

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ГУМУСООБРАЗОВАНИИ И МИГРАЦИИ В ПОЧВАХ ТАЕЖНО–ЛЕСНОЙ ЗОНЫ

И.М. ЯШИН, Р.А. АТЕНБЕКОВ, В.А. ЧЕРНИКОВ, И.И. ВАСЕНЕВ

(РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева)

Обсуждаются результаты многолетних стационарных исследований авторов (2014–2017 гг.) по трансформации растительных остатков, формировании и превращении новообразованных водорастворимых органических веществ (ВОВ), их водной миграции и эмиссии диоксида углерода CO_2 в экосистемах таежной зоны. В полевых опытах были использованы методы хроматографии, сорбционных лизиметров и радиоактивных индикаторов. Предложена для обсуждения экологическая концепция гумусообразования в почвах таежной зоны. Охарактеризована экологическая роль водорастворимых органических веществ в функционировании почвенных микроорганизмов, мобилизации и внутрипрофильной миграции некоторых продуктов почвообразования, в частности, соединений Fe.

Исследованы некоторые компоненты поверхностных вод Юрьев–Польского ополья в сравнении с региональным фоном – аналогами Центрально–лесного биосферного заповедника в Тверской области. Установлена генетическая взаимосвязь продуктов почвообразования (ВОВ с кислотными свойствами и соединений железа) – активными мигрантами в подзолистых почвах – с поверхностными водами таежных экосистем. Концентрация ионов Fe^{3+} варьирует в пределах $0,33 \pm 0,1 - 0,78 \pm 0,12$ мг/л (Плещеево озеро) и намного выше ПДК. Величины БПК₅ и ХПК также заметно превышают ПДК, что указывает на присутствие также органических веществ антропогенного генезиса, как и в реке Трубеж.

Экологический характер гумусообразования в почвах подзолистого типа таежных экосистем отражает динамику взаимосвязанных процессов мобилизации, трансформации и миграции ВОВ в виде своеобразного звена биогеохимического круговорота углерода. Данный процесс экологически выгоден таежной биоте. Миграционный вынос ВОВ из подзолистых почв составляет 1/5 – 1/10 часть исходно формирующихся их масс.

Ключевые слова: трансформация растительных остатков, водорастворимые органические вещества (ВОВ), гумификация, гумусообразование, миграция, сорбция.

Введение

Существующие концепции формирования, динамики и миграции гумусовых соединений (ГС), кроме работ [4, 10] и ряда других авторов, основываются на результатах лабораторного моделирования. Полученные сведения интересные, но неполные. Положения о процессе гумусообразования в почвах экосистем тайги требуют дальнейшего экспериментального обоснования с экологических позиций. Наряду с этим роль водорастворимых органических веществ (ВОВ) в водной миграции продуктов почвообразования и эмиссии газов экспериментально изучена недостаточно. Это и определило характер настоящей публикации.

Объекты и методы исследований

Ранее нами были рассмотрены генетические особенности почв стационарных пло-

щадок и экологические условия ландшафтов ЦЛТБЗ и др. [13]. Наряду с указанными объектами (рис.1) были изучены также почвы аграрных экосистем в условиях Юрьев–Польского ополья на примере ОАО «Дружба» Переславль–Залесского района Ярославской области. В опытах применялись химические методы оценки свойств почв и гумусовых веществ, метод сорбционных лизиметров и радиоактивных индикаторов для оценки продуктов трансформации растительных остатков [12]. Для оценки качества поверхностных вод Юрьев–Польского ополья были использованы гидрохимические и биохимические методы исследования [13]. Отметим, для оценки состава ВОВ нами была усовершенствована известная аналитическая схема W. Forsyth [4, 5]. Она широко используется при выделении, очистке и фракционировании фульвокислот (ФК) почв на 2 группы веществ: специфической (ФК) и индивидуальной природы (ИОВ – кислоты, полифенолы). Использовали также такие доступные и эффективные сорбенты как органические синтетические иониты (катионит КУ–2 в H^+ форме и анионит АВ–17 в OH^- форме) и низкодольный активированный уголь «карболен». *Ионообменные смолы* используются для поглощения из почвенных растворов органоминеральных соединений с разными знаками зарядов и сорбции ИОВ – низкомолекулярных органических кислот, аминокислот и полифенолов [5].



Рис. 1. Аграрные экосистемы Юрьев–Польского ополья на примере ОАО «Дружба»: (а) профиль **р.2** дерново–слабоподзолистой легкосуглинистой почвы на склоне увала 1–й «эрозийной катены» – дипломник Артур Кашаев устанавливает колонки; б – соискатель кафедры экологии Рамиз Атенбеков устанавливает колонки в профиле **р.5** в дождливое лето; в – профиль **р.5** трансформированной дерново–слабоподзолистой остаточно–карбонатной почвы, на плакоре, с установленными сорбционными лизиметрами в засушливое лето

Результаты и их обсуждение

Компоненты ВОВ – их состав и водная миграция уже более 40 лет изучается сотрудниками Тимирязевской научной школы И.С. Кауричева [4, 5, 10–13]. Но экологическая роль ВОВ в эмиссии газов и гумификации изучены недостаточно. Известны *три научных направления* при исследовании состава, свойств и функций гумусовых веществ (ГВ) почв:

- 1–е – химическое,
- 2–е – биохимическое,
- 3–е – почвенно–экологическое (биогеохимическое) – [5].

