

3. Миграция химических элементов (геохимическая миграция)

Под термином **«геохимическая миграция»** А. Е. Ферсман подразумевал комплекс процессов, определяющих перемещение химических элементов в земной коре и ведущих обычно к их рассеянию или концентрации.

Химические элементы различаются между собой по миграционной способности, т. е. по интенсивности перемещения в геохимических процессах. При этом миграционная способность элемента может меняться в зависимости от физико-химических условий среды миграции.

К числу **активных мигрантов** относятся химические элементы, легко мигрирующие в широком диапазоне термодинамических условий, имеющих место в пределах земной коры. Атомы этих элементов свободно перемещаются как в магматических расплавах, так и в растворах, включая растворы зоны гипергенеза. Характерными примерами элементов - активных мигрантов являются галогены, щелочные металлы и др. **Неактивные мигранты** (например, элементы группы платины) мигрируют лишь в узком диапазоне термодинамических условий (магматические расплавы стадии протокристаллизации). В ряде случаев миграция химических элементов этой группы осуществляется также в пассивной форме в зоне гипергенеза путем механического перемещения частиц минералов и горных пород экзогенными геологическими процессами.

Большинство химических элементов земной коры являются достаточно активными мигрантами. Их перемещение (миграция) в земных условиях осуществляется **в атомной (инертные газы, пары ртути и т. п.), ионной (растворы, частью расплавы), молекулярной (растворы, силикатные расплавы) или коллоидальной, а также грубодисперсной (обломки пород и минералов) форме.**

3.1. Миграция элементов в природных водах и расплавах

Факторы геохимической миграции

Миграция химических элементов в природных водах (и магматических расплавах) осуществляется под влиянием внутренних и внешних факторов. **Внутренние факторы** обусловлены физическими и химическими свойствами (константами) элементов и их ионов. **Внешние факторы** определяются параметрами среды, в которой происходит миграция.

Внутренние факторы геохимической миграции – гравитационные свойства атомов и ионов, валентность, атомные и ионные радиусы, а также радиоактивные свойства атомов, роль которых как фактора миграции заключается в непрерывном изменении (уменьшении) количества радиоактивных элементов при их распаде и в образовании новых ядер с иными физико-химическими свойствами.

Внешние факторы миграции – рН и Eh вод и магматических расплавов, поверхностные силы природных коллоидных систем, жизнедеятельность организмов, температура и давление.

Гравитационные свойства атомов и ионов,

определяющие особенности их миграции в гравитационном поле Земли, играли ведущую роль в процессе формирования оболочек земного шара, в то время как в магматогенных процессах и в зоне гипергенеза значение этого фактора в геохимической миграции ограничено. Наиболее ярко он проявляется в формировании россыпей, т.е. скоплений в определенных участках речных или морских отложений тяжелых и механически прочных минералов (золота, алмаза, касситерита, циркона, вольфрамит и др.).

Поведение ионов в водных растворах и расплавах зависит также от **валентности**. Для многих металлов чем больше валентность, тем менее растворимые соединения они образуют, тем, следовательно, ниже их миграционная способность. Поэтому одновалентные щелочные металлы образуют, как правило, легко растворимые соединения (NaCl , Na_2CO_3 , Na_2SO_4), двухвалентные щелочноземельные - менее растворимые соединения (CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3). Соединения трехвалентных металлов, таких как Al^{3+} , Fe^{3+} , еще менее растворимы. Однако, существуют и исключения из этого правила. Так, к примеру, MgSO_4 - хорошо растворимая соль, а AgCl растворяется плохо. Разновалентные ионы одного и того же элемента характеризуются различной подвижностью в водной среде.

Рассматривая миграцию химических элементов в зависимости от **величин атомных и ионных радиусов**, А. Е. Ферсман отмечал, что атомы и ионы, обладающие слишком большими (более 1,60А — Cs⁺¹, S⁻², Cl⁻¹, Se⁻², Br⁻¹, Te⁻², J⁻¹, Ne, Ar, Kr, Xe) или слишком малыми (менее 0,40А - C⁺⁴, B⁺³, N⁺⁵, Be⁺², S⁺⁶, Se⁺⁶, P⁺⁵, Cr⁺⁶) радиусами, обладают и повышенной способностью к миграции и перераспределению (конечно, при прочих равных условиях). А В. М. Гольдшмидт считал, что атомы и ионы, отличающиеся по радиусам от норм (от средних величин), накапливаются по преимуществу в конечные стадии кристаллизации магматических расплавов и играют незначительную роль в начальные стадии магматической кристаллизации. Это положение может быть иллюстрировано гранитными пегматитами, где в низкотемпературные стадии их образования накапливаются элементы с очень малыми (Be, B) и очень высокими (Rb, Cs) величинами радиусов иона.

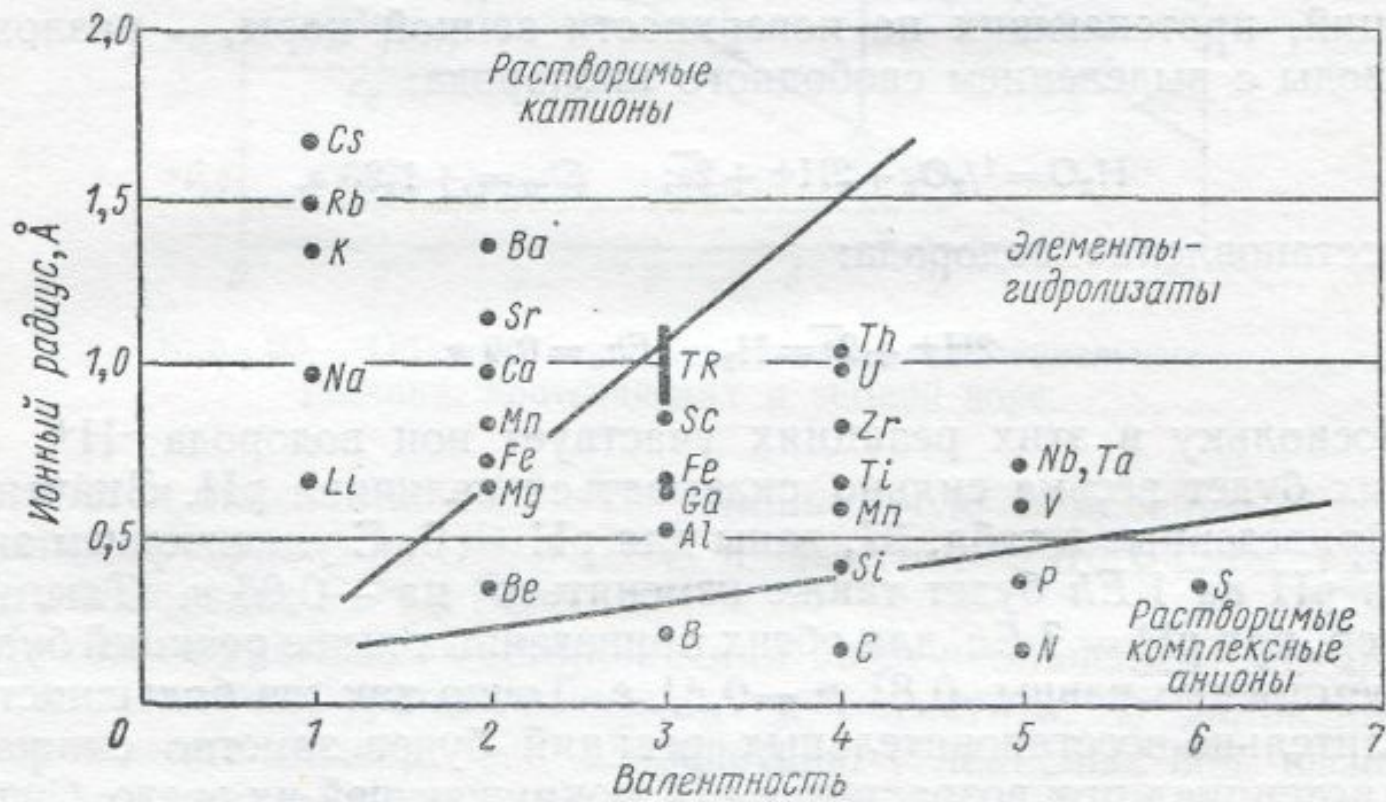


Рис. 52. Разделение важнейших элементов по их ионным потенциалам.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		I	II	III	IV	V	VI	VII	0	
1	H																He	
2	Li	Be	B									C	N	O	F		Ne	
3	Na	Mg	Al									Si	P	S	Cl		Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Pa	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

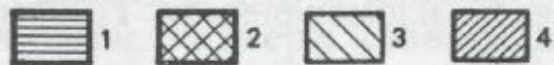
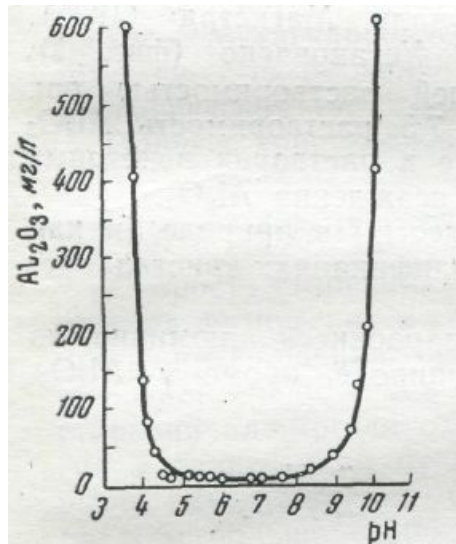


Рис. 26. Катионогенные и анионогенные элементы в земной коре:

1 — элементы, образующие только катионы, 2 — элементы, образующие только анионы, 3 — амфотерные элементы — катионогенные и анионогенные (в том числе элементы, образующие комплексные анионы), 4 — элементы, у которых ионная форма отсутствует или не характерна

В зависимости от внешних условий многие элементы могут быть и катионогенными и анионогенными. Так V в магме находится в форме V^{3+} и является катионогенным аналогом железа, а в резко окислительных щелочных условиях пустынть пятиявалентен и образует анион — VO_4^{3-} .

