

TRACE ELEMENTS IN SOILS AND LIVING ORGANISMS

D. S. ORLOV

Trace elements are contained in soils, rocks, natural waters and living organisms in small quantities. They fulfill the most important functions of initiation and activation of the biogeochemical processes. Regional biogeochemical maps allow to improve the ecological situation by applying microfertilizers, top-dressing and medicinal preparations.

Микроэлементы содержатся в почвах, породах, природных водах, живых организмах в очень малых количествах, но выполняют важнейшие функции инициаторов и активаторов биохимических процессов. Карты биогеохимического районирования позволяют оптимизировать экологическую ситуацию путем использования микроудобрений, подкормок и медицинских препаратов.

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ И ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

Д. С. ОРЛОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Почвы и живые организмы содержат почти все элементы, входящие в Периодическую систему Д.И. Менделеева, за исключением искусственно полученных человеком трансуранов. Но по количественным уровням диапазон колебаний содержания очень велик — от десятков процентов до $n \cdot 10^{-3}$ — $n \cdot 10^{-5}$ и даже до $n \cdot 10^{-9}$ — $n \cdot 10^{-10}$ %. Об этом подробно писал академик В.И. Вернадский еще в 30-х годах XX века, говоря об изменении концентрации многих элементов, их изотопного состава под влиянием живых организмов, подчеркивая в то же время, что накопленные в его время сведения явно недостаточны для полного понимания того, как формируется химический состав биосферы [1]. В частности, В.И. Вернадский считал, что “связь состава организмов с химией земной коры и то огромное — первенствующее значение, которое имеет живое вещество в механизме земной коры, указывают нам, что разгадка жизни не может быть получена только путем изучения живого организма. Для ее разрешения необходимо обратиться и к его первоисточнику — к земной коре. А то, что состав земной коры определяется не геологическими причинами, а свойствами атомов, ясно указывает, что в явлениях жизни сказываются свойства не только одной нашей Земли” (имелась в виду химия Космоса). В.И. Вернадский дал также определение понятия “биогеохимические провинции”, учение о которых в последующем интенсивно развивали А.П. Виноградов и В.В. Ковальский. Формирование биогеохимических провинций тесно связано с накоплением и миграцией микроэлементов, которыми чаще всего называют элементы, содержащиеся в живых организмах в небольших количествах, и без которых жизнедеятельность затруднена или невозможна. Такое чисто количественное определение во многом условно, поскольку некоторые элементы одновременно могут быть и макро- и микроэлементами. Поэтому профессор Московского государственного университета Е.П. Троицкий предпочитал называть микроэлементы инициаторами и активаторами биохимических процессов, без участия которых невозможна регулирующая роль ферментов.

Стройное учение о микроэлементах создано трудами отечественных и зарубежных ученых (В.И. Вернадский, А.П. Виноградов, В.В. Ковальский, В.А. Ковда, R.L. Mitchell, A.L. Page, H.J.M. Bowen, J.F. Hodson). Эти исследования касались не

только содержания микроэлементов в почвах, породах, водах, растениях, животных, форм соединений, закономерностей их миграции и аккумуляции, но и влияния избытка или недостатка микроэлементов на развитие растений. Этому в свое время немало внимания уделяли такие крупнейшие российские агрохимики и химики почв, как академики К.К. Гедройц и Д.Н. Прянишников.

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОБЪЕКТАХ БИОСФЕРЫ

К микроэлементам обычно относят Li, B, F, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Rb, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, I, Cs, W, Au, Bi. Многие другие элементы, также обычно содержащиеся в малых количествах, нередко относят к токсичным элементам¹, таковы ртуть, свинец, кадмий. Несмотря на это, стоит подчеркнуть, что и обычные микроэлементы, когда их слишком много, могут стать токсичными (так же, между прочим, как и макроэлементы), а токсичные элементы при очень малых концентрациях не оказывают вредного воздействия на растения и животный мир. Иными словами, если быть точным, нет токсичных элементов, а есть их токсичные концентрации.

На рис. 1 показано среднее распределение в почвах различных химических элементов [2]. Доля каждого из элементов пропорциональна занимаемой на рис. 1 площади. Хорошо видно, что в большинстве почв около половины всей массы представлено кислородом, конечно не свободным, но входящим в состав оксидов, солей сложных органических веществ или алюмосиликатов. Второе место по массе занимает кремний, затем — алюминий и железо. Кальций составляет не более 2–2,5% массы. Магния, калия, натрия, серы, титана и марганца в сумме обычно содержится не более 3%. Тогда как на долю всех микроэлементов (если не считать Mn и Fe, которые иногда выполняют такую же роль) приходится значительно менее 1%. Содержание микроэлементов в почвах и других объектах биосферы чаще выражают не в процентах, а в мг/кг или по западным нормативам в ppm (частей на миллион, что соответствует принятой в России размерности в мг/кг). Среднее содержание некоторых микроэлементов в биосфере приведено в табл. 1.

