

УДК 631.417:631.445:504.54

МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ, БАЛАНС И ФУНКЦИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВАХ ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ¹

© 2020 г. И. М. Яшин¹, В. А. Черников¹, С. Л. Белопухов^{1,*}

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

*E-mail: belopuhov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2019 г.

После доработки 15.12.2019 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

С помощью методов радиоактивных индикаторов и сорбционных лизиметров на стационарах изучены мобилизация, биодegradация, баланс и функции водорастворимых органических веществ (ВОВ) в подзолистых почвах южной (Подмосковье) и средней (Архангельская обл.) тайги. Обоснован один из возможных механизмов, а также скорость эмиссии газов (в частности, CO₂) из подзолистых почв при трансформации ВОВ группами микроорганизмов. В полевых опытах установлено, что наибольшая скорость эмиссии CO₂ из новообразованных масс ВОВ происходила в пахотных почвах в сравнении с лесными аналогами, в которых эта величина составила 30.4 мг CO₂/м²/сут. Оглеение почв заметно затормаживало трансформацию молекул ВОВ до конечных продуктов биодegradации; при этом формировались так называемые “промежуточные” органические вещества с аллелопатическими свойствами. При переувлажнении почв, наряду с CO₂, образуются газы с восстановительными функциями (H₂S, CH₄).

Ключевые слова: эмиссия CO₂, водорастворимые органические вещества, источники диоксида углерода, фотосинтез (темновая и световая фазы), таежные экосистемы, почвы, гумусообразование.

DOI: 10.31857/S0002188120070108

ВВЕДЕНИЕ

Компоненты водорастворимых органических веществ (ВОВ) почв давно привлекают внимание экологов, физиологов растений, почвоведов, микробиологов [1–10]. Это обусловлено их уникальными коллоидно-химическими свойствами и экологическими функциями [7, 11–14]. Большой вклад в исследование природы ВОВ, их состава, водной миграции и активного участия в глее- и подзолообразовании сыграли фундаментальные работы почвоведов Тимирязевской академии – В.Р. Вильямса, С.П. Яркова, И.С. Кауричева, А.Д. Фокина, С.Н. Алешина, А.И. Карпухина, В.И. Савича.

В таежных экосистемах компоненты ВОВ интенсивно мобилизуются в жидкую фазу почв из опада и лесных подстилок, корневых выделений и смывов с вегетативных органов растений. Заметный вклад в баланс ВОВ вносят и плесневые грибы-кислотообразователи в лесных подстилках

[2, 3, 15]. В этой связи исследование веществ почвенных растворов становится весьма актуальным. Неслучайно Докучаевское общество почвоведов России периодически проводит совещания и научные конференции по лизиметрии [3, 12, 16]. В этом направлении следует отметить инновационные технологии немецких специалистов [10, 17], которые добились значительных успехов при сопряженном изучении состава и свойств веществ лизиметрических растворов, а также газовой фазы почв и экосистем. На лизиметрической станции они используют лизиметры-монолиты шахтного типа, совмещенные с инновационными газоанализаторами типа “Лайкор”; полученная информация о составе веществ жидкой и газовой фаз выводится в павильон с компьютерами [17].

Одним из перспективных направлений в лизиметрии является разработка и применение метода сорбционных лизиметров (МСЛ) [14, 18]. Данный метод позволяет изучать процессы трансформации и водной миграции веществ в почвах реальных экосистем, с его помощью можно установить формы и масштаб миграции ионов метал-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 02-04-48791.

лов в зависимости от почвенно-геохимических условий ландшафта, а также исследовать динамику продуктов почвообразования. МСЛ отличаются маневренностью и технологической простотой, поэтому данный метод позволяет организовывать стационарные наблюдения в различных географических зонах и в труднодоступных ландшафтах — дельтах и поймах рек, территориях после масштабных пожаров (гарях), на опытах селекционных станций и госсортоучастках, в горных экосистемах, в рисовых чеках, где стационарные лизиметры инженерного типа установить довольно проблематично [9].

Подчеркнем, изучение экологических функций компонентов *ВОВ* (газовой, миграционной, аллелопатической и др.) способствует более полному познанию таежных экосистем, например, выявлению адаптации биоты к суровым биоклиматическим условиям с помощью “биогенного кислотообразования” [1, 2, 19]. Появилась возможность оценки экологической взаимосвязи фотосинтеза в растениях и гумусообразования в почвах с помощью *ВОВ*. Это экосистемный уровень, а не уровень почвенного образца. Напомним, что экосистема, в отличие от почвы, обладает эмерджентностью.

