РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ ВОДА–ПОРОДА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Савенко В.С.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: Alla_Savenko@rambler.ru

АННОТАЦИЯ: Химические составы наземных растений и литогенной основы ландшафтов опосредованно связаны через почвенно-грунтовые воды и селективность биологического накопления химических элементов. Коэффициент биологического накопления $K_{\text{БН}}$, равный отношению содержания элемента в растениях и водной среде, для большинства химических элементов (Ga, Si, S, Sc, Ag, Nb, Cr, Mg, Sr, As, Au, Ti, La, Fe, Mo, Ca, Cd, Be, Cs, Ra, B, Al, Ni, Sn, Th, V, Pb) находится в пределах $10^{2.5 \pm 0.5}$. Это указывает на относительно слабое фракционирование химических элементов в процессе их извлечения растениями из почвенно-грунтовой водной среды. Наряду с этим имеется небольшая группа элементов-дискриминантов (F, Cl, Br, I, Li, Na, U, Sb, Hg), для которых $K_{\text{БН}} < 10^2$, и группа элементов-концентраторов ($P > Mn > Rb > Co > K > Cu > Ba > Zn$) с явно выраженными физиологическими функциями, для которых характерны наиболее высокие значения $K_{\text{БН}} > 10^3$.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1953 г. один из основателей геохимии ландшафтов Б.Б. Полынов писал: “Я полагаю ..., что состав природных речных вод обуславливается не простыми абиотическими реакциями действия воды на минералы магматических пород, т.е. гидролизом и растворением, как это придумано в учебниках, а более сложным, хотя и более быстро текущим процессом извлечения элементов из минералов организмами и растворением в воде зольной части организмов при их минерализации” [5, с. 474]. Однако спустя год другой выдающийся ученый М.Г. Валяшко привел веские доказательства того, что “распространенность элементов в земной коре определяет главные компоненты природных вод, растворимость же соединений, образованных главными компонентами, играет определяющую роль в формировании химического состава природных вод” [2, с. 581]. Эти формально противоположные точки зрения сосуществуют на протяжении полувека и аргументация каждой из них постоянно расширяется.

К настоящему времени накоплен огромный фактический материал, подтверждающий важную роль продуктов метаболизма (в первую очередь свободной углекислоты и карбоновых кислот) в формировании состава поверхностных вод. Вместе с тем полученные для водной миграции химических элементов ряды подвижности [4] определенно коррелируют с растворимостью связанных с этими элементами минералов. Очевидно, что для понимания процесса формирования химического состава вод суши необходимо знать закономерности взаимодействия биоты с водами и почвенно-литогенной основой ландшафтов. Выяснение одного из аспектов этой проблемы – свя-

зи состава растительного покрова суши с составом почвенно-грунтовых вод – составляет цель настоящей работы.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для количественного описания биологического фракционирования химических элементов в материковом секторе биосферы широко используется коэффициент биологического поглощения $A_{\text{БП}(i)}$, равный отношению содержания элемента i в золе растений (C_i^3) к его содержанию в горных породах (C_i^n), служащих первичным источником вещества биоты:

$$A_{\text{БП}(i)} = C_i^3 / C_i^n. \quad (1)$$

Исключение составляют углерод, водород, кислород и азот, образующие группу “не зольных” элементов.

Различия в величинах $A_{\text{БП}(i)}$ обычно считаются проявлением селективности извлечения растениями разных химических элементов из материнских горных пород, с которыми взаимодействуют живые организмы, создавая при этом биокосные системы суши. Диапазон значений $A_{\text{БП}(i)}$ достигает 10^6 – 10^7 раз [3, 4], что создает впечатление исключительно высокой селективности накопления элементов в растениях. Вместе с тем известно, что химические элементы поступают в растения не непосредственно из горных пород, а в основном из почвенно-грунтовых вод, макро- и микроэлементный состав которых контролируется не только распространенностью химических элементов в горных породах, но также растворимостью минеральных фаз и параметрами сорбционно-десорбционных равновесий. Живые организмы влияют на содержание растворенных форм хи-

мических элементов в почвенно-грунтовых водах через химически активные экзометаболиты и продукты разложения отмершего органического вещества, однако эти процессы участвуют только в формировании водной среды, из которой растения извлекают необходимые им вещества. Поэтому для количественной характеристики селективности накопления химических элементов в растениях суши было бы правильнее вместо (1) использовать коэффициент биологического накопления $K_{\text{БН}(i)}$:

$$K_{\text{БН}(i)} = C_i^{\text{P}} / C_i^{\text{B}}, \quad (2)$$

где C_i^{P} – содержание химического элемента i в растениях; C_i^{B} – концентрация элемента i в почвенно-грунтовых водах, откуда через корневую систему происходит поступление веществ в растения.