Преобладающая часть содержащихся в почве микроэлементов растениям недоступна. Так называемые подвижные соединения Cu, Co, Mn (то есть доступные растениям) составляют только 10–25% общего количества, для Zn и Mo их доля и того меньше, иногда до 1%. Одна из причин заключается в том, что значительная часть их входит в состав

¹ Токсичные элементы — химические элементы, которые оказывают отрицательное влияние на живые организмы. Отрицательное влияние проявляется только при достижении некоторых минимальных концентраций, неодинаковых как для самих элементов, так и для живых организмов.

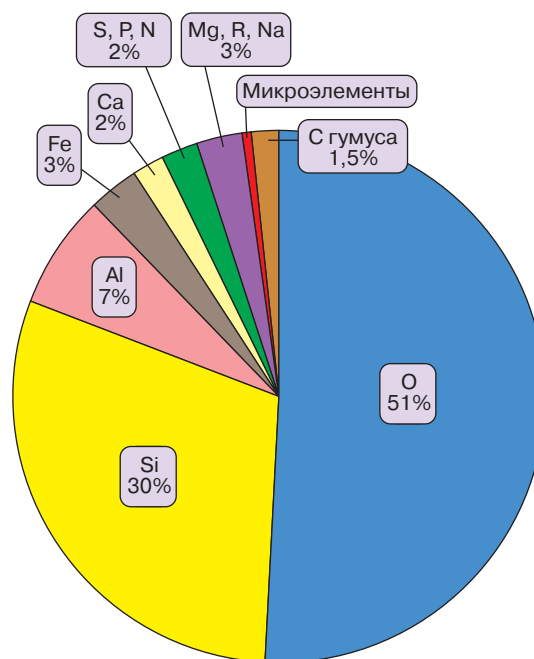


Рис. 1. Среднее содержание в почвах различных химических элементов

Таблица 1. Среднее содержание некоторых элементов (в мг/кг) в биосфере (по А.П. Виноградову и Д.П. Малюге)

Элемент	Литосфера	Почва	Растения (в золе)
Li	32	30	11
Be	4	6	2
B	12	10	400
F	660	200	10
Na	25 000	6300	20 000
Mg	18 700	6300	70 000
P	930	800	70 000
S	470	850	50 000
Ti	4 500	4600	1 000
V	90	100	61
Cr	83	200	250
Mn	1 000	850	750
Co	18	10	15
Ni	58	40	50
Cu	47	20	200
Zn	85	50	900
Se	0,05	0,01	—
Mo	1,1	2,0	20,0
I	0,4	5,0	50,0
Au	0,004	—	1,0
U	2,5	1,0	0,5

почвенных минералов, нередко состоящих из песчаных частиц, а такие частицы быстро не подвергаются разрушающему действию дождевых вод или корневых выделений, и поэтому входящие в их состав элементы питания растениями не усваиваются. Распределение некоторых микроэлементов по почвенным частицам различного размера показано на рис. 2.

В почвах и породах присутствуют микроэлементы в различных соединениях: переходящие в водные вытяжки, вытесняемые из твердых фаз почвы солевыми растворами (обменные катионы), извлекаемые ацетатно-аммонийным буферным раствором (эти соединения считаются доступными растениям), кислоторастворимые соединения и, наконец, микроэлементы, входящие в состав различных почвенных минералов. Иногда неправильно считают, что те элементы, которые извлекаются из почв и пород водой, представлены водорастворимыми солями. На самом деле микроэлементы могут быть в форме труднорастворимых карбонатов, гидроксидов, сульфидов, но в водной вытяжке они все же обнаруживаются в количествах, соответствующих произведению растворимостей соответствующих солей. Поэтому, если в водной вытяжке содержание элемента мало, это не означает, что его мало и в твердых фазах, а объясняется низкой растворимостью преобладающих соединений.

Соотношение микроэлементов в почвах и литосфере для многих элементов сходно: чем больше элемента в литосфере, тем больше его же и в почве, однако строгой пропорциональности нет; если, например, содержание лития в почвах и литосфере почти одинаковое, то серы больше в почвах, а никеля, меди, цинка больше в литосфере. Одна из причин — аккумуляция многих элементов живыми организмами, в частности растениями, после отмирания

которых микроэлементы попадают прежде всего в почву. Это отчетливо видно на примере элементов-биофилов, содержание которых в золе растений во много раз выше, чем в литосфере и почвах. Таковы, например, Mo, Zn, Cu, I, В. Исходя из этого, член-корреспондент РАН В.А. Ковда предложил способ обнаружения прошлой или настоящей жизни в любых почвогрунтах, в том числе и на других планетах: если в верхних слоях грунтов содержание элементов-биофилов повышено, то, по мнению В.А. Ковды, это может служить признаком прошлой или настоящей жизни.

ФУНКЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

В живых организмах микроэлементы входят в состав ферментов, гормонов, витаминов и других жизненно важных соединений. Обычно считают, что в таких соединениях участвуют около 30 микроэлементов. Ферменты — это катализаторы биологического происхождения, которые ускоряют биохимические реакции, а активность ферментов регулируется микроэлементами, хотя известны случаи, когда активация ферментов возможна как микроэлементами, так и макроэлементами. Ниже приведены примеры ферментов, в которых как микроэлементы, так и макроэлементы выполняют сходные функции.

Фермент	Макроэлементы и микроэлементы, активирующие фермент
Карбоксилаза	Mn ²⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ , Fe ²⁺ , Ca ²⁺ , Zn ²⁺
Полипептидаза	Zn ²⁺ , Co ²⁺
Аминопептидаза	Mg ²⁺ , Mn ²⁺
Лецитиназа	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Co ²⁺ , Zn ²⁺ , Mn ²⁺
Аргиназа	Co ²⁺ , Mn ²⁺ , Ni ²⁺ , Fe ²⁺

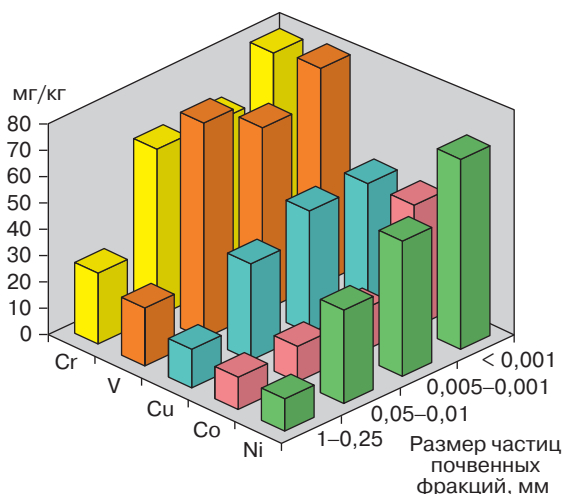


Рис. 2. Содержание микроэлементов в частицах различного размера черноземной почвы (по В.А. Ковде)

Экспериментально доказано, что микроэлементы необходимы для многих важнейших биохимических процессов, недостаток элементов замедляет эти процессы и даже останавливает их. Для белкового, углеводного и жирового обмена веществ необходимы Mo, Fe, V, Co, W, B, Mn, Zn; в синтезе белков участвуют Mg, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Cr; в кроветворении — Co, Cu, Mn, Ni, Zn; в дыхании — Mg, Fe, Cu, Zn, Mn, Co. Поэтому микроэлементы нашли широкое практическое применение в качестве микроудобрений для полевых культур, подкормок в животноводстве, птицеводстве, рыбоводстве [3]. Борные удобрения применяют больше всего под сахарную свеклу, кормовые культуры, лен, хлопчатник. Молибден важен при выращивании бобовых культур, поскольку он необходим для деятельности клубеньковых бактерий, связывающих атмосферный азот. В медных удобрениях чаще всего нуждаются многие сельскохозяйственные культуры, выращиваемые на осушенных торфяно-болотных

почвах, где мало меди или она прочно связана, а также на супесчаных и песчаных почвах. Цинковые удобрения полезны во многих регионах России и смежных государств, они могут быть эффективны при выращивании кукурузы, сахарной свеклы, хлопчатника, овощных культур. На почвах с нейтральной или слабощелочной реакцией нередко вносятся марганцовые удобрения, так как в этих почвах мало усвояемого растениями марганца, который при такой реакции почв легко превращается в труднорастворимый пиролюзит MnO_2 , в карбонаты или фосфаты. Разработаны также кобальтовые удобрения, иодные, а также комплексные микроудобрения, содержащие наборы нескольких элементов.

Пищевые цепи, в которых участвуют микроэлементы, довольно сложны. Первичными источниками микроэлементов могут быть преимущественно горные породы, частично атмосферный воздух и почвенно-грунтовые воды (рис. 3). Микроэлементы потребляются растениями, главным образом из почвы, но некоторые микроэлементы из воздуха и воды. Важно подчеркнуть, что оседающая атмосферная пыль также может стать источником микроэлементов, которые проникают в растения и животных непосредственно через эпидермис или эпителий. Следующий этап – усвоение микроэлементов сельскохозяйственными и дикими животными. Это связано преимущественно с поеданием растений, отчасти с водой, хотя возможно и влияние воздуха. Растительный покров и животные служат основой для кормов и пищевых продуктов, с которыми микроэлементы поступают в организмы человека и животных. Таким образом, конечный состав микроэлементов в организме человека зависит от условий среды и при необходимости может корректироваться либо пищевыми добавками, либо медицинскими препаратами.

