

АБИОГЕННЫЕ ПОЛЯ МИГРАЦИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВАХ ТАЕЖНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ

И. М. ЯШИН, И. С. КАУРИЧЕВ, И. НМАДЗУРУ

(Кафедры экологии и почвоведения)

На основании результатов изучения структуры почвенного покрова и систематизированных лизиметрических наблюдений в сопряженных элементарных почвенных ареалах (ЭПА) проведена оценка полей абиогенной миграции водорастворимых органических веществ в почвах стационаров подзон южной и средней тайги европейского Севера.

Абиогенная миграция¹ водорастворимых органических веществ (ВОВ) в почвах подзолистого типа обусловлена главным образом передвижением гравитационных потоков влаги и находящихся в них в различных состояниях химических соединений. Этот тип миграции играет активную и специфическую роль в современном развитии почв таежно-лесной зоны [7, 11, 13, 14, 19, 23], например в транспортировке и перераспределении в почвенном пространстве продуктов почвообразования и выветривания. Данный процесс наиболее интенсивно проявляется в осенне-весенний период [8, 12, 15]. Интересные материалы получены в опытах, в которых изучалась миграция ряда химических элементов в биогеоценозах южной тайги при использовании изотопно-индикатор-

ного метода [19]. В частности, было установлено, что масштаб биологического поглощения, например такого типоморфного химического элемента, как железо, в подзолистых тяжелосуглинистых почвах, отличающихся низкой фильтрационной способностью и склонностью к периодическому сезонному переувлажнению поверхностных слоев почвы, примерно в 8 раз больше, чем вертикальная нисходящая миграция. Последняя составляющая миграции, а также поверхностные и боковые внутрипочвенные миграционные процессы водорастворимых веществ представляют собой абиогенный поток миграции, имеющий результирующий нисходящий вектор² и продолжающийся в почвенном пространстве практически

¹ Абиогенная миграция определяется совокупностью химических, физических и физико-химических процессов [9, 14].

² Для выровненных поверхностей рельефа. В почвах, развитых на склонах, миграция веществ имеет также поверхностный и боковой внутрипочвенный характер [14, 19].

круглый год, а в зимний период — реализующийся за счет диффузии (броуновского движения молекул).

К абиогенному потоку относится также восходящее перемещение веществ как результат пленочно-капиллярного движения почвенных растворов, возникающее при гидротермическом градиенте и обусловленное другими причинами [9, 14]. Эта составляющая миграции частично компенсирует необратимую потерю массы химических соединений, мобилизованных в раствор из труднорастворимых продуктов с помощью компонентов ВОВ, в абиогенный поток [7].

Биологический поток включает биогенную трансформацию и миграцию не только биофильных (углерода, азота, фосфора, серы и кальция), но и сопутствующих зольных химических элементов (кремния, кальция, железа, марганца и др.) [18]. Своеобразие биологического круговорота заключается в интенсивном переводе растительностью³ указанных элементов из труднорастворимого состояния в биохимически активное и мобильное за счет формирования как разнообразных органических веществ, богатых энергией и содержащих азот, так и водорастворимых внутрикомплексных органо-минеральных соединений. Характерно, что данные группы соединений систематически возвращаются в верхние слои почвы с растительным опадом или другими путями. Они доступны почвенной биоте и способны к почвенно-геохимической миграции.

³ Абиогенные поля миграции отражают разноориентированный вынос ВОВ в сопряженных и автономных ЭПА того или иного биогеоценоза (или элементарного ландшафта), а также потоки веществ за счет корневых выделений; выщелачивания атмосферными осадками из вегетативных органов растений.

При трансформации растительного опада (с участием микрофлоры и иных групп живых организмов) происходит вторичное превращение биофильных химических элементов и зольных компонентов с образованием термодинамически (и микробиологически) устойчивых и специфических структур гумусовых соединений, в составе которых идентифицируются кислоты, различные по природе соли [14, 23]. Рассматриваемый поток миграции веществ имеет результирующий восходящий вектор, период его проявления в годовом отрезке времени (за исключением представителей вечнозеленой хвойной растительности) непродолжительный, он носит преимущественно обратимый характер при участии целесообразно взаимосвязанных групп живых организмов [18, 19]. Указанный процесс, на наш взгляд, отражает особенность не только адаптации живых организмов таежных биогеоценозов, но и эволюции почвенного покрова в четвертичный период с созданием по меньшей мере двух депо (резервных фондов элементов питания): 1) лесной подстилки (нередко оторфованной, грубогумусной и достаточно развитой) и 2) гумусовых соединений, сорбционно закрепленных в горизонтах A_0A_1 . Эти природные образования выполняют ряд важных экологических функций [23].

Таким образом, формирование в почвенном пространстве таежно-лесной зоны двух емких почвенно-биологических барьеров на пути миграции биофильных и других элементов питания позволило предотвратить значительный и необратимый абиогенный вынос их из почвы и вовлечение в глобальный геохимический поток (безвозвратную потерю для живых организмов на период, измеряемый многовековым интервалом времени).

Абиогенный и биологический потоки миграции взаимосвязаны, они образуют биогеохимический круговорот и отражают специфику современного функционирования и развития компонентов лесных биогеоценозов [1, 3, 19], однако данные потоки не в полной мере изучены. Сведений же по абиогенной миграции веществ в почвах европейского Севера достаточно много, но они довольно разноречивы и раскрывают главным образом отдельные составляющие данного потока, не затрагивая практически миграцию веществ в элементарных почвенных структурах [7, 20]. На наш взгляд, это объясняется методическими трудностями, которые во многом ограничивают реализацию идей исследователей.

Новые возможности открываются при использовании методов изотопных индикаторов и сорбционных лизиметров [7, 14, 22]. Совершенствование последнего дало возможность путем прямых наблюдений изучить абиогенную миграцию ВОВ в лесном биогеоценозе и уточнить масштабы мобилизации новообразованных органических продуктов из различных органогенных субстратов в сезонном и годовом циклах [22, 23]. В частности, установлено, что масштаб миграции ВОВ в почвах подзолистого типа, диагностированный по значениям совместной сорбции на активированном угле и оксиде алюминия, заметно больше, чем при использовании в колонках Al_2O_3 [7, 22].

