

УДК 631.445.2(470.11):[631.412+631.417

ОСОБЕННОСТИ МОБИЛИЗАЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

И. С. КАУРИЧЕВ, И. М. ЯШИН, А. И. КАРПУХИН, И. Г. ПЛАТОНОВ

(Кафедры почвоведения, экологии, земледелия и методики
опытного дела)

В подзолистых почвах Вилегодского и Няндомского стационаров Архангельской области изучали направленность и скорость трансформации растительных остатков (меченных ^{14}C), а также мобилизацию и масштаб вертикальной нисходящей миграции водорастворимых органических веществ кислотной природы.

Уникальной и динамичной стадией биогеохимического круговорота органической формы углерода в биосфере Земли является трансформация растительного опада в почвах [3, 6, 13, 17, 18]. Циклично повторяясь в почвенном пространстве — времени, этот сложный биохимический процесс в той или иной мере завершается формированием новообразованных групп гумусовых соединений. Разнообразные органические вещества, синтезированные фотосинтетическим путем в растительных организмах, со временем трансформируются в почвенном опаде в самоорганизованную и устойчивую в конкретных условиях среды систему гумусовых веществ [7, 9, 18].

С целью оценки направленности и скорости трансформации различных растительных материалов в лесных и пахотных почвах европейского Севера на кафедре почвоведения Тимирязевской академии были выполнены комплексные исследования при использовании сов-

ременных методов: радиоактивных индикаторов, хроматографии и сорбционных лизиметров [1—4, 6, 12—15]. Установлена, в частности, своеобразная роль компонентов водорастворимых органических веществ (ВОВ) в образовании водорастворимых органо-минеральных соединений [4] и формировании гумусово-аккумулятивного горизонта дерново-подзолистых почв [1, 6], миграционном обновлении молекул гумусовых веществ [12], подзолообразовании [3] и питании растений [13]. Однако научные изыскания охватывали преимущественно почвенно-геохимические ландшафты подзоны южной тайги. Сведений о процессах почвообразования в типичных регионах таежно-лесной зоны — средней и северной тайге — пока недостаточно [14, 15]. В этой связи нами были проведены разноплановые лабораторные и натурные исследования мобилизации и трансформации ВОВ в подзолистых почвах лесных ландшафтов южной части Архангельской области.

Методика

В лабораторных условиях изучали органические продукты (группы ВОВ), активно образующиеся в результате компостирования органических субстратов таежных биоценозов (лесных оторфованных подстилок, эпифитных лишайников, корокомпостов и др.) при избыточном увлажнении ($t=20^{\circ}\text{C}$). Полученные водные экстракты, как правило интенсивно окрашенные, фракционировали методом сорбционной хроматографии на активированном угле с целью диагностики состава и свойств групп ВОВ [2, 15].

Тотально меченную ^{14}C массу (50 мг) ячменя¹ (*Hordeum distichon*) тщательно перемешивали с объемом почвы (9 см³) и вносили на стационарные площадки Вилегодского стационара под лесную подстилку на глубину 3 см, а в пахотных почвах — на глубину 10—13 см в 2-кратной повторности. Активность исходного растительного материала составляла 69 707 имп/мин на 50 мг субстрата.

В течение 4-летнего цикла наблюдений (1982—1985) изучали скорость трансформации растительных остатков (по ^{14}C), с помощью координатного метода определяли пространственно-временное перераспределение ^{14}C в составе ВОВ: вертикальную нисходящую миграцию в почве, поступление в растения, сорбцию компонентами почвы.

Через заданные интервалы времени из мест внесения меченых растительных остатков послойно (че-

рез 1, 4 и 8 см) отбирали образцы из объема почвы (в форме прямоугольной призмы $5\times 1\times 1$ см, площадь сечения 1 м^2) до глубины 1 м. Из проб почвы тщательно удаляли неразложившийся органический материал и корни растений [12, 13].

Включение мобильных органических продуктов разложения изучаемого субстрата в педогенные гумусовые соединения диагностировали путем их 4-кратной десорбции из отдельных образцов почвы растворами 0,1 н. H_2SO_4 и 0,1 н. $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ [9]. Степень радиоактивности проб почв и растительности измеряли на приборе ПП-8 («Волна») с газоразрядным счетчиком Т-25-БФМ, а в растворах — на автоматическом приборе «Rackbeta», модель 1219 фирмы «LKB» Wallac.

Полевые опыты проводили на стационарах кафедры почвоведения, расположенных в Няндомском и Вилегодском районах Архангельской области [5, 15]. Стационары были заложены на типичных почвах после осуществления крупномасштабной и детальной почвенных съемок. На Вилегодском стационаре изучали превращение растительных остатков, меченных ^{14}C , в аутоморфной и полугидроморфной глубокоподзолистых легкосуглинистых почвах под лесной растительностью (ельниками-зеленомошниками), а также в глубокоподзолистой пахотной легкосуглинистой почве, сформированной на покровных отложениях (табл. 1). На Няндомском стационаре в лесном биоценозе (ельнике-черничнике зеленомошном II бонитета) по сезонам года исследовали вертикальную нисходяще-восходящую миграцию ВОВ в сильноподзолистых иллювиально-гумусово-железистых супесчаных почвах с помощью метода сорбционных лизиметров. В качестве сорбентов использовали активирован-

¹ Образцы получены согласно методике [12] на кафедре применения радиации и изотопов в сельском хозяйстве. Авторы выражают благодарность профессору В. В. Рачинскому за предоставленную возможность работы с радиоактивными изотопами.