Экосистемы способны сохранять и передавать информацию в пространстве—времени в виде структур органических и органо-минеральных веществ и их функций [15, 16, 20, 21]. В экосистемах упорядоченность структур биополимеров и гумуса поддерживается с помощью биогеохимических циклов миграции веществ и гумусообразования в почвах [14, 22]. Структурная упорядоченность гумусовых соединений (ГС), с одной стороны, отражает особенности функционирования живых организмов, а с другой — миграционные потоки органических соединений фотосинтетической природы в экосистемах. Структуры ГС развиваются (самоорганизуются) в условиях неравновесности экосистем — постоянного притока веществ и солнечной энергии. Часть веществ и энергии в химических связях *ВОВ* покидает экосистемы. Эти особенности и обуславливают флуктуации состава и свойств ГС вблизи квазистационарного состояния многофазной почвенной системы, а также формирование диссипативных структур (соединений переменного состава) [1, 6]. Как только прекращается внешний приток веществ и энергии, например, в почву (а в отношении ГС — это водорастворимые органические вещества), например, из-за распашки целинных степных почв или вырубки лесов в зоне тайги, так и начинается постепенное разрушение структур ГС [8, 13, 14, 22]. Становится понятной важность

и актуальность исследования миграционных потоков, баланса и функций *ВОВ* в экосистемах.

Цель работы — исследование миграционных потоков, баланса и функций водорастворимых органических веществ в почвах таежных экосистем.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были почвы и экосистемы средней тайги стационара “Вилегодский” Архангельской обл. и южной тайги — в Подмосковье [14]. Использованы метод радиоактивных индикаторов (изотоп ^{14}C) и сорбционных лизиметров [22]. Аналитическая схема W. Forsyth в модификации И.М. Яшина позволила путем сорбции *ВОВ* активированным углем “карболен” в сорбционных колонках (в полевых опытах) определить состав *ВОВ*, их свойства и функции [8, 9, 14, 18, 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получена новая информация о скорости и продуктах трансформации растительных остатков (*ВОВ*), тотально меченных радиоактивным изотопом ^{14}C , на поверхности почв [14, 18] (табл. 1). Установлено, что на начальном этапе превращения растительного опада в поверхностных слоях почв на стационаре в Подмосковье формировались преимущественно индивидуальные (неспецифические) органические вещества, десорбируемые из активированного угля колонок 90%-ным ацетоном и водой. Доля фульвокислот (**ФК**) в среднем достигала 30% в составе *ВОВ*. По молекулярно-массовому (**ММ**) составу новообразованные компоненты *ВОВ* имели низкомолекулярный состав: среди индивидуальной группы органических веществ на долю *ВОВ* с $\text{ММ} \leq 1000$ а.е.м. приходилось 94.1%, среди **ФК** — 84.7% [1, 7, 12, 24].

Сопряженное использование методов адсорбционной хроматографии на активированном угле (в колонках, установленных в почве) и гелевой фильтрации на сефадексах (важно использовать системную гель-хроматографию с гелями G-10, G-25, G-50, а не одну марку гелей декстрана), в едином варианте опыта обеспечивало концентрирование новообразованных масс *ВОВ* в сорбционных лизиметрах и последующее (лабораторное) выделение групп *ВОВ* с диагностикой их молекулярно-массового состава и свойств [1, 6, 7, 13, 24]. Заметное разнообразие органических лигандов и их производных, входящих в молекулярные структуры *ВОВ*, определяло неоднородность

Таблица 1. Распределение радиоактивного изотопа ¹⁴C по новообразованным группам *ВОВ* из растительных остатков ячменя, локализованных в сорбционных лизиметрах, и установленных в верхних слоях почв (стационар “Михайловский” Московская обл., экспозиция – 1 год), % суммарной активности *ВОВ*

Номера сорбционных колонок	Относительная активность групп <i>ВОВ</i> в элюатах из активированного угля колонок		Суммарная активность <i>ВОВ</i> по ¹⁴ C, %	Активность жидких новообразованных продуктов (<i>ВОВ</i>), % исходной активности ¹⁴ C
	водо-ацетоновый	водо-аммиачный		
1	75.8 ± 1.5	24.2 ± 0.4	100	1.81 ± 0.1
2	80.0 ± 1.7	20.0 ± 0.3	100	3.52 ± 0.2
3	65.7 ± 1.2	34.3 ± 0.6	100	3.29 ± 0.2
4	57.0 ± 0.9	43.0 ± 0.8	100	3.16 ± 0.3
\bar{x}	69.9	30.4	–	2.95
σ	10.3	8.95	–	0.77

Примечания. 1. Активность изотопа ¹⁴C в растворах и экстрактах с угля диагностировали жидкостно-сцинтилляционным методом на бета-спектрометре Rackbeta (модель 1219 фирмы LKB, Wallac, Финляндия) в сцинтиляторе марки ЖС-8 с предварительным эталонированием. Ошибка измерений не превышала 3% при доверительном интервале 99%. 2. Меченый углерод твердых проб (растительных остатков и сорбентов) определяли в гелевых сцинтилляторах марки ЖС-13н на приборе ПП-8 Волна с газоразрядным счетчиком Т-25-БФЛ. Ошибка измерений – <10% при доверительном интервале 99%.