Первое направление связано с использованием химических реагентов (водных раство-

ров кислот, щелочей...), которые радикально трансформируют исходные структуры и свойства ГВ. Второе также опирается на лабораторные опыты с различными группами микроорганизмов и позволяет получить сведения о прогумусовых веществах. Третье направление отличается изучением гумификации в реальных почвах и экосистемах.



Рис. 2. Лесные экосистемы ОАО «Дружба» Юрьев–Польского ополья Ярославской области: а – профиль нарушенной дерново–слабоподзолистой остаточно–карбонатной среднесуглинистой почвы на покровных карбонатных суглинках в фации «опушка дуба»; б – опушка дубравы, что на фото «а», где заложен р.11 в 22 м от профилированной автодороги; в – профиль дерново–подзола, контактно–осветленного супесчаного на двучленных отложениях, р.10 – в ельнике сложном

При этом используются модификация метода сорбционных лизиметров и радиоактивный изотоп ^{14}C [10]. Данное научное направление весьма трудоемкое, длительное, требует специальной подготовки и обязательного достаточного финансирования (такие работы авторами выполнялись по грантам РФФИ и Правительства РФ). Основу экологической концепции гумусообразования (развиваемой в Тимирязевской академии), в частности, в почвах таежной зоны составляют известные экологические представления об адаптации¹ групп живых организмов к суровым почвенно–биоклиматическим условиям Европейского Севера. В этой связи новообразованные компоненты гумусовых веществ (ВОВ) рассматриваются нами не только как самостоятельные и специфические продукты таежного почвообразования, но и как органические соединения, с помощью которых живые организмы успешно функционируют при явном дефиците тепла, низкой биологической активности, периодическом сезонном переувлажнении почв и промывном водном режиме, ярко выраженном недостатке обменных катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также доступных форм N, P, K.

Касаясь роли гумусообразования и оценки роли ВОВ в этом процессе, отметим, что первые два научных направления (химическое и биохимическое) охватывают химию гумусовых веществ. Они подробно изложены в монографических работах [1, 2, 6, 8], где отмечены их главные особенности:

- 1) классическая конденсационная теория [6],
- 2) гипотеза окислительного кислотообразования [1],
- 3) общая теория гумификации [8],
- 4) экологическая концепция гумификации и гумусообразования [5].

¹ Механизм адаптации изучен пока в общих чертах: на уровне ботаники (систематика и морфология растений) и частично физиологии и биохимии растений (И.М. Яшин и др., 2015).

Гипотеза окислительного кислотообразования не требует обязательной биодegradации биополимеров до мономеров и включает три стадии:

1) окислительное кислотообразование, сопровождающееся активным накоплением ГС по составу и свойствам подобных гуминовым соединениям, которые являются источником фульвокислот;

2) трансформация гуминовых веществ с отщеплением фрагментов фульвокислот (ФК);

3) постепенная минерализация ГС. Авторы этой концепции [1] считают, что конечной стадии гумификации нет, как нет и конечного продукта. При этом, несмотря на многообразие экологических условий, принципиальная схема формирования молекул гумусовых кислот, по мнению этих авторов, едина. Однако почвы в ландшафтах разные, в них отмечается разный состав и свойства гумуса. Можно предположить здесь явное методологическое противоречие.

В основе общей теории гумификации [8] лежат представления о неоднозначной биотермодинамической устойчивости различных классов и групп органических веществ почвы. Эта концепция недостаточно обоснована, но ее слабые стороны специалистами пока не рассматривались.

Сторонники конденсационной теории [6] считают, что биополимеры растительного опада сначала полностью распадаются до мономеров с помощью микроорганизмов, а затем происходит конденсация и полимеризация новообразованных мономеров – образуются высокомолекулярные соединения ГВ. В каких условиях реализуется эти процессы, неясно.

Отмеченные гипотезы рассматриваются в общем виде, без конкретизации типов почв, процессов почвообразования и экологических условий, в которых происходит гумусообразование. Поэтому, например, положение об активном формировании высокомолекулярных органических веществ на начальном этапе гумификации растительных остатков не согласуется с морфологией почв подзолистого типа подзон средней и северной тайги: в профиле этих почв горизонт A_1 отсутствует, нет и гуминовых веществ. Вместо горизонта A_1 белесые горизонты почв (оглеенные и подзолистые) периодически пропитываются при водной миграции Fe–органическими и компонентами ВОВ. Так формируются ложные – сезонно гумусированные – горизонты подзолистых почв в таежных экосистемах.

Напомним, внедрение современных физико–химических методов (хроматографии, сорбционных лизиметров, радиоактивных изотопов) позволило получить новую информацию о гумусообразовании и уточнить роль ВОВ в эмиссии газов, миграции веществ и формировании ГВ [10–13]. Ранее на основе результатов стационарных полевых опытов в работе [10] впервые была сформулирована оригинальная концепция матричной достройки молекулярных структур ГВ почв подзоны южной тайги. В этом исследовании доказано, что процессы гумификации и обновления нативных структур ГВ реализуются на ионно–молекулярном уровне при участии компонентов ВОВ с кислотными и комплексообразующими свойствами. В этой связи охарактеризуем экологическое участие ВОВ в формировании нативных ГВ в почвах тайги. Множество молекул ВОВ, мобилизованных в растворимое состояние из опада растений и подстилки, способны к флуктуациям и новой структурной организации, т.е. бифуркациям. Из теории систем известно, что быстрее развиваются те подсистемы, в которых с самого начала их функционирования наблюдаются большое разнообразие веществ. В таежных экосистемах бифуркация связана с динамичным характером реакций образования, обновления, трансформации и миграции ВОВ. Лавинообразные флуктуации новообразованных молекул ВОВ, могут подавлять развитие уже организованной и химически слабо активной системы гу-

