

УДК 574

К РАЗРАБОТКЕ ТЕОРИИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ВЕЩЕСТВА В ЛАНДШАФТЕ *

А. Д. ФОКИН, Ф. И. КОЗЛОВСКИЙ

Рассмотрены задачи, подходы, теоретические и информационные проблемы, возникающие при разработке теории биогеохимических потоков вещества в ландшафте. Выделены главные направления структурных и функциональных исследований ландшафта, необходимые для разработки ландшафтно-биогеохимических моделей, а также основные факторы, имеющие значение для классификации биогеохимических потоков и ландшафтов.

Необходимость теоретических исследований в области биогеохимии обусловлена напряженной экологической обстановкой, сложившейся на Земле. Различные виды антропогенной деятельности существенно повлияли на сложившиеся природные циклы многих элементов, что обусловило значительное изменение химического состава атмосферы, природных вод и т. д. Эти изменения чаще всего приводят к негативным или непредсказуемым последствиям (увеличение концентрации двуокси углерода в атмосфере, эвтрофикация крупных водоемов типа Великих Озер или озера Байкал и др.). Кроме того, в природные биогеохимические циклы включаются и разнообразные токсичные вещества антропогенного происхождения: пестициды, искусственные радионуклиды, тяжелые металлы.

Важной предпосылкой развития ис-

следований в названном направлении является общая тенденция к интеграции на новом уровне исследований ландшафтов как систем (экосистем, геосистем). Эта интеграция отмечается в последние годы в ряде дисциплин ландшафтно-географического цикла (в почвоведении, геоморфологии, гидрологии, геохимии и геофизике ландшафтов и др.) и выражается в возникновении междисциплинарных направлений на стыке традиционных разделов науки (например, педогеоморфологии) [29].

Мы полагаем, что кардинальным путем подобного синтеза является создание теории биогеохимических потоков, которая способна придать стремлению к интеграции операциональный характер, поскольку именно через эти потоки осуществляются межкомпонентные взаимосвязи, объединяются ландшафты различных уровней вплоть до биосферного.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проект 93-05-14252.

Учитывая исключительную структурную и функциональную сложность объекта исследования — биогеохимических потоков в биосфере, в ландшафте, необходимо по возможности ограничить задачи разрабатываемой теории. Наиболее актуальными как для развития теории, так и для принятия практических решений, на наш взгляд, являются следующие.

1. Понимание и оценка любых химических изменений в окружающей среде как результата совокупного действия, как правило, нескольких биогеохимических потоков (не только миграционных, но и трансформационных, см. ниже). Разработка подходов к выделению главных потоков, характерных и значимых для данного ландшафта.

2. Разработка типологии или классификации биогеохимических потоков в ландшафте.

3. Разработка классификации ландшафтов на основе главных биогеохимических потоков.

4. Разработка способов количественной оценки различных биогеохимических потоков и расчета их совокупного действия.

5. Подходы к прогнозу биогеохимической обстановки для конкретных территорий при различных видах и масштабах антропогенной деятельности. Решение данной задачи имеет исключительно важное практическое значение, поскольку позволяет предотвращать принятие решений, которые могут повлечь за собой неблагоприятные экологические последствия.

Таким образом, речь идет о разработке теории, объединяющей различные и достаточно разрозненные представления об отдельных потоках вещества в биосфере, установлении взаимосвязи между ними и нахождении алгоритмов, позволяющих оценивать и прогнозировать химическое состояние среды обитания как результата совокуп-

ного действия различных биогеохимических потоков.

Естественно, что для решения этих задач требуется знание не только качественных, но и количественных характеристик биогеохимических потоков. Только количественная форма описания даст возможность конкретно оценивать и прогнозировать экологическую обстановку, возможности и пути воздействия на нее, прямые и отдаленные последствия таких воздействий.

Остановимся подробнее на проблемах, осложняющих решение перечисленных задач.