Выявлено, что абиогенный поток миграции ВОВ в лесных ландшафтах значительно пополняется за счет мобилизации компонентов ВОВ атмосферными осадками из вегетативных органов древесной растительности, мохового и кустарничкового покрова (образующих в лесах европейского Севера нередко сплошной наземный покров), вслед-

ствие корневых выделений, а также при трансформации гумусовых веществ, протекающей наиболее активно в периоды поверхностного сезонного переувлажнения почв подзолистого типа [22].

Наряду с указанными опытами нами была проведена модификация метода сорбционных лизиметров с целью экспериментального обоснования коэффициента мобилизации ($K_{\text{моб}}$) ВОВ по сезонам года из различных органогенных субстратов путем расчета абсолютных (вероятных) величин масштаба мобилизации ВОВ [23]. Полученные результаты, на наш взгляд, являются основополагающими при решении ряда задач экологии и генетического почвоведения, в частности при определении гумусового баланса пахотных почв, диагностике миграции в почве биологически активных форм тяжелых металлов и т. д. [22, 23].

Накопленный фактический материал по вертикальной нисходящей миграции ВОВ в почвах подзолистого типа указывает на то, что этот процесс не является пассивным. Напротив, наблюдается достаточно интенсивное сорбционно-десорбционное взаимодействие компонентов ВОВ, находящихся в почвенных растворах и лизиметрических водах в ионно-молекулярном и коллоидном состояниях, с гумусовыми веществами и минеральными соединениями генетических горизонтов почвы [5, 9, 14, 19, 22]. В то же время целесообразно обратить внимание на недостаточную изученность абиогенной миграции ВОВ в динамичном и весьма неоднородном почвенном пространстве (например, в таежно-лесной зоне). Исследованию сопряженных потоков миграции ВОВ в элементарных почвенных ареалах биогеоценозов южной и средней тайги и посвящена настоящая работа.

Методика

Для установления абсолютных (вероятных) масштабов мобилизации ВОВ из свежих и гумифицирующихся растительных остатков в натуральных опытах определяли $K_{\text{моб}}$ ВОВ и качественный состав последних при использовании модифицированного метода сорбционных лизиметров [23]. В стеклянные фильтры-воронки последовательно снизу вверх располагали слои чистого кварцевого песка мощностью 2 см, низкосолевого активированного угля «карболен» (частицы менее 0,5 мм) мощностью 3—3,5 см, вновь слой песка, на который укладывали двухслойный капроновый мешочек с измельченными (0,5—1,0 см) воздушно-сухими растительными остатками массой 15,0—23,5 г. Колонки по периметру опоясывали лейкопластырем как для маркировки, так и для предотвращения их разрушения. Повторность установки 2—3-кратная. Сорбционные колонки жестко крепили с приемными сосудами емкостью 2—5 л. На стационарных площадках с 1—2 м² снимали и удаляли лесную подстилку, а сорбционные лизиметры располагали в верхних слоях изучаемых почв с таким расчетом, чтобы поверхность колонок находилась на 5—6 см выше лишенной растительности поверхности почвы. Контролем служили 2—3 колонки с активированным углем. После заданного срока траншею вскрывали, сорбционные установки извлекали, демонтировали и доставляли в лабораторию. В приемные сосуды добавляли 2—3 капли толуола. Растительные остатки высушивали в вакуум-испарителе.

Десорбцию ВОВ, поглощенных низкосолевым активированным углем, проводили в динамике по схеме Форсита (1947 г.), несколько видоизменив ее после проведения

исследований по сорбции-десорбции компонентов ВОВ [7, 22]. Элюэнты через колонку с углем пропускали последовательно со скоростью 40—50 мл/ч: сначала 90 % водный ацетон и воду (их общий объем, как правило, составлял 500—650 мл), затем 2 % водный раствор NH_4OH (объем 300—400 мл и редко 510 мл) до полного обесцвечивания элюатов. При этом, как показали результаты специальных опытов, использование водного раствора 0,1 н. NaOH вызывает некоторую пептизацию частиц угля; применение образцов высокозольного активированного угля (в частности, БАУ) при фракционировании по схеме Форсита способствует смещению соотношений групп ВОВ в сторону преобладания специфических компонентов.

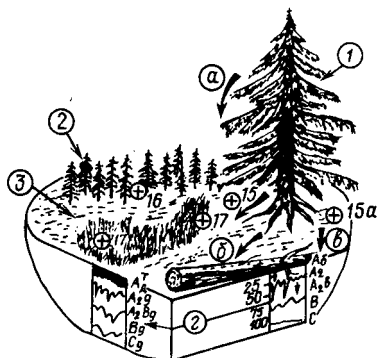
Наконец, активированному углю присуще явление так называемого «отдыха сорбента», связанное с наличием в его частицах различных по размеру пор, что и определяет высокую удельную поверхность (400—700 до 1100 м²/г) и универсальную сорбционную способность данного поглотителя, поэтому периодически осуществляли регенерацию активированного угля путем термической обработки [22].

Содержание углерода ВОВ определяли по методу Тюрина в модификации Симакова, предварительно упаривая аликвоты и добавляя в них по 20—30 мл насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с целью предотвращения потерь органических кислот от теплового разрушения.

Отметим, что $K_{\text{моб}}$ и масштаб выноса ВОВ (при их вертикальной нисходящей миграции) выражали в одних единицах измерения (масса вещества в г). Учитывая $K_{\text{моб}}$ ВОВ по сезонам года и массу органических субстратов, определяли абсолютный масштаб мобилизации ВОВ в растворимое состояние [22].

Наряду с изучением процессов мобилизации ВОВ из растительных остатков исследовали внутрипрофильную миграцию и трансформацию этих веществ в почвах подзолистого типа с помощью метода сорбционных лизиметров [8, 22, 23]. В качестве сорбентов использовали оксид алюминия для хроматографии, который обычно располагали слоем 1,5—2,5 см в нижней части колонок, а в верхней — низкозольный активированный уголь карболен (частицы менее 0,5 мм). Сорбенты разделяли 3-сантиметровым слоем отмытого от железа кварцевого песка. Контакт колонок с почвой осуществляли через 2—3-сантиметровый слой песка, который хорошо предохранял активированный уголь от заиливания.