миновых веществ, сорбционно закрепленных на почвенной матрице. Со временем в подзолистых почвах таежной зоны начинает доминировать наиболее полезно и активно функционирующая динамическая система ВОВ, адекватно отражающая приспособительные реакции групп живых организмов к суровым условиям таежных ландшафтов. Именно с помощью ВОВ, обладающих кислотными, аллелопатическими и комплексообразующими свойствами, живые организмы осуществляют эффективную мобилизацию в раствор и усвоение элементов питания, которые в подзолистых почвах находятся в труднодоступном и рассеянном состоянии². ВОВ отражают, с одной стороны, своеобразие почвенных процессов трансформации органических веществ растительного опада и формирования новых специфических продуктов (водорастворимых и химически активных), а с другой – экологические особенности взаимосвязи живых организмов со средой их обитания – подзолистыми почвами. Указанные теоретические положения подтверждаются фактическими данными по Вилегодскому стационару (Архангельская область), где нами была изучена трансформация растительных остатков, тотально меченных радиоактивным изотопом ¹⁴C, на поверхности почв [5, 11].

В этих 2-х годичных опытах авторами была установлена зависимость баланса ВОВ от степени гидроморфности почв подзолистого типа. Так, в автономных лесной и пахотной глубоко подзолистых почвах подзоны средней тайги Архангельской области РФ заметно преобладает процесс биодegradации ВОВ (70,4±4,6% и 83,0±4,1%) с эмиссией CO₂↑. В полугидроморфных почвах количественные закономерности процессов биодegradации и водной миграции ВОВ выражены менее контрастно – соответственно 32,4±2,5% (газы H₂S↑, CH₄↑) и 12,5±0,3% от суммарной исходной активности ¹⁴C. Причем доминируют закрепление компонентов ВОВ в исходном субстрате (консервация опада 29,5±0,9%) и их биодegradация. Примерно пятая часть массы ВОВ включается в гумусовые соединения почв (18,2±0,4%, главным образом, в фульвокислоты), а десятая доля ВОВ поступает как в биологический (7,4±0,6%), так и в абиогенный циклы миграции (12,5±0,3%).

Таблица 1

Форма и масштаб нисходящей водной миграции Fe и ВОВ в почвах ОАО «Дружба» Юрьев-Польского ополья и фоновых аналогах Центрально-лесного биосферного заповедника

Гор-т и глубина закладки колонок, см	C _{орг} ВОВ, г/м ² за 1 год				% ионов Fe ³⁺ , прочно связанных с ВОВ в комплексы	Масштаб нисходящей миграции Fe-ВОВ комплексов, мг/м ²	Градиент барьера миграции (G) C _{орг} ВОВ, г/м ³ год-1
	Общий масштаб водной миграции (уголь и катионит)	в водо-ацетонном элюате с угля (ИОВ)	в аммонийном элюате с угля (ФК)	По сорбции катионитом КУ-2			
Юрьев-Польское ополье ОАО «Дружба». Р. 10. Лес – ельник сложный. Почва: дерново-подзол контактно-осветленный супесчаный на двучленных отложениях – рис.2в (наблюдения: 27.06. 2014 – 25.06. 2015).							
A ₀ (O) – 1	14,2 ±5,1	8,0 ±1,3	4,1 ±1,9	2,1±0,9	61,1 ±4,3	324 ±11	Не опр.

² Этот вопрос впервые с теоретических позиций был рассмотрен Пономаревой В.В. (1980).

Гор-т и глубина закладки колонок, см	C _{орг} ВОВ, г/м ² за 1 год				% ионов Fe ³⁺ , прочно связанных с ВОВ в комплексы	Масштаб нисходящей миграции Fe-ВОВ комплексов, мг/м ²	Градиент барьера миграции (G) C _{ВОВ, орг} /м ³ год-1
	Общий масштаб водной миграции (уголь и катионит)	в водо-ацетонном элюате с угля (ИОВ)	в аммонийном элюате с угля (ФК)	По сорбции катионитом КУ-2			
E _n – 14	9,6 ±2,2	5,1 ±1,7	2,5 ±1,4	2,0±1,4	58,7 ±3,7	129 ±11	35,4
B _{fg} – 39	3,4 ±1,8	1,0 ±0,2	2,1 ±0,4	0,3±0,1	64,8 ±1,4	91 ±14	24,8
Юрьев-Польское ополье ОАО «Дружба». Р.2. Луг разнотравный (около балки на склоне – рис.1а). Почва: дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая на покровных суглинках (наблюдения 04.07.2014 – 05.07.2015).							
A ₁ – 10	6,1±0,7	Не опр.	4,7±0,7	1,4±0,5	42,7±5,9	429±121	Не опр.
EL/B – 45	10,5±1,4	Не опр.	9,4±1,4	1,1±0,3	58,4±7,6	749±78	– 12,6
ЦЛГПБЗ. Лес – ельник-черничник. На 3 от здания конторы в 84 м. Р. 10я. Дерново-палево- подзолистая супесчаная почва на древнем аллювии (наблюдения 29.06.2015– 05.07.2016).							
A _o (O) – 2	19,8±3,8	Не опр.	16,5±2,3	3,3±1,1	67,2±4,8	487±45	Не опр.
E _n – 12	5,9±2,4	Не опр.	3,8±1,7	2,1±0,6	43,6±2,1	137±67	139,0
B _{fg} – 34	13,3±4,9	Не опр.	12,9±4,5	0,4±0,1	41,8±1,9	286±123	– 33,6
ЦЛГПБЗ. Луг разнотравный. На 3 от здания конторы в 38 м. Р.4я.1–я надпойменная терраса реки Межа. Почва – дерново-палево-подзолистая легкосуглинистая на древнеаллювиальных отложениях (наблюдения 23.06.2014–29.06.2015 гг.).							
A ₁ 3	4,2±0,6	2,1±0,7	1,7±0,9	0,4±0,2	44,7±5,7	649±34	Не опр.
E _h 17	12,8±3,1	3,5±1,1	5,1±2,0	4,2±0,9	39,6±3,2	432±27	– 61,4
B _{frp} 27	3,1±0,2	0,5±0,2	2,3±0,7	0,3±0,1	54,2±4,4	79±16	1,0
EL' 55	5,9±2,2	2,1±1,1	2,9±1,3	0,9±0,4	64,3±7,1	196±25	– 10,0