Al^{3+} (pH<4), $(AlO_4)^{5-}$ (pH>9,5)



Фиг. 1. Зависимость растворимости Al_2O_3 от величины pH среды (по Магистаду)

Кислотно-щелочные условия (pH). Многие химические элементы подвижны в широком диапазоне pH и могут интенсивно мигрировать как в кислой, так и в щелочной среде (Na, K, Cs, Li, Rb, F, Cl, Br, J и др.). Катионы большинства металлов (Co^{3+} , Cr^{3+} , Bi^{3+} , Sn^{2+} , Th^{4+} , Zr^{4+} , Sb^{3+} , Sc^{3+} и др.) способны мигрировать только в весьма кислых растворах и легко осаждаются при повышении их щелочности. Поэтому в обычных природных водах зоны гипергенеза, имеющих нейтральную реакцию, содержания этих элементов ничтожны. В щелочной среде элементы, обладающие амфотерными свойствами, могут снова перейти в растворимое состояние с образованием комплексных анионов.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) также во многом определяет геохимические особенности природных вод. Окислительно-восстановительные условия можно характеризовать по содержанию в системах ведущих элементов, ионов и соединений, особенно таких, как O_2 , CO , Fe^{2+} , Fe^{3+} , H_2S и др. С этих позиций можно выделить следующие *окислительно-восстановительные обстановки миграции* (в скобках — примеры):

Ультраокислительная — Cr^{6+} , V^{5+} , Ti^{3+} , Mn^{4+} , Fe^{3+} , Co^{3+} , Se^{6+} , V^{6+} , Mo^{6+} , N^{5+} , Cu^{2+} (щелочные почвы сухих степей и пустынь, содовые озера).

Окислительная — Fe^{3+} , Mn^{4+} , U^{6+} , Mo^6 , Cu^{2+} (океаны, реки, озера).

Слабоокислительная — Fe^{3+} , Mn^{2+} , Mo^{6+} , U^{6+} , Cu^{2+} (многие трещинные воды скальных пород).

Слабовосстановительная — Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} (магма).

Восстановительная — Fe^{2+} (гидротермы с H_2S , сероводородные илы морей и соляных озер, породы Луны, болота тайги, тундры, влажных тропиков).

Ультравосстановительная — Fe^0 , возможно, Si^0 (земное ядро, нижняя мантия, железные и каменные метеориты).

Окислительные условия связаны с присутствием в водах свободного кислорода атмосферы. Кроме него, окислителями могут быть элементы, находящиеся в высоких степенях окисления, такие как Fe^{3+} , Mn^{4+} , S^{6+} , Cu^{2+} и другие химические элементы, способные принимать электроны, а также азотная кислота и ее соли, концентрированная серная кислота, хлорная и бромная вода. Главный критерий окислительной обстановки - присутствие свободного кислорода в водах. Если он отсутствует, то показателем окислительных обстановок является трехвалентное железо, соединения которого легко узнаются по характерной желтой, красной, бурой и красно-бурой окраске.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) оказывает существенное влияние на миграционную способность элементов, на их рассеяние и концентрацию. Такие элементы, как Cr, V, S в высоких степенях окисления образуют растворимые соединения - хроматы, ванадаты, сульфаты. Поэтому в природных средах, где господствует окислительная обстановка, эти элементы могут обладать высокой миграционной способностью. Железо и марганец в окислительной обстановке, напротив, образуют трудно растворимые соединения Fe^{3+} , Mn^{4+} , что и объясняет их низкую миграционную способность в кислородсодержащих водах.

В восстановительной обстановке

кислород отсутствует, а роль восстановителей играют различные химические элементы, атомы и ионы которых способны отдавать электроны: Fe, Mn, двухвалентная (отрицательная) сера, водород. Важнейшими агентами восстановительных реакций в природных водах зоны гипергенеза являются микроорганизмы, разлагающие органическое вещество.

Восстановительная обстановка в экзогенных условиях может быть **сероводородной** и **глеевой** (при отсутствии H_2S). Сероводородные условия создаются в водах, богатых SO_4^{2-} , где микробиологическое окисление органических веществ осуществляется частично за счет восстановления сульфатов. При этом в водах появляется H_2S , который легко узнается по запаху. Следует отметить, что для образования сероводорода необходимо органическое вещество, поэтому сульфатные воды в породах, не содержащих органическое вещество, будут лишены H_2S .

Присутствие в водах сероводорода приводит к осаждению металлов, имеющих сродство с серой и образующих нерастворимые сульфиды. Это в основном **железо, свинец, цинк, медь, серебро**. Таким образом, природные воды с сероводородной восстановительной обстановкой характеризуются очень низким содержанием многих тяжелых металлов, вследствие образования этими металлами трудно растворимых сульфидов.

Оглеением называют восстановительные процессы, протекающие без участия сероводорода и приводящие к образованию пород, илов, почв сизой, зеленой, голубоватой и пятнистой (охристо-сизой) окрасок, свойственных соединениям двухвалентного железа. Именно такие окраски характеризуют восстановительную глеевую обстановку. Свободный кислород и другие сильные окислители здесь либо отсутствуют, либо встречаются в очень незначительных количествах. Из газовых компонентов в водах преобладают CO_2 и CH_4 . Воды восстановительной глеевой обстановки содержат мало анионов SO_4^{2-} , поэтому сероводород либо не образуется вовсе, либо присутствует в очень малых количествах.

Для восстановительных глеевых вод характерно повышенное содержание двухвалентного железа, марганца, метана, гумусовых веществ, фосфора, меди, цинка. Миграция урана и молибдена возможна только в слабоглеевых водах (при сравнительно высоком Eh), в которых они находятся в высоких степенях окисления (U^{6+} , Mo^{6+}). При более низких значениях Eh (среднеглеевые воды) уран переходит в четырехвалентное состояние и образует нерастворимые соединения (урановые черни, смолки, коффинит).

Характеризуя окислительно-восстановительный потенциал как фактор водной миграции химических элементов, следует иметь в виду, что он находится в тесной зависимости от рН водного раствора и заметно изменяется при изменении водородного показателя. Это можно наглядно продемонстрировать на примере железа. Так, в частности, в сильноокислых средах (зоны окисления сульфидных месторождений, кислые болота тайги) переход закисной формы железа в окисную осуществляется при положительных значениях E_h [(+0,4)-(0,8)], в то время как в щелочных средах (почвы и коры выветривания пустынь) это происходит при отрицательных значениях этого показателя.

Поверхностные силы природных коллоидных систем

играют не менее существенную роль в процессе миграции элементов в водной среде. Они растут с ростом удельной поверхности, поэтому велики у тонкодисперсных систем, особенно у коллоидов, обладающих высокой сорбционной способностью.

Коллоидная форма миграции и явления сорбции играют важную, а иногда и определяющую роль в миграции и концентрации железа, алюминия, марганца, а также многих микроэлементов в поверхностных водах. Можно утверждать, что в водах зоны гипергенеза, где концентрация микроэлементов очень низкая, не достигающая значений, необходимых для выпадения соединений этих элементов из раствора, сорбционное соосаждение (т.е. выпадение в осадок вместе с сорбентом - носителем) является основной причиной прекращения миграции.

Процессам сорбции свойственна **селективность**, которая проявляется в том, что определенными коллоидами поглощаются вполне определенные ионы и молекулы. При этом состав сорбируемых веществ в значительной степени зависит от заряда коллоидных частиц. Положительно заряженными коллоидами являются гидроокислы Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{4+} , Zr^{4+} и др., отрицательно заряженными – глинистые минералы, частицы кремнезема, большинства сульфидов, гидроокислов V^{5+} , Mn^{4+} , Fe^{2+} , а также гумусовые органические коллоиды. При благоприятных условиях коллоиды Mn^{4+} способны сорбировать вплоть до промышленных концентраций Ni, Co, K, Ba, Cu, Zn, Hg, Au, W; коллоиды гидроокислов Fe^{3+} — As, V, P, Sb, Se; гель кремнезема сорбирует радиоактивные элементы, доломита - Rb, Zn.