Все корма и пищевые продукты после их использования человеком и животными образуют некоторые количества отходов, с которыми микроэлементы могут возвращаться в почву. То есть цикл

замыкается. Отсюда вытекает очень важное правило: чтобы сохранить необходимое равновесие в биосфере, человечество обязано создавать безотходные технологии и схемы полного возврата всех отчуждаемых из почв элементов снова в естественные или сельскохозяйственные почвы.

УЧАСТИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВООБРАЗОВАНИИ

На первых этапах изучения микроэлементов преобладало мнение, что они существенны только для живых организмов. Последующие исследования показали, что даже при малом содержании многие микроэлементы могут существенно влиять на процессы почвообразования и активно в них участвовать. Характерные для почв слоистые алюмосиликаты при изоморфных замещениях модифицируются, изменяются их строение и свойства. Так, в минералах-хлоритах алюминий октаэдрических слоев может быть замещен на Cr^{3+} , Mn^{3+} , магний в бруситовом слое – на Mn^{2+} , Ni^{2+} , в монтмориллонитах¹ алюминий замещается на Ni^{2+} , Zr^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , в вермикулитах – на Cr^{3+} , V^{3+} и т.д. Такого рода замещения могут изменить электрические заряды, приходящиеся на элементарную ячейку минерала, что, в свою очередь, повлияет на степень их обводненности, способность поглощать катионы, органические вещества.

Поскольку микроэлементы воздействуют на развитие растений, то все почвенные биохимические процессы накопления, трансформации, переноса органических соединений в экосистеме во многом зависят от уровня содержания и набора микроэлементов; одновременно последние стимулируют деятельность микроорганизмов. В результате

¹ Монтмориллонит – трехслойный глинистый минерал, кристаллический пакет которого образован одним слоем алюмогидроксильных октаэдров и двумя слоями кремнекислородных тетраэдров. Легко набухает за счет проникновения воды в межпакетные промежутки.

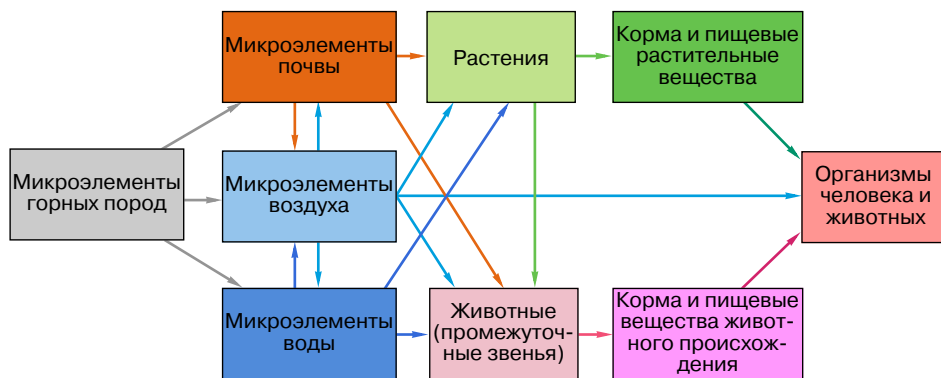


Рис. 3. Биогеохимические цепи микроэлементов (по В.В. Ковальскому)

интенсифицируются процессы образования гуминовых веществ в почвах из растительных остатков. На содержание и распределение микроэлементов активно влияют многие процессы формирования почвенного профиля. Они выносятся из элювиальных (оподзоленных, осолоделых) горизонтов, накапливаются в иллювиальных горизонтах (горизонтах вымывания), глеевых (восстановленных) горизонтах.

Общая схема участия микроэлементов в различных почвенных процессах по В.А. Ковде [4] приведена в табл. 2. В ней показаны важнейшие процессы, происходящие в почве, участвующие в этих процессах микроэлементы и те почвы или почвенные горизонты¹ и образования, в которых накапливаются микроэлементы. Набор процессов, приведенных в табл. 2, не полон, но достаточен, чтобы показать масштабность явления. В текст табл. 2 внесены некоторые изменения и уточнения, чтобы сделать ее более понятной широкому кругу читателей.

Соединения микроэлементов в породах и особенно в почвах отличаются удивительным разнообразием. Катионы металлов поступают в почвы при

¹ Горизонт почв генетический – относительно однородный по составу и свойствам слой почвы, сформировавшийся в процессе почвообразования, как правило, одновременно с другими горизонтами и находящийся с ними во взаимной зависимости. Совокупность генетических горизонтов образует почвенный профиль.