Таблица 2. Формирование фульвокислот и внутрипочвенное превращение групп *ВОВ* в сильноподзолистой почве под 70–80-летней елью (стационар в учхозе РГАУ–МСХА “Михайловское”, экспозиция – 1 год, при десорбции *ВОВ* из угля использованы равные объемы элюентов)

Расстояние от ствола ели, горизонт и глубина установки колонок под ними, см			Объем воды в лизиметрах, л	Углерод <i>ВОВ</i> , мг/л			Вынос C_{org} <i>ВОВ</i> , г/м ² /год		Сорбция и минерализация <i>ВОВ</i> горизонтами почвы	
				в приемнике вод	в водо-ацетоновом элюате из угля (ИОВ)	в аммонийном элюате из угля (ФК)	фактический	расчетный	г/м ²	%
0.9 м	АО	2	1.85	3.6	226	41.2	75.5	103	–	–
1.3 м	АО	2	2.60	2.5	118	76.4	76.9	–	–	–
2.5 м	АО	2	2.00	2.4	61.7	41.2	29.2	–	–	–
Среднее			2.15 ± 0.7	2.8 ± 0.7	135 ± 84	52.9 ± 20.3	60.5 ± 27.1	103	–	–
0.9 м	А1	7	1.40	1.8	153	183	71.1	–	–	–
1.3 м	А1	9	1.30	4.5	26.5	52.3	16.3	–	–	–
Среднее			1.35	3.2	89.5	117	43.7	–	16.8	27.8
0.9 м	ЕL	28	0.24	6.1	200	176	13.8	–	–	–
1.3 м	ЕL	30	0.80	5.9	61.8	291	43.2	–	–	–
Среднее			0.52	6.0	131	234	28.5	–	15.2	25.1
Итого							28.5	–	32.0	52.9

Примечание. Расчетный вынос *ВОВ*: при запасе еловой подстилки 1.4 кг/м², содержании в ней углерода органических веществ 0.56 кг/м² и величине k_{mob} , равной 12%, ожидается мобилизация в раствор 67.2 г *ВОВ*/м² в осеннее-ранневесенний период. Из массы опада 0.4 кг/м² будет дополнительно мобилизовано углерода *ВОВ* 19.2 г/м², что составит 86.4 г С/м². С учетом убыли опада и коэффициента мобилизации, равного 3%, в летний период из массы подстилки 1.4 кг/м² образуется углерода *ВОВ* 16.8 г/м². За год масштаб мобилизации *ВОВ* из гор. АО сильноподзолистой почвы, сформированной под кроной ели, составит 103 г/м² (без учета количества *ВОВ* в составе атмосферных осадков, стекающих с вегетативных органов ели и корневых выделений).

их ММ состава, а также особенности коллоидных, аллелопатических и химических свойств. Это очень важно с экологической точки зрения [7, 13, 25].

Наряду с полевыми опытами, в которых была использована радиоактивная метка ¹⁴C, был изу-

чен состав *ВОВ* и масштаб их водной миграции (плотность потока миграции) с помощью метода сорбционных лизиметров. Сорбент – активированный уголь “карболен” (табл. 2).

Результаты полевых опытов по изучению водной миграции *ВОВ* на основе МСЛ согласуются с

Таблица 3. Баланс масс новообразованных *ВОВ* при трансформации тотально меченных изотопом ^{14}C растительных остатков ячменя в глубоко подзолистых почвах средней тайги (стационар “Вилегодский” в Архангельской обл.) [14], % суммарной активности исходного органогенного субстрата, через 2 года наблюдений

Основные статьи баланса (по ^{14}C), оценка биогеохимических процессов в таежной экосистеме	Лесные почвы		Пахотная почва автономная (плакор)
	Автономная (плакор)	Полугидроорфная (западина)	
1. Осталось в исходном растительном опаде – консервация растительного опада	16.1 ± 0.3	29.5 ± 0.9	5.8 ± 0.2
2. Поглощено корнями растений и мхами (включение в биогенный поток миграции)	0.9 ± 0.0	7.4 ± 0.6	0.1 ± 0.0
3. Включено в гумусовые соединения почвы в слое внесения радиоактивной метки (0–3 см) – обновление фульвокислот гумуса	5.8 ± 0.1	18.2 ± 0.4	4.1 ± 0.1
4. Биодegradация молекул <i>ВОВ</i> микроорганизмами до конечных продуктов и эмиссия CO_2	70.4 ± 4.6	32.4 ± 2.5	83.0 ± 4.1
5. Включено в водную миграцию компонентов <i>ВОВ</i> с потоком гравитационной влаги в профиле почвы (нижняя граница зоны миграции за 2 года – 39–44 см)	6.8 ± 0.2	12.5 ± 0.3	7.0 ± 0.2

Примечания. 1. Меченый радиоактивный углерод ^{14}C твердых проб почвы и растений определяли в гелевых сцинтилляторах марки ЖС-13 н. 2. Степень радиоактивности субстратов измеряли на приборе ПП-8 (“Волна”) с газоразрядным счетчиком Т-25 БФЛ. Ошибка измерения не превышала 10% при доверительном интервале 99%. 3. В работе участвовали профессора А.И. Карпунин и И.Г. Платонов.