На основе параметров изолиний радиоактивности ¹⁴C в составе ВОВ была оценена средняя линейная скорость внутрипочвенной миграции ВОВ, составившая 20–22 см·год⁻¹ для легкого суглинка. В то же время различные компоненты ВОВ мигрируют в глубь легкосуглинистой глубоко подзолистой почвы из зоны образования с разными линейными скоростями, поскольку по-разному сорбируются почвенными минералами и коллоидами Fe(OH)₃, Al(OH)₃. При этом миграционная зона «с» в составе ВОВ представлена преимущественно фульвосоединениями. Растянутая вглубь по профилю зона «d», до 44 см, была без хроматографического разделения природной смеси ВОВ. Таким образом, доказана возможность водной миграции и фракционирования в почве компонентов ВОВ. Судя по фактическим данным, ВОВ почти транзитом проходят горизонты E и E/B₁ (их сорбционная емкость используется неполно), обуславливая биологическую активность нижних горизонтов длительно охлаждаемых и часто оглеенных подзолистых почв (табл. 1).

**Концентрация химических элементов (мг/л) в водах реки Межа
и Большого пруда ЦЛГПБЗ в 2015–2016 гг.**

Химические элементы	Поверхностные воды ЦЛГПБЗ			Параметры ПДК, мг/л
	Вода из р. Межа (засушливое лето 28.08.2015)	Вода из р. Межа (влажное лето 21.05.2016)	Вода из Большого пруда (28.08.2015)	
Fe ³⁺	0,9±0,2	2,2±0,6	1,8±0,3	0,3
NO ₃ ⁻	0,7±0,13	не опр.	0,43±0,08	45
Сухой остаток	381±34	198±21	55±10	450
Al ³⁺	0,01±0,2	0,14±0,3	0,1±0,2	0,2
pH	7,2±0,2	6,6±0,2	7,1±0,2	6,8–7,1
Zn ²⁺	0,6±0,09	1,4±0,2	0,1±0,01	1,0
ХПК	12,4±2,5	51,0±12,0	28,8±6,9	30
БПК ₅	10,4±1,6	18,2±2,4	16,0±2,1	4,0
Ca ²⁺	11,4±2,5	18,7±5,2	17,6±3,4	–
Na ⁺	12,7±3,3	26,8±4,1	21,3±2,1	–
K ⁺	3,8±1,2	7,4±2,4	5,2±3,3	–
Водопроводная вода в гостинице ЦЛГПБЗ (21.05.2016)	Fe ³⁺ = 0,16±0,04; pH = 6,7±0,2; Ca ²⁺ = 16,4±5,7; БПК ₅ = 11±3			

В почвах изучаемых таежных экосистем наблюдается заметная дифференциация масштаба миграции ВОВ и их состава. При этом общий элювиальный характер перераспределения масс ВОВ и продуктов почвообразования (соединений Fe) в профилях почв подзолистого типа наблюдается особенно четко в условиях лесных фаций, развитого микрорельефа и наличия латерального (бокового) потока влаги в почвах на двучленных породах. Причем в составе ВОВ минеральных горизонтов больше отмечено молекул ФК. Они отличаются высокой химической активностью. Супесчаные дерново–подзолы слабо поглощают мигрирующие ВОВ, соединения Fe, которые со временем проникают в грунтовые, а затем и речные воды (табл.2,3). Рассчитанный нами градиент барьера миграции (G) по C_{орг} оказался отрицательным в трех почвенных разрезах. Такая ситуация отмечена для горизонтов EL/V и V_f. В отношении соединений Fe также установлена аналогичная закономерность, например, в лесной почве ЦЛГПБЗ разреза 10я. Выявлена ведущая роль в процессах миграции Fe фульвокислот и ВОВ с кислотными свойствами. Причем Fe мигрирует не только в форме устойчивых комплексных соединений с ВОВ, но и предположительно в форме гидрозолей гидроксида Fe(OH)₃ «под защитой ВОВ» [4]. ВОВ и Fe диагностируются и в поверхностных водах исследуемых экосистем.

