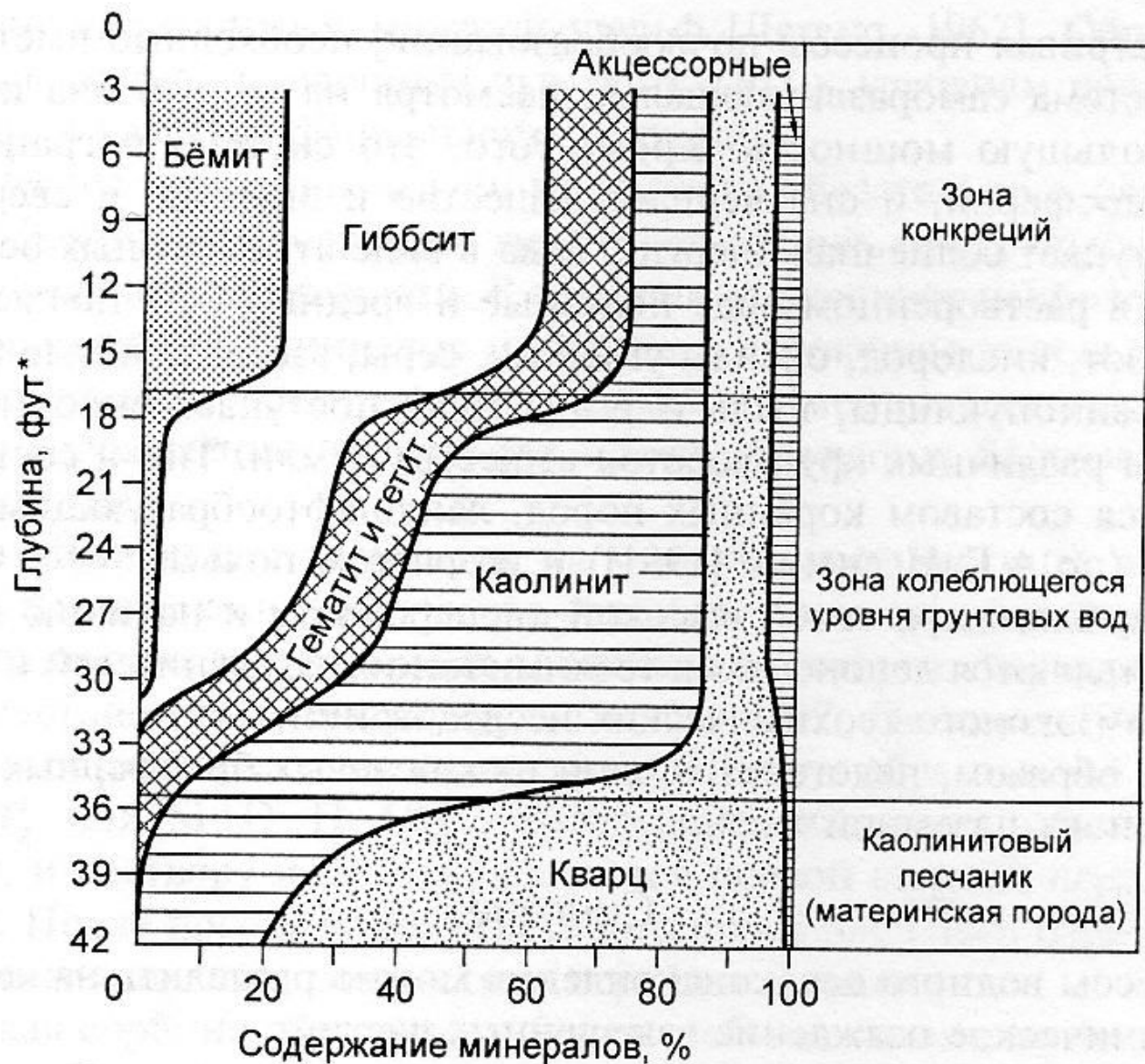