Таблица 2. Участие микроэлементов в важнейших почвенных процессах (по В.А. Ковде)

Процесс	Почвы или почвенные образования	Накапливающиеся микроэлементы
Малый биологический круговорот	Растительный опад свежий или частично разложившийся	Mo, Zn, Cu, Co, B, I, Br, Se, Ni, U, Ba, Mn, Sr, V
Синтез гумуса	Гуминовые вещества	B, I, Mn, Co, Cu, Mo, Zn, Ni, Pb, Br, F
Образование глин и синтез коллоидов	Высокодисперсная часть почвы	Mn, Fe, Cu, Co, V, Cr, Ni, Mo, Li, Rb, Cs, Ba, Sr, Pb, Zn, Mn, V, I, B
Иллювиирование	Иллювиальные горизонты	Cu, Ni, Co, V, Cr, Zn, Mo, B
Оглеение*	Глеевый горизонт	Mn, Co, Cu, V
Гидрогенная аккумуляция	Северные луговые почвы	Mn, Cu, Ni, V, Co, B
	Южные луговые почвы	Ba, Sr, B
	Солончаки	B, I, F, Li, Rb, Cs, Zn, Ca, Co
	Тропические латериты	Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu

* Оглеение – процесс образования глея, то есть такого почвенного горизонта, в котором вследствие переувлажнения развиваются восстановительные процессы; например Fe^{3+} превращается в Fe^{2+} .

растворении пород и минералов, при минерализации растительных и животных остатков (рис. 4), но в почвенном растворе их доля невелика, поскольку почвенные коллоиды легко их поглощают, а гуминовые вещества связывают в комплексные соединения. Частично они переходят в гидроксиды, карбонаты, фосфаты твердых фаз. Для других неметаллических элементов (B, F) могут быть характерны производные соответствующих кислот. Так, бор чаще всего представлен солями ортоборной кислоты H_3BO_3 – боратами.

Особое место занимают соединения иода; его роль особенно велика, так как, с одной стороны, он влияет на состояние щитовидной железы, а с другой – радиоактивный иод – один из важнейших компонентов антропогенных выбросов радионуклидов, в том числе при авариях. Почвы Русской равнины, по данным Н.Г. Зырина и Ю.Н. Зборищука, по содержанию иода делятся на три группы: 1) автоморфные² кислые таежные почвы с низким содержанием

² Автоморфные почвы – почвы, сформировавшиеся под влиянием только атмосферных осадков и не подвергающиеся переувлажнению за счет притока грунтовых или поверхностных вод. В противоположность им выделяют также гидроморфные почвы – формирующиеся под влиянием дополнительного и избыточного (сверхатмосферного) увлажнения.

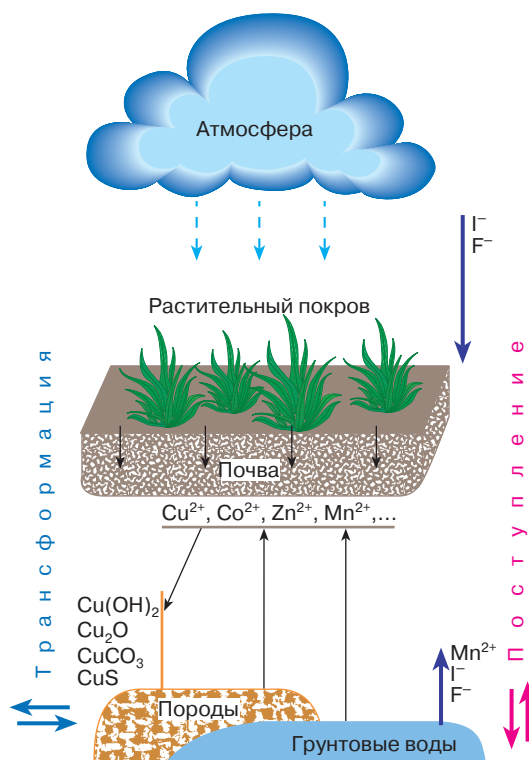


Рис. 4. Поступление и трансформация микроэлементов в экосистеме

иода, 2) автоморфные почвы лесостепной и степной зоны с высокой концентрацией иода и 3) торфяно-болотные луговые, пойменные почвы, где иода больше всего. Это не случайно, поскольку концентрация иода в почве y (в мг/кг) прямолинейно связана с содержанием органического вещества x (в %) по уравнению $y = 0,25 + 0,43x$.