Водная миграция масс нерастворимых форм тяжелых металлов

Металлы	Суммарный годовой массопоток металла	Масса нерастворимы х форм в годовом массопотоке	Доля нерастворим ых форм в годовом массопотоке, %
$1 \cdot 10^6$ т/год			
Fe	990	963	97,3
Ti	75,6	75,4	99,7
Mn	20,9	20,5	98,1
Zn	6,68	5,86	87,7
V	3,53	3,48	98,6
Cr	2,50	2,46	98,4
Pb	2,87	2,83	98,6
Cu	1,88	1,52	83,1
Ni	1,70	1,38	81,2
Co	0,35	0,34	97,1
Ga	0,344	0,34	98,8
Cd	0,022	0,013	59,1

Значение коллоидно-дисперсных систем, как фактора геохимической миграции, не ограничивается областью гипергенеза. Важную роль играют коллоиды в формировании эндогенных рудных залежей. Среди последних часто обнаруживаются метаколлоидные структуры руд золота, мышьяка, платины, сфалерита, пирита и др., свидетельствующие о пребывании слагающих их элементов в системе коллоидных растворов до момента отложения в составе рудной залежи.

Жизнедеятельность организмов как фактор геохимической миграции проявляется практически целиком в зоне гипергенеза. Выделяемые корнями растений органические кислоты способны разрушать кристаллические решетки многих минералов, способствуя переходу слагающих их элементов в растворы. Цирконий, титан, иттрий и некоторые другие малоподвижные элементы могут мигрировать в виде органических комплексных соединений. Поэтому в природных средах, воды которых богаты органическими кислотами, интенсивность их миграции увеличивается. Кроме того, обитающие в водоемах микроорганизмы извлекают из воды различные химические элементы (N, P, Ca, S, K, микроэлементы) в процессе жизнедеятельности. Это извлечение протекает избирательно и иногда в значительных количествах.

Температура и давление. Температура среды является одним из важных внешних факторов миграции. Температура определяет подвижность и агрегатное состояние вещества (физико-химические фазы), скорость химических реакций, скорость и последовательность кристаллизации из расплавов и растворов, дифференциацию элементов по их критическим температурам.

В земной коре температуры, по-видимому, колеблются от 1600— 1500° С в магматических расплавах и глубоких частях земной коры до —85° С на ее поверхности (в Антарктиде). Таким образом, геохимические процессы миграции элементов в земной коре происходят в широком диапазоне температур. Определенные температуры геохимических процессов способствуют образованию горных пород, различных по минеральному составу.

Температуры геохимических процессов определяются с помощью так называемых геологических или минералогических термометров, под которыми понимают такие минералы или их комбинации, или определенные свойства минералов, для которых известны температуры их образования, превращения или изменения.

Точки превращения у полиморфных модификаций минералов являются важным минералогическим термометром

α -кварц \rightarrow β -кварц	575° С
β -кварц \rightarrow β -тридимит	870° С
β -тридимит \rightarrow β -кристобалит	1470° С
арагонит \rightarrow кальцит	410° С
метацинабарит \rightarrow киноварь	400° С
марказит \rightarrow пирит	450° С
энстатит \rightarrow клиноэнстатит	1260—1290° С

Температуры кристаллизации различных горных пород:

дунит	1500
перидотит	1400
лабрадорит	1400—1450
габбро-норит	1250
диорит	1200
сиенит	1100
гранит	1000

Давление наиболее резко сказывается на миграции химических элементов при его резких изменениях, например над магматическим очагом вследствие появления тектонических разломов. Связанное с этим выделение летучих компонентов дает начало деятельности пневматолито-гидротермальным процессам и интенсивной миграции элементов из магматического очага в окружающую среду.

Значительные колебания температур и давлений и их соотношения определяют изменение физического состояния элементов (расплавление, растворение, отщепление газовой фазы или, наоборот, кристаллизация, сжижение), что является важным условием их миграции.

Роль сложных комплексных соединений.

Природные водные растворы это не чистая фаза H_2O , а сложные системы, содержащие кроме молекул воды и растворяющегося вещества много других компонентов. Многие из них способны образовывать с рудными элементами сложные комплексные соединения общей формулы $[ЭL_n]^{m-}$, где Э — ион комплексообразователь; L — лиганды, его окружающие.

Поведение комплексных новообразований существенно отличается от поведения простых ионов. Среди природных лигандов — прежде всего ионы Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} и HCO_3^- , сложные органические кислоты (гуминовые и фульвокислоты). Так, уранил-ион - UO_2^{2+} в карбонатных растворах образует комплексные ионы $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ и $[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$. В результате ион UO_2^{2+} , чрезвычайно легко восстанавливаемый даже слабыми восстановителями до U^{4+} , оказывается весьма устойчивым в процессе гидротермального рудообразования.

Ион UO_2^{2+} образует прочные комплексные ионы с целым рядом органических лигандов, обычно присутствующих в природных растворах. В результате поведение урана, заключенного в комплексные ионы, становится принципиально отличным от геохимии иона уранила.

Олово и молибден образуют комплексные ионы с ионами фтора, хлора и гидроксидов, а свинец в условиях избытка гидросульфидных ионов не только не выпадает в виде сульфидов PbS , но наоборот, активно мигрирует в составе комплексных гидросульфидных ионов $Pb(HS)_2^0$ и $Pb(HS)_3^-$.

Развитие химии комплексных соединений, в том числе при повышенных температурах и давлениях, и использование этих данных в геохимии сняло многие проблемы, связанные с переносом рудных элементов в гидротермальном рудообразовании. При этом центральными факторами, определяющими возможности переноса или отложения рудных элементов, стала не температура, а **химические условия**, при которых происходит либо образование, либо разрушение комплексных ионов.

Геохимические показатели водной миграции

Коэффициент водной миграции А.И. Перельмана:

$$K_x = (m_x \cdot 100) / (a \cdot n_x),$$

где m_x – содержание химического элемента в водах, г/л; n_x – его содержание в горных породах, дренируемых этими водами, вес %; a – сумма минеральных веществ, растворенных в воде, г/л.

Градация химических элементов по интенсивности их водной миграции:

I – очень подвижные мигранты (Cl, Br, V, I и др.) – $K_x - n \cdot 10 - n \cdot 100$;

II – легкоподвижные мигранты (Ca, Na, Mg, Sr и др.) – $K_x - n$;

III – подвижные мигранты (K, P, Pb, Li и др.) – $K_x - 0, n$;

IV – слабоподвижные и инертные мигранты (Al, Ti, Zr, Sn, Pt и др.) – $K_x - 0, 0n$ и менее.

3.2. Атмосферная миграция

Факторы атмосферной геохимической миграции

Миграция химических элементов воздушным путем осуществляется благодаря общей и местной циркуляции атмосферы. В нижних ее слоях постоянно происходят вертикальные (восходящие и нисходящие) и горизонтальные перемещения воздушных масс различной силы и направления. Такие воздушные потоки, формируемые обычно благодаря температурным градиентам и связанные с местной и общей циркуляциями атмосферы, способны перемещать химические элементы на сотни и тысячи километров. При этом формы их переноса могут быть различными. Прежде всего следует различать перенос химических элементов с **твердыми и жидкими аэрозольными частицами, а также в парогазовой форме.**

При движении воздушной массы, сформированной над океаном вглубь континента минерализация осадков уменьшается по мере их выпадения. Подсчитано, что с осадками на морских побережьях выпадает около 50 мг/л солей, а в пределах континента на расстоянии 150 – 200 км от побережья – около 30 мг/л.

Над континентами степень минерализации осадков определяется климатическими условиями. Она максимальна в пределах пустынных и полупустынных ландшафтов (около 180 мг/л), где большие пространства покрыты солончаками и минимальна во влажных тропических лесах (около 20 мг/л), где запыление атмосферы невелико. Однако суммарное количество поступающих на поверхность с осадками солей будет выше в областях достаточного увлажнения, чем в сухих областях, за счет почти в 20 раз большего количества выпадающих здесь осадков.

Геохимические показатели атмосферной миграции

Для характеристики атмосферной миграции химических элементов разработан ряд геохимических показателей: коэффициент атмогеохимической активности, коэффициент аэрозольной концентрации и так называемая «пылевая нагрузка».

Коэффициент атмогеохимической активности, предложенный М.А.Глазовской, представляет собой отношение количества элемента, поступающего с осадками за год, к его количеству, потребляемому растениями за год. Этот показатель характеризует степень вовлечения в биологический круговорот элементов, поступающих с атмосферными осадками. Иными словами, этот показатель определяет эффективность использования атмосферных осадков живым веществом природной системы.

Коэффициент аэрозольной концентрации и «пылевая нагрузка» используются для оценки твердофазных атмосферных выпадений.

Коэффициент аэрозольной концентрации ($K_{ак}$), предложенный В.В.Добровольским, представляет собой величину отношения содержания элемента в пыли к его среднему содержанию (кларку) в земной коре. Иными словами, этот коэффициент представляет собой кларк концентрации химического элемента в твердой фазе аэрозоля, рассчитанный относительно земной коры.

«Пылевая нагрузка» (P_n)

представляет собой количество твердых выпадений из атмосферы на единицу площади в единицу времени.