Таблица 1

Некоторые свойства подзолистых почв Вилегодского стационара

Горизонт и глубина отбора образцов, см	Гумус, %	pH _{сол}	H _{об}	S	H _г	Доступные формы		Содержание, %, в почве частиц, мм	
			мг·экв/100 г			P ₂ O ₅	K ₂ O		
								мг/100 г	
Автоморфная глубокоподзолистая легкосуглинистая (П_лП)									
A ₀ A ₁ (2—6)	—	3,9	9,1	34,0	5,5	7,0	132,0	—	—
E (11—21)	0,9	3,9	2,7	1,8	8,7	11,8	6,8	10,4	21,8
E (30—40)	0,3	4,1	1,5	1,3	5,0	15,5	4,2	6,4	13,7
EB (45—55)	0,2	3,6	2,8	10,0	8,8	10,8	14,5	27,8	36,0
B (75—85)	0,2	3,7	1,1	17,8	5,8	18,0	13,3	33,5	41,7
C (220—230)	—	4,3	0,0	16,9	0,0	16,9	13,2	25,1	34,8
Полугидроморфная глубокоподзолистая глеевая (П_лП)									
A ₀ A ₁ (5—10)	—	3,6	1,6	40,0	5,9	10,2	142,0	—	—
E _g (10—20)	2,7	3,7	4,4	2,9	13,2	10,2	7,0	19,2	28,4
E (25—35)	1,2	3,7	4,0	2,6	10,8	9,6	6,6	19,5	26,0
EB (48—58)	0,7	3,6	4,5	3,4	14,5	21,5	8,5	21,3	29,6
B (85—95)	0,2	3,8	0,6	18,2	4,0	11,0	16,5	36,6	49,2
G (200—210)	—	4,8	0,2	19,8	2,8	27,5	17,0	36,2	52,1
Пахотная глубокоподзолистая (П_лП)									
A _p (0—25)	1,5	4,8	0,0	5,2	3,0	19,5	28,6	9,1	20,4
E (30—40)	0,4	4,0	1,3	2,2	4,4	4,8	9,1	8,1	17,9
EB (55—65)	0,2	3,8	2,1	9,5	7,7	8,0	13,9	25,1	34,9
B (80—90)	0,3	3,7	1,7	14,4	7,5	12,0	17,3	34,2	44,0
C (215—225)	—	4,1	0,2	17,9	3,0	26,0	17,0	33,0	43,2

ный уголь и оксид алюминия для хроматографии [2]. Обычно последний сорбент слоем 1,5—2 (3 см) располагали в нижней части сорбционных колонок, а активированный уголь (фракция 0,25—0,5 мм) сосредоточивали в верхней части установок. Сорбенты разделяли 3-сантиметровым слоем чистого кварцевого песка, отмытого от железа. Контакт колонок с почвой осуществляли через 2—3-сантиметровый слой песка, который хорошо сохранял сорбенты от заиливания.

Для изучения вертикальной нисходящей миграции ВОВ в подзолистых почвах испытывали различные геометрические формы и объемы сорбционных сосудов применительно к почвам неоднородного гранулометрического состава. В та-

ежном лесу сорбционные лизиметры с приемниками вод устанавливали в почвенном профиле под кронами модельных деревьев, в «окнах» между ними, под типичными моховыми кочками (высотой 42 и диаметром у основания 87 см) и лесной подстилкой (гор. A₀^г и A₀^{лн}). Лизиметры закладывали в 1986—1990 гг. в 3—4-кратной повторности под основные генетические горизонты.

Получение подобной информации даст возможность наиболее полно оценить ту обстановку, в которой реализуется стадийный биохимический процесс превращения растительной мортмассы в специфичные гумусовые соединения при устойчивом присутствии в почвенных растворах подзолистых почв ВОВ кислотной природы, среди которых ди-

агностированы и поверхностно-активные вещества [2, 3, 6, 15].

Результаты

Почвенный покров стационаров представлен различными комбинациями элементарных ареалов почв, поэтому при выборе стационарных площадок исходили из необходимости обстоятельного изучения характера почвенных структур [16], состава и свойств почв, специфики гумусовых соединений [5].

Подзолистые почвы Вилегодского стационара имеют хорошо развитый, четко дифференцированный на генетические горизонты почвенный профиль. Им свойственны кислая реакция среды по всему профилю, насыщенность щелочноеземельными основаниями, слабая гумусированность и четкое перераспределение илестых частиц (табл. 1). Для гумуса изучаемых почв характерен фульватный и гуматно-фульватный состав. В частности, в пахотных подзолистых почвах соотношение ГК и ФК равно 0,74. В составе гумуса (в A_p) на долю углерода фульвосоединений (ФС) приходится 38,0 %, гуминовых соединений — 28,4, негидролизуемого остатка — 33,6 %.