Другой биогеохимический аспект $K_{\text{БН}(i)}$ связан с выяснением факторов, лимитирующих первичную продукцию растительного покрова. Величина первичной продукции экосистем суши зависит от интенсивности солнечной радиации и обеспеченности влагой, что находит отражение в тесной корреляции первичной продукции и гидротермического потенциала [7]. При этом установлено, что для протекания на поверхности листа самой реакции фотосинтеза требуется транспирация больших объемов воды, в 200-1000 раз превышающих прирост биомассы [1]. Наряду с этим транспирация нужна также для поставки в растение химических элементов, необходимых для образования новой биомассы [9], и если $K_{\text{БН}(i)}$ мал, то лимитирующим первичную продукцию наземных экосистем фактором может быть не гидротермический потенциал, а недостаточная концентрация в почвенно-грунтовых водах физиологически необходимых элементов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета $K_{\text{БН}(i)}$ нами было определено содержание химических элементов в растениях суши как среднее геометрическое значение по трем наиболее представительным сводкам [6, 8, 11]. Средние концентрации элементов в водной среде были приняты в соответствии с оценкой [10] для состава грунтовых вод зоны гипергенеза. Сопоставление величин C_i^{P} и C_i^{B} показывает наличие тесной корреляции между ними (рис. 1):

$$\lg C_i^{\text{P}} = 0.952 \lg C_i^{\text{B}} + 2.359, \quad r = 0.94. \quad (3)$$

Диапазон значений $K_{\text{БН}(i)}$ достигает четырех порядков величины (табл. 1), однако в большинстве случаев $\lg K_{\text{БН}(i)} = 2.5 \pm 0.5$, т.е. отклонения от среднего не превышают 0.5 порядка величины. Эти элементы (Ga, Si, S, Sc, Ag, Nb, Cr, Mg, Sr, As, Au, Ti, La, Fe, Mo, Ca, Cd, Be, Cs, Ra, B, Al, Ni, Sn, Th, V, Pb) поступают в растения примерно в тех же соотношениях, которые характерны для почвенно-грунтовых вод.

Предположительно можно выделить 2 группы элементов с признаками значительного фракционирования: элементы-дискриминанты ($\lg K_{\text{БН}(i)} < 2.0$) и элементы-концентраторы ($\lg K_{\text{БН}(i)} > 3.0$).

В первую группу входят галогены, степень накопления которых возрастает с увеличением атомного веса ($\text{F} < \text{Cl} < \text{Br} \approx \text{I}$), легкие щелочные элементы (Li, Na), а также уран, сурьма и ртуть, для которых имеющиеся данные по C_i^{P} и C_i^{B} содержат большую неопределенность.

Четко выраженное селективное концентрирование присуще 8 химическим элементам, образующим в порядке убывания $K_{\text{БН}(i)}$ следующий ряд:

$$\text{P} > \text{Mn} > \text{Rb} > \text{Co} > \text{K} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Zn}.$$

Все эти элементы выполняют определенные физиологические функции и их положение в группе элементов-концентраторов вполне закономерно (рубидий концентрируется в растениях, являясь близким химическим аналогом калия).

Примечательно, что среднее значение $K_{\text{БН}(i)} = 10^{2.5} = 316$ практически точно совпадает со средней величиной отношения массы транспирируемой влаги к продуцируемой растениями биомассе, равной 300 [1]. Это означает, что при транспирации влаги, идущей на обеспечение нормального протекания реакции фотосинтеза, растения получают достаточные количества почти всех химических элементов. Лимитирование первичной продукции можно ожидать только со стороны небольшого числа элементов, показывающих тенденцию селективного концентрирования в растениях (P, Mn, Rb, Co, K, Cu, Ba, Zn), да и то в том случае, если в почвах и грунтах резерв подвижных форм менее чем в 10 раз превышает массу растворенных форм этих элементов. Как правило, последнее условие в природе не выполняется и поэтому главным фактором, определяющим величину первичной продукции растительного покрова суши, следует считать гидротермический потенциал.

Рис. 1. Зависимость между содержанием химических элементов в растениях суши (C_i^p , мкг/г сухого вещества) и грунтовых водах (C_i^b , мкг/мл).

Таблица 1. Среднее содержание химических элементов в грунтовых водах (C_i^b , мкг/мл), растениях суши (C_i^p , мкг/г сухого вещества) и коэффициенты их биологического поглощения относительно водной среды ($K_{\text{БП}(i)}$)