Рассчитывается по формуле

$$P_n = P / S \times t,$$

где P – вес твердого вещества в (г), содержащегося в пробе, S – площадь отбора пробы (m^2); t – время (сутки), за которое выпало данное количество пыли.

Суммарное поступление твердого вещества используется в дальнейшем при определении элементной «нагрузки» на ландшафты:

$P_{\text{общ}} = (C \times P_n) / 100$, где $P_{\text{общ}}$ – общая нагрузка элемента, т.е. приход элемента (г) на 1 км^2 площади в течение суток; C – концентрация данного элемента в твердом веществе (пыли), выраженная в вес.% ; P_n – суммарный приход твердого вещества ($\text{г}/\text{м}^2$ в сутки).

3.3. Биогенная миграция

Живые организмы принимают непосредственное участие в геохимической миграции, в ходе которой химические элементы поглощаются организмами, а также оказывают на нее значительное косвенное влияние, создавая определенные условия среды, в которой происходит миграция. Таковы, в частности, окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия, связанные, как правило, с содержанием в природных средах кислорода, углекислого газа, сероводорода, органических кислот и других продуктов обмена веществ живых организмов

Фитогеохимическая миграция

Факторы фитогеохимической миграции:

- **физиологические и биохимические потребности самих растений** (находясь в непрерывном контакте с атмосферой, гидросферой и почвенным покровом, накапливают, помимо комплекса обычных биогенных элементов, разнообразные микроэлементы, набор которых зависит как от физиологических особенностей растений, так и от геохимических особенностей среды, с которой они взаимодействуют);
- **общий химический состав почв** (под влиянием алюминия сокращается поступление в растения хлора, кальция, магния, калия, натрия и железа; азот тормозит усвоение растениями марганца, а калий и натрий, наоборот способствуют накоплению этого элемента в растениях; калий препятствует поступлению в растения железа и кобальта);

- физико-химические условия почвенной среды** (в восстановительных условиях растения будут предпочтительнее усваивать низковалентные формы элементов, а в окислительных – наоборот; в кислой среде растения поглощают катионогенные элементы, в щелочной – анионогенные);
- биологическая деятельность микроорганизмов;**
- климатические условия** (железо накапливается преимущественно в засушливые годы, а марганец, медь, цинк, молибден – во влажные).

Таблица 2.4. Захват и интенсивность биологического поглощения главных химических элементов растительностью Мировой суши

Элементы	Концентрация в сухой фитомассе, % по Х.Боуэну, 1966	Захват приростом растительности		Коэффициент биологического поглощения
		на всей площади суши, $1 \cdot 10^8$ т/год	на $1 \text{ км}^2 / (\text{т} \cdot \text{год})$	
N	2,00	3450 (2587)	28,78 (21,5)	—
Ca	1,80	3105 (2329)	25,9 (19,4)	14,4
K	1,40	2415 (1801)	20,1 (15,0)	10,4
Si	0,50	862 (840)	7,2 (7,0)	0,3
S	0,34	586 (440)	4,9 (3,6)	170,0
Mg	0,32	552 (414)	4,6 (3,5)	5,3
P	0,23	397 (297)	3,3 (2,5)	57,5
Cl	0,20	345 (259)	2,9 (2,1)	235,3
Na	0,12	207 (145)	1,7 (1,2)	1,0
Al	0,05	86 (65)	0,7 (0,5)	0,1
Fe	0,02	34 (26)	0,3 (0,2)	0,1

Примечание. В скобках указана масса элементов, захватываемая

Зоогеохимическая миграция

Вовлечение химических элементов в миграционные пути осуществляется в результате трофической, гнездостроительной, роющей деятельности животных, а также при суточных и сезонных миграциях.

Особое место в зоогеохимической миграции принадлежит птицам, в связи с их способностью перемещаться на большие расстояния.

Особенно большая роль принадлежит птицам в биогеохимических циклах (в частности фосфора) океанических островов и некоторых побережий (в местах колоний птиц накапливается до 1 т/га органического вещества в виде птичьего помета, состоящего из смеси фосфорорганических соединений, хорошо растворимых в воде).

Геохимические показатели биогенной миграции

Наиболее распространенным показателем биогенной миграции является **коэффициент биологического поглощения (K_b)**, который впервые предложил использовать Б.Б. Плынов. Этот коэффициент показывает во сколько раз содержание того или иного элемента больше в золе растения (или животного), чем в литосфере в целом, или в конкретной горной породе, почве. Чем больше величина K_b , тем энергичнее элемент поглощается организмами, в частности растениями.

Для растений рационально рассчитывать два типа коэффициента биологического поглощения:

K_{b1} – отношение содержания определенного химического элемента в золе растения к кларку литосферы (земной коры). В этом случае коэффициент характеризует биогеохимические особенности растений, которые определяются в основном их систематическим положением, а не составом почв (например, бобовые на любых почвах энергичнее, чем злаки поглощают кальций и молибден). Химический состав растительного и животного организма – важный систематический признак, своеобразный «геохимический портрет» живого организма, который сформировался в ходе эволюции в период видообразования и закрепился наследственно

Ряды биологического поглощения элементов

Группа элементов	Интенсивность накопления или захвата	Коэффициенты биологического поглощения				
		100 · n	10 · n	n	0,0n	0,0n - 0,00n
Элементы биологического накопления	энергичного	P, S, Cl, Br, I				
	сильного			Ca, Na, K, Mg, Sr, Zn, B, Se		
Элементы биологического захвата	среднего				Mn, F, Ba, Ni, Cu, Ga, As, Mo, Hg, Ag, Ra	
	слабого и очень слабого				Si, Al, Fe, Ti, Zr, Rb, V, Cr, Li, Y, Nb, Th, Sc, Be, Cs, Ta, U, W, Sb, Cd	

K_{62} - отношение содержания элемента в золе растений к его содержанию в почве, на которой произрастают данные растения. С помощью этого коэффициента определяется степень влияния химического состава почв на аккумуляцию элементов растениями. Тем самым выявляются местные особенности биологического поглощения.

Тема 4. Геохимические барьеры и аномалии

4.1. Геохимические барьеры

Понятие «**геохимический барьер**» введено в науку А.И. Перельманом для выделения **участков зоны гипергенеза, где на коротком расстоянии происходит резкое снижение интенсивности миграции тех или иных химических элементов и как следствие – их накопление.**



А. И. Перельманом введено в науку не только само понятие «геохимический барьер», но и такая важная его характеристика, как контрастность (S). *Контрастность* — это отношение значений концентрации компонента до (m_1) и после (m_2) барьера:

$$S = m_1 / m_2$$

Контрастность показывает, как резко меняется значение концентрации компонентов на данном геохимическом барьере.

Важным показателем геохимического барьера является его *избирательность* по отношению к сумме мигрирующих веществ. При крайне низкой избирательности барьера останавливается практически весь процесс миграции.

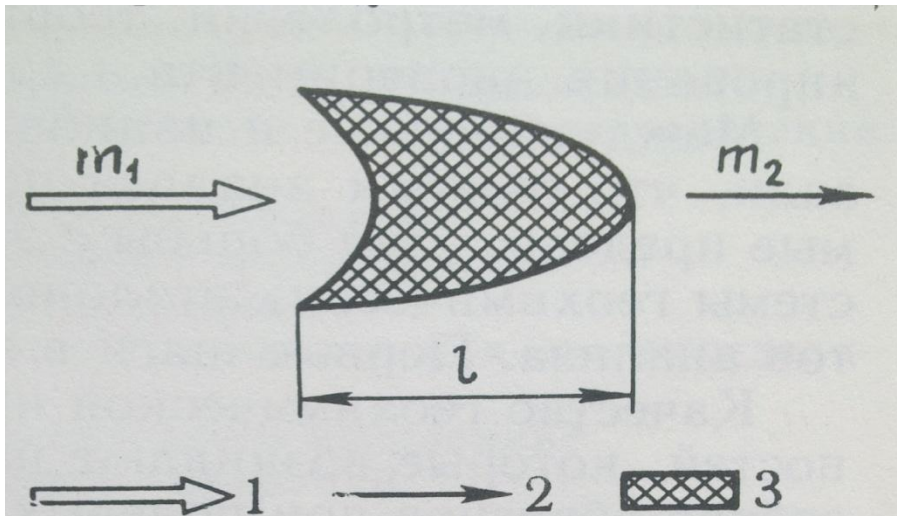


Рис. 18. Параметры геохимического барьера:

l — направление миграции химических элементов до барьера, 2 — после барьера, 3 — область концентрации элементов на барьере (рудные тела, аномалии и др.), m_1 — геохимические характеристики среды до барьера, m_2 — после барьера, l — длина барьера

Геохимические барьеры принято разделять на две большие группы – **природные** и **техногенные**. Их дальнейшая типизация осуществляется с учетом основных **форм миграции элементов**. Поэтому можно говорить о трех типах геохимических барьеров: **механическом**, **биогеохимическом** и **физико-химическом**. Последний подразделяется еще и на ряд классов.