Все это свидетельствует о том, что основным компонентом почвы, связывающим иод, является органическое вещество. Когда иод только поступает в почву, он связывается водорастворимыми низкомолекулярными веществами, но постепенно растет его доля, входящая в соединения с гуминовыми веществами, то есть иод становится все более прочно связанным [5]. К сожалению, конкретные соединения иода с органическими веществами почв изучены плохо.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

Все химические элементы в биосфере постоянно перемещаются как в пределах отдельных сфер (литосфера, гидросфера, атмосфера, педосфера¹), так и между ними. Темпы миграции химических элементов неодинаковы, и наиболее активно они передвигаются в атмосфере и природных водах, в связи с чем А.И. Перельман разделил их на воздушные и водные мигранты, хотя и в пределах каждой группы выделяются подгруппы более или менее подвижных элементов в зависимости от свойств их соединений, кислотности и окислительно-восстановительной обстановки в той среде, где они мигрируют. Повторяющиеся перемещения и превращения химических элементов в биосфере при активном участии живого вещества называют биогеохимическими циклами элементов. Предложено большое число биогеохимических циклов элемен-

¹ Педосфера — поверхностная оболочка суши земного шара, образованная различными почвами.

тов, все их рассмотреть невозможно, и поэтому в качестве примера приведен только один из вариантов биогеохимического цикла бора по В.В. Ковальскому (рис. 5). Соединения бора встречаются во всех природных телах. Из расплавленной магмы при застывании они могут поступать в изверженные породы, а в результате деятельности вулканов попадать как в атмосферу, так и в гидросферу. На этом этапе преобладают чисто геохимические процессы практически без участия живых организмов. Выветриваясь, изверженные породы дают начало почвам; часть их снова может превратиться в магму или частично раствориться в природных водах. Живое вещество свойственно преимущественно педосфере и гидросфере, откуда организмы черпают бор, но в результате разложения остатков живых организмов соединения бора вновь поступают в почву и природные воды. Характерно, что на рис. 5 многие блоки связаны двумя стрелками, показывающими возможность протекания процессов в прямом и обратном направлениях.

Нетрудно видеть, что в целом биогеохимический цикл бора замкнут, но в его пределах есть циклы меньших масштабов, ограниченные небольшим числом блоков. Скорости передвижения соединений бора между отдельными блоками различаются на несколько порядков, поэтому бор накапливается в глинистых и окисленных морских осадках, особенно в железных рудах, но это не означает, что биогеохимический цикл бора разорван. Биогеохимические циклы других элементов построены аналогично, но они различаются по числу блоков, по доминирующим процессам, скоростям и массам мигрирующих элементов.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЗОНЫ И ПРОВИНЦИИ

Как показал В.И. Вернадский, содержание, миграция и аккумуляция химических элементов обусловлены всем комплексом природных факторов. Позже, разрабатывая идеи биогеохимического

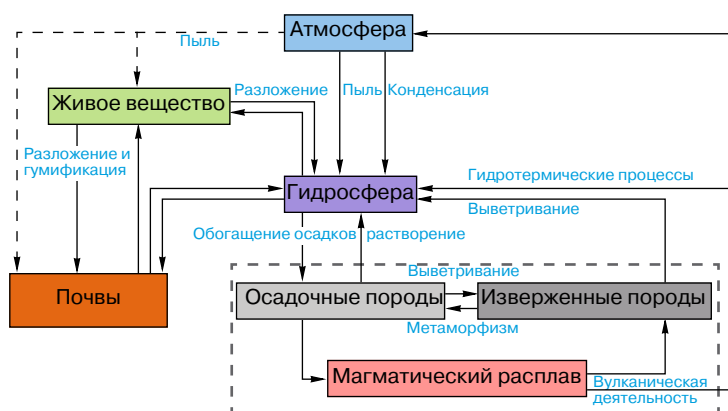


Рис. 5. Биогеохимический цикл бора

районирования, В.В. Ковальский рассматривал в единстве как геохимическую среду (породы, природные воды, почвы), так и физиологические и биохимические особенности организмов. При таком анализе выявляются связи между недостатком или избытком микроэлементов, их количественными соотношениями и состоянием живых организмов вплоть до появления эндемических (местных) заболеваний, а результаты исследований служат основанием для биогеохимического районирования. В основу такого районирования В.В. Ковальский положил биогеохимические зоны и биогеохимические провинции, выполненная им схематическая карта для бывшего СССР показана на рис. 6 [6]. Всего он выделил четыре зоны на территории бывшего СССР, которые характеризуются единством зональности почвообразования, климата, миграции элементов и типом биологических реакций организмов на геохимические факторы среды.

Таяжно-лесная нечерноземная зона. Реакции организмов в целом обусловлены недостатком кальция, фосфора, кобальта (73% всех почв), меди (70%), иода (80%), молибдена (53%), бора (50%), цинка (49%), оптимальным содержанием марганца (72%), относительным избытком, особенно в поймах рек, стронция (15%).