Мелкодисперсные сорбенты (в частности, Al_2O_3) в колонках сильно уплотняются. Улучшить фильтрационную способность Al_2O_3 можно путем добавления песка (1/5—1/4 массы поглотителя). Порцию сорбента (100—125 г) и песка предварительно смешивали в фарфоровой чашке и в виде кашицы вносили в сорбционную колонку, слегка встряхивая ее для получения ровной горизонтальной поверхности слоя сорбента и лучшей упаковки его частиц. Таким образом добивались примерно равных скоростей фильтрации растворов в сорбционном лизиметре и почве, что особенно важно для аналогов, имеющих легкий гранулометрический состав. Эффективное функционирование сорбционных лизиметров обеспечивается благодаря вертикальному расположению и плотному контакту рабочей поверхности колонок с выровненным «потолком» ниш, куда они полностью замуровывались; почва вокруг сорбционных лизиметров, а также во всей траншее сильно утрамбовывалась. Отдельные колонки распола-



Блок-схема «поля» абигенной (водной) миграции ВОВ в таежном биогеоценозе (ельнике разнотравном).

Растительность парцелл: 1 — зрелое дерево ели (возраст 70—80 лет); 2 — молодой ельник мертвопокровный (возраст 10—15 лет); 3 — осокowo-моховая западина.

Потоки ВОВ в биогеоценозе: а — сток в составе атмосферных осадков с вегетативных органов модельного дерева; б — миграция из растительного опада и лесной подстилки; в — поступление в почву в составе корневых выделений и почвенного гумуса.

Схема почвенных профилей ЭПА (а — индексы почвенных горизонтов); 15—17 — номера почвенных разрезов и траншей (места установки сорбционных лизиметров и отбора почвенных образцов).

гали в зоне магистральных трещин горизонтов A_2 и A_2B , поскольку последние являются своеобразными внутрипрофильными «артериями», по которым в основном и происходит перенос продуктов почвообразования из верхних генетических горизонтов в глубь почвы (нередко и в грунтовые воды).

Миграцию ВОВ изучали в сопряженных ЭПА стационаров. Предварительно были исследованы физико-химические свойства почв, состав гумуса, проведено также детальное картографирование участков [20—22]. В учхозе «Михайловское» Подольского района Московской области сорбционные лизиметры устанавливали в почвах парцелл лесно-

го биогеоценоза — ельника разно-
травного: под кроной зрелой ели
(возраст 70—80 лет), в молодом
ельнике (мертвопокровном) и осо-
ково-моховой западине (рисунок).
На мелиоративном массиве Нян-
домского стационара Архангельской
области лизиметры закладывали
после проведения детальной почвен-
ной съемки М 1:200 (на площади
0,7 га диагностировано 104 разре-
за и полуямы, что позволило вы-
делить 82 ЭПА) [21].

Результаты

Внимание специалистов к диа-
гностике ЭПА, по терминологии
В. М. Фридланда [18], как наимень-
ших картографических единиц, за-
метно повысилось в 50—60-е годы
в связи с изучением пестроты поч-
венного покрова и диагностикой
минимального естественного объема
почвы. Результаты изысканий по-
зволили разработать положение о
почвенном индивидууме (ПИ)-педо-
не⁴, полипедоне, тессере [26—30].
Исходя из полученной информации,
американские почвоведы создали
классификацию почв, которая в из-
вестной мере основывается на оцен-
ке низших таксономических уров-
ней (ПИ) и известна как «7-е при-
ближение» [30].

Отечественные авторы в 60—70-х
годах выполнили важные теорети-
ческие и практические исследова-
ния пространственного залегания
почв, обосновав некоторые преде-
лы почвенной неоднородности [2,
5, 6, 10, 16, 18]. Для этого бы-
ли использованы различные под-
ходы: картографический (детальная
почвенная съемка участков угодий,

стационара и т.д.), математиче-
ский (статистический анализ
пространственной изменчивости
свойств почвы с привлечением тео-
рии случайных функций для об-
работки регистрограмм и разграни-
чения высоко- и низкочастотных
составляющих) и комплексный,
при котором ЭПА выделяются и
исследуются совместно с элемен-
тарными ареалами растительности
в биогеоценозах [5, 6, 10, 16, 18].

При использовании 1-го и 3-го
методических приемов выделения
ПИ специалисты исходят из есте-
ственной границы ЭПА, который мо-
жет быть гомогенным, спорадиче-
ски пятнистым и т.д. [5, 6, 18].
При использовании 2-го приема
ЭПА и ПИ устанавливают в лю-
бой точке пространства путем
закладки длинных (десятки мет-
ров) разноориентированных тран-
шей, а ПИ (педон) в принципе
рассматривают как статистическое
понятие [10], что, на наш взгляд,
не совсем правомерно, поскольку
и ПИ, и почвенный покров — это
реальные природные тела. ПИ на-
ходится на стыке микрогеографи-
ческой и макрогенетической орга-
низаций почвенной материи (пред-
ставляя собой целесообразный ком-
понент и продукт функционирова-
ния биогеоценоза). ПИ необходи-
мо рассматривать как наиболее
крупную упорядоченную морфо-
структуру, своеобразный генетиче-
ский эталон почвы [21].

При детализации почвенного про-
странства и выделения ЭПА мы
руководствовались 1-м и 3-м мето-
дическими подходами. Детальная
почвенная карта Няндомского ста-
ционара приведена в работе [21].
Во внешне хаотичной пестроте
почвенного покрова прослеживается
четко выраженная закономерность
залегания ЭПА и элементарных
почвенных структур (ЭПС) по мик-
рорельефу [20, 21].

⁴ Учение о педоне в приложении к конкретным почвенным типам, подтипам, родам и видам почв разработано пока в общем виде.

При этом масштаб почвенной карты служит критерием выделения ЭПА, среднее значение площади которых составляет 13,3 м². По-видимому, в последующем диагностика ПИ в ЭПА может проводиться формально (математическими методами) или на основе идентификации центра масс ЭПА. Размеры последнего являются важной диагностической константой. Чем сложнее организована ЭПС из п-ЭПА и чем интенсивнее миграция химических элементов, тем больше в такой «опорной» почвенной структуре содержится информации (в виде различных органических соединений, в форме миграционного обмена веществом и энергией и т. д.) и тем меньше площадь выявления ЭПА в пространстве.