Природные геохимические барьеры

Накопление элементов на природных геохимических барьерах происходит в результате осаждения как природных, так и техногенных компонентов. В первом случае возникающие на барьерах **природные** аномалии, как правило, невыразительные (слабоконтрастные), поскольку содержания элементов в них обычно не превышают нескольких кларков концентрации. **Техногенные** же аномалии значительно контрастнее природных и поэтому они четче выявляют действующий барьер.

Механические барьеры – это участки резкого уменьшения интенсивности **механической** миграции, осуществляемой либо водными, либо воздушными потоками. В первом случае они наиболее выразительно проявляются в зоне седиментогенеза (осадкообразования), где с ними нередко связано образование россыпных месторождений золота, олова, циркония, титана, тория и других металлов.

Классификация геохимических барьеров

Характеристика миграционного потока (среды миграции)	Характеристика веществ, перемещающихся в миграционном потоке				
	Минералы, изоморфные примеси в минералах	Растворенные газовые смеси и пары	Коллоиды и сорбированные ими вещества	Животные и растительные организмы	Техногенные соединения
Водные растворы (П)	I ₁₊₊₊	—	I ₃₊₊	I ₄₊	I ₅₊
Газовые смеси (К)	K ₁₊₊	K ₂₊₊	K ₃₊₊₊	K ₄₊	K ₅₊₊

Условные обозначения: «←» – барьер практически не получил развития; «+» – роль барьера незначительна; «++» – барьер получил широкое развитие в биосфере; «+++» – один из основных механических барьеров.

Биогеохимические барьеры являются пространственным выражением интенсивной биогенной аккумуляции химических элементов. Различают **собственно биогеохимические барьеры**, соответствующие гумусовому горизонту почв, где в ряде случаев происходит накопление рудных элементов и **фитогеохимические**, связанные с концентрацией элементов живыми растениями.

Физико – химические барьеры изучены наиболее детально. Они подразделяются на ряд классов, внутри которых выделяются еще и виды барьеров.

Окислительные барьеры – в общем случае проявляются в местах перехода от менее окислительных условий к более окислительным (или от более восстановительных к менее восстановительным), но особенно активно развиваются на участках резкой смены восстановительных условий окислительными. В этом случае главным агентом окисления служит свободный кислород, в связи с чем данную разновидность окислительного барьера называют **кислородным барьером**.

В кислородной обстановке слабо мигрируют **железо, марганец, кобальт и другие поливалентные элементы**. В восстановительной глеевой обстановке миграционная способность их значительно увеличивается. В результате на контакте с кислородной зоной эти элементы окисляются, теряют подвижность и накапливаются на кислородном барьере. **Зона окисления сульфидных месторождений.**

Разновидностью кислородного барьера является так называемый **серный барьер**, на котором осаждается элементарная сера в соответствии с реакцией $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$. Этот процесс протекает при участии различных микроорганизмов (серобактерий, тионовых бактерий), которые способны откладывать серу либо непосредственно в своих клетках, либо косвенным путем при окислении сероводорода.

Проявления серного барьера можно встретить:

- в местах выхода на поверхность сероводородных источников (небольшие скопления серы в районе Кавказских минеральных вод);
- на поверхности илов озер, морей и океанов (элементарная сера образуется за счет окисления тионовыми бактериями H_2S , поступающего из иловых или подземных вод).

Восстановительные барьеры –

возникают на участках, где окислительные условия сменяются восстановительными. В соответствии с двумя основными видами восстановительной обстановки – сероводородной и глеевой – выделяют и два вида восстановительных геохимических барьеров: **сероводородный (сульфидный) и глеевый.**

На восстановительных барьерах осаждаются большая группа элементов, причем особенно много их концентрируется на сероводородном барьере - все халькофильные элементы (**Cu, Zn, Pb, Ag, Cd и др.**), **железо, уран, селен, молибден и др.** Меньшее число элементов накапливается на глеевых барьерах - **уран, ванадий, селен, рений.** Парагенная ассоциация элементов на сероводородном барьере во многом зависит от количества сероводорода. Если в водах его достаточно для осаждения всех металлов, поступающих к барьеру, то возникает полиэлементная сульфидная ассоциация, включающая **железо, медь, цинк, серебро, свинец и т.д.** и формируются полиметаллические руды. При недостаточном количестве сероводорода осаждаются будут только те металлы, которые обладают наибольшим сродством к сере. Это в первую очередь **медь и серебро.** Таким образом формируются монометальные руды типа медистых песчаников в породах красноцветных формаций.

Восстановительные барьеры особенно характерны для ландшафтов влажного климата – тундры, тайги, лесов умеренного и тропического поясов. Они отмечаются:

- в краевой зоне болот;
- в почвах;
- в илах рек и озер;
- в водоносных горизонтах на выклинивании зоны пластового окисления.

Щелочной барьер – возникает на участках резкого повышения рН, в частности там, где кислая среда переходит в щелочную, сильноокислая в слабокислую или же слабощелочная с сильнощелочную.

На щелочном барьере осаждаются большая группа химических элементов, в основном металлов, которые хорошо мигрируют в кислых и слабокислых условиях, а в щелочной среде образуют трудно растворимые гидроокислы. К их числу относятся **Al, Fe, Mn, V, Cr, Zn, Ni, Cu, Co, Pb, Cd**. Приурочен к зонам контактов известняков с алюмосиликатными породами различного генезиса, к границам смены различных типов почв (обыкновенного чернозема карбонатным), к зоне смешения речных и морских вод.

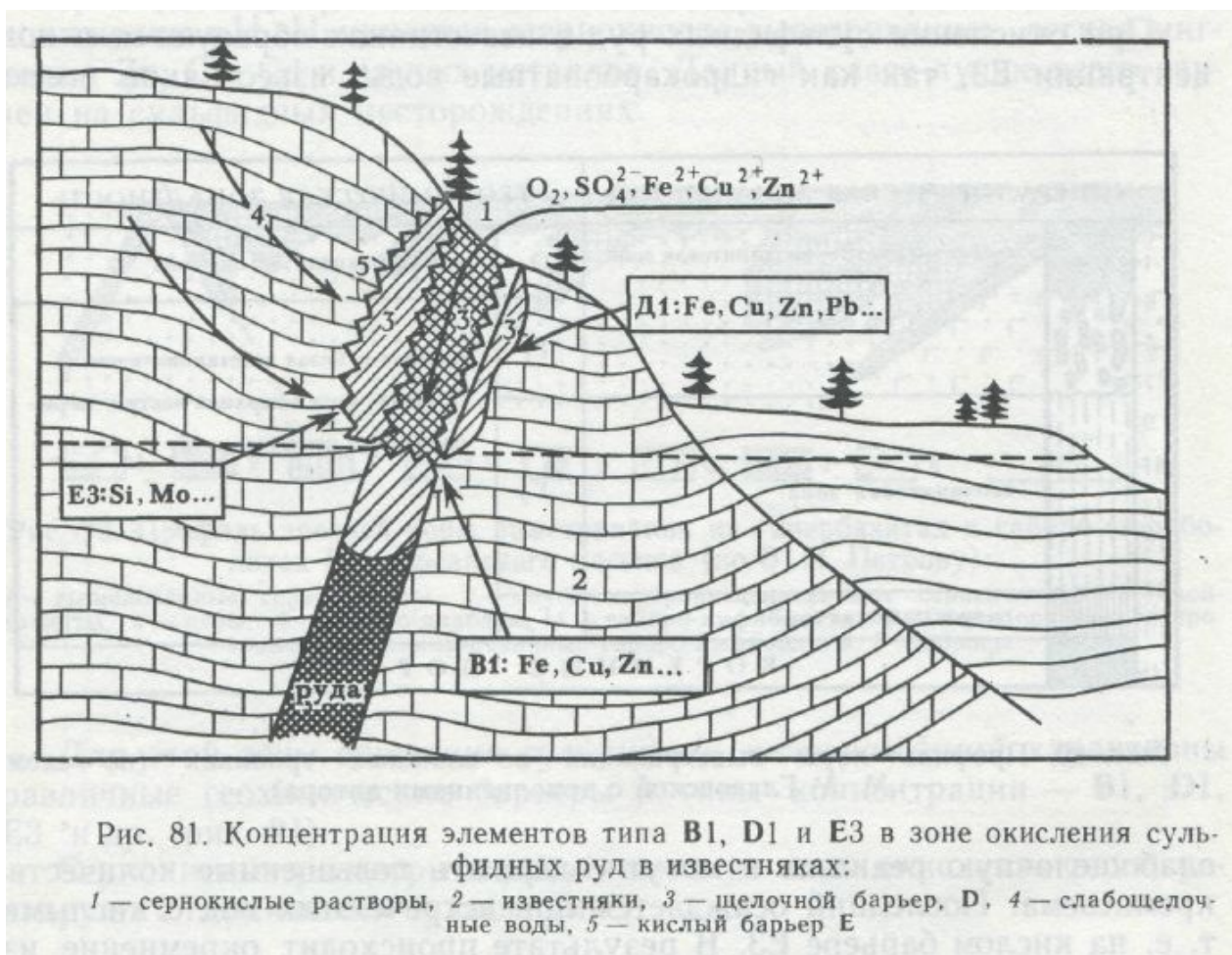


Рис. 81. Концентрация элементов типа **B1**, **D1** и **E3** в зоне окисления сульфидных руд в известняках:
 1 — сернокислые растворы, 2 — известняки, 3 — щелочной барьер, **D**, 4 — слабощелочные воды, 5 — кислый барьер **E**