Состав гумуса подзолистой иллювиально-гумусово-железистой супесчаной почвы Няндомского стационара по всему профилю фульватный. При этом на долю наиболее агрессивной фракции фульвокислот (1а), переходящей в 0,1 н. H_2SO_4 элюат, в частности из горизонта $V_h(f)$, приходится почти 49 % $C_{общ}$ органического вещества, причем в составе ФС, как это следует из результатов колоночной сорбционной хроматографии на активном угле, количество углерода индивидуальных органических соединений составляет 39—43 % $C_{ФС}$, содержа-

щихся в сернокислой вытяжке.

Подобный генезис гумуса, характеризующегося высокой химической активностью по отношению к тем или иным компонентам почвы и заметной миграционной способностью, обусловлен спецификой функционирования таежных лесных биоценозов.

Таежно-лесным биоценозам европейского Севера свойственна преимущественно напочвенная аккумуляция растительного опада, где сосредотачиваются элементы-органогены [9, 11]. Поверхностная локализация в почвенном пространстве органогенного субстрата, групп микроорганизмов и почвенных животных, а также присутствие в наземном покрове таежных лесов мхов и лишайников, кустарничков и корней древесной растительности позволяют устойчиво продуцировать в водный раствор значительное количество энергоемких групп ВОВ с ярко выраженными кислотными свойствами [1—4, 9, 11, 14, 15]. Благодаря биологическому кислотообразованию живые организмы достаточно эффективно воздействуют на минеральный субстрат почвы, вследствие чего происходит мобилизация доступных элементов питания. Из-за отсутствия (или менее эффективного) аналогичного механизма у культурных растений, возделываемых на подзолистых почвах, их развитие без комплексной мелиорации (известкование, внесение удобрений, отвод избытка влаги и т. д.) чрезвычайно затруднено.

ВОВ продуцируются в раствор вследствие не только функционирования живых организмов, но и продолжительного затопления растительного опада водой, например ранней весной при таянии снега в таежном лесу, а также осенью в период образования верховодки [14].

Таблица 2

Фракционирование ВОВ, мобилизованных в раствор из органогенных субстратов подзолистых почв, на активированном угле (отбор проб — 14/XI—89; 100 г растительной массы заливали 1,0 л воды; экспозиция 166 сут)

Объект исследования и срок отбора проб	рН _{вод}		Собщ ВОВ в растворах, мг/л	Сорбция ВОВ активированным углем, % к С _{исх}	Состав ВОВ, % Собщ в активированном угле		Десорбция ВОВ с активированного угля, %
	начало опыта	конец опыта			водацетонный элюат	аммиачный элюат	

Подзона северной тайги (Холмогорский стационар)

Лесная подстилка:							
гор. А ₀ ^г (0—5 см)	4,55	5,82	148,2	96,1	49,7	37,1	86,8
гор. А ₁ ^п (6—11 см)	4,60	5,70	202,4	96,6	30,3	53,1	83,4
Эпифитные лишайники и мелкие веточки ели	4,20	4,39	230,3	90,1	89,3	10,3	99,6
Живые растения брусники	5,40	6,25	701,1	96,3	40,1	5,6	45,7

Подзона средней тайги (Няндомский стационар)

Лесная подстилка, гор. А₀^п (3—9 см)

14/XI—89 г.	4,20	4,33	205,2	95,6	20,7	30,7	51,4
14/IX—87 г.*	4,07	2,31	126,4	98,2	49,1	49,6	98,7
18/IX—87 г.*	4,32	3,10	93,6	94,5	20,1	78,3	98,4

* Органогенные субстраты массой 150 г заливали 1 л дистиллированной воды в 3-литровых стеклянных банках с притертыми пробками и настаивали в темноте при температуре 20 °С в течение 320 сут. Полученные растворы ВОВ были профильтрованы через воронку с беззольным бумажным фильтром и фракционированы затем на активном угле (масса 40—50 г) по схеме Форсита [15].

Результаты серийных модельных экспериментов, в которых изучали мобилизацию ВОВ из растительного опада в раствор [15], свидетельствуют о своеобразии этого процесса, протекающего при участии микроорганизмов (на что указывают заметно варьирующие во времени значения рН). Процесс мобилизации ВОВ характеризуется высокими интенсивностью и стадийностью (изменяется состав ВОВ), причем накапливающиеся продукты трансформации растительных субстратов, в свою очередь, влияют на функционирующие микроорганизмы.

Состав ВОВ, продуцируемых в растворимое состояние, неоднороден и зависит от типа опада, географического

положения почв, сезона, когда отбирали растительные субстраты для исследования и т. д. Так, из образцов торфяно-перегнойной лесной подстилки, отобранных по окончании биологически активного периода (в сентябре) на Няндомском стационаре, в раствор мобилизовались ВОВ, в составе которых заметно преобладали специфические компоненты, в том числе и ФС. Из лесной подстилки, отобранной весной после длительного абиогенного периода, в раствор поступало одинаковое количество индивидуальных органических веществ и специфических соединений (табл. 2).