Наличие одновременно или последовательно протекающих процессов трансформации и перемещения веществ, различных по своей природе (биотических, химических и т. д.), различие масштабов и структурных уровней, на которых они протекают (от молекулярного до биосферного) весьма затрудняют стандартные подходы, которые успешно используются при разработке общих теорий (например, массопереноса) для более «однородных» по структуре и функционированию объектов типа общей теории сорбционно-динамического перемещения вещества в сорбционных колонках [16, 17]. Ограниченное использование готовых теорий, подобных названной, возможно, например, при описании абиотического перемещения солей в почвенном профиле. Однако, несмотря на известные успехи в данном направлении [2], очень часто возникают разного рода труднопреодолимые препятствия — отсутствие стационарного режима перемещения почвенной влаги, наложение биотических потоков, соизмеримых по масштабам с абиотическими и часто противоположно направленными [22, 23], трещинная локализация перемещения вещества в текстурно-дифференцированном почвенном профиле и «недоиспользование» сорбционной емкости всей почвенной массы [23] и т. д. В связи со

Основные направления структурных и функциональных исследований природных объектов, являющиеся основой для разработки ландшафтно-биогеохимических моделей

Компоненты, составляющие экосистемы и ландшафты	Структурно-субстантивная характеристика объектов в связи с трансформацией и миграцией вещества	Процессы трансформации	Процессы миграции	Сложные процессы формирования новых природных образований
Биота	Вещественный и элементный состав биоты. Состояние вещества в живой и отмершей биомассе. Ферментативная активность	Биологическая трансформация вещества и изменение его состояния и миграционной способности (в составе биоты) [1]	Биота как прямой и косвенный фактор массопереноса [22, 23]	
Почва и почвенный покров	Система комплексной параметрической оценки подвижности вещества в почве [18, 32]	Процессы химических (гидролиз, комплексообразование и др.) и сорбционных взаимодействий в почвах [12] Биологическая мобилизация и трансформация в почвах [3, 24, 27]	Теория диффузионных процессов в почвах. Теория сорбционно-динамической миграции вещества в почвах [2, 15—17]. Общая теория перемещения в почвах	Теория морфогенеза и функционирования почв, почвенного покрова и более сложных ландшафтных структур [4, 5, 8—12, 14, 21, 26, 29—31]
Почвенный воздух и приземные слои атмосферы	Режим состава почвенного воздуха, включая летучие соединения	Сорбция и биологическое поглощение вещества из воздушной среды. Трансформация вещества в составе почвенного воздуха	Потоки воздуха в почве и в приземном слое	
Грунт (почвообразующие и подстилающие породы)	Вещественный, минералогический и гранулометрический состав почвогрунтов [9, 28]	Процессы выветривания в почвообразующих и подстилающих породах [19, 20, 28]	Миграция вещества в почвообразующих и подстилающих породах в составе жидкой и газовой фаз	
Почвенно-грунтовые воды	Режим уровней и состав почвенно-грунтовых вод [6, 7]	Биотические и абиотические процессы трансформации веществ, растворенных в почвенно-грунтовых водах	Вертикальное и боковое перемещение почвенно-грунтовых вод. Теоретические и экспериментальные исследования баланса почвенно-грунтовых вод [6, 7]	
Воды поверхностного стока и бессточные водоемы	Режим уровней и состав поверхностных вод [6, 7]	Биотические и абиотические процессы трансформации веществ, растворенных в поверхностных водах	Исследования миграции вод поверхностного стока [6, 7]	
Донные отложения	Состав и состояние вещества в донных отложениях	Биотические и абиотические процессы трансформации вещества в донных отложениях	Донные отложения как геохимический барьер, транзитная среда и источник мигрирующих соединений	

Примечание. Жирным шрифтом выделены недостаточно изученные направления исследований.

сказанным одним из возможных первоначальных подходов может явиться первоначальная разработка теории (или «адаптация» к природным объектам других имеющихся теорий) для отдельных потоков, реализующихся в ландшафтах, после чего должен последовать этап создания «синтетической» супермодели, объединяющей главные потоки.