Лесостепная и степная черноземная зона. В этой зоне характерно оптимальное содержание в почве кальция и кобальта (96% для серых лесных и 77% для черноземных почв), меди (72–75%), марганца (71–75%), иод, цинк и молибден сбалансированы с другими элементами. Иногда только наблюдается недостаток подвижного марганца.

Сухостепная, пустынная, полупустынная зона. На живые организмы влияют повышенные уровни содержания сульфатов, бора (88%), цинка (76%), часто

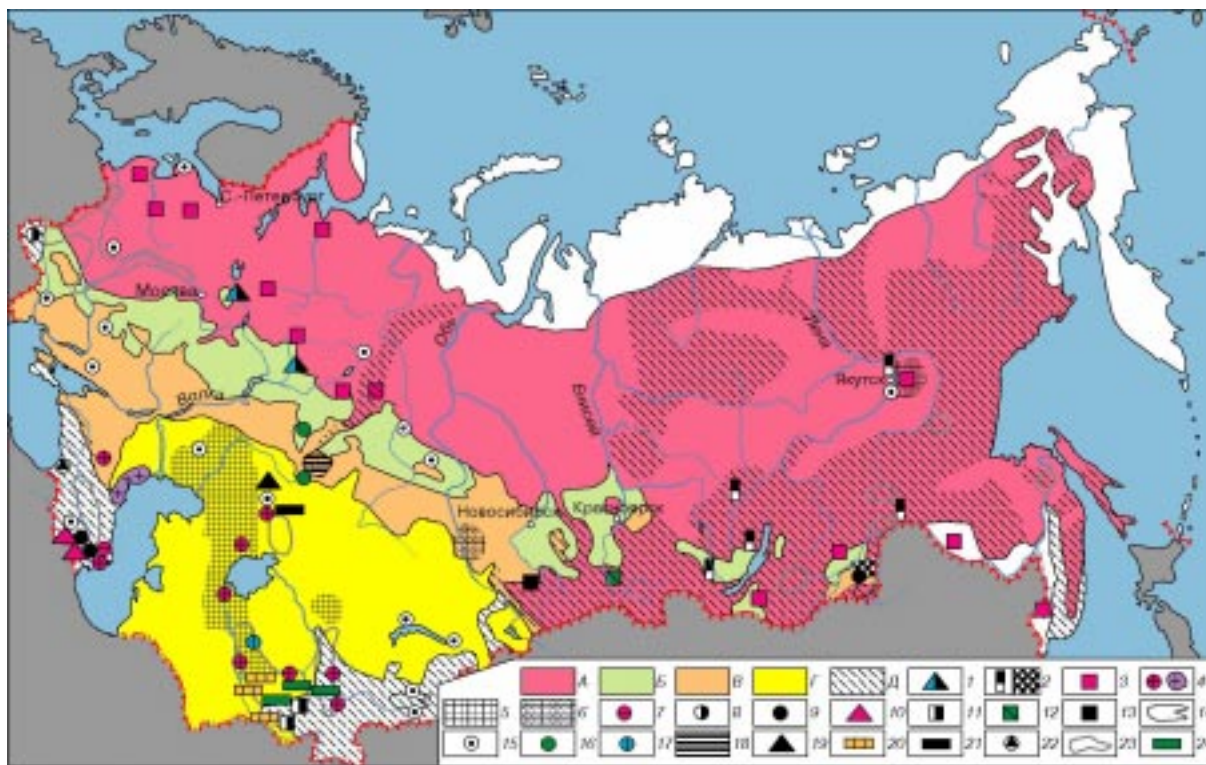


Рис. 6. Схематическая карта биогеохимических зон и провинций (по В.В. Ковальскому). А – таежно-лесная зона, провинции: 1 – бедные иодом и кобальтом, 2 – обогащенные стронцием, бедные кальцием, 3 – с недостатком селена; Б – лесостепная зона; В – степная черноземная зона; Г – сухостепная, полупустынная и пустынная зона, провинции: 4 – с недостаточным содержанием меди, избыточным – молибдена и сульфатов, 5 – с избытком бора, 6 – с пониженным содержанием меди и кобальта, повышенным – молибдена и бора; Д – горные зоны. Азональные биогеохимические провинции: 7 – богатые кобальтом, 8 – бедные иодом и марганцем, 9 – богатые свинцом, 10 – обогащенные молибденом, 11 – с избыточным содержанием стронция и кальция, 12 – обогащенные селеном, 13 – с неблагоприятным соотношением меди, молибдена и свинца, 14 – обогащенные ураном, 15 – с избытком фтора, 16 – обогащенные медью, 17 – с нарушенным обменом меди, 18 – богатые никелем, магнием, стронцием, бедные кобальтом, марганцем, 19 – богатые никелем, 20 – обогащенные литием, 21 – обогащенные хромом, 22 – обогащенные марганцем, 23 – с недостатком фтора, 24 – с недостатком цинка в пастбищных растениях. Обогащение провинций некоторыми элементами может быть как естественным, так и техногенным

стронция (47%), молибдена (40%), низкое содержание меди (40%), иногда кобальта (52%).