Наименьший размер ЭПА (разр. 35) на выровненных участках стационара у болотных почв (6,7 м²), что свидетельствует о важной и специфической роли вывалов древесной растительности в современной трансформации почвенного покрова таежных биогеоценозов [5, 6, 15].

Небольшие площади ЭПА (9,0—9,5 м²) имеют также подзолистые типичные, контактно-глееватые, поверхностно- и грунтово-глееватые, глеевые легко- и среднесуглинистые почвы, пространственные ареалы которых тесно связаны как с бывшим фитогенным полем⁵ хвойной растительности, так и с действующим топозитогенным фактором и особенностями водного режима.

На изучаемой территории своеобразно залегают подзолистые ил-

⁵ Фитогенное поле парцелл таежного биогеоценоза в основном и определяет параметры абиогенных полей миграции ВОВ конкретных ЭПА, так или иначе взаимосвязанных в своем развитии.

лювиально-железистые песчаные и супесчаные почвы, занимающие небольшие куполообразные повышения в микрорельефе — разр. 54 и 57 (площадь ЭПА в среднем составляет 8,9 м²) или формирующиеся преимущественно по крайкам западин, блюдцев и современных ложбин стока (площадь ЭПА от 23,5 до 24,7 м²).

Следовательно, несмотря на большую пестроту почвенного покрова стационара, в нем выявляются упорядоченные ЭПС [21, 22]. Компонующие их ЭПА в горизонтальной плоскости почвы смыкаются через так называемые «переходные» объемы⁶, образуя различные по сложению почвенные профили. Вокруг массивов переувлажненных почв, как правило, формируются ЭПА со сложными и мозаичными профилями. Почвенные комбинации на данных участках отличаются наибольшей контрастностью и сложностью, поэтому их диагностика связана с очень большими затратами средств и времени.

Выявленные при детальной почвенной съемке «опорные» почвенные структуры создают симметрию пространственной организации почв [21, 22]. Многократное их повторение и различные комбинации в принципе и определяют неоднородность почвенно-географического пространства. На ключевых участках стационара [21] (разр. 50, 51 и 40, 14; 32 и 43 и т. д.) такими «опорными» ЭПС, в частности в подзоне средней тайги (с морен-

⁶ Исследования показали, что в натуре нельзя провести точную границу между ЭПА ни в виде линии, ни в виде плоскости. Она реально существует только в форме своеобразного «переходного объема», признаки и свойства которого нередко затрудняют полевую диагностику почвы. Критерии оценки таких почв пока отсутствуют.

ным ландшафтом), являются зональные типы почв — подзолистые, болотно-подзолистые, болотные и дерново-глеявые. Их ЭПА могут быть как гомогенными [18], так и нередко спорадически пятнистыми с «вклинившимися» ЭПА других типов почв, что свидетельствует об активной эволюции подобных ЭПС (разр. 55 и 57).

Отметим еще одну генетическую особенность ЭПА: если они занимают верхние части микроповышений, то признаки и свойства почв изменяются более контрастно от центра ЭПА к периферии выделов (это в основном эродированные аналоги); если ЭПА приурочены

к подошвам микросклонов и окрайкам западин, то изменение свойств прослеживается от одной границы ЭПА к другой — это так называемые переходные объемы, характерные для эрозионных, в том числе и намывных почв [21].

Подобные ЭПА и были выбраны в качестве объектов изучения вертикальной нисходящей миграции веществ (табл. 1). Контролем служила подзолистая почва лесного биогеоценоза, расположенного примерно в 200 м от стационара.

Лизиметрические наблюдения показали, что в распаханых иллювиально-железистых подзолистых почвах стационара вертикальная

Таблица 1

Масштаб вертикальной нисходящей миграции ВОВ и их состав в почвах Няндомского стационара Архангельской области (июнь 1986 г. — июнь 1987 г.)

Горизонт и глубина установки колонок, см	Объем воды в лизиметрах, л	С ВОВ, г/м ² ·год ⁻¹			С ВОВ в водоацетоновом элюате, % С _{общ} ВОВ	Сорбция С ВОВ горизонтами почв, % к поступившему
		общий вынос	вынос С при сорбции на Al ₂ O ₃	вынос С при сорбции на активированном угле		

Мелиоративный массив 2-го года освоения. Уклон 0,07°
(сеяные многолетние злаковые травы)

Разр. 26 — осваиваемая среднеподзолистая иллювиально-железистая супесчаная почва на флювиогляциальных отложениях. Микроводораздел

A _n — 23	Не опр.	6,2	2,7	3,5	32,7	—
A ₂ — 29	» »	6,2	2,6	3,6	44,6	—
B _f — 43	» »	7,5	4,0	3,5	41,9	—

Разр. 27 — осваиваемая дерновая перегнойно-глеявая оподзоленная почва на карбонатной завалуненной морене. Западина

A _n — 26	2,7	11,0	2,7	8,3	24,4	—
A _{2g} — 44	2,5	7,2	3,0	4,2	61,8	34,5

Разр. 28 — осваиваемая слабоподзолистая иллювиально-железистая супесчаная сильноосмытая почва. Нижняя треть микросклона

A _n — 20	Не опр.	5,6	3,1	2,5	33,2	—
B _f — 49	» »	7,3	2,4	4,9	66,3	—

Лес — ельник черничник зеленомошный;

разр. 25 — сильноподзолистая иллювиально-железистая супесчаная почва на флювиогляциальных отложениях. Выровненный водораздел с развитым микрорельефом

A ₀ — 8	1,7	40,0	19,3	20,7	67,7	—
A ₂ — 23	1,1	30,0	7,2	22,8	63,2	25,0
B _f (h) — 64	0,5	21,7	7,5	14,2	33,1	27,7
A ₀ ^г — 3	1,1	9,7	Не опр.	9,7	79,4	—

* Учет миграции ВОВ из «свежей» подстилки (мохов) с 20 июня по 15 сентября 1988 г.