фактическими данными, полученными при использовании растительных остатков, меченных изотопом ^{14}C . Установлено, в частности, что в составе *ВОВ*, мобилизованных в почвенный раствор из еловой подстилки, заметно преобладали органические вещества индивидуальной природы – алифатические кислоты, аминокислоты, полифенолы. Однако после водной миграции через органо-минеральный сорбционный барьер (гор. А1) в составе *ВОВ* почвенных растворов заметно увеличивалась концентрация ФК, которая с глубиной еще больше возрастала и становилась преобладающей в подзолистом горизонте. Формирование ФК, возможно, было связано с реакциями комплексообразования и гетерогенного катализа [1, 6, 7]. Напомним, что молекулы ФК – наиболее устойчивые к биодegradации микроорганизмами, а также химически активные и миграционно способные [1, 6, 26].

Статьи баланса *ВОВ*, изученные в одном из полевых опытов с помощью метода радиоактивных индикаторов (табл. 3), показали, что наиболее значимой из них в балансе *ВОВ* была их биодegradация микроорганизмами. Например, в автономных подзолистых почвах (на плакоре) эта величина составила $70.4 \pm 4.6\%$ от суммарной активности *ВОВ*. В полугидроморфной лесной почве (подзолисто-глеевой) статьи баланса были менее контрастными, чем в автоморфных аналогах. Примечательно, что в нисходящую водную ми-

грацию включалось 6.8–12.5% новообразованных масс *ВОВ* с кислотными свойствами. Причем одной из особенностей конвективного переноса влаги было то, что при нисходящей миграции в поровое пространство верхних горизонтов засасываются молекулы CO_2 из поверхностных слоев почвы. Газы не только сорбируются минералами почвы, но и органическими кислотами почвенных растворов, претерпевая трансформацию. Генезис газовой фазы почвы отражает особенности функционирования экосистемы, а не только почвенные процессы и деятельность микроорганизмов (“дыхание почвы”) [9, 17, 23].

На основе авторских экспериментальных данных была рассчитана скорость эмиссии CO_2 в таежной (лесной) экосистеме на основе результатов опыта, обобщенных в табл. 1. Средняя величина масштаба мобилизации *ВОВ* составляла 2.95% (абсолютная величина) за 1 год, что было равно 29.5 г *ВОВ*/кг органогенного субстрата. При запасах лесной подстилки 2.5 кг/м² масштаб мобилизации $\text{C}_{\text{орг}}$ *ВОВ* составил 73.8 г/м²/год. Масштаб биодegradации *ВОВ* достигал в лесной фации 70% в среднем за 2 года опыта (табл. 3). Следовательно, остались неутрализованными 22.2 г *ВОВ*/м² в течение опыта. Скорость эмиссии молекул CO_2 при трансформации *ВОВ* в поверхностных слоях почвы составила 30.4 мг/м²/сут или 0.69 ммоль. Эта величина не является постоянной, поскольку

лесная экосистема функционирует в динамическом режиме фотосинтеза (в световой и темновой фазах [20]), сопряженно с процессами почвообразования – глее- и подзолообразованием, трансформацией *BOB*, их миграцией, накоплением лесных подстилок и “дыханием почвы”. Поскольку CO_2 тяжелее воздуха, он скапливается вблизи поверхности почв (без учета антропогенных источников CO_2). Оптимальная концентрация CO_2 в воздухе составляет 330–420 ppm. Сопряженное изучение миграционных потоков *BOB* и CO_2 в экосистемах заповедников позволяет получить фоновые данные о функционировании почв и экосистем. При этом в соответствии с динамикой трансформации растительных остатков и формированием групп *BOB* отмечают их сезонные флуктуации, связанные с активностью микроорганизмов [3, 4, 8, 23]. Эмиссия CO_2 из почв в таежных экосистемах также имеет волновой характер. Поэтому следует не просто измерять концентрации CO_2 в воздухе по сезонам года, а изучать динамику экосистемных и почвенных процессов на стационарах.

Почему уделено большое внимание компонентам *BOB* в почвах таежных экосистем? В работах [1, 6, 13] отмечено, что *BOB* играют важную роль при формировании и обновлении структур гумусовых соединений в почвах. При этом в почвах лесных (таежных) ландшафтов средней и северной тайги не отмечено формирование устойчивых и высокомолекулярных гуминовых соединений. В профиле подзолистых почв не образуется горизонт А1. Исследователи иногда не учитывают этот феномен, не обосновывают процессы гумификации и гумусообразования на экосистемном уровне. На наш взгляд, в почвах таежных экосистем для “сборки” высокомолекулярных структур ГК не только не хватает подходящего “сырья” (компоненты *BOB* имеют низкомолекулярный состав, слабо закрепляются почвенной матрицей и легко элюируются водой). Эти почвы имеют очень низкое содержание N и ионов Ca^{2+} , содержат в основном низкомолекулярные органические вещества с кислотными функциями, которые заметно не насыщены ионами металлов [2, 6, 12, 19].