Следовательно, прослеживается тесная генетическая связь почвенного покрова и поверхностных вод. Известно, что гидрохимический состав речных и озерных вод отражает экологическую ситуацию в почвах – эрозию, миграцию удобрений, сброс бытовых стоков [13]. Поэтому качество и безопасность поверхностных вод прудов ОАО «Дружба», реки Трубеж и Плещеева озера Юрьев–Польского ополья сравнивали с региональным фоном – рекой Межа и Большим прудом в ЦЛГПБЗ. Отбор проб воды из ближнего пруда ОАО «Дружба» (на въезде в д. Дубки) и пруда у д. Михалево проводили в июле 2014 и 2015 гг. В водах прудов изучали кислотность (рН), сухой остаток, концентрацию Fe, цвет. Установлено, что экологическое состояние вод ближнего пруда ОАО «Дружба» можно оценить как неудовлетворительное (это своего рода «пруд-отстойник»). Прозрачность воды (метод креста в цилиндре) – низкая 12–15 см, цвет зеленоватый; в дальнем пруду вода прозрачная, без запаха.



Рис. 3. Поверхностные воды в пределах г. Переславль–Залесский: а – дельта реки Трубеж при ее впадении в Плещеево озеро – у церкви 40 великомучеников; б – река Трубеж в черте г. Переславль–Залесский испытывает все более мощную антропогенную нагрузку; в – соискатель кафедры экологии Рамиз Атенбеков отбирает пробы воды из Плещеева озера ранней весной при наличии ледяной шуги у южного берега

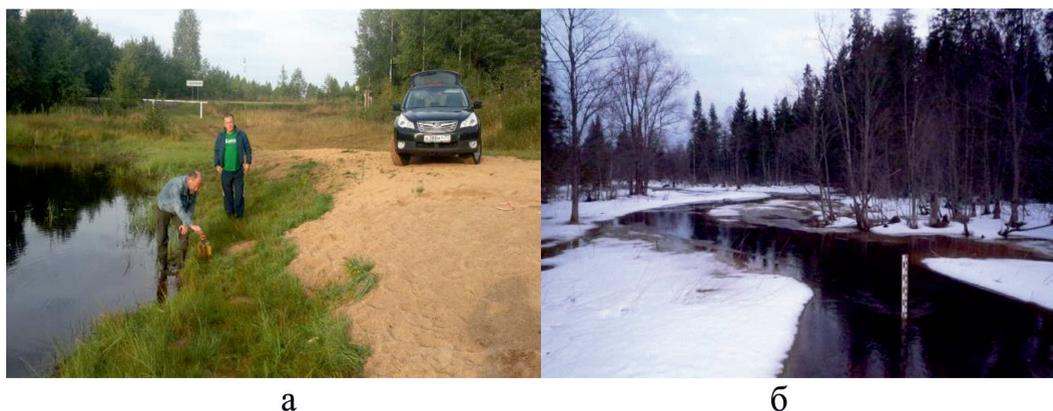


Рис. 4. Поверхностные воды ЦЛГПБЗ: а – доцент кафедры экологии Евгений Таллер и соискатель Рамиз Атенбеков отбирают воды из Большого пруда у д. Большое Федоровское; б – разлив реки Межа в период снеготаяния, в 230 м от домика бывшего магазина

**Концентрация химических элементов (мг/л)
в водах реки Трубеж и Плещеева озера Юрьев–Польского ополья
(отбор проб воды 29.04.2016 г.)**

Химические элементы	Поверхностные воды Юрьев–Польского ополья			Параметры ПДК, мг/л
	Вода из р. Трубеж (устье реки – точка 1)	Вода из Плещеева озера (точка 2)**	Вода из Плещеева озера (точка 3)*	
Fe ³⁺	0,74±0,1	0,33±0,1	0,78±0,12	0,3
NH ₄ ⁺	0,16±0,03	0,14±0,04	4,7±0,8	0,3
Сухой остаток	247±22	124±2,4	243±22	450
pH	8,0±0,2	7,8±0,2	7,9±0,2	6,8–7,1
ХПК	60±14	25,6±6,1	224±22	30
БПК ₅	12,6±1,6	12,0±1,6	13,8±1,8	4,0
Ca ²⁺	28,4±1,9	23,2±3,1	28,3±5,2	–
Na ⁺	9,6±2,3	13,8±2,7	10,4±1,8	–
K ⁺	2,7±1,1	4,3±1,4	3,9±0,8	–
Водопроводная вода в г. Переславль–Залеска (29.04.2016)	Fe ³⁺ = 0,11±0,02; pH = 7,2±0,2; Ca ²⁺ = 28,7±4,3; БПК ₅ = 13±2			

* Отбор проб воды из озера в 80 м на запад от церкви 40 великомучеников и устья реки.

**Отбор проб воды из озера на В от точки 3 в 354 м (окраина города – 15 м от домов).

Величина pH вод ближнего пруда равна 8,1–8,3 (у берега, примыкающего к дороге, заметна пена и «радужные пленки» от нефтепродуктов), очевидно, за счет сброса моющих средств и бытовых стоков. Запах воды слабо затхлый. Концентрация Fe³⁺ – 0,7 мг/л. В дальнем пруду качество воды заметно лучше: pH 6,7 – 6,9, вода чистая, концентрация Fe³⁺ – 0,3 мг/л (это норма по ПДК). Изучение проб воды в ЦЛГПБЗ проводили по сезонам: весной 21.05.2016 г. и летом 28.08.2016 г. В августовских пробах вод нефтепродуктов в воде не обнаружено. Установлено превышение ПДК в воде по концентрации Fe³⁺ и величине БПК₅ (табл. 2, рис.4). Пробы фоновых вод из реки Межа и Большого пруда, отобранные 21 мая 2016г., имели соответственно следующие показатели (мг/л): БПК₅ – 18,2±2,4 и 17,8±2,3; ХПК – 51,0±12,0 и 68,0±16,0; Fe³⁺ – 2,2±0,6 и 2,2±0,54; pH 6,6±0,2 и 6,4±0,2.