нисходящая миграция ВОВ носит ярко выраженный элювиальный характер. Это связано, по-видимому, как с общим процессом трансформации веществ при мелиорации почв европейского Севера, так и с наличием незначительного уклона местности, способствующего развитию боковых (латеральных) потоков воды и ВОВ. В этих почвах по сравнению с лесными подзолистыми масштаб выноса ВОВ из сформированного техногенным путем гор. А₁ выражен менее активно, что вызвано прежде всего дефицитом органического материала и интенсивной минерализацией формирующихся компонентов ВОВ в песчано-

супесчаном субстрате [7, 23].

Особенностью абиогенной миграции ВОВ в сопряженных ЭПА являются их вынос из автоморфных подзолистых почв и поступление в аквальные микроландшафты, где распространены почвы гидроморфного ряда. Здесь вертикальный нисходящий вынос ВОВ более активен, чем в почвах микроповышений. Это обусловлено, с одной стороны, большей массой растительных и гумифицированных остатков в гор. А_п, а с другой — общим уклоном местности. При этом 34,5 % массы углерода ВОВ от поступившей задерживается в гор. А₂, имеющем среднесуглинистый состав.

Таблица 2

Состав и масштаб вертикальной нисходящей миграции ВОВ в элювиальной части профиля подзолистых почв лесного биогеоценоза (ельник разнотравный) на стационаре учхоза ТСХА «Михайловское» (июнь 1988 г. — июнь 1989 г.)

Горизонт и глубина установки колонок, см	Объем воды в литрах, л	С ВОВ, мг · л ⁻¹			Вынос С ВОВ, г/м ² × год ⁻¹	С неспецифических органических веществ в составе ВОВ, %	Сорбция С ВОВ гор. А ₁ , % к поступившему
		в приемниках вод	в водоацетонном элюате с угля	в аммиачном элюате с угля			

Парцелла — молодой ельник мертвопокровный (возраст 10—15 лет); разр. 16 — сильноподзолистая среднесуглинистая почва на покровных бескарбонатных отложениях

А ₀ —2	Не опр.	Не опр.	274,5	235,0	30,1	53,9	—
А ₀ А ₁ —5	» »	» »	47,0	71,0	6,8	39,8	77,4
А ₂ —24	» »	» »	70,6	142,4	12,1	33,1	—

Парцелла — осоково-моховая западина; разр. 17 — среднеподзолистая среднесуглинистая поверхностно-глеватая почва на покровных бескарбонатных отложениях

А _д ^т —3	Не опр.	Не опр.	196,6	83,5	49,3	70,2	—
А _д ^т —4	» »	» »	427,4	83,0	51,5	83,7	—
А _д ^т —3	» »	» »	149,8	118,1	44,8	55,9	—
Среднее по							
А _д ^т	» »	» »	257,9	94,9	48,4	69,9	—
А ₁ —9	1,40	4,5	26,5	52,3	4,5	33,6	90,7

Парцелла — зрелое дерево ели; разр. 15 — сильноподзолистая среднесуглинистая почва на покровных бескарбонатных отложениях

А ₀ —2	2,15	2,8	135,2	52,9	60,5	71,9	—
А ₀ А ₁ —8	1,35	3,2	89,7	117,3	43,7	43,3	27,8
А ₂ —29	0,52	6,0	130,9	233,5	28,5	35,9	34,8

Примечание. Сорбция ВОВ почвой отражает соотношение их масс на входе и выходе из генетического горизонта при нисходящей миграции.

В лесных подзолистых иллювиально-железистых почвах водораздельных территорий мигрирующие с гравитационным потоком ВОВ почти на 1/3 сорбируются гор. В (f), а в мелиорированных почвах, напротив, из этого горизонта выносятся некоторое количество компонентов ВОВ, в составе которых преобладают низкомолекулярные неспецифические органические продукты. Возможно, это связано с пульсацией верховодки гидроморфных почв в осенне-весенний период и вызванной ею современной трансформацией веществ в профиле, в частности гор. В (f), на что указывал А. Д. Фокин [19].

Результаты сопряженного изучения вертикальной нисходящей миграции ВОВ в лесном биогеоценозе подзоны южной тайги (табл. 2) свидетельствуют о четкой дифференциации масс ВОВ в почвенном пространстве, обусловленной как парцеллярной структурой биогеоценоза (неодинаковым составом растительности, разными величинами биомассы и опада, неоднозначными запасами и свойствами лесной подстилки и т.д.), так и своеобразием организации ЭПА в пространстве. Показано, что в ЭПС стационара в настоящее время функционируют не только сравнительно автономные (профили 15 и 18), но и сопряженные ЭПА (профили 16 и 17). У первых практически отсутствует боковой внутрипочвенный привнос ВОВ, и они развиваются как бы обособленно. Вторые взаимосвязаны местными внутрипочвенными потоками влаги и ВОВ, а локальный сток замыкается вокруг разр. 17.

Эволюция сопряженных ЭПА по сравнению с автономными более самобытна, поскольку совместный эффект воздействия таежной растительности и внутрипочвенных потоков влаги на скорость и направ-

ленность процессов формирования элювиально-иллювиального профиля подзолистой почвы достаточно высок. В этой связи диагностика и оценка абиогенных полей миграции ВОВ позволяют обобщать пространственное варьирование выноса компонентов ВОВ в парцеллярной структуре биогеоценоза.

Изучаемые парцеллы характеризуются заметной дифференциацией абиогенного потока ВОВ, особенно их качественного состава. Поля абиогенной миграции ВОВ мозаичны, в определенной мере они отражают своеобразие гумусовых соединений (их состав и свойства) и особенно морфологического сложения почв. Так, активные сорбционные барьеры в отношении ВОВ были диагностированы в ЭПА осокново-моховой западины и в «окне» между кронами деревьев. В других ЭПА горизонт A_1 не обнаружен, а вместо него диагностирован A_0A_1 — прототип A_1 . Поэтому в одних ПИ преобладает элювиальный вынос ВОВ и продуктов почвообразования, а в других (разр. 17 и 18) — заметное закрепление основной массы ВОВ.

На основании сведений, полученных по конкретным ЭПА, были рассчитаны средние статистические параметры интегрального выноса ВОВ в годовом и сезонном циклах в целом для почвенного пространства биогеоценоза. В первом случае они составили (Γ на 1 м^2 С ВОВ): из гор. A_0 (A_0^*) — 46,3 ($\sigma^2=15,3$), A_1 (A_0A_1) — 18,3 ($\sigma=22,0$), A_2 — 20,3 ($\sigma=11,6$).