Следовательно, направленность процессов гумусообразования в почвах тайги состоит не столько в образовании высокомолекулярных ГС, сколько в динамике взаимосвязанных процессов мобилизации, трансформации и водной миграции кислотных компонентов *BOB*, содержащих энергию в химических связях их молекул, а также элементы питания, доступные биоте [21, 22]. *BOB* принадлежит важная генетическая роль связую-

щего звена между биотой и почвой в биогеохимическом круговороте [3, 14].

Но компоненты *BOB* не только участвуют в формировании и обновлении системы гумусовых соединений почв [15, 16]. В условиях возросших антропогенных нагрузок на почвы и экосистемы *BOB* выступают своеобразной движущей силой, с помощью которой происходит самоочищение экосистем и почв в зоне тайги. Например, в лесопарковых ландшафтах г. Москвы (в почвах катены Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева), испытывавших заметную антропогенную нагрузку, еще в 1992–1993 гг. была изучена водная миграция компонентов *BOB* с помощью их сорбции на оксиде алюминия (Na^+) в колонках (табл. 4).

Установлено, что через 20 лет масштаб водной миграции *BOB* в почвах ЛОД стал значительно больше (табл. 5). Не исключено, что это было связано с возросшей антропогенной нагрузкой – частицами пыли, сажи, золы, в составе которых содержатся и тяжелые металлы (ТМ). Лесопарковые экосистемы ЛОД, находящиеся на территории столичного мегаполиса, реагируют на экотоксиканты путем усиления биогенной кислотности и водной миграции *BOB*. Например, в 1993 г. масштаб водной миграции *BOB* из горизонта лесной подстилки составил ($\text{г C}_{\text{орг}}/\text{м}^2/\text{год}$): на плакоре – 11.2 ± 1.0 , на склоне из того же горизонта – 8.2 ± 1.3 , в нижней 1/3 склона холма – 16.5 ± 1.8 . В современный период мобилизация *BOB* с кислотными свойствами из растительного опада и корневых выделений в фациях ЛОД выражена значительно более активно: $38.6 \pm 4.7 \dots 55.9 \pm 6.7 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$. С помощью *BOB* происходит самоочищение почв от экотоксикантов, чему способствует также промывной водный режим и обильное снеготаяние. Не исключено, что ответная реакция таежной биоты (и микроорганизмов), например, на ионы ТМ связана не только с увеличением масштаба миграции *BOB* в фациях ЛОД, но и изменением их компонентного состава – появлением среди компонентов *BOB* антибиотиков, полифенолов и микотоксинов – супертоксикантов, опасных для животных и людей. Возможно, поэтому травянистый покров на ЛОД выражен фрагментарно, с весьма низким видовым разнообразием лесных трав. Хотя это может быть связано и с затенением почв.

Исследуя водную миграцию *BOB* в почвах катены ЛОД, отмечены высокая подвижность и химическая активность их компонентов (табл. 5). Наибольший масштаб миграции *BOB* выявлен в почве под посадкой дуба, поскольку фация дуба

Таблица 4. Масштаб вертикальной нисходящей миграции *ВОВ* в дерново-подзолах контактно-осветленных супесчаных на двучленных отложениях (Лесная опытная дача РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, наблюдения 06.1992–06.1993 гг.)

Горизонт и глубина установки колонок, см	Общий углерод в почве, %	Вынос $S_{орг}$ <i>ВОВ</i> , г/м ² /год		Сорбция и минерализация <i>ВОВ</i> в почве, %
		верхний слой оксида алюминия	нижний слой оксида алюминия	
Плакор холма, квартал 11, лиственница				
О, 2	Не определяли	7.4 ± 0.6	3.80 ± 1.4	Не определяли
A1/Eh, 22	3.9 ± 0.2	1.2 ± 0.7	0.40 ± 0.15	85.7
Egh, 34	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.5	0.60 ± 0.4	Не определяли
EL'g, 57	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.13 ± 0.3	
Подошва склона холма, квартал 11, дуб				
О, 3	Не определяли	11.8 ± 3.2	4.70 ± 0.4	Не определяли
A1/Eh, 24	4.4 ± 0.5	3.5 ± 1.4	2.20 ± 0.3	65.5
Egh, 32	0.9 ± 0.4	1.4 ± 0.6	1.10 ± 0.3	Не определяли
EL'g, 63	0.5 ± 0.3	0.6 ± 0.5	0.45 ± 0.1	
Середина склона холма, квартал 11, сосна				
О, 1	Не определяли	5.3 ± 2.0	2.90 ± 0.7	Не определяли
A ₁ /Eh, 18	2.1 ± 0.9	3.8 ± 1.7	0.65 ± 0.4	45.1
Egh, 35	0.5 ± 0.4	2.6 ± 1.5	0.51 ± 0.2	Не определяли
EL'g, 70	0.2 ± 0.1	1.4 ± 0.9	0.32 ± 0.1	

Примечания. 1. В сорбционных лизиметрах использованы 2 слоя оксида алюминия. Повторность закладки колонок 3–4-кратная, указаны средние величины и σ ; $S_{орг}$ определяли в средних пробах 3–5 г оксида алюминия по методу Тюрина. В работе участвовал дипломник В. Зотиков. 2. В 1992 г. сорбционные лизиметры помогали закладывать профессора И.Г. Платонов и Л.В. Мосина.