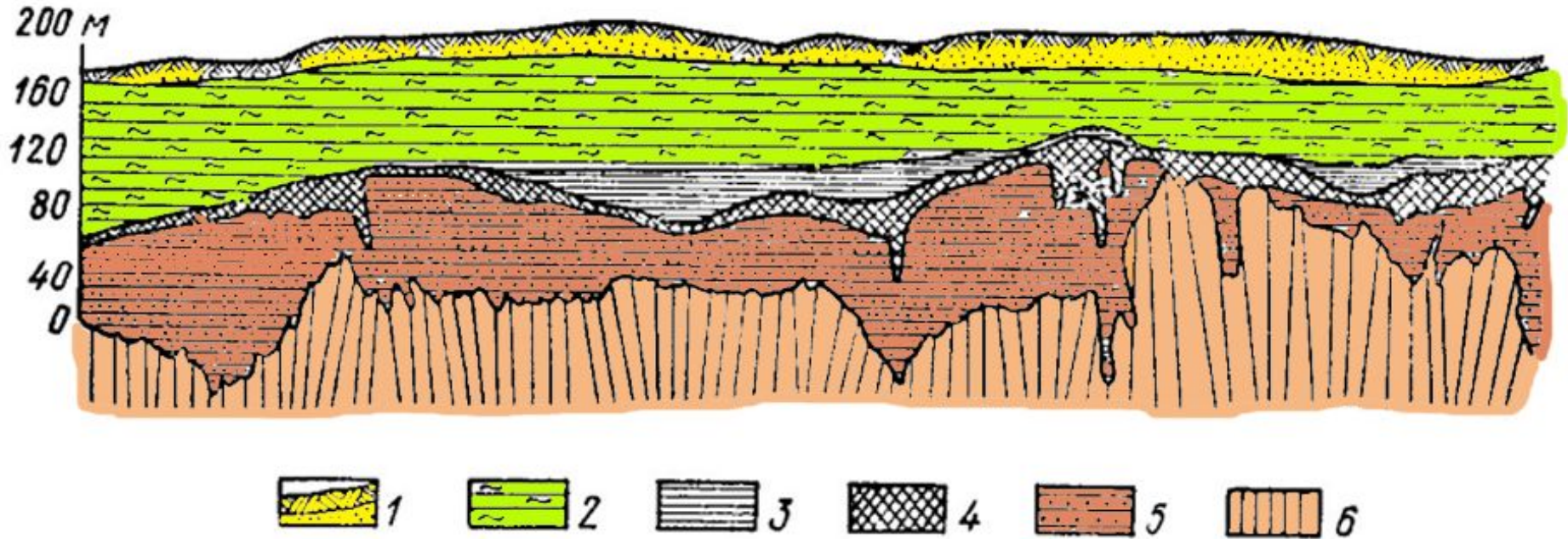