Заключение

Экспериментальный материал, полученный авторами в почвах таежных экосистем Европейского Севера с помощью методов хроматографии, сорбционных лизиметров и радиоактивных индикаторов, позволил охарактеризовать экологические положения гумусообразования. Установлено, что основная масса источников гумусовых веществ почв – жидких ВОВ – мобилизуется в таежных лесах из биополимеров растительного опада и лесных подстилок – лигнина, клетчатки, гемицеллюлозы. Растительный опад заметно обеднен обменным кальцием, поэтому кислоты не усредняются, в почвах наблюдается высокая кислотность, отражающая также

особенности биогенного кислотообразования таежных экосистем. Компоненты ВОВ имеют ярко выраженные кислотные свойства и низкие молекулярные массы ($MM \leq 5000$ а.е.м.), что препятствует реакциям конденсации молекул ВОВ в гуминовые вещества из-за кислотного гидролиза. ВОВ обуславливают фульватный состав гумуса, а профили подзолистых почв получают из лесных подстилок и опада уже сформированные молекулярные структуры ВОВ, часть которых поглощается минералами генетических горизонтов, а часть выщелачивается в грунтовые, затем и речные воды. Экологический характер гумусообразования в почвах подзолистого типа таежных экосистем отражает динамику взаимосвязанных процессов мобилизации, трансформации и миграции ВОВ в виде своеобразного звена биогеохимического круговорота углерода. Миграционный вынос ВОВ из подзолистых почв составляет $1/5 - 1/10$ часть исходно формирующихся их масс. Новообразованные массы ВОВ претерпевают интенсивную биodeградацию с эмиссией $CO_2 \uparrow$, что подтверждает их экологическую роль в жизнедеятельности микроорганизмов.

Причем процессы биodeградации ВОВ протекают по двум направлениям: первый путем быстрого окисления микроорганизмами молекул ВОВ (в условиях аэрации) до конечных продуктов – $CO_2 \uparrow$, H_2O и минеральных солей и второй – при дефиците $O_2 \uparrow$, например, при оглеении почв путем неполного окисления компонентов ВОВ ферментами, в частности, плесневых грибов. Это влечет за собой образование восстановленных газов ($CH_4 \uparrow$ и H_2S), промежуточных продуктов кислотной природы (нередко с негативными аллелопатическими свойствами – масляная, бензойная, валериановая кислоты, алкалоиды и микотоксины). Компоненты ВОВ выполняют уникальную экологическую взаимосвязь в экосистемах между двумя природными процессами: фотосинтезом в растениях и гумусообразованием в почвах с участием микроорганизмов. Продукты жизнедеятельности плесневых грибов – суперэкоксиканты. Они накапливаются в плохо просушенном сене и полегших посевах зерновых культур. Разработка экологической концепции гумусообразования позволяет оценить безопасность почв и поверхностных вод.

В почвах лесных и аграрных экосистем Юрьев–Польского ополья и ЦЛГПБЗ наблюдается заметная дифференциация масштаба миграции ВОВ и их состава. В лесных фоновых почвах ЦЛГПБЗ вынос ВОВ варьирует в пределах $5,9 \pm 2,4 - 19,8 \pm 3,8$ г/м² C_{org} ВОВ. Здесь же отмечен активный вынос соединений Fe – от 137 ± 67 до 487 ± 45 мг/м², Железо мигрирует как в форме комплексных Fe–органических соединений ($41,8 \pm 1,9 - 67,2 \pm 4,8\%$ от общей массы мигранта), так и в форме коллоидов – гидрозолей гидроксида Fe под «защитой» ВОВ. Супесчаные горизонты дерново–подзолов контактно–осветленных, развитых на двучленных породах, в период дождей прокрашиваются ВОВ при миграции, и непрочно удерживаются супесью. ВОВ затем проникают в грунтовые, а затем и речные воды. Масштаб водной миграции ВОВ в почвах с двучленным сложением профилей варьирует от $3,4 \pm 1,8$ до $14,2 \pm 5,1$ г/м² (в еловом лесу ОАО «Дружба»), и от $5,9 \pm 2,4$ до $19,8 \pm 3,8$ г/м² за 1 год в ЦЛГПБЗ. Генетическая взаимосвязь продуктов таежного гумусообразования (компонентов ВОВ) с составом поверхностных вод – рек, озер и прудов – позволяет уточнить также и особенности генезиса почв и почвообразующих пород. Карбонаты кальция являются эффективным сорбционным барьером для Fe. Почвообразующие породы на стационарах ЦЛГПБЗ и в Юрьев–Польском ополье слабо– и бескарбонатные ($CaCO_3$ отмечены в форме дресвы и щебня), поэтому поверхностные воды имеют высокую концентрацию ВОВ и Fe^{3+} .