расположена в нижней 1/3 очень пологого склона увала. В профиле почвы фации дуба отмечены более мощные гор. A0 и A1, чем в других фациях. В то же время для гор. A1 почвы в фации лиственницы отмечена более активная сорбция и минерализация *ВОВ*, очевидно, вследствие лучшей аэрации гор. A1. В почвах фации сосны нисходящий (абиогенный) вынос *ВОВ* был очень активен по всему профилю, что связано с супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом и трансформацией верхних горизонтов (70–80 см) почвы при ветровалах. Подчеркнем, что сложившиеся представления о доминирующей роли нисходящей водной миграции *ВОВ* в почвах таежной зоны нельзя признать корректными. На самом деле в почвах таежных экосистем отчетливо выражена пульсация восходяще-нисходящих миграционных потоков (табл. 5). Вынос веществ в значительной мере компенсируется их возвратом. Если бы в экосистемах тайги был ярко выражен только вертикальный нисходящий вектор миграции *ВОВ* и химических элементов, то почвы довольно быстро превратились в почвоподобные тела (неудоби), утратив свои важные геохимические функции, это явление не отмечали.

На основе полученных экспериментальных данных сформулированы механизмы образования ФК в почвах подзолистого типа тайги: ассоциативный, миграционный и комплексообразовательный. В первом случае при ассоциации молекул *ВОВ* в новые структуры ФК участие принимают, например, гидратированные ионы Fe^{3+} . Показано, что среди мобильных железобульватных комплексов диагностировано 53–67% ионов Fe(III), прочно связанных ФК. Искусственное введение в раствор низких концентраций шавелевой кислоты, наоборот, вызывает распад новообразованных ассоциатов ФК до низкомолекулярных мономеров *ВОВ* [14]. Реакции комплексообразования ФК и ионными формами Fe(III) наряду с перегруппировкой их молекулярных структур сопровождаются также рН-эффектом – некоторым подкислением почвенного раствора. Наличие значительных масс низкомолекулярных органических кислот в лесных подстилках тайги препятствует формированию высокомолекулярных гуминоподобных структур. Поэтому в лесных подзолистых почвах средней и северной тайги под лесной подстилкой не образу-

Таблица 5. Сезонный масштаб нисходящей миграции *ВОВ* и их состав в почвах Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева

Горизонт и глубина установки колонок, см	Объем воды в лизиметрах, л	$C_{орг} \text{ ВОВ, мг/л}$			Вынос $C_{орг} \text{ ВОВ, г/м}^2/\text{год}$	$C_{орг} \text{ ИОВ в составе ВОВ, \%}$	Сорбция и минерализация <i>ВОВ</i> гор. А ₁ , % к приходу
		в приемниках вод	в водоацетонном элюате с угля (ИОВ)	в аммонийном элюате с угля (ФС)			
Под кроной дуба, квартал 13, разр. 47, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва на морене, нижняя 1/3 склона, наблюдения – 1 год							
А0(О), 3	1.54	2.9	417 ± 57	95.8 ± 15	38.6 ± 5	81.3	–
А1, 14	1.15	6.3	74.2 ± 23	187 ± 26	19.7 ± 2	28.4	49.0
А1/ЕLh, 27	0.93	8.4	35.7 ± 13	217 ± 34	19.0 ± 2	14.1	3.6
Под кроной лиственницы, квартал 7, разр. 15Л, дерново-подзол. контактно-осветленный супесчаный на двухчленных отложениях, плакор, наблюдения – 1 год							
А0(О), 2	1.74	11.6	537 ± 109	205 ± 30	55.9 ± 7	72.4	–
А1/Еh, 15	1.43	8.8	204 ± 23	372 ± 34	43.4 ± 3	35.4	22.4
Еhg, 28	0.84	15.6	115 ± 19	227 ± 40	25.7 ± 2	33.6	40.8
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, наблюдения в период вегетации с 05.06. по 21.09							
А0(О), 2	0.25	1.4	89.5 ± 6	137 ± 15	17.1 ± 2.1	39.5	–
А1/Еhg, 16	0.22	3.6	37.9 ± 2	88.2 ± 5	9.5 ± 1.9	30.1	44.4
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, наблюдения в абиогенный период с 15.10 по 21.05							
А0(О), 2	1.22	4.8	314 ± 88	184 ± 54	37.5 ± 4	63.0	–
Еhg, 29	1.37	11.5	176 ± 30	220 ± 66	29.8 ± 3	44.5	20.5
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, опыт по изучению восходящей миграции с 15.10 по 21.05							
Еhg, 28	–	–	74.2 ± 16	193 ± 27	20.1 ± 3	27.8	Возврат 53.6%

Примечание. Сорбция *ВОВ* почвой отражает соотношение их масс на входе и выходе из генетического горизонта при миграции; заметная масса *ВОВ* при этом биodeградирует. В этом случае реализуется понятие “градиент барьера” миграции.

