

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕМЕНТОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ПОЧВА–АТМОСФЕРА» (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО УРАЛА)

Ю.Л. Мельчаков

Уральский государственный педагогический университет

620219, г. Екатеринбург, просп. Космонавтов, 26

Поступила в редакцию 25 декабря 2007 г.

Рассмотрены принципы и подходы изучения геохимии массопереноса в системе «почва–атмосфера». Проанализированы составляющие двух ветвей аэральной миграции: атмосферных выпадений и эвапотранспирационного переноса. Дана количественная оценка масс главных и рассеянных элементов, участвующих в атмосферном цикле миграции. На основе полученных результатов сделаны выводы о главных закономерностях элементопереноса.

Ключевые слова: *геохимия, атмосферный цикл миграции, главные и рассеянные элементы.*

REGULARITIES OF ELEMENTTRANSFER IN SYSTEM «SOIL–ATMOSPHERE» (THE NORTH URALS AS AN EXAMPLE)

U.L. Melchakov

Urals State Pedagogical University

The principles and approaches of mass transfer geochemistry study in system «soil–atmosphere» are examined in the article. The parts of two branches of air migration: atmospheric fallout and evapotranspiration transfer were analysed too. A quantitative estimation of major and trace elements mass taking part in atmospheric cycles of migration is given. Using the obtained data, a conclusion concerning the main regularities of element transfer was made.

Key words: *geochemistry, atmospheric cycles of migration, major and trace elements.*

История вопроса

В начале 60-х гг. XX в. при решении ряда практических задач было обращено внимание не только на водную и биологическую миграцию, изучение которых имеет довольно длительную историю, но и на аэральную миграцию химических элементов. Большинство ученых, занимающихся изучением атмосферной миграции, пользовалось традиционным подходом: оперировало с концентрациями элементов. На новый уровень исследований, предполагающий выяснение закономерностей миграции масс элементов, вовлекаемых в атмо- и биогеохимические циклы, перешло сравнительно небольшое число специалистов. Фундаментальные подходы к оценке аэральной миграции на глобальном уровне путем определения массопереноса химических элементов были разработаны В.В. Добровольским [1983], а на региональном уровне – Н.Ф. Глазовским

[1985]. Методология аэрального элементопереноса подробно рассмотрена в монографии [Мельчаков, 2007]. В настоящем сообщении акцент сделан на систему «почва–атмосфера».

Теоретические положения

Самоорганизация анализируемой системы базируется на представлении о цикличности миграции вещества, которая поддерживает стационарное состояние системы. Выделяются две ветви аэральной миграции: атмосферные выпадения и эвапотранспирационный перенос. При этом само деление на ветви продиктовано чисто методическими соображениями, т.к. реально в природе существует непрерывный циклический обмен между земной поверхностью и атмосферой: аэрозоли поступают в воздух и удаляются из него вместе с атмосферными осадками и в форме сухих осадений.

Атмосферные выпадения

В регионах с гумидным климатом атмосферные осадки являются основным механизмом выведения аэрозолей из тропосферы. Последние могут служить ядрами конденсации водяного пара и в этом случае подвергаются воздействию конденсирующейся воды и растворенных в ней Cl^- и SO_4^{2-} . Таким образом, уже изначально облачные капли обогащаются многими водорастворимыми формами элементов. Существует и другой механизм выведения аэрозолей из атмосферы – подоблачное вымывание. При этом часть элементов, содержащихся в аэрозолях, растворяется; сами аэрозоли захватываются каплями дождя или снежинками. Известно, что эффективность вымывания определяется многими факторами, среди которых важную роль играют физические параметры осадков. Так, например, одна влажная снежинка сложной формы может содержать до 10^6 субмикронных пылевых частиц, а сухая, гранулированная – всего 100-1000 [Thornten, Eisenreich, 1982]. Вместе оба типа вымывания дают влажное осаждение.

Меньшую роль играют «сухие» выпадения. Они вместе с «мокрыми» выпадениями образуют суммарные выпадения. Именно сведения о суммарных выпадениях как результирующем показателе аэральной миграции элементов позволяют количественно оценить существующие в природе круговороты вещества. Поэтому суммарные выпадения – важный геохимический параметр.