В водных экстрактах из лесной подстилки (горизонт А^г) Холмогор-

Таблица 3

Фракционирование ВОВ, мобилизованных в раствор из корокомпостов* при их затоплении водой, на активированном угле (50 г сухого компоста заливали 600 мл воды в банках с притертыми пробками; экспозиция 134 сут)

Тип корокомпоста	рН _{вод}		Со щ ВОВ в конце опыта, мг/л	Сорбция ВОВ активированным углем, % к С _{исх}	Состав ВОВ, % С _{общ} в сорбенте		Десорбция ВОВ с активированного угля, %
	начало опыта	конец опыта			водацетонный элюат	аммиачный элюат	
Дробленая кора хвойных пород (частицы 0,25—2,0 мм)	4,35	5,92	5375,4	99,5	43,2	28,0	71,2
Компост короминеральный, навозный:							
весенней закладки	6,00	7,45	1456,6	97,6	86,6	12,6	99,2
осенней закладки	5,90	7,50	901,7	86,5	42,6	51,4	94,0
Компост сложный (зимней закладки)	7,15	7,95	728,3	88,1	61,8	29,0	90,8
Компост короминеральный с добавкой СО (NH ₂) ₂	6,00	7,50	1401,8	88,8	77,2	15,0	92,2

* Корокомпосты были любезно предоставлены старшим научным сотрудником Архангельского научно-исследовательского института леса и лесохимии Л. А. Варфоломеевым.

ского стационара в основном присутствовали индивидуальные органические компоненты. Их количество в составе ВОВ резко доминировало в водных растворах из эпифитных лишайников и мелких веточек молодой ели.

Установлено, что из вегетативных органов кустарничков, например брусники, локализуемой в таежном лесу по небольшим моховым кочкам и приствольным повышениям, в водный раствор поступает большое количество ВОВ, среди которых преобладают индивидуальные органические вещества. Из грубогумусного горизонта лесной подстилки (A₀^{III}) в раствор продуцируются как специфические, в том числе органические соединения фульвокислотного характера, так и индивидуальные органические компоненты.

В связи с интенсификацией земледелия на европейском Севере для повышения плодородия пахотных подзолистых почв стали использоваться компосты, приготовленные, в частности, на основе отходов деревоперерабатывающих производств — мелкофракционной коры хвойных пород. Поэтому представляло интерес изучить состав ВОВ, мобилизуемых в растворимое состояние из компостов, чему и были посвящены лабораторные эксперименты (табл. 3). Все изученные корокомпосты характеризовались высокой мобилизующей способностью по отношению к ВОВ. Однако добавки, внесенные в техногенные смеси в виде минеральных удобрений, способствовали заметному уменьшению кислотности групп ВОВ в сравнении с контролем. В составе ВОВ, продуцируемых из корокомпостов в

водный раствор, преобладали преимущественно неспецифические органические вещества, количество которых в растворах варьировало в зависимости от сезона закладки компостов в бурты и продолжительности их компостирования.

Дробленая кора хвойных пород (контроль) отличалась наиболее высокой способностью продуцировать в раствор ВОВ, концентрация которых к концу опыта превышала 5,3 г углерода в 1 л. Сорбированные активированным углем группы ВОВ по-разному элюировались с сорбента: неспецифические органические вещества слабо удерживались активированным углем и легко десорбировались 90 % водным ацетоном, а собственно ФС более прочно поглощались этим сорбентом и неполно элюировались в первом цикле десорбции 2 % водным раствором NH_4OH .

Опыты с корокомпостами нуждаются в дальнейшем обосновании. При этом в натуральных опытах принципиально важно изучить характер и интенсивность воздействия продуктов разложения корокомпостов на компоненты почвы — органическое вещество, почвенные минералы и микрофлору.

Мобилизованные в растворимое состояние ВОВ в таежном биоценозе трансформируются при миграции по профилю почв подзолистого типа [1, 9, 10, 13, 15]. Миграционную способность того или иного химического соединения оценивают с помощью лизиметрического и радиоизотопного методов. В качестве критерия миграции водорастворимых веществ можно использовать такой показатель, как R_p , который в определенной мере характеризует запаздывание движения химического соединения в конкретном слое (профиле) почвы по сравнению с перемещением потока гравитационной

воды, если изучаемое вещество сорбируется по выпуклой изотерме сорбции [10, 13].

Количественным показателем миграции мобильных химических соединений в почвах (в том числе и групп ВОВ) является вынос водорастворимых веществ с единицы площади 3-мерного почвенного пространства за год, сезон, месяц.

Путь миграции, в частности миграции ВОВ по профилю подзолистой почвы, можно выразить единицами длины конкретного почвенного горизонта (l, см). Однако в процессе миграции компоненты ВОВ перераспределяются между жидкой и твердой фазами. Поэтому в дальнейших расчетах трудно обойтись без знания концентраций органических веществ в растворе и почве. При этом состав и содержание ВОВ в жидкой фазе отражают, с одной стороны, своеобразие мобилизации компонентов ВОВ из растительных остатков и самой почвы, а с другой — особенности превращения ВОВ в процессе сорбционно-десорбционного (хроматографического) нисходящего перемещения с потоком воды. Например, масштаб вертикальной нисходящей миграции ВОВ из того или иного генетического горизонта подзолистой почвы можно оценить исходя из уравнения

$$W = \frac{VC}{St} = \frac{2,7 \text{ л} \cdot 0,250 \text{ г/л}}{6,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ год}} = 101,7 \text{ г/м}^2 \cdot \text{год}^{-1},$$

где W — миграционный поток ВОВ (по результатам натурального опыта из горизонта A_0^{III} подзолистой почвы Няндомского стационара за 1 год); V — объем воды, профильтровавшейся через сорбционную колонку (с активированным углем и Al_2O_3) и поступившей в приемник

(2,7 л); C — концентрация ВОВ в природном почвенном растворе (для Няндомского стационара, например, в среднем составляет 0,250 г углерода ВОВ в 1 л); S — площадь сечения потока гравитационной воды, заданная в виде площади сечения сорбционного лизиметра (в опыте 66,4 см²); t — время функционирования лизиметров (1 год).

В большинстве случаев реальные величины миграционных потоков ВОВ обычно в несколько раз меньше [2, 13, 14]. Это обусловлено, на наш взгляд, с одной стороны, использованием в сорбционных лизиметрах только одного типа сорбента, например Al_2O_3 , возможными методическими ошибками при лабораторной диагностике углерода ВОВ (в частности, в кислотной форме), а с другой — интенсивной минерализацией ряда компонентов ВОВ в некоторых типах сорбентов, так как последние активно сорбируют разные группы микроорганизмов.

Результаты стационарных опытов, в которых изучалась миграция ВОВ, свидетельствуют, во-первых, о широкой амплитуде колебаний концентрации ВОВ в пространстве и, во-вторых, о неоднозначном характере путей перемещения (миграции) данной группы органических соединений в почвенном объеме. Содержание ВОВ в таежных почвах зависит как от типа почв и вида лесной растительности, так и от мощности оторфованного слоя подстилки, в которой формируются ВОВ. Например, под кроной молодой ели в средней тайге Няндомского стационара из подстилки выщелачивается 35,8 г/м²·год⁻¹ углерода ВОВ, из под моховой кочки (высотой 42 см и диаметром 87 см) — 34—40,0, из подстилки между кронами деревьев — в среднем 19,3 г/м² × год⁻¹ (табл. 4).

Характер водной миграции групп ВОВ в подзолистой почве в значительной мере определяется ее морфологией и гранулометрическим составом. В песчано-супесчаном аналоге формируется 5—7-сантиметровый (темно-бурый) миграционный фронт ВОВ, диагностирован также его горизонтальный перенос. Морфогенетические наблюдения позволили установить, что миграционный фронт ВОВ, который был зафиксирован ранней весной (начало мая) непосредственно под подстилкой, к сентябрю достиг горизонта $V_{h(t)}$. Геохимическим барьером при нисходящей водной миграции ВОВ по профилю изучаемой почвы является иллювиально-гумусово-железистый горизонт. Соотношение групп ВОВ в водных растворах при их миграции несколько варьирует вплоть до горизонта $V_{h(t)}$, причем группы ВОВ преимущественно представлены органическими соединениями индивидуальной природы. На выходе из горизонта $V_{h(t)}$ в почвенном растворе уже заметно преобладают специфические группы ВОВ, в том числе и ФС.

Лизиметрические исследования показали, что в летний период из лесной подстилки (Няндомский стационар) выщелачиваются преимущественно индивидуальные органические вещества, очевидно, как вследствие их более активного синтеза в растительных тканях и продуцирования в раствор, так и из-за низкой биокаталитической активности почвенных соединений.

Таким образом, мобилизация ВОВ кислотной природы из различных органогенных субстратов в лесных биоценозах (и вегетативных органов растений) является типичным биогенным процессом, сопутствующим функционированию сообществ живых организмов.

Таблица 4

Масштаб вертикальной миграции ВОВ и их состав в подзолистых иллювиально-гумусово-железистых почвах под моховой кочкой Няндомаского стационара (в сорбционных лизиметрах располагали 2 слоя сорбента: нижний — Al_2O_3 , верхний — активированный уголь; экспозиция 6/VII—86 — 6/VII—87 гг.

Генетический горизонт и глубина установки колонок, см	С ВОВ						Содержание С ВОВ в водно-ацетоновом элюате, % Собщ в сорбентах
	общий		Al_2O_3		активированный уголь***		
	концентрация, мг/л	вынос, $\frac{г/м^2 \times}{\times год^{-1}}$	в элюатах, мг/л	$\frac{г/м^2 \times}{\times год^{-1}}$	в элюатах, мг/л	$\frac{г/м^2 \times}{\times год^{-1}}$	
O_1 (8)	432,1	40,0	$\frac{15,0}{87,0}$	19,3	$\frac{220,5}{109,6}$	20,7	67,7
A_2 (23)	392,0	30,0	$\frac{6,0}{79,5}$	7,2	$\frac{193,8}{112,7}$	22,8	63,2
Колонки на горизонте $V_{h(t)}$ (48) (восходящая миграция)	—	—	$\frac{17,6}{75,0}$	26,5	$\frac{96,5}{152,2}$	46,4	16,6
Колонки под горизонтом $V_{h(t)}$ (64)	273,2	21,7	$\frac{17,5}{90,0}$	7,5	$\frac{32,5}{133,2}$	14,2	33,1
O_1 (3)	232,6***	9,7	—	—	$\frac{130,7}{71,3}$	9,7	79,4

* Числитель — десорбция 1 н. H_2SO_4 ; знаменатель — 2 % NH_4OH .