ется гумусово-аккумулятивный горизонт. Вместо него присутствует подзолистый горизонт, пропитанный миграционными формами *ВОВ* и железо-органическими комплексными соединениями. Данный процесс имеет ярко выраженный сезонный цикл: весной подзолистый горизонт выражен наиболее типично, а летом – это ложный гумусовый слой, нередко ошибочно принимаемый за дерновый горизонт.

Миграционный механизм образования *ФК* был обнаружен и изучен при прохождении *ВОВ* в профиле ряда почвенно-геохимических барьеров миграции: сорбционного органогенного (О_т), сорбционного органо-минерального (А1), элювиально-оглеенного (ЕLg). В основе указанного механизма, очевидно, лежат сорбционно-каталитические реакции с минералами (и коллоидами) и комплексобразование. Наиболее значимы для таежной биоты те низкомолекулярные фракции *ФК*, которые не насыщены ионами металлов и являются активными природными реагентами (и

мигрантами). Им принадлежит своеобразная и важная роль в почвенно-геохимической миграции ионов ТМ в ландшафтах тайги, а также в модификации и стабилизации коллоидных систем Si, Fe, AL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что в транс-аккумулятивной фации Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева (под кроной дуба) в годовом цикле миграции заметно выражена сорбция водорастворимых органических веществ (*ВОВ*) в горизонте А1. В этом горизонте задерживается 49% мигрируемых масс *ВОВ*. Горизонт А1/Еh является транзитным для *ВОВ* и сорбция почти не выражена.

На плакоре, под кроной лиственницы, в горизонте А1/Еh отмечен аккумулятивно-элювиальный процесс: в этом случае закреплялось только 22.4% мигрирующих масс *ВОВ*, хотя в горизонте

E_{hg} отмечена более масштабная сорбция *ВОВ*. В период вегетации водная миграция *ВОВ* в почвах ЛОД была выражена менее масштабно (из-за биодegradации *ВОВ* микроорганизмами), причем в составе *ВОВ* преобладали вещества фульвокислотной природы, более устойчивые к биодegradации.

С помощью методов радиоактивных индикаторов и сорбционных лизиметров исследованы миграционные потоки *ВОВ*, их статьи баланса и некоторые экологические функции. В почвах таежных экосистем установлена скорость эмиссии CO_2 из почвы — $30.4 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$. Оптимальная концентрация CO_2 в воздухе составляла 330–420 ppm. Установлено, что углеродсодержащие вещества жидкой и газовой фаз таежных экосистем генетически взаимосвязаны, но их функции исследованы пока недостаточно.

Становление экологической парадигмы, основанной на познании нативных форм гумусовых веществ, было осуществлено при изучении почв и экосистем тайги. В этом случае процесс таежного гумусообразования связан с биогенным кислотообразованием при активном участии в нем микроскопических плесневых грибов — *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus*. В экосистемах тайги формируются разнообразные по составу, структуре и свойствам *ВОВ*, как функция таежной биоты. Компоненты *ВОВ* отличаются химической активностью, кислотными и аллелопатическими свойствами, позволяя таежной биоте эффективно и устойчиво функционировать в суровых условиях климата, на бедных почвообразующих породах, при промывном водном режиме и оглеении почвенных горизонтов. *ВОВ* — доступный источник веществ и энергии для микроорганизмов. Используя компоненты *ВОВ*, микроорганизмы изменяют их состав и свойства — появляются новые устойчивые фракции органических веществ.