Вместе с тем, реально в природных условиях атмосферные выпадения, как правило, встречаются на своем пути своеобразный биологический экран: растительность. В этой связи автору представляются актуальными как минимум два аспекта: 1) анализ геохимической роли растительности в изменении элементного состава атмосферных выпадений; 2) изучение закономерностей массопереноса в системе «атмосфера–растительность–почва». Не останавливаясь подробно на данной проблеме, отметим, что отдельным ее вопросам в последнее время посвящен ряд публикаций как у нас в стране, так и за рубежом. Их краткий обзор сделан в монографии [Мельчаков, 2005].

Сезонное изменение состава осадков является одной из важных характеристик. При этом тренд может быть разный, зависящий от роста содержания основных примесей в холод-

ный или теплый периоды. Поэтому необходимы сезонные наблюдения.

Эвапотранспирационный перенос химических элементов

Эта ветвь аэральной миграции наименее изучена.

Автор выделяет составляющие эвапотранспирационного переноса: поток газовых форм химических элементов в системе «растительность–тропосфера» и в системе «почва–тропосфера». Первый обязан растениям, т.к. в процессе их жизнедеятельности химические элементы переходят в газовую форму нахождения. В этой форме есть такие элементы, которых, на первый взгляд, не должно быть – это тяжелые металлы. Экспериментально установлено, что терпены, продуцируемые лесными массивами, несут тяжелые металлы. Поэтому их содержание в воздухе над рудными телами повышается [Barringer, 1977].

Другой массоперенос: общее почвенное дыхание – представляет собой суммарный поток двух основных компонентов: дыхание корней и дыхание почвенной микрофлоры [Edwards et al., 1970]. В его изучении встречаются большие сложности. Так, если в определении транспирационных форм элементов древесных растений их можно вычленировать из общего эвапотранспирационного потока, включающего газовые эманации из почвы, то для наземной травянистой растительности сделать это технически сложно. Отмеченная трудность хорошо известна экспериментаторам, которые пытались определить раздельно массу испаряющейся влаги с поверхности почвы и поверхности травянистых растений. По этой причине необходимо определять суммарную величину эвапотранспирации с поверхности почвы. Кроме того, вода испаряется с поверхности стволов и толстых ветвей древесных растений, хотя ее количество значительно меньше того, которое теряется через листья. Работая в первом приближении, можно пренебречь отмеченными эманациями.

Представляются важными следующие соображения. Необходимо проводить сопряженное изучение вышерассмотренных миграционных потоков в типичных ландшафтах региона. При этом спектр элементов должен включать большинство из известных в природе или все 89 элементов (в идеале).

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕМЕНТОПЕРЕНОСА

Таблица 1

Массы главных элементов,
мигрирующих в среднетаежных ландшафтах, кг/км²·год

Элементы	Атмосферные выпаде-ния	Эвапотранс- пирация	Элементы	Атмосферные выпадения	Эвапотранс- пирация
Ca	3200	730	Fe	150	54
K	1000	130	Si	106	39
Mg	620	45	Al	53	29
S	360	430	P	41	6
Na	360	200	<i>Всего</i>	5890	1663

Таковы исходные теоретические положения и методологические подходы к решению проблемы оценки массопереноса в системе «почва–атмосфера», включающей и растительность.

Объекты и методика исследования

Эксперимент проводился в 2000-2003 гг. на территории Свердловской области в среднетаежных и подгольцовых ландшафтах массива Денежкин Камень (Северный Урал). Оба ключевых участка приурочены к массиву основных интрузивных пород (габбро).

Для оценки аэральной миграции в зимний период традиционно исследуется состав снежного покрова. Мы предлагаем дополнительно использовать ГИС (геоинформационные системы) исследуемого района для повышения точности оценки атмосферных выпадений. В частности, нами использовался ГИС заповедника «Денежкин Камень» [Мельчаков и др., 2004]. Основа ГИС создана с помощью программного обеспечения Arc/Info, версия 7.1.1. и ERDAS, а также Imagination 8.3. Топографическая основа масштаба 1:25 000. Работали в версии Arc Map 9.0. Расчеты выпадений выполнены двумя способами: с учетом слоя снеговых вод и

используя только площади поперечного сечения снежного керна. Сопоставление показало большую степень близости значений. В теплое время года анализировали жидкие атмосферные осадки, в которых присутствует как пыль, вымываемая из атмосферы во время дождей, так и пылевые частицы, осевшие на древесной растительности, а затем смытые с листьев и тонких ветвей деревьев. Кроме того, в подкroновое пространство поступает какое-то количество пыли в сухие периоды, причем ее носителем служат в основном листья деревьев.