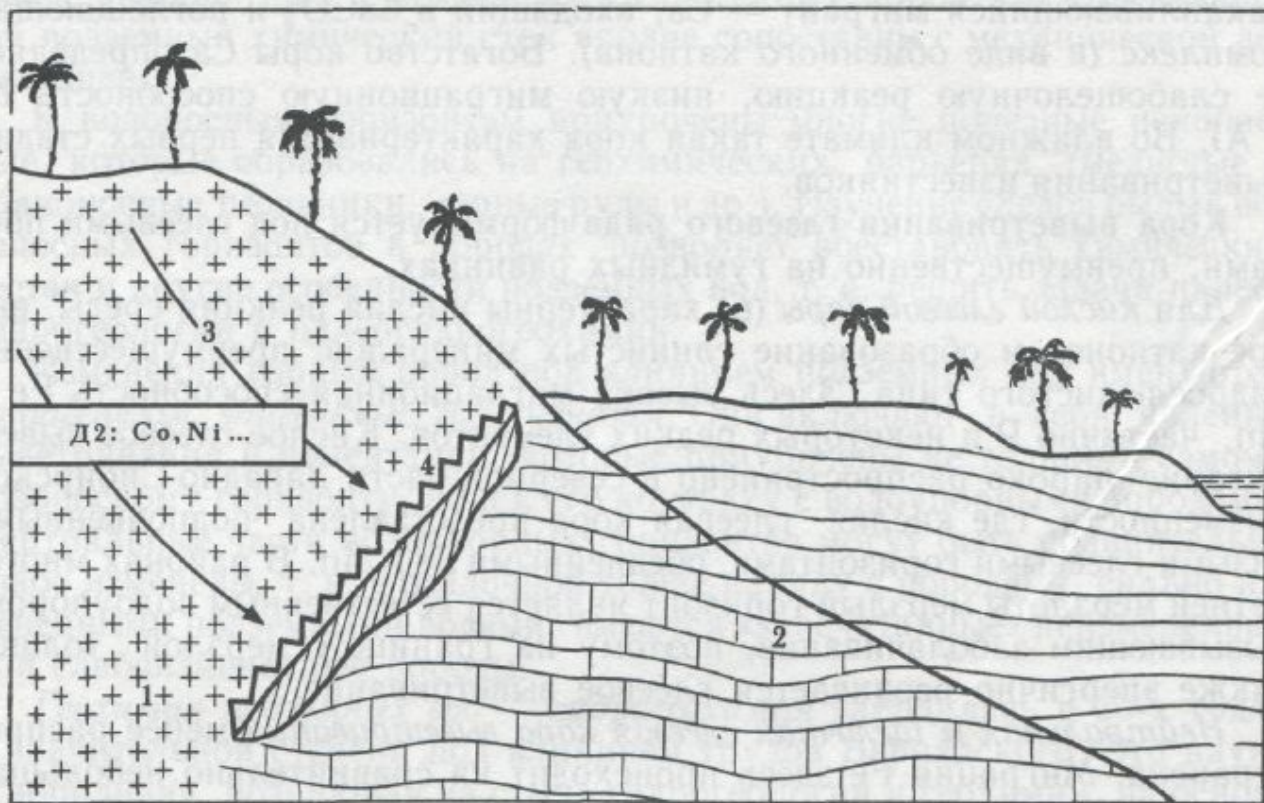


Рис. 82. Концентрация никеля и кобальта типа D2 в результате боковой миграции:

1 — ультраосновные породы, 2 — известняки, 3 — кислые воды, содержащие органические комплексы металлов, 4 — щелочной барьер

Щелочной барьер играет одну из самых заметных ролей в создании геохимической обстановки в зоне гипергенеза. За счет осаждения металлов на щелочном барьере в иллювиальных карбонатных горизонтах черноземов и каштановых почв образуются крупные аномалии, которые определяют экологическую обстановку на значительной площади. В то же время этот щелочной барьер служит естественным препятствием для проникновения металлов в более глубокие горизонты вплоть до грунтовых вод.

Кислый барьер - возникает при резком уменьшении pH, в частности при изменении нейтральных и щелочных условий на слабокислые и кислые. Он наиболее контрастен при большом перепаде pH, способствующем осаждению анионогенных элементов, в особенности **кремния**, но также **хрома, ванадия, урана, селена, молибдена**, соединения которых в кислой среде слаборастворимы.

Сорбционный барьер – имеет самое широкое распространение и проявляется практически во всех природных обстановках. Основными сорбентами микроэлементов являются органическое вещество почв, глинистые минералы, гидроокислы железа и марганца. Чрезвычайно широко распространен, но особенно характерен для ландшафтов влажного климата, где накапливается много органических и минеральных коллоидов, которые способны накапливать широкую гамму микроэлементов (Rb, Zn, Cu, Ni, Co, Pb, U, Hg, V и др.). ***Испарительный барьер*** – отчетливо проявляется в аридных ландшафтах при энергичном испарении грунтовых вод.

Термодинамический барьер – возникает в результате резкого изменения одного из факторов внешней миграции – температуры или давления. Примеры: зоны разломов, места выхода на поверхность подземных углекислых минеральных вод (карстовые районы, травертины горы Горячая вблизи г. Пятигорска).



раствор

ТВ. ве-во

газ

Комплексный геохимический барьер – участок, где в конкретных природных условиях проявляется несколько геохимических барьеров, накладывающихся друг на друга. На подобных барьерах формировалась большая часть месторождений полезных ископаемых.

Классический пример – торфяники:

- верховые (кислый, глеевый, сорбционный барьеры);
 - низинных болот (глеевые, кислые, сорбционные, механические, в аридных областях испарительные).
- Превосходят верховые по содержанию большинства микроэлементов.

Таблица 5.6. Средняя концентрация рассеянных элементов в торфе лесной зоны европейской территории России, мкг/г сухого вещества (по данным В.Н.Крешталовой)

Элемент	Тип торфа					
	верховой (603 образца)		переходный (324 образца)		низинный (2657 образцов)	
	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>M</i>	<i>V</i>	<i>M</i>	<i>V</i>
Ti	117,9	52	210,6	89	283,8	72
V	3,0	37	6,8	48	10,8	90
Cr	3,7	51	4,9	51	7,8	36
Mn	22,1	99	43,3	98	124,8	93
Co	0,7	81	0,9	73	1,3	90
Ni	4,0	63	4,6	77	7,0	44
Cu	3,6	8,5	4,7	95	7,5	61
Zn	18,4	97	8,5	90	11,1	72
Ga	1,2	57	2,7	89	3,1	78
Ge	0,4	76	0,2	95	0,6	81
Zr	4,2	83	11,5	97	17,9	64
Mo	0,3	77	1,1	65	1,6	68
Pb	3,6	64	4,5	98	2,3	71
Ag	0,1	86	0,2	105	0,2	73
Y	0,7	68	2,4	48	2,2	95
Sc	0,1	112	0,3	102	0,3	84
Sr	19,6	53	47,5	52	55,4	40

П р и м е ч а н и е. *M* – среднее содержание, мг/кг; *V* – коэффициент вариации, %.

Техногенные геохимические барьеры

По определению А.И. Перельмана **техногенный геохимический барьер** – это участок **ноосферы**, где происходит резкое снижение интенсивности техногенной миграции и как следствие – концентрация химических элементов. Важно помнить, что техногенные барьеры – это барьеры, образующиеся **только в результате антропогенных изменений условий миграции.**

Классификация техногенных геохимических барьеров основана на тех же принципах, что и природных. Вместе с тем, полной аналогии здесь не может быть, так как в ноосфере возможны типы концентраций элементов, не вписывающиеся в известную схему. Это связано с тем, что в техногенной миграции нередко участвуют химические соединения, чуждые биосфере, никогда в ней не существовавшие и обладающие другими свойствами, нежели природные вещества (искусственные полимеры, лекарства, краски, сплавы и т.д.).

Техногенные **механические барьеры** – наземные сооружения, земляные выемки, искусственные посадки деревьев и т.п.

Наиболее отчетливо проявляются в городских ландшафтах, где много наземных сооружений, а важнейшим источником загрязнения окружающей среды является автотранспорт.

Серьезным механическим барьером являются лесопосадки вдоль оживленных автомагистралей. В поверхностном горизонте почв под этими посадками устанавливаются концентрации элементов, превышающие фон в десятки раз.

В качестве техногенных **биогеохимических барьеров выступают** все сельскохозяйственные культуры, в которых в той или иной степени накапливаются P, S, N, K, многие микроэлементы. Накопленные культурными растениями элементы большей частью удаляются с урожаем и поэтому не возвращаются в почву (с пшеницей с одного гектара пашни отчуждается около 600 г марганца, 300 г бария, 200 г титана, 100 г цинка; с капустой – сотни граммов титана и стронция, десятки граммов цинка, меди, марганца, бария, циркония). Исключением являются многолетние растения, у которых основная масса надземной и вся подземная часть не вывозится.