Выражаем благодарность за участие в полевых опытах профессору И.Г. Платонову и А.И. Карпухину, за методическую помощь в работе — профессору А.Д. Фокину, доценту А.С. Пельцеру и старшему научному сотруднику Е.И. Шестаковой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпухин А.И., Яшин И.М., Черников В.А. Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов // Изв. ТСХА. 1993. Вып. 2. С. 107–126.
2. Мотузова Г.В., Зорина А.В., Степанова А.А. Водорастворимые органические вещества подстилок AL-Fe-гумусовых подзолов Кольского полуострова // Почвоведение. 2005. № 1. С. 65–73.
3. Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России М.: Наука, 2007. 315 с.
4. 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.
5. Тюрюканов А.Н., Федоров В.М., Тимофеев-Ресовский Н.В. Биосферные раздумья. М.: АЕН РФ, 1996. 368 с.
6. Фокин А.Д. Исследование процессов трансформации, взаимодействия и переноса органических веществ, Fe и фосфора в подзолистой почве: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ТСХА, 1975. 28 с.
7. Яшин И.М., Кащенко В.С. Миграция водорастворимых органических соединений в супесчаных глееподзолистых почвах Севера Европейской части СССР // Изв. ТСХА. 1984. Вып. 6. С. 59–71.
8. Яшин И.М. Об эффекте “гумусовой занавески” в глееподзолистых почвах северной тайги Архангельской области // Сб. тр. “Экология и почвы”. Избр. лекции. Пушино: ИФХ и БПП РАН, 2005. С. 319–330.
9. Яшин И.М. Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ–МСХА, 2013. 183 с.
10. Guggenberger G., Zech W. Dissolved organic carbon in forest floor Leachates: simple degradation products or humic substances? // Sci. Total Environ. 1994. V. 152. Iss. 1. P. 37–47.
11. Шамрикова Е.В. Кислотность почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России. СПб.: Наука, 2013. 157 с.
12. Шишов Л.Л., Кауричев И.С., Большаков В.А., Яшин И.М. Лизиметры в почвенных исследованиях. Монография. М.: РАСХН, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1998. 264 с.
13. Яшин И.М., Черников В.А., Карпухин А.И. Содержание и состав водорастворимых органических веществ в поверхностных природных водах Европейского Севера // Изв. ТСХА. 1990. Вып. 3. С. 68–83.
14. Яшин И.М. Водорастворимые органические вещества почв таежной зоны и их экологические функции: Дис. ... д-ра биол. наук. М.: МСХА, 1993. 726 с.
15. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 296 с.
16. Карпачевский Л.О., Яшин И.М. Предисловие к тез. докл. 1-й Всерос. конф. “Лизиметрические исследования почв” (6–10 июля 1998 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова). М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 8–12.
17. Umwelt-Gerate-Technik (Katalog): Lysimeterver-suche. Munchenberg, 2011. 209 s. (www.ugt-online.de)
18. Яшин И.М., Черников В.А. Опыт применения хроматографии в почвоведении и экологии. Монография / Под ред. Яшина И.М. М.: РГАУ–МСХА, 2017. 240 с.
19. Лукина Н.В., Никонов В.В. Кислотность подзолистых AL-Fe-гумусовых почв сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 1997. № 7. С. 879–891.

20. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. Уч. изд-е. Пер. с англ. / Под ред. Кретовича В.Л. М.: Мир, 1986. Т. 1 – 392 с., Т. 2 – 312 с.
21. Яшин И.М., Васенев И.И., Черников В.А. Экогеохимическая оценка почв заповедников Европейского Севера России. Монография / Под ред. Яшина И.М. М.: РГАУ–МСХА, 2019. 212 с.
22. Яшин И.М., Кауричев И.С., Черников В.А. Экологические аспекты гумусообразования // Изв. ТСХА. 1996. Вып. 2. С. 59–71.
23. Яшин И.М. Трансформация растительных остатков и формирование мобильных групп гумусовых веществ в почвах тайги // Сб. мат-лов Всерос. научн. конф. с международ. участием, посвящ. 110-летию со дня рожд. Р.В. Ковалева – первого директора ин-та ИПА СО РАН “Почвы Сибири: вызовы 21-го века”. Новосибирск, 15–17 сентября 2017. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2017. С. 123–129.
24. Яшин И.М., Раскатов В.А., Шишов Л.Л. Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА, 2003. 316 с.
25. Яшин И.М. Методология и опыт исследования органических веществ лизиметрических (и природных) вод таежных ландшафтов // Мат-лы Междунаро. симп. “Методы исследования органического вещества почв”. Владимир: РАСХН, 2005. С. 481–487.
26. Кудярова А.Ю. Использование сорбционных лизиметров для изучения влияния фосфатов на перенос в почве металлов и органического углерода // 1-й Всерос. конф. “Лизиметрические исследования почв” (6–10 июля 1998 г., Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова). М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 101–104.
27. Yashin I.M. Migration of water-soluble organic substances as related to soil cover structure in taiga landscapes // Euras. Soil Sci. 2002. 35. P. 78–89.

Migration Flows, Balance and Functions of Water-Soluble Organic Substances in Soils of Taiga Ecosystems

I. M. Yashin^a, V. A. Chernikov^a, and S. L. Belopukhov^{a,#}

^a Russian State Agrarian University–Moscow Timiryazev Agricultural Academy
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: belopuhov@mail.ru

Using the methods of radioactive indicators and sorption lysimeters in hospitals, the mobilization, biodegradation, balance and functions of water-soluble organic substances (*WOS*) in podzolic soils of the southern (Moscow region) and middle taiga Arkhangelsk region were studied. One of the possible mechanisms is substantiated, as well as the rate of gas emission (in particular, CO₂) from podzolic soils during the transformation of the *WOS* by groups of microorganisms. In field experiments it was found that the highest rate of CO₂ emission from the newly formed *WOS* masses occurs in arable soils in comparison with forest analogues, in which this value is 30.4 mg/m² CO₂ per day. Soil gleying significantly inhibits the transformation of *WOS* molecules to the final products of biodegradation; in this case, the so-called “intermediate” organic substances with allelopathic properties are formed. With waterlogging of soils, along with CO₂, gases are formed with reducing functions – H₂S, CH₄.

Key words: CO₂ emission, water-soluble organic substances, sources of carbon dioxide, photosynthesis (dark and light phases), taiga ecosystems, soils, humus formation.