Для сбора суммарных атмосферных выпадений применяли емкости (своеобразные ловушки), заполненные примерно на 3/4 объема дистиллированной водой [Мельчаков, 1999]. Некоторые различия в методике определялись спецификой изученных ландшафтов. Ловушки располагались в средней части подкroнового пространства, в соответствии с рекомендациями В.П. Учватова и Н.Ф. Глазовского [1982], поскольку различия в количественном поступлении вещества и его химизме в разных участках подкroнового пространства существенны, а средняя часть наиболее представительна.

Заметим, что и зарубежные специалисты чаще всего оценивают суммарные выпадения

Таблица 2

Массы рассеянных элементов,
мигрирующих в среднетаежных ландшафтах, г/км²·год

Элементы	Атмосферные выпадения	Эвапотранс- пирация	Элементы	Атмосферные выпадения	Эвапотранс- пирация
Mn	264000	6300	Cd	290	58
Cu	44600	1900	As	200	43
Zn	40400	3600	Se	180	130
B	6900	2700	Co	57	22
Pb	3700	810	Hg	46	20
Ni	2360	330	—	—	—

[Berg et al., 1994; Poissant et al., 1994, и др.], и только в некоторых случаях разделяют элементы, поступающие путем сухого и мокрого выпадений [Holsen, Noll, 1992, и др.], что объясняется, наряду с другими причинами, тем, что для достижения результатов, близких к реальности, необходимо применять такие методики расчетов, которые учитывали бы распределение частиц по размеру и позволяли оценивать скорости осаждения частиц каждого размерного класса.

Для исследования эвапотранспирационного переноса собирали конденсаты в полиэтиленовые пакеты (с наиболее распространенных древесных растений) или в специально сконструированную камеру (для сбора испарений травянистых растений и с поверхности почвы). Отбор конденсатов производили в течение многих (до 35-ти) дней без перерыва.

Обработка аналитических данных. Был выполнен полиэлементный анализ в лаборатории физико-химических методов анализа Института химии твердого тела УрО РАН на приборе Spectromass 2000 (Spectro AI, Germany) в режиме RQ (RapiQuant). В результате в каждой пробе суммарных атмосферных выпадений и конденсатов были определены по 70-74 элемента. На всех этапах выполнялись самые жесткие требования к чистоте эксперимента, в частности, контейнеры для образцов и реактивы были тщательно протестированы на загрязненность. Эта процедура является совершенно необходимой, особенно в случаях определения ультранизких концентраций следовых элементов [Gasparon, 1998].

Результаты и их обсуждение

1. Впервые определены количественные параметры суммарных атмосферных выпадений подавляющего большинства элементов применительно к природным условиям таежного Урала (табл. 1, 2). Из многочисленной группы рассеянных элементов выбрали хорошо изученные.

Определено, что в таежных ландшафтах ежегодно поступает в подкروновые пространство из атмосферы на 1 км²: 1000н кг Са и К; 100н кг Mg, S, Na, Fe, Si и Mn; 10н кг Al, P, Sr, Ba, Zn, Cu; н кг B, Pb, Ti, Cr, Ni и других элементов; 100н г V, Cd, As, Se и других элементов. Представители группы редких земель и некоторые другие элементы поступают в таежные ландшафты в количестве, измеряемом 1н-10н г/км²·год.

2. Установлена четкая сезонная динамика аэрального массопереноса. Модули атмосферных выпадений большинства элементов за теплый период года превосходят соответствующие величины холодного периода в n раз (на порядок); суммарное значение модулей теплового периода года составляет 92 % годового массопотока.