В современных представлениях об экосистемах, ландшафтах, почвах преобладают структурные представления, основанные на сведениях статического характера: положение и физико-гео-

рафические условия ландшафтов, строение и состав их компонентов, в меньшей степени режимы динамических свойств и признаков, например, тепла, влаги, биомассы и их производных. Именно эти сведения положены в основу большинства классификаций ландшафтов или почв. Полезность такой информации не вызывает сомнений, в том числе и для разработки теории и изучения процессов и потоков, протекающих в экосистемах и ландшафтах.

Однако уровень наших знаний о процессах трансформации и массопереноса даже для отдельных объектов, со-

Т а б л и ц а 2

Факторы, значимые при разработке классификаций миграционных и миграционно-трансформационных потоков и их параметрической оценке

Тип миграционного носителя	Механизмы транспорта, активизации включения в поток и трансформации в потоке	Характеристика потоков и их параметрическая оценка
Биотические потоки		
Микроорганизмы	Прямое передвижение организмов, например хемотаксис. Неравномерный рост колоний в зависимости от условий	Направления и траектории перемещения
Низшие многоклеточные и высшие растительные организмы	Перемещение веществ в результате поглощения, перераспределения по организму, прижизненного или посмертного выделения в зоне, не совпадающей с зоной поглощения, сопровождается трансформацией	Объемы и массы перемещаемого вещества, например кг/га · год
Почвенная фауна	Прямое перемещение и одновременно трансформация в составе организмов	Средние и максимальные величины перемещения (мм, см и т. д.) и скоростей (мм/ч, см/год и т. д.)
Наземные животные	Абиотические потоки	
Воздушные массы	Включение в состав газообразной фазы в результате испарения, диффузии или механического воздействия воздушного потока	То же плюс оценка «емкости» носителя по отношению к веществу (растворимость, сорбционная емкость и т. п.). Относительное перемещение мигрирующего вещества к перемещению носителя (R _f)
Вода	Растворение веществ, пентизация коллоидов и перенос в результате гравитационного перемещения влаги. Сорбиционно-динамическое перемещение через почву, породу, диффузия в водной фазе, механическое воздействие водного потока и вовлечение в поток твердых частиц	
Молекулы комплексообразователей и коллоиды	Перемещение закомплексованных или сорбированных ионов в составе комплексных соединений или коллоидов, мигрирующих в составе другого носителя	

**Факторы, значимые при разработке классификации
продукционно-трансформационных потоков и их параметрической оценке**

Организмы и компоненты ландшафта, участвующие в трансформации	Направленность продукционно-трансформационных процессов	Характеристика потоков и их параметрическая оценка
Биологическая		
Первичные продуценты	Формирование первичной биопродукции	Масса производимой биопродукции, т/га · год; ее энергетический эквивалент, ккал
Консументы первого и последующих порядков	Последовательная деструкция и формирование относительно устойчивых промежуточных продуктов: детрита, гумуса, торфа. Деструкция ксенобиотиков	Масса трансформированного вещества, относительная масса промежуточных продуктов (подстилочный коэффициент, коэффициент гумификации, скорость обращения по ¹⁴ C, тип кинетики и кинетические показатели деструкционных процессов)
Редуценты	Полная минерализация промежуточных продуктов и органических ксенобиотиков	
Абиотическая		
Почвенные растворы, границы раздела фаз, растворенные и взвешенные вещества, почвенные сорбенты, минералы, минерально-гумусовые соединения	Изменение доступности для растений, растворимости, миграционной способности в результате растворения — осаждения, соосаждения, окисления — восстановления, сорбции включения веществ в межпакетные слои глинистых минералов Каталитическая деструкция ксенобиотиков на активных поверхностях в почве	Тип кинетики (диффузионная, пленочная, химическая), кинетические параметры Характеристика обратимости процессов Оценка трансформационной возможности компонента по массе вещества