** Числитель — десорбция 90 % водным ацетоном; знаменатель — 1 н. $NaOH$.

*** Сорбционные лизиметры заложены с 20/VI по 15/IX—88 г. (с учетом С ВОВ в приемнике вод), их объем — 0,36—1,1 л.

С целью количественного обоснования данных положений на Вилегодском стационаре был заложен полевой опыт по изучению трансформации растительного опада (ячменной соломы), меченного ^{14}C , в поверхностных слоях подзолистых почв (табл. 5—7).

Анализ результатов опыта свидетельствует о высокой степени трансформации исследуемого органического материала (94,2 %) в пахотной подзолистой почве, что, очевидно, обусловлено более благоприятными условиями развития микроорганизмов, чем в лесных аналогах. В целинных подзолистых почвах полугидроморфного ряда

степень превращения растительных остатков оказалась минимальной (70,5 %).

Продукты трансформации органических субстратов — различные группы ВОВ — в почвенных растворах претерпевают самые разнообразные изменения: минерализуются микроорганизмами (как легкоусвояемый и весьма энергоемкий материал), сорбируются почвенными соединениями, мигрируют в глубь почвы с гравитационной водой, участвуют в обновлении педогенного гумуса, питания растений.

Новообразованные ВОВ в подзолистых почвах активно вымываются из верхних горизонтов атмосфер-

Таблица 5

Внутрипрофильное (миграционное) распределение ^{14}C по слоям подзолистых почв Вилегодского стационара (отбор проб через 2 года, в скобках — через 4 года)

Глубина миграции ^{14}C в составе ВОВ, см	Лесные почвы				Пахотная почва	
	П _л П		П _л П			
	1	2	1	2	1	2
В точке внесения	785 (220)	73,9 (38,9)	711	68,7	395	59,8
По профилю почвы:						
1	50 (50)	4,7 (8,8)	55	5,3	38	5,8
2	44	4,1	66	6,4	41	6,2
7	40 (49)	3,8 (8,7)	56	5,4	42	6,4
17	44 (58)	4,1 (10,3)	60	5,8	33	5,0
27	42 (66)	4,0 (11,7)	35	3,4	56	8,5
37	57 (68)	5,4 (12,0)	52	5,0	55	8,3
Сумма	1062 (565)	100,0	1035	100,0	660	100,0

Примечание. 1 — активность проб почвы, имп/мин; 2 — % суммарной активности исходного органогенного субстрата.

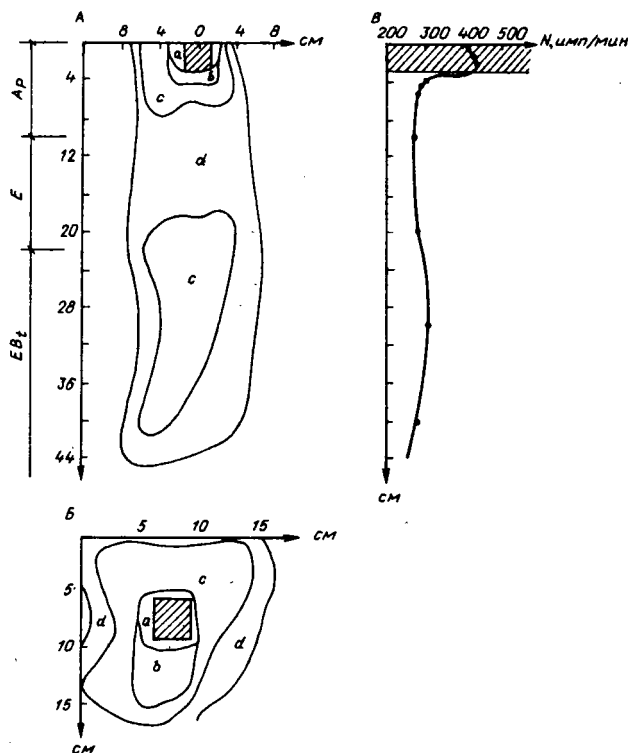
Таблица 6

Распределение ^{14}C по основным группам гумусовых соединений подзолистых почв Вилегодского стационара (% суммарной активности исходного субстрата, через 2 года опыта)

Исследуемая почва (индекс)	Активность отобранных проб почвы без остатков растений, имп/мин	С ФС почв в вытяжках			С гуминовых соединений	С в негидролизуемом остатке
		0,1 н. H_2SO_4	0,1 н. $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$	всего		
В зоне внесения (под гор. А₁)						
П _л П	212	37,3	4,6	41,9	18,3	39,8
П _л П	209	63,2	2,8	66,0	12,3	21,7
П _л П	249	53,8	3,5	57,3	14,8	27,9
Под зоной внесения (гор. А₂)						
П _л П	15	35,0	13,5	48,5	21,5	30,0
П _л П	16	32,9	22,2	55,1	6,1	38,8
П _л П	18	15,2	21,1	36,3	20,3	43,4
В гор. А₂В						
П _л П	12	43,8	2,1	45,9	1,6	52,5
П _л П	11	50,0	2,5	52,5	1,7	45,8
П _л П	12	16,7	17,7	34,4	15,6	50,0

ными осадками, что способствует расширению масштаба воздействия органических веществ кислотной природы на почвенные минералы (рисунк).