В осенне-ранневесенний период среднестатистический вертикаль-

⁷ σ — дисперсия среднего. С позиции структуры числовой информации использована «серия выборок» для обоснования абиогенных полей миграции ВОВ по ЭПА биогеоценоза.

ный нисходящий вынос ВОВ, рассчитанный по 4 ЭПА изучаемого биогеоценоза, был равен (г на 1 м² С ВОВ): из гор. А₀ (А_д^Г) — 13,9 (σ=2,3), А₁ — 7,1 (σ=5,1), А₂ — 10,3 (σ=7,5) и из гор. А_{2В} — 7,7 (σ=5,3). При этом внутривертикальный баланс ВОВ для горизонта А₂ и в сезонном, и в годовом циклах оказался отрицательным (соответственно —3,2 и —2,0 г/м²).

Искомые значения абиеогенной миграции ВОВ являются в известной мере случайными величинами из-за ограниченности сведений об их разноориентированном массопереносе, но они не обусловлены случайностью самого объекта (почв и ВОВ). В то же время вариационная статистика основана на

анализе однородной выборки, например свойства почв ЭПС, состоящих из п-ЭПА, в таком случае интерпретируются в отрыве от места (стационара) наблюдений. Это предопределяет практически случайный характер изучаемого объекта, что неправомерно. Поэтому целесообразно обратить внимание на методологию статистической обработки данных, получаемых, в частности, при стационарных наблюдениях в почвах таежно-лесной зоны... «надо иметь в виду, — подчеркивают авторы [2], — что теория ошибок... создавалась... для прямых измерений, а в почвоведении они фактически никогда не возможны». И далее подчеркивают: ...«объекты почвоведения являются сложными

Таблица 3

Состав и масштаб вертикальной нисходящей миграции ВОВ в почвах парцелл лесного биогеоценоза подзоны южной тайги (стационар в учхозе «Михайловское» Московской области; 11 сентября 1991 г. — 21 мая 1992 г.)

Горизонт и глубина установок колонок, см	Общий вынос С ВОВ, г/м ²	С ВОВ, г/м ²			Вынос С ВОВ по сорбции на Al ₂ O ₃ , г/м ²	С ВОВ неспецифических органических веществ, %	Сорбция С ВОВ почвой, % к поступившей массе
		в водорастворимом элюате	в аммиачном элюате	всего			

Разр. 16. Молодой ельник — мертвопокровный

А ₀ — 2	19,2	8,7	1,4	10,1	9,1	86,1	—
А ₂ — 21	21,2	3,1	1,2	4,3	16,9	72,1	—
А _{2В} — 44	6,2	3,3	1,6	4,9	1,3	67,3	70,8

Разр. 17. Осоково-моховая западина

А _д ^Г — 4	17,2	2,0	1,3	3,3	13,9	60,6	—
А ₁ — 9	10,7	1,9	2,1	4,0	6,7	47,5	37,8
А _{2г} — 14	6,8	3,2	1,2	4,4	3,4	72,7	36,4
А _{2В} — 43	15,1	5,3	0,7	6,0	9,1	88,3	—

Разр. 15. Под кроной зрелой ели

А ₀ — 2	13,2	2,7	1,4	4,1	9,1	65,9	—
А ₂ — 18	9,1	1,5	1,6	3,1	6,0	48,4	31,1
А _{2В} — 46	7,0	2,0	0,8	2,8	4,2	71,4	23,1

Разр. 18. Смешанный лес (разнотравный), в 220 м от разр. 15

А ₀ — 1	11,9	Не опр.	Не опр.	Не опр.	11,9	Не опр.	—
А ₁ — 18	3,5	—	—	—	3,5	—	70,6
А ₂ — 24	4,2	—	—	—	4,2	—	—
А _{2В} — 34	2,4	—	—	—	2,4	—	42,9

многофакторными системами с целым комплексом взаимозависимых свойств»..., поэтому... «трудно указать в настоящее время хотя бы одно свойство почвенных объектов, для которых тип распределения (нормальное, логнормальное, Вейбула... И. Я.), то есть вид функции распределения с точностью до меняющихся среднего и дисперсии был бы установлен сколь-нибудь обоснованно» [2, с. 12].

В этой связи используемые математические приемы (методы) должны быть адекватны реальному объекту (его составлению, развитию, свойствам и т. д.). В почвоведении, например, перспективно использование теории случайных функций [2]. При подобном подходе оценка варьирования величин абиогенной миграции ВОВ в почвенном пространстве нуждается не в одно-, а в двукратном усреднении характеристик случайной функции $f(r; x)$: во-первых, по профилю — для множества конкретных горизонтов и ПИ (координата x) и, во-вторых, в пространстве ЭПС для п-ЭПА (координата r). В то же время при лабораторном анализе сорбентов проводилось усреднение не только их проб, но и полученных аналитических параметров.

В самом деле, миграционная функция $f(r; x)$ задается по крайней мере 2 векторами: параметрическим вектором, характеризующим мобилизацию ВОВ из конкретной «точки» ЭПА (x), и вектором «точки» (r) пространства ЭПА, в котором функция задана вдоль осей координат — собственно миграционный вектор, обусловливающий не только разноориентированный массоперенос ВОВ, но и их трансформацию в жидкой и твердой фазах почвы.

Функции и свойства почв по вертикали и горизонтали неоднозначны. Вертикальная координата стро-

го специфична (по ней, например, диагностируется почва как генотип), дискретна, имеет в отличие от горизонтальной значительно меньшую протяженность и низкий (хотя и чрезвычайно информативный) уровень организации почвенной массы. В принципе данная координата (с учетом центра масс) и позволяет выявить ПИ (педон), однако, строго говоря, за почвенным разрезом остается какая-то зона неопределенности. Поэтому одна вертикальная координата в известном смысле ограничивает взгляд на почву как на планетарное, единое образование — семиконтинуум: пространство непрерывное по горизонтали и прерывное по вертикали.