Факторы, значимые для разработки биогеохимической классификации ландшафтов

Связанные с биопродуктивностью	Связанные с миграционными потоками	Связанные с трансформационными потоками
<ol style="list-style-type: none"> 1. Величина биопродуктивности 2. Тип биопродукции (древесная и травянистая растительность, сельскохозяйственные культуры и т. п.) 3. Биогеохимические и другие факторы, лимитирующие биопродуктивность 4. Формы и масштабы биологической аккумуляции (гумусонакопление, торфообразование). Формы биологической аккумуляции как биогеохимический барьер 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Основные миграционные носители и мигранты в ландшафте 2. Типы и структура основных «каналов» миграции 3. Система основных биогеохимических барьеров в ландшафте 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Природные биогеохимические буферные механизмы противостояния антропогенному воздействию, механизмы самовосстановления 2. Общий уровень деструкционных возможностей ландшафта по отношению к ксенобиотикам 3. Типы основных деструкционных систем в ландшафте

ставляющих ландшафты и экосистемы, явно недостаточен. Представление об этом может дать табл. 1, в которой слабоизученные направления исследований выделены особым шрифтом.

Множество процессов и потоков в экосистемах, ландшафтах или отдельных объектах, входящих в их состав, требует разработки унифицированной системы понятий и терминов, а также типологии или классификации потоков. Пока данная проблема, как уже говорилось, остается задачей будущего. Однако, поскольку в настоящей работе речь идет о биогеохимических потоках, дадим возможный вариант определения этого понятия.

Биогеохимический поток — любой процесс массопереноса в ландшафте (компонентах ландшафта), приводящий к перераспределению веществ между отдельными структурными элементами ландшафта и экосистем (например, массоперенос в системе почвенный раствор — растение). Процессы трансформации, сорбции и т. д. также подходят под данное определение. В последнем случае речь может идти о перераспределении вещества на молекулярном, коллоидном или микроагрегатном уровне почв.

Поскольку в экосистемах и ландшафтах имеют место чисто транспортные (миграционные) потоки вещества, далеко выходящие за молекулярный уровень, и одновременно — масштабные процессы массопереноса на значительные расстояния, сопровождающиеся трансформацией вещества, целесообразно выделять 3 вида потоков: трансформационные, миграционные и миграционно-трансформационные.

В настоящей работе не ставится задача разработки классификации биогеохимических потоков. Речь пока может идти только о подходах к такой классификации. Сложность состоит в том, что для ее создания может быть предложено много разнообразных кри-

териев, полный учет которых едва ли возможен. В табл. 2 и 3 представлена попытка обобщения основных факторов и процессов, которые следует учитывать при разработке классификаций биогеохимических потоков. Для миграционных и миграционно-трансформационных потоков все эти факторы и процессы группируются в соответствии с тремя критериями: 1) природа процесса миграции (биологическая или абиотическая); 2) тип миграционного носителя; 3) механизм миграционного процесса. В этих же таблицах намечаются подходы к разработке систем параметрической оценки биогеохимических потоков.

В классификационную систему трансформационных биогеохимических потоков целесообразно включить формирование первичной биопродукции, поскольку данный процесс представляет собой важнейшее глобальное направление превращения вещества на Земле. В связи с этим потоки, представленные в табл. 3, обозначены как продукционно-трансформационные. Факторы и конкретные процессы, определяющие потоки названного типа, группируются также в соответствии с тремя критериями: 1) природа процесса; 2) организмы или компоненты экосистемы, участвующие в продукционно-трансформационном процессе; 3) результирующая направленность процесса.

В табл. 2 и 3 не вошли многие критерии, важные или даже необходимые при разработке классификации биогеохимических потоков в ландшафте, которые все еще не удается привести в единую систему с приведенными в таблицах. Поэтому ограничимся пока их перечислением.

1. Характер локализации и организации потока в пространстве и во времени. Данный критерий предполагает оценку уровня структурной организации потока, охват одной или несколь-

ких структурных составляющих ландшафта, развитие потока только внутри данного ландшафта либо выход за пределы последнего.

2. Направленность действия потока — вынос или аккумуляция вещества в ландшафте либо транзитный транспорт через ландшафт.

3. Характеристика степени цикличности, обратимости или, наоборот, необратимости процесса.

Перечисленные критерии исключительно важны для характеристики и систематизации биогеохимических потоков и, безусловно, должны быть учтены при разработке соответствующих классификаций.