Внутрипочвенный фронт миграции ^{14}C , включенного в компоненты ВОВ, заметно растянут (до 40 см), а максимум активности меченого углерода был диагностиро-



Миграционное распределение ^{14}C в составе ВОВ по слоям пахотной подзолистой почвы (через 2 года после внесения опада, меченного ^{14}C).

А — изолинии перераспределения органических продуктов разложения ячменной соломы (по ^{14}C) в вертикальной плоскости почвенного объема площадки; Б — изолинии перераспределения ^{14}C в составе ВОВ в горизонтальной плоскости почвенного объема площадки; В — распределение ^{14}C в составе ВОВ по профилю почвы. Изолинии активности: а — 150—180; б — 40—50; с — 30—40 и д — 25—30 имп/мин. Точка внесения субстрата, меченного ^{14}C , заштрихована.

ван на глубине 0—3 см, т. е. в зоне внесения. Кроме указанного максимума, в почвенном пространстве стационарной площадки обнаружен другой нисходящий (вертикальный) поток ^{14}C в составе ВОВ, имеющий слабый горизонтальный (поверхностный) сдвиг (рисунок). Внутрпрофильное (миграционное)

перераспределение ^{14}C в составе ВОВ в изучаемых почвах носит элювиальный характер.

Новообразованные группы ВОВ из разлагающегося органогенного субстрата включаются в специфические органические вещества почвы, преимущественно в группу ФС (табл. 6). Эта тенденция харак-

Таблица 7

Перераспределение продуктов трансформации опада ячменной соломы (меченой ^{14}C) в подзолистых почвах Вилегодского стационара (% суммарной активности исходного органогенного субстрата, через 2 года опыта)

Основная статья баланса ^{14}C	Лесные почвы		Пахотная почва (ПлП)
	ПлП	ПлП	
Остаток в исходном растительном субстрате	16,1	29,5	5,8
Поглощено корнями растений и мхами	0,9	7,4	0,1
Включено в гумусовые вещества почвы (в слое внесения, 0—3 см)	5,8	18,2	4,1
Минерализовано до конечных продуктов (CO_2 , H_2O и минеральных солей)	70,4	32,4	83,0
Миграция из зоны внесения с гравитационным потоком воды в глубину профиля почвы	6,8	12,5	7,0

терна для подзолистых почв западин и понижений в рельефе, испытывающих временное сезонное переувлажнение.

Некоторое количество ^{14}C в составе продуктов трансформации ячменной соломы усваивается корнями растений. Этот процесс наиболее четко выражен на стационарной площадке с полугидроморфными почвами, в поверхностном покрове которых преобладают сфагновые мхи (7,4 % общей активности субстрата).

Вертикальные (нисходящие) потоки ВОВ, как показали исследования, наиболее характерны для почв подзолистого типа, и прежде всего для полугидроморфных аналогов (12,5 % $^{14}\text{C}_{\text{общ}}$).

Минеральные и органические соединения автоморфных подзолистых почв аккумулируют незначительную часть ^{14}C в составе новообразованных ВОВ, поэтому в почвах данного типа гумусово-аккумулятивный генетический горизонт обычно не выражен. В то же время в полугидроморфных подзолистых почвах активно накапливается грубогумусный материал, а новообразованные компоненты ВОВ, мигрируя с потоком воды по почвенному профилю, участвуют в формировании специфического (потечного) гумуса.

В пахотной подзолистой почве в отличие от изученных лесных аналогов наиболее интенсивно протекают биохимические процессы минерализации новообразованных групп ВОВ. При этом ^{14}C в составе ВОВ в весьма незначительных количествах усваивается корнями растений и закрепляется в исходном органогенном субстрате (в зоне внесения).

Своеобразная трансформация продуктов разложения наземного растительного опада наблюдается в полугидроморфных подзолистых почвах. В слоях скопления оторфованных лесных подстилок активно мобилизующиеся в водный раствор компоненты ВОВ, с одной стороны, слабо минерализуются, очевидно, из-за их сорбции высокомолекулярными соединениями органогенных субстратов (лигнинном, дубильными веществами, клетчаткой и т. д.), а с другой — вследствие накопления в водных растворах.

Следовательно, в условиях лесных биоценозов среднетаежной подзоны природа процесса гумусообразования в значительной мере определяется начальными реакциями мобилизации в растворимое состояние групп ВОВ с кислотными свойствами и их последующим превра-

щением при дефиците щелочноземельных оснований.

С почвенно-экологической точки зрения весьма характерно, что трансформация растительного опада и компонентов лесных подстилок в гумусовые соединения происходит главным образом в поверхностных горизонтах почв подзолистого типа, насыщенных органомным материалом (как живыми вегетативными органами, так и мертвым субстратом растительности), корнями растений, мхами, лишайниками, а также микроорганизмами. В этих условиях весьма эффективно осуществляются поиск и усвоение сообществом живых организмов доступных форм элементов питания при биогенном кислотообразовании. Данному процессу сопутствуют также биохимические реакции разложения растительного опада, способствующие формированию разнообразных органических кислот.

За счет устойчивого обогащения почвенных растворов компонентами ВОВ (в условиях своеобразного гидротермического режима) образование системы гумусовых соединений в подзолистых почвах средней тайги идет в основном по пути синтеза их мобильных продуктов с ярко выраженными кислотными свойствами.