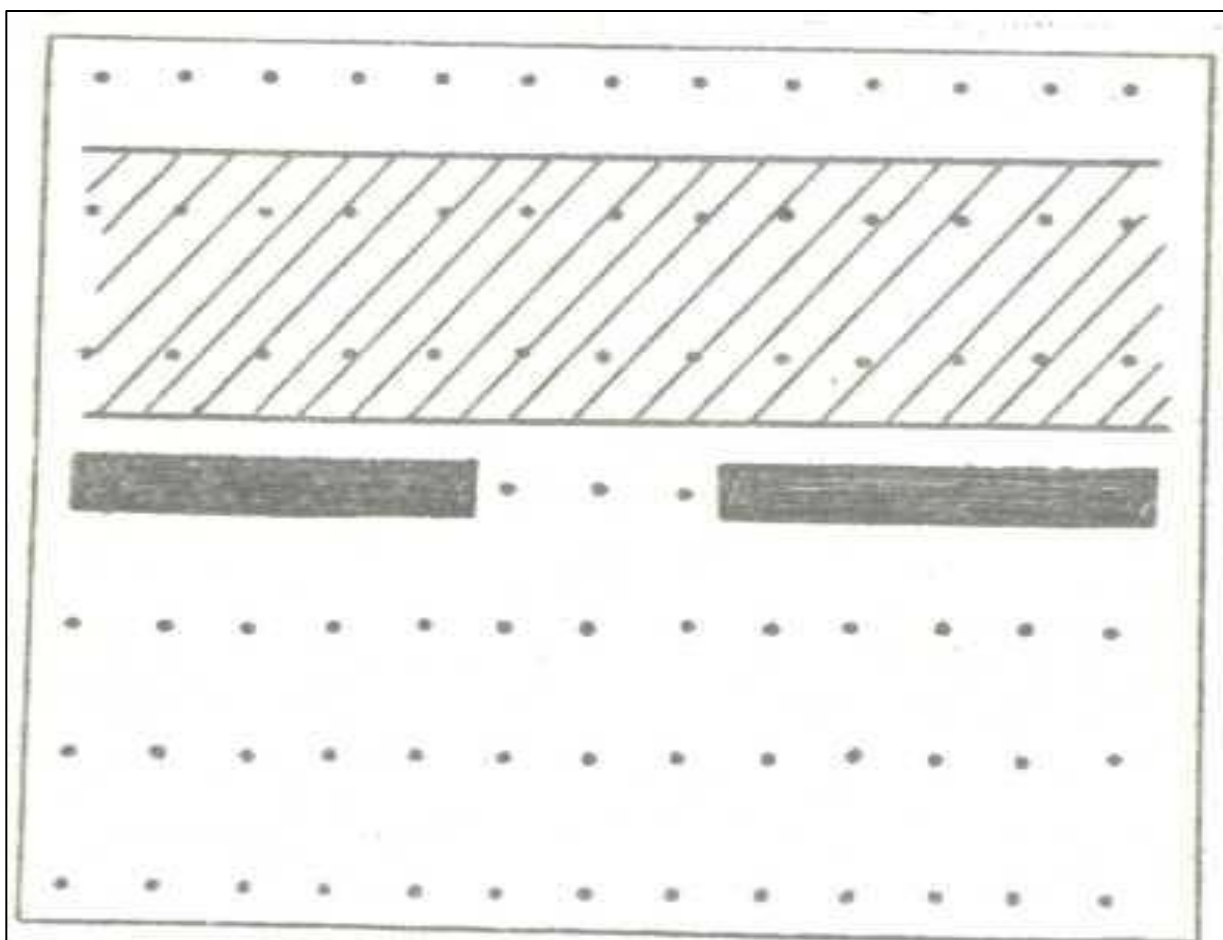
Очень контрастный **щелочной барьер** возникает между верхним и нижним горизонтами почвенного профиля тундровых ландшафтов через некоторое время после прекращения загрязнения их хлоридными сточными водами нефтяного промысла. Накопление катионогенных элементов – Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd и др.

Кислый барьер возникает в нижних горизонтах отвалов вскрышных пород старых отработанных угольных шахт. Накопление анионогенных элементов и элементов -комплексообразователей – Mo, Be, Se, Zr, Ge.

Примером **комплексного техногенного геохимического барьера** можно считать приплотинную часть Цимлянского водохранилища, где функционируют четыре крупных барьера – механический, сорбционный (Cr, V, Pb, Zn, Cu, Mn, Ni, Co и др), биогеохимический (Cu, Zn, Ni, V и др.), восстановительный глеевый (Cu, Cr, V, Mn и др.).

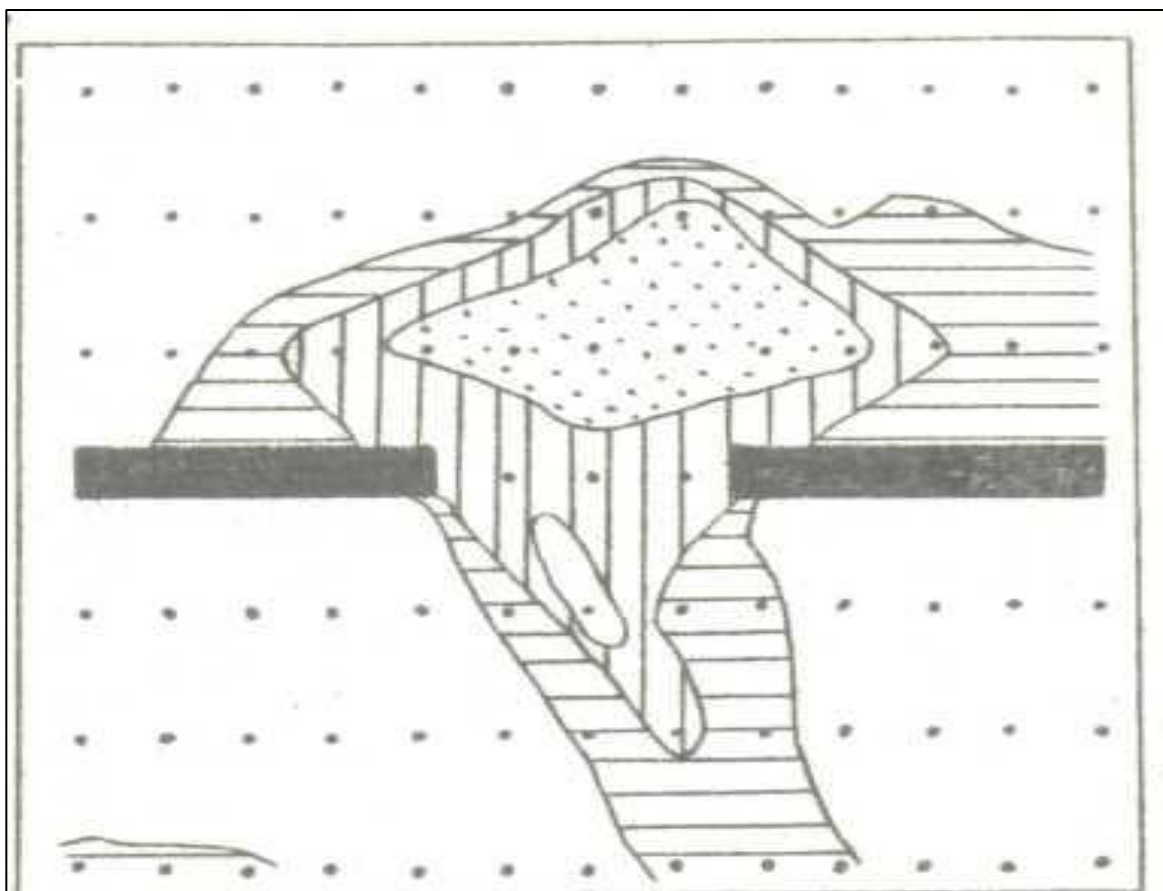
К группе техногенных барьеров следует отнести **искусственные геохимические барьеры**. Это участки ноосферы, где целенаправленно осуществляется изменение геохимической обстановки, приводящее к снижению интенсивности миграции химических элементов и как следствие – к их локализации. Создание искусственных барьеров позволяет решать целый ряд практических задач:

- формировать искусственные месторождения отдельных металлов;
- закреплять удобрения в почвах, мелиорировать почвы;
- локализовать загрязнения окружающей среды.



1
 2
 3

Р и с. 17. Площадка испытания
 искусственного щелочного барьера:
 1 - участок внесения бордоской
 жидкости; 2 - тело щелочного барье-
 ра; 3 - места отбора проб



Р и с. 18. Поток техногенной меди на площадке испытания искусственного щелочного барьера (в $10^{-3}\%$): 1 - менее 5; 2 - 5...10; 3 - 10...15; 4 - более 15; 5 - тело щелочного барьера; 6 - место отбора проб

Техногенным геохимическим барьерам противопоставляются **техногенные зоны выщелачивания.** Это такие участки ноосферы, в которых под влиянием техногенной миграции происходит выщелачивание (вымывание) подвижных элементов.