Указанный тренд закономерен: зимой жизнедеятельность организмов затухает, как следствие уменьшаются масштабы аэрального переноса продуктов эвапотранспирации и эффект трансформации атмосферных выпадений пологом леса.

Можно сделать вывод, что сезонный тренд указывает на важную роль биоклиматических факторов в рассматриваемом массопереносе.

3. Получены новые данные о трансформации суммарных атмосферных выпадений элементов пологом древесных растений: в холодное время года данный эффект проявляется нестабильно.

4. Проанализирована трансформация состава фронтальных и внутримассовых летних осадков кронами хвойных деревьев и установлено, что в данном явлении генетический тип атмосферных осадков играет важную роль. При выпадении внутримассовых осадков эффект трансформации не выражен у большинства рассеянных элементов, в отличие от фронтальных осадков.

5. Впервые определены масштабы эвапотранспирационного переноса химических элементов применительно к природным условиям таежного Урала (табл. 1, 2).

Установлено, что в таежных ландшафтах Урала ежегодно с 1 км² мобилизуется в атмосферу: 100н кг Са, S, Na и К; 10н кг Fe, Mg, Si и Al; н кг P, Mn, B, Sr, Ba, Zn и Cu; 100н г Ti, Br, Cr, Pb, Se, Ni и других элементов; 10н г Li, Zr, Sc, V, Sb, Ag, Cd, Sn, As, Ga, Hg, Co и других элементов. Многие рассеянные элементы переносятся в количестве, измеряемом 0,1н-1н г/км²·год.

Эвапотранспирационный перенос суммы анализируемых элементов в таежных ландшафтах составляет 27 % от такого значимого процесса, как атмосферные выпадения.

6. Определено, что в эвапотранспирационном массопотоке возрастает относительное значение тяжелых металлов и близких им элементов, массы которых невелики, по сравнению

Коэффициенты корреляции Пирсона (r)
между изученными массопереносами в среднетаежных ландшафтах

Группа элементов	Сравниваемые объекты: эвапотранспирация– атмосферные выпадения
1. Главные	0,841 (9)
Рассеянные:	
2. Литофильные	0,908 (34)
3. Халькофильные	0,919 (16)
4. Сидерофильные	0,999 (9)

Примечание. Все значения (r) больше табличных критических значений коэффициента корреляции Пирсона для 5 % уровня значимости. В скобках – количество проб.

с участием их масс в биологическом круговороте (в узком смысле слова). Возможно, это свидетельствует о выработке растениями в процессе эволюции механизма избавления от токсичных элементов путем эвапотранспирации.

7. Установлена связь состава конденсатов эвапотранспирационных выделений с местоположениями участков. Констатируется увеличение концентраций элементов в конденсатах горно-таежного пояса по сравнению с подгольцовым, что объясняется биоклиматическими факторами. Как следствие, значения эвапотранспирационного переноса большинства элементов в горно-таежном поясе в несколько раз превышают соответствующие значения для подгольцового пояса (по сумме элементов в 2,7 раза).

8. Определен относительный вклад лесных ярусов в эвапотранспирационный перенос элементов. В горно-таежном поясе эвапотранспирация травяно-кустарникового яруса составляет 92 %, древесного яруса – 8 % от общего массопотока.

Соответствующие параметры подгольцового пояса принципиально иные: в нем эвапотранспирация травяно-кустарникового яруса составляет 42 %, древесного яруса – 58 % от общего массопереноса.

9. Рассчитаны и проанализированы коэффициенты корреляции между двумя изученными массопереносами (табл. 3). Их корреляционная связь статистически доказана, причем все значения (r) выше 0,84, что свидетельствует о сильной положительной корреляции двух потоков. Ранее [Мельчаков, 2005] проанализирована также связь между парами потоков: эвапот-

ранспирационный перенос–биологический круговорот (опад), эвапотранспирационный перенос–вынос с речным стоком, атмосферные выпадения–вынос с речным стоком, биологический круговорот (опад)–атмосферные выпадения. Установлено, что наиболее тесно связанными массопереносами являются эвапотранспирационный перенос и атмосферные выпадения. Более тесная связь между эвапотранспирацией и атмосферными выпадениями не случайна и объясняется тем, что оба потока «пронизывают» нижние слои тропосферы и количество факторов, осложняющих эту связь, меньше в сравнении с другими парами потоков.