Рис. 3.18. Изменение минералогического состава бокситовой почвы с глубиной [Дегенс, 1967].

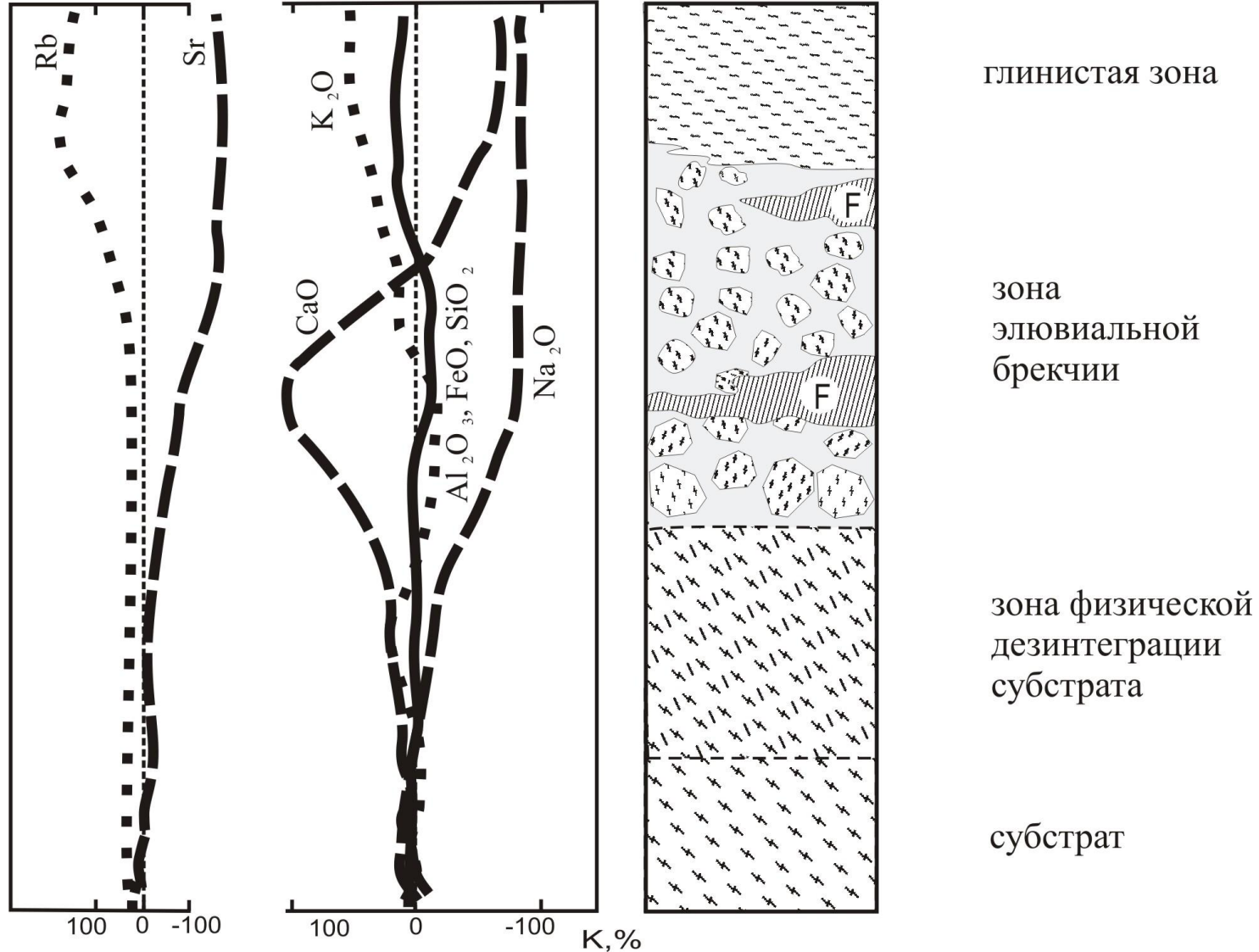
* Фут = 0,3048 м.

Разрез древней коры выветривания



Схематизированный разрез участка Курской магнитной аномалии
(по В. П. Рахманову)

1 — четвертичные отложения; 2 — мезокайнозойские отложения; 3 — переотложенные продукты выветривания; 4 — гематитовый горизонт коры выветривания; 5 — горизонт окисленных железистых кварцитов; 6 — исходные породы (железистые кварциты)



- Схема строения палеопротерозойского профиля выветривания Карелии. Зона элювиальной брекчии-F-участки обогащения аутигенными карбонатами, $K, \% = [(K_{эл. кв} - K_{эл. суб}) / K_{эл. суб}] \cdot 100$, где $K_{эл. кв}$ – концентрация элемента в выветренном образце, $K_{эл. суб}$ – концентрация

- Химические изменения пород в профиле предсариолийской коры выветривания оз. Паанаярви характеризуются одновременным увеличением содержаний K_2O , Al_2O_3 и CaO , при этом концентрация Na_2O уменьшается. Глинистая зона коры выветривания не образует единого горизонта, а представлена в виде маломощных линзовидных прослоев в зоне элювиальной брекчии.
- В результате увеличение концентрации Al_2O_3 и K_2O обусловлено формированием глинистых аутигенных минералов, а CaO – кристаллизацией доломита из гипергенного раствора, который дренировал профиль выветривания.

Полезные ископаемые - продукты гипергенеза

1. **Обломочные МПИ** - элювиальные россыпи Au, Pt, Sn, алмазов. Образуются благодаря устойчивости минералов к разрушению и накоплению их в элювии.
2. **Остаточные коры выветривания** (т.е. после формирования коры выветривания новообразованные минералы остаются на месте). С ними связаны МПИ Ni, Co, Cr, Fe, каолиновых глин, бокситов.
3. **Инфильтрационные** - образуются за счет растворения полезных компонентов при гипергенезе из одних пород и перенос их водными растворами и осаждение в других породах: U, V, Fe и др.