В составе поверхностных вод Юрьев–Польского ополья присутствуют как продукты почвообразования из-за распаханности почв (катионы K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , Fe^{3+} , Al^{3+}), так и вещества антропогенного генезиса, усиливающие щелочность – мою-

щие средства (СПАВы). Концентрация ионов Fe^{3+} варьирует в пределах $0,33 \pm 0,1 - 0,78 \pm 0,12$ мг/л (Плещеево озеро), что намного превышает ПДК. Величины БПК₅ и ХПК также заметно превышают ПДК, что указывает на присутствие органических веществ и антропогенного генезиса. Негативное влияние на экологическое состояние поверхностных вод в экосистемах ОАО «Дружба», а также реки Трубеж и Плещеево озеро в г. Переславль-Залесский оказывают постройки домов в водоохранной зоне реки, воздействие сточных бытовых вод, смывы с моторных лодок. В этой связи необходим мониторинг безопасности поверхностных вод в селитебных городских ландшафтах, а также оценка почвенного покрова.

Библиографический список

1. *Александрова Л.Н.* Органическое вещество почвы и процессы его трансформации // Л.: Наука. 1980. 288 с.
2. *Дергачева М.И.* Система гумусовых веществ почв // Новосибирск: Наука. 1989. 100 с.
3. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв). М.: Наука. 1990. 261 с.
4. *Карпунин А.И., Яшин И.М., Черников В.А.* Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов в таежных ландшафтах Европейского Севера // Известия ТСХА. 1993. Вып. 2. С. 107–126.
5. *Кауричев И.С., Яшин И.М., Черников В.А.* Эко–геохимические закономерности гумусообразования в почвах таежных ландшафтов // Известия ТСХА. 1997. Вып. 1. С. 63–82.
6. *Кононова М.М.* Органические вещества почв. М.: АН СССР. 1963. 314 с.
7. *Никитин Е.Д.* Миграция Fe в почвах таежно–лесных ландшафтов // Почвоведение. 1980. № 9. С. 13–22.
8. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты и общая теория гумификации. М.: МГУ. 1990. 325 с.
9. *Рачинский В.В., Фокин А.Д., Талдыкин С.А.* Исследование потоков почвенной влаги и миграция веществ в подзолистых почвах изотопно–индикаторным методом // Почвоведение. 1982. № 2. С. 67–73.
10. *Фокин А.Д.* Участие различных соединений растительных остатков в формировании и обновлении гумусовых веществ почвы // Проблемы почвоведения. М.: Наука. 1978. С. 60–65.
11. *Яшин И.М., Кауричев И.С., Черников В.А.* Экологические аспекты гумусообразования // Известия ТСХА. 1996. Вып. 1. С. 110–129.
12. *Яшин И.М., Васнев И.И., Раскатов В.А.* Методы экологических исследований. М.: РГАУ–МСХА. 2015. 183 с.
13. *Яшин И.М., Гареева И.Е., Атенбеков Р.А., Васнев И.И.* Экологический мониторинг воздействия антропогенеза на поверхностные воды. Учебное пособие. Ред. И.М. Яшин. М.: РГАУ–МСХА. 2015. 167 с.
14. *Bodenkundliche Kartieranleitung.* Fachliche Redaktion: *H. Sponagel* (Leitung), W. Grotenthaler u.a. Hannover, 2005, – 438 s.
15. *Blume H.–P.* Handbuch des Bodenschutzes – Bodenökologie und –belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 1992. 794 S.
16. *Eckelmann W.* Soil Information for Germany. 2004.
17. *Hintermaier–Erhard G., Zech W.* Wörterbuch der Bodenkunde – Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Boden. Stuttgart, 1997, 338 S.

18. *Rehfuess K.E.* Waldboden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Hamburg und Berlin, 1990, 294 S.

ECOLOGICAL ROLE OF WATER-SOLUBLE ORGANIC SUBSTANCES (WOS) IN HUMUS FORMATION AND THE MIGRATION OF SUBSTANCES IN THE TAIGA REGION SOILS

I.M. YASHIN, R.A. ATENBEKOV, V.A. CHERNIKOV, I.I. VASENEV

(Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy)

The paper discusses the results of long-term stationary research (2014 – 2017) conducted by the authors on transformation of plant residues, the genesis and transformation of newly-formed water-soluble organic substances (WOS), their aquatic migration and carbon dioxide emission ($\text{CO}_2\uparrow$) in the Taiga region ecosystems. In the field experiments, use was made of the methods of chromatography, sorption lizimeters and radio-active indicators. An ecological concept of the humus formation in the Taiga region soils is offered for discussion. The ecological role of water-soluble organic substances in the functioning of soil microorganisms, mobilization and migration (within the soil profile) of several products of soil formation, including Fe compounds, has been described.

Several surface water compounds of the Yuriev-Polskiy grassland have been studied as compared with the background regional level, which is analogous to the Central Forest Biosphere Reserve in the Tver region. The genetic interconnection between soil-formation products (WOS with acidic features and iron compounds both are active migrants in podzolic soils) and surface waters of the Taiga ecosystems has been found. Concentration of Fe^{3+} ions varies within the range of $0,33\pm 0,1$ – $0,78\pm 0,12$ mg/l (the Plescheyevo lake) and greatly exceeds the maximum permissible concentration (MPC). The values of Biological Oxygen Consumption over five days (BOC_5) and Chemical Oxygen Consumption (COC) also noticeably exceed the MPC level that shows the presence of organic substances of anthropogenic genesis in the Trubezh river. Ecological nature of humus formation in the podzolic soils of the Taiga ecosystems indicate the dynamics of interconnected processes of WOS mobilization, transformation and migration as a specific part of the biogeochemical carbon cycle. The process under consideration is ecologically beneficial for the Taiga biota. The WOS removal from podzolic soils amounts to $1/5^{\text{th}}$ – $1/10^{\text{th}}$ of the initially formed WOS masses.