Однако представляется более важным совершенно неисследованный аспект проблемы: какая часть эвапотранспирационного массопотока возвращается на поверхность почвы конкретного ландшафта, и, соответственно, какой остаток вовлекается в более протяженную миграцию. Для решения этой задачи необходимы специальные исследования, как вариант – с мечеными атомами.

Поставленный нами эксперимент по установлению взаимосвязи элементного состава атмосферных осадков в теплое время года и летучими выделениями растений позволил сделать следующий вывод. Элементный обмен между ассимилирующей поверхностью растений и атмосферой не только оказывает важное влияние на химический состав осадков, но и является одной из причин внутримассовых осадков [Мельчаков, Суриков, 2007]. Этот результат является недостаточным для ответа на поставленный вопрос, а лишь указывает на качественную характеристику явления.

Выводы

Реализация рассмотренных принципов и подходов изучения элементопереноса в системе «почва–атмосфера» позволила установить количественные параметры суммарных атмосферных выпадений и эвапотранспирационного переноса элементов. На основе полученных данных выявлены закономерности элементопереноса. Доказана положительная корреляционная связь двух миграционных потоков. В практическом аспекте результаты представляются актуальными в качестве дополнительного средства геохимического и экологического мониторинга заповедного района Урала.

Список литературы

- Глазовский Н.Ф. Ландшафтно-геохимическое значение глубокого подземного стока в аридных областях СССР. Дис. докт. геогр. наук. М.: МГУ, 1985. 643 с.
- Добровольский В.В. География микроэлементов: глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- Мельчаков Ю.Л. Окружающая среда: контроль и рекомендации. Ч.1. Екатеринбург, 1999. 58 с.
- Мельчаков Ю.Л. Атмосферная миграция химических элементов на Урале. Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2005. 420 с.
- Мельчаков Ю.Л. Роль эвапотранспирации в системе миграционных потоков химических элементов. Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2007. 326 с.
- Мельчаков Ю.Л., Суриков В.Т. Роль биогеохимических процессов в массопереносе химических элементов с атмосферными осадками (на примере Северного Урала) // География и природные ресурсы. 2007. № 1. С. 83-90.
- Мельчаков Ю.Л., Учватов В.П., Квашина А.Е. и др. Исследование геохимических потоков в фоновых ландшафтах Северного Урала // География и природные ресурсы. 2004. № 4. С. 74-78.
- Учватов В.П., Глазовский Н.Ф. Эколого-геохимические и природоохранные аспекты трансформации природных вод в лесных экосистемах // Взаимодействие лесных экосистем и атмосферных загрязнителей. Ч. 2. Таллин, 1982. С. 137-162.
- Barringer A.R. Airtrace: an airborne geochemical exploration technique // U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1015. (Proceedings of the First Annual William T. Pecora Memorial Symposium). 1977. P. 354-369.
- Berg T., Rwysit O., Ctlinnes E. Trace elements in atmospheric precipitation at Norwegian background stations (1989-1990), measured by ICP-MS // Atmos. Environ. 1994. № 28. P. 3519-3536.
- Edwards C.A., Reichl D.E., Crossley D.A. The role of soil invertebrates in turnover of organic matter and nutrients // Analysis of temperate Forest Ecosystems / Eds: D.E. Reihle. Springer-Verlag. New York, 1970. P. 12-172.
- Gasparon M. Trace metals in water samples: minimising contamination during sampling and storage // Environmental Geology 1998. V. 36 (3-4). P. 207-214.
- Holsen T.H., Noll K.E. Dry deposition and atmospheric particles: application of current models to ambient data // Environ. Sci. Technol. 1992. № 26. P. 1807-1814.
- Poissant L., Schmit J.-P., Beron P. Trace inorganics in rainfall in the Montreal Island // Atmos. Environ. 1994. № 28. P. 339-346.
- Thornten J.D. Eisenreich S.J. Impact of land – use on the acid and trace element composition of precipitation in the North Central USA // Atmos. Environ. 1982. V. 10. № 8. P. 1945-1955.

Рецензент доктор геол.-мин. наук Н.А. Григорьев