В зависимости от направления миграционных потоков геохимические барьеры подразделяются на радиальные и латеральные. **Радиальные барьеры** формируются между различными генетическими горизонтами почв и донных осадков. В этих случаях миграционные потоки направлены преимущественно сверху вниз или снизу вверх. Иными словами радиальные барьеры отражают вертикальную геохимическую неоднородность как наземных, так и аквальных ландшафтов

Латеральные (линейные) барьеры формируются на границах раздела различных по составу и свойствам природных геохимических систем при миграции вещества в субгоризонтальном (латеральном) направлении.

Для **двусторонних барьеров** характерна миграция химических элементов с противоположных сторон.

В зависимости от масштаба проявления выделяют **макро-, мезо- и микробарьеры**

Геохимические аномалии

Геохимическое поле (Г.п.)—земное пространство, охарактеризованное содержаниями химических элементов или их соединений, как функциями пространственных координат и времени. Г.п., изменяясь во времени и в пространстве, для каждого момента времени в данной точке имеет только одно значение. Термин введен П. К. Соболевским в 1932 г. по аналогии с физическими полями Земли.

Для любого химического элемента согласно закону Вернадского $0 < C_x < 100\%$. В преобладающей части пространства значения Г.п. близки к величинам кларков химических элементов (C_k) для тех или иных геосфер, что соответствует местному геохимическому фону (C_f) или **нормальному Г. п. (поле рассеяния химических элементов)**.

**Аномальное геохимическое поле
(поле концентрации химических
элементов).**

Параметры геохимического поля -
это характеристики, которые помогают
количественно оценить
пространственное распределение тех
или иных веществ в пределах
геохимических полей любого масштаба.

C_x - главный параметр геохимического поля. Это **содержание** или концентрация того или иного химического элемента, соединения или группы веществ в данной точке геологического пространства (геохимического поля).

Второй параметр – это **среднее содержание** вещества или его геохимический фон (C_ϕ).

Минимально аномальное содержание ($C_{м.а}$).

Дисперсия, как мера разброса, неоднородности распределения C_x по всему объему объекта изучения (где пусто, а где густо). Количественно выражается по-разному, как стандартное отклонение, средне квадратичное, стандартный множитель, коэффициент вариации и т.д.

Кларк концентрации: $K = C_x / C_k$.

Природные и техногенные геохимические поля. Последние формируются в результате активной хозяйственной деятельности человека (т.е. имеют техногенную природу) в различных компонентах окружающей среды – атмосферном воздухе, почвах, горных породах, донных осадках, играющих роль аккумулятора и трансформатора техногенного загрязнения.

Геохимические аномалии представляют собой область содержаний одного или нескольких химических элементов, существенно отличающихся от геохимического фона. В свою очередь, **геохимический фон** – это среднее или модальное содержание элемента в пределах геохимически однородной системы (участка). Различают **положительные** (выше фона) и **отрицательные** (ниже фона) аномалии. Положительные аномалии образуются на геохимических барьерах, отрицательные – в зонах выщелачивания

По своему происхождению геохимические аномалии разделяются на **природные** и **техногенные**. К природным аномалиям относятся все месторождения, рудопроявления, связанные с ними первичные и вторичные ореолы, участки повышенной концентрации элементов на геохимических барьерах, а также многочисленные зоны выноса и пониженной концентрации элементов.

Геохимические аномалии образуются в различных природных средах – в горных породах и почвах, поверхностных и подземных водах, атмосферном воздухе, живых организмах, в связи с чем их разделяют на **литогеохимические, гидрогеохимические, атмогеохимические и биогеохимические (фитогеохимические и зоогеохимические).**

Природные геохимические аномалии различают по размерам. Те, которые соответствуют размерам отдельных рудных тел (и их первичных и вторичных ореолов) или месторождений, называются **локальными**, а те, которые соответствуют полям концентрации — **региональными**. Региональные аномалии обычно выявляются при мелкомасштабных геохимических исследованиях, а локальные — при средне- и крупномасштабных. В пределах площадей, занимаемых региональными аномалиями (и на их фоне), выявляются локальные.

Проверка локальных аномалий должна приводить к выявлению месторождений и отдельных рудных тел.

По отношению к телам (месторождениям) полезных ископаемых локальные геохимические аномалии можно разделить на перспективные, неперспективные и ложные.

Перспективные аномалии генетически связаны с полезными ископаемыми. Именно эти аномалии могут и должны использоваться при поисках отдельных тел и месторождений полезных ископаемых.

Неперспективные аномалии — это геохимические аномалии, связанные с повышенными, но непромышленными концентрациями элементов (их соединений) в горных породах.

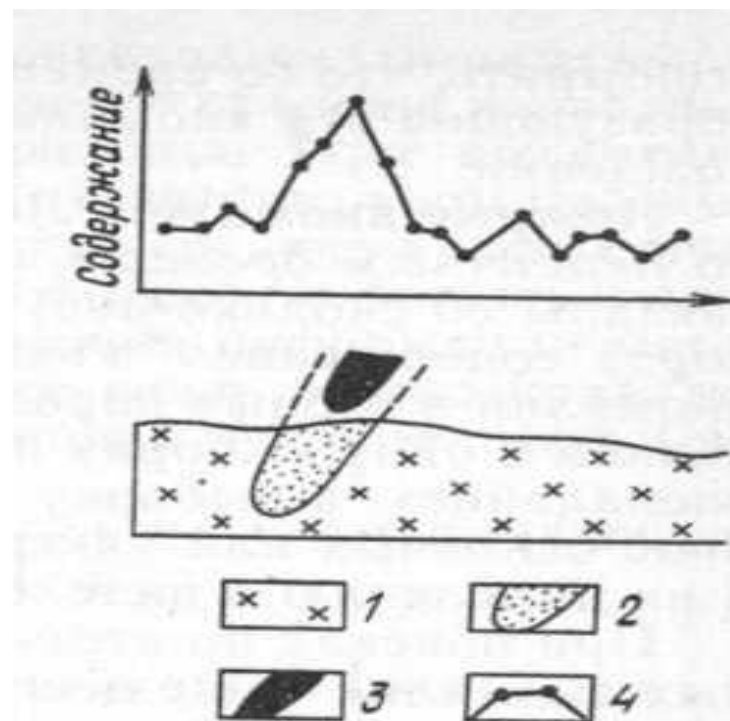


Рис. 5. Неперспективная геохимическая аномалия, связанная с ореолами рассеяния в нижней части рудного тела:

1 — вмещающие породы; 2 — геохимический ореол; 3 — разрушенное рудное тело (предполагаемое); 4 — кривая содержаний металла в пробах

Ложные аномалии, выявляемые при поисках месторождений по первичным ореолам, отличаются от описанных тем, что они не связаны со сколько-нибудь повышенным для данного типа горных пород содержанием каких-либо элементов. Возникновение таких аномалий в горных породах обычно вызвано неправильным объединением в одну выборку проб, отбираемых из различных пород. Так, «попадание» в выборку проб из карбонатных пород нескольких проб основных или ультраосновных магматических пород приведет к их выделению в виде ложной аномалии Co и Ni.

Техногенные геохимические аномалии, т.е. участки повышенного или пониженного содержания химических элементов (относительно местного фона), образуются в результате хозяйственной деятельности человека.

Можно выделить три основных вида техногенных аномалий.

1) Аномалии, формирующиеся на техногенных геохимических барьерах путем накопления элементов, поступающих как с природными, так и с техногенными миграционными потоками.

2) Аномалии, образующиеся на природных геохимических барьерах за счет осаждения элементов из техногенных потоков.

3) Аномалии (отрицательные), возникающие в результате интенсивного антропогенного выноса элементов.

Кроме того, различают регрессивные, трансгрессивные и неотрасгрессивные техногенные геохимические аномалии.

Регрессивные аномалии (иначе их можно назвать реликтовыми) выявляются только в долговременно депонирующих (аккумулирующих) загрязнение компонентах ландшафта (почвах, донных отложениях) и отсутствуют в транспортирующих средах (воздухе, воде), а также в средах кратковременно депонирующих загрязняющие вещества (снег, поверхность растений). Они отражают воздействие некогда существовавших источников загрязнения, ныне не функционирующих.

Трансгрессивные аномалии развиваются одновременно в депонирующих и транспортирующих средах, фиксируя устойчиво существующие источники со стабильными зонами загрязнения.

Что касается **неотрансгрессивных** аномалий, то они связаны с недавно созданными техногенными источниками и поэтому проявляются только в природных средах, транспортирующих и кратковременно депонирующих загрязнение.

В зависимости от размеров различают глобальные, региональные и локальные техногенные аномалии. **Глобальные аномалии** охватывают весь земной шар или значительную его часть.

Региональные – захватывают части материков, отдельные страны, области, зоны или провинции.

Локальные техногенные аномалии связаны с конкретными источниками загрязнения (заводом, рудником и т.п.). Их радиус не превышает нескольких десятков километров. Пространство, занимаемое локальной аномалией, называют **техногенным ореолом рассеяния**.