Горные зоны. В горных почвах соотношение и концентрации микроэлементов изменяются в широких пределах, поэтому возможны различные реакции организмов, но часто проявляется недостаток иода, кобальта, меди, цинка, хотя возможны и варианты избытка меди, цинка, кобальта, молибдена, стронция и других элементов. В пределах зон выделены провинции, которые показаны на карте условными значками, сущность которых определена в легенде. Значение тех или иных провинций можно раскрыть на нескольких примерах. Так, в провинциях с недостатком кобальта ослабляется синтез витамина В₁₂. Последнее характерно для нечерноземной зоны, где нередко развивается гипопили авитаминоз В₁₂. При избытке молибдена и нарушении его соотношения с медью усиливается синтез фермента ксантинооксидазы, у животных развивается молибденовый токсикоз, а у человека — эндемическая молибденовая подагра.

Реакция животных на недостаток меди проявляется как вследствие ее низкого содержания в кормах, так и при избытке молибдена и сульфатов. В результате тормозится синтез некоторых окислительных ферментов. У овец и крупного рогатого скота возникает своеобразная болезнь, называемая эндемической атаксией.

Если в почвах и кормах много бора, то понижается активность пищеварительных ферментов, что вызывает эндемический борный энтерит. При недостатке иода нарушается функция щитовидной железы, она увеличивается, возникает эндемический зоб. При избытке селена происходят деформация копыт, облысение овец.

Чтобы устранить эти негативные явления, прибегают к внесению в почвы различных микроэлементов, применяют специальные подкормки для животных. Приведенные примеры еще раз показывают необходимость для живых организмов практически всех элементов Периодической системы Д.И. Менделеева. Это позволяет еще раз говорить о том, что нет токсичных элементов, а есть их токсические концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на довольно длительную историю изучения проблемы микроэлементов в биосфере, современное состояние знаний приходится характеризовать только как поверхностное прикосновение к этой проблеме. Накоплено много фактических данных по уровням содержания микроэлементов в различных компонентах биосферы, по реакции живых организмов на их недостаток или избыток, разработаны специальные методы анализа малых количеств элементов, составлены карты биогеохимического районирования и биогеохимических провинций. Несмотря на это, общей теории, рас-

сматривающей функции, механизмы воздействия и роль микроэлементов в биосфере, пока нет. Можно только утверждать, что микроэлементы необходимы всем без исключения живым организмам, что последние резко реагируют на недостаток, избыток или неблагоприятное соотношение элементов. Найдены некоторые эмпирические приемы регулирования жизненных процессов, если они осложнены несбалансированностью микроэлементного питания.

Но значительно больше остается нерешенных вопросов, которые охватывают как крупные теоретические проблемы, имеющие глобальное значение, так и конкретные, часто прикладные задачи, понимание которых необходимо для экологической оптимизации природной среды. Глобальное значение имеют проблемы одновременного действия группы (ансамбля по [7]) элементов, роль последних в становлении и эволюции жизненных форм, связь потребностей в микроэлементах с геохимией Земли и космического пространства. Частные задачи связаны с разработкой методов и показателей мониторинга в отношении микроэлементов, создания медицинских препаратов, подкормок и удобрений, содержащих микроэлементы, технологии их использования, с разработкой методов учета одновременного влияния нескольких микроэлементов на живые организмы. Решение этих проблем, связанных с микроэлементами, принадлежит будущему. Такое положение образно охарактеризовал профессор Е.П. Троицкий, который писал: “Занавес, скрывающий от нас интимную сторону биопроцессов, пока еще не поднят, но он уже колыхается при помощи микроэлементов!” [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Проблемы биогеохимии // Тр. биогеохим. лаб. М., 1980. Т. 16. С. 9–226.
2. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 372–390.
3. Ансюк П.И. Микроудобрения: Справ. книга. Л.: Колос, 1978. 272 с.
4. Ковда В.А. Основы учения о почве. М.: Наука, 1973. Кн. 2. С. 199–229.
5. Тихомиров Ф.А. Радиоэкология иода. М.: Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
6. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. 180 с.
7. Троицкий Е.П. Основные проблемы учения о микроэлементах в системе почва–растение // Вестн. МГУ. 1969. № 5. С. 48–56.

* * *

Дмитрий Сергеевич Орлов, зав. кафедрой химии почв факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, доктор биологических наук, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов – химия почв. Автор более 500 научных работ, в том числе учебника, шести учебных пособий, 12 монографий, часть из которых переведена на английский язык.