И, наконец, последняя проблема, рассматриваемая в этой статье, связана с поиском подходов к разработке классификации ландшафтов, в основу которой положена характеристика биогеохимических потоков вещества.

Приоритетной задачей при создании такой классификации является выделение ведущих, наиболее значимых трансформационных и миграционных потоков, формирующих внешний облик ландшафта, определяющих его роль в глобальных биосферных явлениях, а также роль, формы и место человеческой деятельности в данном ландшафте.

Для различных ландшафтов среди главных характеристик процессов, связанных с реализацией действия множества «элементарных» потоков вещества, можно назвать характеристику продукционного процесса и биопродуктивности основных экосистем, входящих в ландшафт, выраженную в массе формирующейся продукции на единицу площади, а также в типе продукции: древесная растительность определенного типа, луговая или степная растительность, сельскохозяйственные культуры и т. д.

В число классификационных признаков ландшафта следует включить

главные факторы, лимитирующие развитие биопродуктивности, например, недостаточную или избыточную увлажненность, недостаток или избыток тепла, избыточный уровень засоленности почвогрунтов, недостаток биофильных элементов, чрезмерное развитие склоновых явлений, повышенную ветровую нагрузку и т. д. Большинство перечисленных факторов прямо или косвенно связано с особенностями биогеохимических потоков в данном ландшафте. Например, дефицит элементов минерального питания объясняется не только бедностью исходного субстрата, но и недостаточной развитостью процессов мобилизации биофилов из труднодоступных форм: фиксации атмосферного азота, мобилизации зольных элементов питания из почвенно-минералогических источников и т. д.

Необходимо отметить, что уровень биопродуктивности играет исключительно важную роль в противостоянии различных экосистем и ландшафтов различным формам антропогенного воздействия.

Важными классификационными биогеохимическими признаками ландшафта являются масштабы и формы биологической аккумуляции: гумусонакопление, торфонакопление, детритонакопление. Для характеристики скоростей обновления органических фондов биологической аккумуляции удобно использовать показатели типа mg , определяемые по ^{14}C , ^3H или другими методами. Значимую информацию для биогеохимической классификации ландшафта может дать оценка различных форм биологической аккумуляции в качестве биогеохимических барьеров для различных веществ. Например, хорошо известна роль гумусовой оболочки как сорбционного барьера для многих радионуклидов, тяжелых металлов и других токсичных соединений.

Важной группой признаков, кото-

рые следует учитывать при разработке биогеохимической классификации ландшафта, являются абиотические миграционные характеристики ландшафта. К числу таких характеристик следует отнести: 1) основные миграционные носители и мигранты в ландшафте (воздушные потоки, поверхностные воды, почвенно-грунтовые воды, органическое вещество, соли с указанием их состава, токсичные вещества); 2) тип и структуру основных «каналов» миграции (речной сток, дренажные системы, фильтрация через пористые среды, системы трещин и проводящих каналов в почве и почвообразующей породе и т. д.); 3) систему основных биогеохимических барьеров в ландшафте. Следует иметь в виду, что миграционные «каналы» могут в ряде случаев выполнять главную роль в формировании ландшафта. В очевидной форме это проявляется у пойменных ландшафтов. В других случаях влияние структуры миграционных каналов не столь явно выражено и требует дополнительного исследования.

Последняя группа признаков, имеющих значение для биогеохимической классификации ландшафтов, связана с трансформационными характеристиками отдельных компонентов, составляющих ландшафт. Важнейшими из этих характеристик являются: 1) наличие природных биогеохимических механизмов противостояния различным формам антропогенного воздействия, механизмы восстановления; 2) общий уровень деструкционных возможностей ландшафта и экосистем по отношению к различным ксенобиотикам; 3) типы основных деструкционных систем в ландшафте (микробиологические, гумусово-каталитические, сорбционные и др.).

В табл. 4 приведено обобщение перечисленных факторов, имеющих, на наш взгляд, важное значение при раз-

работке биогеохимической классификации ландшафтов.