Абиогенная вертикальная миграция ВОВ играет своеобразную роль в формировании и обновлении гумусовых соединений, а также в образовании системы генетических горизонтов почв подзолистого типа. Указанные процессы изучены еще не в полной мере, а их диагностика для генетического почвоведения представляет исключительный интерес. Пока, например, неясно, почему при максимальном потоке ВОВ ($60,5 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$) под кроной зрелой ели в почвенном профиле не формируется четко выраженный гумусово-аккумулятивный горизонт. В то же время в данной почве наблюдается весьма мощный элювиальный горизонт (25—37 см).

При вертикальной нисходящей миграции ВОВ в целинных среднесуглинистых почвах отмечено изменение их группового состава, поэтому на выходе из гор. A_1 и A_2 в почвенных растворах заметно преобладают органические соединения специфической природы (в частности, фульвосоединения). По-видимому, в основе данного процесса лежат сорбционно-десорбционные

взаимодействия, так или иначе связанные с миграционным механизмом образования и обновления молекулярных структур гумусовых веществ [19]. В сильноподзолистых почвах (под кроной зрелой ели) основная масса ВОВ участвует не в формировании гор. A_1 , а в миграционном перераспределении продуктов почвообразования в сопряженных горизонтах A_2 и A_2B (В), что связано как с составом ВОВ, так и со спецификой их сорбции и массопереноса. Новообразованные группы ВОВ более энергично закрепляются в гор. A_1 и A_0A_1 , если почва испытывает временное сезонное переувлажнение поверхностных слоев (разр. 17).

В осенне-ранневесенний периоды происходит наиболее активная внутрипрофильная миграция ВОВ и продуктов почвообразования с гравитационной влагой, что способствует повышению биологической активности почв. Как и в годовом цикле, в рассматриваемый период наблюдается заметная дифференциация состава ВОВ в почвенном профиле. После прохождения почвенными растворами гор. A_0A_1 (A_1) и A_2 среди компонентов ВОВ увеличивается доля фульвосоединений (разр. 15 и 17). Однако данная закономерность варьирования состава ВОВ в иллювиальных слоях изучаемых почв нарушается. Увеличивается доля низкомолекулярных органических соединений неспецифической природы, что, возможно, обусловлено трансформацией педогенных гумусовых соединений (как результат сорбционно-десорбционных процессов и биодеградации органо-минеральных продуктов), боковым привнесом ВОВ, а также является результатом фильтрационной гетерогенности.

Принимая непосредственное и активное участие в сложных и ди-

намичных взаимодействиях всех составных фаз почвы, ВОВ непрерывно изменяются, определяя динамичный характер свойств почв подзолистого типа, фракционно-групповой и молекулярно-массовой состав гумуса [8, 19, 25].

Примечательно, что значительное количество миграционных форм ВОВ в абиогенный период было диагностировано благодаря комбинированному использованию в лизиметрах активированного угля и оксида алюминия. Применение активированного угля позволило сорбировать большую часть ВОВ. На наш взгляд, это обусловлено как спецификой процессов поглощения ВОВ углем (совокупность реакций динамики сорбции и хроматографии), так и поступлением в зону лизиметров компонентов ВОВ, которые в данный период характеризовались ярко выраженным гетерогенным составом и неоднозначными коллоидно-химическими свойствами [23, 25].

Реальные значения выноса ВОВ можно уточнить с помощью простых расчетов, применяя для этого коэффициенты мобилизации ВОВ ($K_{\text{моб}}$) из конкретного субстрата [8, 23]. Значения $K_{\text{моб}}$ используются и в случае прогноза масштаба мобилизации ВОВ из той или иной массы свежих или гумифицированных растительных остатков [23], поскольку из них в таежно-лесной зоне образуется значительное количество компонентов с ярко выраженными кислотными свойствами, способствующими мобилизации из труднорастворимых почвенных соединений как элементов питания, так и зольных компонентов и их миграции.

Из установленного нами соотношения [8, 23]

$$K_{\text{моб}} = M_{\text{моб}} / A, \quad (1)$$

где $K_{\text{моб}}$ — коэффициент мобилизации ВОВ из растительного опада; $M_{\text{моб}}$ — масса мобилизуемого углерода ВОВ (g); A — исходная масса растительного опада (g), следует, что логарифмическое выражение уравнения

$$\lg M_{\text{моб}} = K_{\text{моб}} \lg A \quad (2)$$

после преобразования дает параболическую зависимость значений $M_{\text{моб}}$ от A (3):

$$M_{\text{моб}} = A^{K_{\text{моб}}} \quad (3)$$

Исходя из этой зависимости можно заключить, что скорость изменения $M_{\text{моб}}$ ВОВ пропорциональна отношению масс $M_{\text{моб}}/A$.

Результаты собственных наблюдений [8, 23] показали удовлетворительное совпадение расчетных и фактических величин $M_{\text{моб}}$ ВОВ во II и IV вариантах опыта (соответственно 1,44 и 1,35; 1,27 и 0,91) при трансформации различных видов опада в осенне-весенний период. В летний сезон установленная зависимость не отражает реальных процессов мобилизации и трансформации ВОВ, так как важную роль в этот период играет глубокая минерализация новообразованных ВОВ до CO_2 , H_2O и минеральных солей микроорганизмами.

Полученные сведения наряду с имеющейся информацией о закономерностях сорбции и трансформации ВОВ в почвах (изотермы сорбции), а также данными о запасах гумусовых веществ и их составе могут быть использованы при обосновании гумусового баланса.

Выводы

1. Особенностью абиогенной миграции ВОВ в сопряженных ЭПА моренного микрорельефа являются их вынос из подзолистых почв нормального увлажнения и сосредото-

чение в определенной мере в аквальных микроландшафтах с болотными и дерново-глебовыми почвами.

2. В лесном биогеоценозе подзоны южной тайги отмечается заметная дифференциация мигрируемых масс ВОВ в почвенном пространстве, обусловленная его парцеллярной структурой и особенностями организации ЭПА в пространстве.

3. В сильноподзолистой почве (под кроной зрелой ели) основная мигрируемая масса ВОВ участвует не в процессах формирования гор. A_1 , а в миграционном перераспределении и массопереносе продуктов почвообразования. Более энергичное закрепление компонентов ВОВ происходит в почвах западин, испытывающих временное поверхностное переувлажнение.