Элемент	C_i^b	C_i^p	$\lg K_{\text{БП}(i)}$	Элемент	C_i^b	C_i^p	$\lg K_{\text{БП}(i)}$
F	0.48	2	0.62	Fe	0.481	150	2.49
Na	67.6	750	1.05	Mo	0.0018	0.6	2.52
U	0.0013	0.02	1.19	Ca	39.2	13000	2.52
Sb	0.00068	0.015	1.34	Cd	0.00024	0.09	2.57
Cl	59.7	2000	1.53	Be	0.00019	0.07	2.57
Li	0.013	0.6	1.66	Cs	0.00026	0.1	2.59
Hg	0.0004	0.02	1.70	Ra	4.6×10^{-10}	2×10^{-7}	2.64
I	0.008	0.6	1.88	B	0.078	40	2.71
Br	0.085	8	1.97	Al	0.226	150	2.82
Se	0.00072	0.07	1.99	Ni	0.0036	2.5	2.84
Ga	0.00037	0.04	2.03	Sn	0.00039	0.3	2.89
Si	8.35	1000	2.08	Th	0.00024	0.2	2.92
S	25.6	3400	2.12	V	0.0013	1.2	2.97
Sc	0.00007	0.01	2.15	Pb	0.003	3	3.00
Ag	0.00026	0.04	2.19	Zn	0.041	60	3.17
Nb	0.0005	0.08	2.20	Ba	0.0183	34	3.27
Cr	0.003	0.5	2.22	Cu	0.0056	11	3.29
Mg	18.2	3400	2.27	K	5.15	12000	3.37
Sr	0.183	35	2.28	Co	0.00039	1.1	3.45
As	0.0015	0.3	2.30	Rb	0.0019	8	3.62
Au	5.3×10^{-6}	0.0015	2.45	Mn	0.055	310	3.75
Ti	0.0174	5	2.46	P	0.058	1900	4.52
La	0.00067	0.2	2.47				

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Между средним содержанием химических элементов в растениях суши и почвенно-грунтовых водах имеется тесная корреляция $\lg C_i^p = 0.952 \lg C_i^b + 2.359$, $r = 0.94$.

Для большинства химических элементов (Ga, Si, S, Sc, Ag, Nb, Cr, Mg, Sr, As, Au, Ti, La, Fe, Mo, Ca, Cd, Be, Cs, Ra, B, Al, Ni, Sn, Th, V, Pb) величина коэффициента биологического накопления $K_{БН(i)}$ изменяется в пределах $10^{2.5 \pm 0.5}$, что указывает на относительно слабое фракционирование химических элементов в процессе их извлечения растениями из почвенно-грунтовой водной среды. Наряду с этим имеется небольшая группа элементов-дискриминантов (F, Cl, Br, I, Li, Na, U, Sb, Hg), для которых $K_{БН} < 10^2$, и группа элементов-концентраторов ($P > Mn > Rb > Co > K > Cu > Ba > Zn$) с явно выраженными физиологическими функциями, для которых характерны наиболее высокие значения $K_{БН} > 10^3$.

Химические составы наземных растений и литогенной основы ландшафтов опосредованно связаны через почвенно-грунтовые воды, а содержание растворенных форм химических элементов в почвенно-грунтовых водах служит второстепенным фактором, лимитирующим

первичную продукцию, по сравнению с интенсивностью транспирации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. Глобальная экология. – М.: Мысль, 1977. – 327 с.
2. Валяшко М.Г. Роль растворимости в формировании химического состава природных вод // Докл. АН СССР. 1954. Т. 49. № 4. – С. 581-584.
3. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Высшая школа, 1998. – 413 с.
4. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
5. Полюнов Б.Б. О геологической роли организмов // Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 466-476.
6. Романкевич Е.А. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы) // Геохимия. 1988. № 2. – С. 292-306.
7. Рябчиков А.М. Структура и динамика геосферы. – М.: Мысль, 1972. – 223 с.
8. Савенко В.С. Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы // Итоги науки и техники. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. – Т. 31. – М.: ВИНТИ, 1991. – 212 с.
9. Савенко В.С. Что такое жизнь? Геохимический подход к проблеме. – М.: ГЕОС, 2004. – 203 с.
10. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
11. Bowen H.J.M. Trace elements in biochemistry. L.: Acad. Press, 1966. – 241 p.

DISTRIBUTION OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE WATER-ROCK SYSTEM AS A FACTOR OF FORMATION OF THE VEGETATION COVER COMPOSITION

Savenko V.S.

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ABSTRACT: The elemental compositions of land plants and lithogenous basis of landscapes are indirectly interrelated through the soil-subsoil waters and the selectivity of biological accumulation of chemical elements. Coefficient of biological accumulation K_{BA} equal to the ratio of element content in plants and water environment is in the interval $10^{2.5 \pm 0.5}$ for the most part of chemical elements (Ga, Si, S, Sc, Ag, Nb, Cr, Mg, Sr, As, Au, Ti, La, Fe, Mo, Ca, Cd, Be, Cs, Ra, B, Al, Ni, Sn, Th, V, and Pb). It specifies rather weak fractionation of chemical elements during their extraction by plants from the soil-subsoil water environment. At the same time there is a small group of elements-discriminants (F, Cl, Br, I, Li, Na, U, Sb, and Hg) with $K_{BA} < 10^2$ and group of elements-concentrators ($P > Mn > Rb > Co > K > Cu > Ba > Zn$) with obviously expressed physiological functions for which the highest values of $K_{BA} > 10^3$ are characteristic.