Итак, данная работа не содержит решения поставленных задач. Однако обсуждение проблемы дает представление об их масштабности, значимости и о возможных подходах к решению. Обсуждаемые подходы, очевидно, потребуют последующего уточнения и обсуждения. Именно эта цель преследовалась при написании работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Ю. В.* Тяжелые металлы в почве и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987.—
2. *Анохин В. Л.* Моделирование процессов миграции радиоизотопов в ландшафтах. М.: Атомоиздат, 1974.—
3. *Аристовская Т. В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980.—
4. *Арманд Д. Л.* Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975.—
5. *Берущавили Н. Л.* Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990.—
6. *Воронков П. П.* Гидрохимия местного стока европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1970.—
7. Гидрологическое прогнозирование/Под ред. М. Г. Андерсона и Т. П. Берта. Пер. с англ. М.: Мир, 1988.—
8. *Глазовская М. А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая школа, 1988.—
9. *Джерард А. Дж.* Почвы и формы рельефа. Л.: Недра, 1985.—
10. *Козловский Ф. И.* Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв. М.: Наука, 1991.—
11. *Козловский Ф. И., Горячкин С. В.* Современное состояние и пути развития теории структуры почвенного покрова. Почвоведение, 1993, № 7, с. 31—43.—
12. *Кремер А. М.* Неоднородность почвенного покрова как самоорганизующаяся система.— В сб.: Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы его

- изучения. М.: Наука, 1970, с. 68—80.— 13. Орлов Д. С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985.— 14. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986.— 15. Прохоров В. М. Диффузия стронция-90 в некоторых почвах в зависимости от влажности.— Тр. по радиационной гигиене. Л., 1964, вып. 2.— 16. Рачинский В. В. К теории применения радиохроматографического метода в изучении движения вещества в почвах.— Докл. ТСХА, 1957, вып. 29.— 17. Рачинский В. В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. М.: Наука, 1964.— 18. Савич В. И. Методики комплексной оценки состояния ионов в почве.— Метод. указ. М.: ТСХА, 1980, с. 59.— 19. Самойлова Е. М. Почвообразующие покровы. М.: Изд-во МГУ, 1983.— 20. Страхов Н. М. Типы метабенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963.— 21. Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем/Под ред. М. А. Глазковской. М.: Изд-во МГУ, 1981.— 22. Фокин А. Д. Изучение баланса переноса железа и фосфора в подзолистых почвах методом радиоактивных индикаторов.— Изв. ТСХА, 1976, вып. 2, с. 110—116.— 23. Фокин А. Д. Почвы, биосфера и жизнь на Земле. М.: Наука, 1985.— 24. Фокин А. Д. Эколого-биогеохимические подходы к оптимизации агроэкосистем.— Почвоведение, 1988, № 9.— 25. Фридланд В. М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972.— 26. Шанцер Е. В. Некоторые общие вопросы учения о генетических типах отложений.— В сб.: Процессы континентального метабенеза. М.: Наука, 1980, с. 5—27.— 27. Шильникова В. К., Серова Е. Я. Микроорганизмы-азотнакопители на службе растений. М.: Наука, 1983, с. 150.— 28. Черняховский А. Г. Современные поры выветривания. М.: Наука, 1991.— 29. Birkeland P. W. Pedology: Weathering a geomorphological research. N. Y., Oxford University Press, 1974.— 30. Hole E. D., Campbell S. B. Soil landscape analysis. Rowman a. Allanheld Publishers, 1985.— 31. Hagget R. S. Soil landscape systems: a mode of soil genesis. In: Geoderma, 1975, № 13, p. 1—22.— 32. Quantitative methods in landscape ecology/Eds. by M. G. Turner a. R. H. Gardner. Springer Verlag, N. Y.— Berlin, 1991.

Статья поступила 15 декабря 1993 г.

SUMMARY

Tasks, approaches, theoretical and information problems arising with developing the theory of biogeochemical flows of a substance in the landscape are discussed. The main leads in structural and functional investigations of landscape required for development of landscape-biogeochemical models, as well as the main factors that are important for classifying biogeochemical flows and landscapes are given.