Выводы

1. Мобилизация и соотношение групп ВОВ в природных растворах подзолистых почв зависят от типа субстрата (свежий или гумифицированный растительный опад) и срока отбора проб.

2. Из свежего растительного опада в подзонах средней и северной тайги (горизонт A_0 лесной оторфованной подстилки, вегетативные органы брусники, эпифитные лишайники) в раствор мобилизуются главным образом индивидуаль-

ные органические соединения, а из гумифицированного субстрата — специфические органические продукты.

3. Из корокопостов, приготовленных на основе мелкоизмельченной коры хвойных пород деревьев, в раствор мобилизуются, как правило, органические компоненты индивидуальной природы. Добавки минеральных удобрений к дробленой коре хвойных пород способствуют активной минерализации новообразованных групп ВОВ и изменению реакции среды водных растворов в нейтральный интервал рН.

4. Масштаб вертикальной нисходящей миграции ВОВ по профилю лесной сильноподзолистой почвы зависит от места установки сорбционных лизиметров (под кроной дерева, моховой кочкой, в «окне» между деревьями).

5. Трансформация продуктов разложения ячменной соломы (меченой ^{14}C) в поверхностных горизонтах определяется генезисом почв, характером их сельскохозяйственного использования, условиями аэрации и временным сезонным переувлажнением.

В лесных полугидроморфных подзолистых почвах преобладают процессы минерализации и закрепления ^{14}C в составе ВОВ в зоне внесения субстрата. Процессы включения компонентов ВОВ в гумусовые соединения, а также нисходящая вертикальная миграция с гравитационным потоком воды менее интенсивны.

6. В лесных автоморфных подзолистых почвах доминируют минерализация групп ВОВ и их аккумуляция в исходном органомном материале.

7. Процессам трансформации продуктов разложения ячменной соломы в пахотных подзолистых поч-

вах сопутствуют биохимические реакции минерализации групп ВОВ. Примерно равные количества ^{14}C в составе ВОВ были диагностированы при их миграции, закреплении в исходном материале и включении в гумусовые соединения подзолистой почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ганжара Н. Ф., Кауричев И. С., Рассохина В. В. Влияние поглощенных катионов на процесс гумусообразования.— В сб.: Особенности почвообразовательных процессов дерново-подзолистых почв.— М.: ТСХА, 1977, с. 51—60.— 2. Кауричев И. С., Яшин И. М. Теоретическое обоснование метода лизиметрических хроматографических колонок.— Изв. ТСХА, 1973, вып. 3, с. 89—98.— 3. Кауричев И. С., Кащенко В. С., Яшин И. М. Некоторые аспекты подзолообразования в подзолистых почвах.— Изв. ТСХА, 1976, вып. 2, с. 81—90.— 4. Кауричев И. С., Карпухин А. И., Степанова Л. П. О природе водно-растворимых железоорганических соединений почв таежно-лесной зоны.— Почвоведение, 1977, № 12, с. 10—19.— 5. Карпухин А. И., Кащенко В. С., Платонов И. Г., Яшин И. М. Влияние разных приемов известкования на состав и свойства освоенных подзолистых почв Архангельской области.— Изв. ТСХА, 1984, вып. 1, с. 87—93.— 6. Лыков А. М. К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии.— Изв. ТСХА, 1979, вып. 6, с. 14—20.— 7. Орлов Д. С. Теоретические и прикладные проблемы химии гумусовых веществ.— В сб.: Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1979, т. 2 (проблемы почвоведения), с. 58—132.— 8. Пупонин А. И., Платонов И. Г., Мано-

лий Г. Г. и др. Эффективность известкования при разных системах обработки дерново-подзолистой почвы в интенсивном земледелии Нечерноземной зоны.— Агрохимия, 1990, № 1, с. 65—73.— 9. Пономарева В. В., Плотникова Т. А. Гумус и почвообразование.— Л.: Наука, 1980.— 10. 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.— 11. Тюрин И. В. К вопросу о природе фульвокислот почвенного гумуса.— Тр. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева, 1940, т. 23, с. 23—40.— 12. Фокин А. Д., Карпухин А. И. Включение продуктов разложения растительных остатков (меченных ^{14}C в гумусовые вещества.— Почвоведение, 1974, № 11, с. 72—78.— 13. Фокин А. Д. Главные составляющие гумусового баланса почв и их количественная оценка.— В сб.: Органическое вещество и плодородие почв. М.: ТСХА, 1983, с. 3—16.— 14. Фролова Л. Н. Особенности почвообразования в еловых лесах в связи со сменой пород в условиях Коми АССР.— Автореф. канд. дис. Сыктывкар — Москва, 1965.— 15. 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.— 16. Яшин И. М., Гавриков Г. Г. Элементарные структуры почвенного покрова южной части Архангельской области.— Изв. ТСХА, 1986, вып. 6, с. 73—84.— 17. Jenkinson D. S.— Soil Sci., 1971, vol. 111, N 1, p. 64—70.— 18. Scharpenseel H. W., Wurzer M., Freytag J., Neue H. U.— Z. Pflanzenernähr. und Bodenk., 1984, Bd. 147, N 4, S. 502—516.

Статья поступила 3 января 1991 г.