Key words: transformation of organic substances, water-soluble organic substances, humus formation, migration, sorption.

References

1. *Aleksandrova L.N.* Organicheskoye veshchestvo pochvy i protsessy yego transformatsii [Organic matter of the soil and the processes of its transformation] // L.: Nauka. 1980. 288 p.
2. *Dergacheva M.I.* Sistema gumusovykh veshchestv pochv [A system of humus substances in soils] // Novosibirsk: Nauka. 1989. 100 p.
3. *Dobrovolskiy G.V., Nikitin Ye.D.* Funktsii pochv v biosfere i ekosistemakh (ekologicheskoye znachenie pochv) [Soil functions in the biosphere and ecosystems (ecological role of soils)]. M.: Nauka. 1990. 261 p.
4. *Karpukhin A.I., Yashin I.M., Chernikov V.A.* Formirovaniye i migratsiya

комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов в таежных ландшафтах Европейского Севера [Formation and migration of complexes of water-soluble organic substances with ions of heavy metals in taiga landscapes of the European North] // *Izvestiya TSKHA*. 1993. Issue 2. Pp. 107–126.

5. *Kaurichev I.S., Yashin I.M., Chernikov V.A.* Эко-геохимические закономерности гумусообразования в почвах таежных ландшафтов [Eco-geochemical regularities of humus formation in the soils of taiga landscapes] // *Izvestiya TSKHA*. 1997. Issue 1. Pp. 63–82.

6. *Kononova M.M.* Органические вещества почв [Organic matter of soils]. М.: АН СССР. 1963. 314 p.

7. *Nikitin Ye.D.* Миграция Fe в почвах таежно-лесных ландшафтов [Migration of Fe in the soils of taiga-forest landscapes] // *Pochvovedeniye*. 1980. No. 9. Pp. 13–22.

8. *Orlov D.S.* Гумусовые кислоты и общая теория гумификации [Humic acids and the general theory of humification]. М.: МГУ. 1990. 325 p.

9. *Rachinskiy V.V., Fokin A.D., Taldykin S.A.* Исследования потоков почвенной влаги и миграция веществ в подзолистых почвах изотопно-индикаторным методом [Studying soil moisture fluxes and migration of substances in podzolic soils by an isotope-indicator method] // *Pochvovedeniye*. 1982. No. 2. Pp. 67–73.

10. *Fokin A.D.* Участие различных соединений растительных остатков в формировании и обновлении гумусовых веществ почвы [Participation of various compounds of plant residues in the formation and renewal of humus substances of soil] // *Problemy pochvovedeniya*. М.: Наука. 1978. Pp. 60–65.

11. *Yashin I.M., Kaurichev I.S., Chernikov V.A.* Экологические аспекты гумусообразования [Ecological aspects of humus formation] // *Izvestiya TSKHA*. 1996. Issue 1. Pp. 110–129.

12. *Yashin I.M., Vasenev I.I., Raskatov V.A.* Методы экологических исследований [Methods of ecological research]. М.: РГАУ–МСХА. 2015. 183 p.

13. *Yashin I.M., Gareyeva I.Ye., Atenbekov R.A., Vasenev I.I.* Экологический мониторинг воздействия антропогенеза на поверхностные воды Учебное пособие [Ecological monitoring of the impact of anthropogenesis on surface waters. Study manual]. Ed. by I.M. Yashin. М.: РГАУ–МСХА. 2015. 167 p.

14. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Fachliche Redaktion: H. Sponagel (Leitung), W. Grotenthaler ua.a. Hannover, 2005, - 438 p.

15. *Blume H.-P.* Handbuch des Bodenschutzes - Bodenkologie und -belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 1992. 794 p.

16. *Eckelmann W.* Soil Information for Germany. 2004.

17. *Hintermaier-Erhard G., Zech W.* Wörterbuch der Bodenkunde - Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Boden. Stuttgart, 1997, 338 p.

18. *Rehfuess K.E.* Waldboden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Hamburg und Berlin, 1990, 294 p.

Яшин Иван Михайлович – д. б. н., проф. кафедры экологии РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Тимирязевская ул., 49; тел.: (499) 977–04–86; e-mail: ivan.yashin2012@gmail.com)

Черников Владимир Александрович – д. с-х. н., проф. кафедры экологии РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Тимирязевская ул., 49; e-mail: 4ernikov@mail.ru).

Атенбеков Рамиз Ажибекович – соиск. кафедры экологии РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Тимирязевская ул., 49; тел.: (499) 977–04–86; e-mail: enter59@mail.ru).

Васенев Иван Иванович – д. б. н., проф., зав. кафедрой экологии РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, Москва, Тимирязевская ул., 49; тел.: (499) 977-04-86; e-mail: ivvasenev@gmail.com).

Ivan M. Yashin – DSc (Bio), Professor, the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; phone: (499) 977-04-86; e-mail: ivan.yashin2012@gmail.com)

Vladimir A. Chernikov – DSc (Bio), Professor, the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, e-mail: 4ernikov@mail.ru).

Ramiz A. Atenbekov – PhD seeker, the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya street, 49; phone: (499) 977-04-86; e-mail: enter59@mail.ru).

Ivan I. Vasenev – DSc (Bio), Professor, Head of the Department of Ecology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49; phone: (499) 977-04-86; e-mail: ivvasenev@gmail.com).