4. Абиогенное поле миграции отражает реальные процессы мобилизации, трансформации и вертикальной нисходящей миграции компонентов ВОВ в ЭПА парцелл биогеоценоза и позволяет ориентировочно оценить их интегрированный вынос в конкретном почвенном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд А. Д. Природные комплексы как саморегулирующиеся информационные системы. — Изв. АН СССР, сер. географ., 1966, № 2, с. 85—94.
2. Благовещенский Ю. Н., Самсонова В. П., Дмитриев Е. А. Формирование гипотез и их анализ по конкретным примерам. — В кн.: Непараметрические методы в почвенных исследованиях. М.: Наука, 1987, с. 74—82.
3. Глазовская М. А., Перельман А. И. Современные почвенно-геохимические проблемы. — В кн.: 100 лет генетического почвоведения. М.: Наука, 1986, с. 161—170.
4. Дылис Н. В. Структура лесного биогеоценоза. — 21-е Комаровские чтения. М.: Наука, 1969. —

5. *Дмитриев Е. А., Карпачевский Л. О., Строзанова М. Н., Шоба С. А.* О происхождении неоднородности почвенного покрова в лесных биогеоценозах.— В кн.: Проблемы почвоведения. Советские почвоведы к XI Междуна. конгр. почвоведов в Канаде, 1978. М.: Наука, с. 212—217.— 6. *Карпачевский Л. О., Киселева Н. К.* Пестрота почвенного покрова и почвенный индивидуум «педон».— В кн.: Лес и почва. Красноярск: Красноярское кч. изд-во, 1968, с. 48—57.— 7. *Кауричев И. С., Яшин И. М., Кашанский А. Д.* Применение метода лизиметрических хроматографических колонок в почвенных исследованиях.— В кн.: Методы стационарного изучения почв. М.: Наука, 1977, т. 2, с. 167—198.— 8. *Кауричев И. С., Яшин И. М.* Образование водорастворимых органических веществ в почвах как стадия превращения растительных остатков.— Изв. ТСХА, 1989, вып. 1, с. 47—57.— 9. *Корсунская Л. П., Мелешко Д. П., Пачепский Я. А.* О фильтрационной гетерогенности и конвективно-дисперсионном массопереносе в почвах.— Почвоведение, 1986, № 7, с. 42—51.— 10. *Козловский Ф. И., Роде А. А.* Выбор участков для стационарных исследований, их первичное изучение и организация наблюдений на них.— В кн.: Принципы организации и методы стационарного изучения почв. М.: Наука, 1976, т. 1, с. 62—94.— 11. *Мина В. Н.* Влияние осадков, стекающих по стволам деревьев, на почву.— Почвоведение, 1967, № 10, с. 44—52.— 12. *Перельман А. И.* Геохимия ландшафта.— М.: Изд-во МГУ, 1975.— 13. *Пономарева В. В.* Биогеохимическое значение леса.— Изв. АН СССР, сер. географ., 1966, № 5, с. 30—39.— 14. *Рачинский В. В., Фокин А. Д., Талдыкин С. А.* Исследование потоков почвенной влаги и миграции веществ в подзолистых почвах изотопно-индикаторным методом.— Почвоведение, 1982, № 2, с. 67—73.— 15. *Роде А. А.* Почвообразовательный процесс и эволюция почв.— В кн.: Генезис почв и современные процессы почвообразования. М.: Наука, 1984, с. 56—136.— 16. *Сорокина Н. П.* Вопросы методики составления детальных почвенных карт и их использование в опытно-полевом деле.— Автореф. канд.

дис. Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 1975.— 17. *Сукачев В. Н.* Основы лесной типологии и биогеоценологии. Избр. тр. Л.: Наука, 1972, т. 1, с. 342—343.— 18. *Фридланд В. М.* Почвенные микро-, мезо- и макроструктуры и их модели — микро-, мезо- и макрокомбинации.— В кн.: Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984, с. 11—17.— 19. *Фокин А. Д.* Процессы трансформации и миграции вещества в почвах. Биологические круговороты и их роль в существовании жизни на Земле.— В кн.: Почва, биосфера и жизнь на Земле. М.: Наука, 1986, с. 32—56.— 20. *Яшин И. М., Кащенко В. С., Платонов И. Г., Самозвон Н. М.* К характеристике почвенного покрова Архангельской области.— Изв. ТСХА, 1986, вып. 1, с. 101—109.— 21. *Яшин И. М., Гавриков Г. Г.* Элементарные структуры почвенного покрова южной части Архангельской области.— Изв. ТСХА, 1986, вып. 6, с. 73—84.— 22. *Яшин И. М.* Элементы симметрии и асимметрии почвенного покрова таежно-лесной зоны.— Изв. ТСХА, 1988, вып. 2, с. 78—86.— 23. *Яшин И. М., Кауричев И. С.* Превращение растительных остатков и формирование групп гумусовых соединений в подзолистых почвах.— Изв. ТСХА, 1989, вып. 4, с. 42—53.— 24. *Яшин И. М., Кауричев И. С.* Почвенно-экологические функции водорастворимых органических веществ в лесных ландшафтах европейского Севера.— В сб.: Эколого-географические проблемы сохранения и восстановления лесов Севера. Тез. докл. Всесоюзн. науч. конф., посвящ. 280-летию со дня рождения М. В. Ломоносова. Архангельск, 1991, с. 142—144.— 25. *Яшин И. М., Кауричев И. С.* Роль низкомолекулярных органических кислот в биогенной трансформации гумусовых веществ почв таежно-лесной зоны.— Изв. ТСХА, 1992, вып. 5, с. 36—48.— 26. *Cline M. S.*— Soil Sci., 1949, vol. 67, N 2.— 27. *Jenny H.*— Soil Sci., 1946, vol. 61, N 6.— 28. *Knox E. I.*— Soil Science Soc. Amer. Proceed., 1965, vol. 29, N 1, p. 79—84.— 29. *Milne I.*— Soil Res., 1935, N 4.— 30. *Smith (ed).*— Soil classification 7-th Approx. USA, 1960.

Статья поступила 20 августа 1992 г.

SUMMARY

Based on the results of studying the structure of soil cover and on systematized lysimetric observations in conjugate elementary soil areas, a diagnosis has been developed and the estimation has been made of the fields of abiogenous migration of water-soluble organic substances in soils of stationars in subzones of southern and middle taiga of European North.