

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

УДК 551.510+556+631

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОРФОВ ЛЕСНЫХ БОЛОТ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

© 2024 г. Л. И. Инишева^{а,*} (<http://orcid.org/0000-0002-7549-8339>),

Н. В. Юдина^б, А. В. Головченко^с

^аТомский государственный педагогический университет, ул. Киевская, 60, Томск, 634061 Россия

^бИнститут химии нефти СО РАН, пр-т Академический, 4, Томск, 634021 Россия

^сМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: inisheva@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2024 г.

После доработки 08.06.2024 г.

Принята к публикации 08.06.2024 г.

Исследовали групповой состав органического вещества (ОВ) торфов разного генезиса таежной зоны Западной Сибири. Установили важность учета видового состава торфов, слагающих естественные и мелиорируемые лесные болота, а также их пространственную неоднородность, что является необходимой составляющей оценки запасов углерода в торфяном профиле лесных экосистем в рамках создаваемой национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов. Эксперименты по трансформации ОВ торфов показали, что активность определяется их ботаническим составом. По скорости разложения ОВ верховые торфа располагаются в ряд: сфагново-мочажинный > комплексный > фускум > шейхцериево-сфагновый > пушицево-сфагновый > шейхцериевый > пушицевый; низинные торфа: гипновый > осоковый > осоково-гипновый > вахтовый > древесный > древесно-осоковый. Опыты по трансформации ОВ растений-торфообразователей в полевых условиях показали, что компонентный и химический составы их органического вещества существенно меняются, но индивидуально по каждому растению. Увеличивается содержание ароматических полисопряженных систем и карбоксильных групп, и уменьшается количество углеводных фрагментов. Агролесомелиорация продолжительностью в 60 лет оказала влияние на процесс трансформации ОВ торфов. Степень разложения торфа травяного и осокового вида в условиях агролесомелиорации увеличилась на 5% в слое 0.75 м. Снизилось содержание битумов, а легкогидролизуемых веществ, гуминовых кислот и лигнина — увеличилось. Приведена характеристика микробиомов и ферментов торфов лесных болот таежной зоны Западной Сибири. Подтверждено положение В.Е. Раковского, что различия болотных растений в составе торфов проявляются в их химических и биологических характеристиках.

Ключевые слова: ботанический состав, Западная Сибирь, микробиом, ферменты, агролесомелиорация, трансформация

DOI: 10.31857/S0032180X24110026, EDN: JOZJVD

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий период большое внимание исследователей уделяется изучению цикла углерода и его составляющих, как наиболее важных для биосферы. В России, в отличие от международного акцента на растительный покров, уделяется внимание трансформации органического вещества (ОВ) в поверхностном слое зоны гипергенеза. Лесное

хозяйство является основным фондодержателем болотных и заболоченных земель. Около 22% лесного фонда страны — заболочено. К категории болота в лесном хозяйстве относят естественные участки с поверхностным слоем торфа мощностью не менее 30 см. За последнее время проблема лесоразведения и сельскохозяйственного использования болотных земель вызвала интерес к изучению

ОВ и биологических свойств торфов лесных болот, прогнозу последствий их изменения.

Преобразования ОВ в торфяном профиле лесных болот имеют особенности, которые определяются наличием неспецифических соединений ОВ в торфе (целлюлоза, липиды, лигнин), отсутствием достаточных количеств минеральной составляющей, низкой скоростью трансформации [19], а также разной устойчивостью их ОВ к биологической деструкции. Именно вследствие уменьшения скорости трансформации ОВ растений на более ранней стадии при подъеме грунтовых вод, состав ОВ торфяных почв в большей степени зависит от исходного химического состава растений-торфообразователей. Этот фактор должен учитываться при прогнозе варьирования распределения углерода и изменения характеристики ОВ торфов в лесных болотах в условиях антропогенных и естественных нарушений болотных экосистем. Химический состав растений-торфообразователей в последующих циклах торфогенеза оказывает существенное влияние на процесс их трансформации, обуславливая активность микробиологических и энзимологических процессов и формируя индивидуальный состав ОВ торфов.

Определяющее влияние химического состава растений на уровень деструкции ОВ в торфяном профиле доказывает тот факт, что “ботанически чистые” виды торфа, т.е. состоящие почти целиком из растительных остатков одного вида, имеют постоянную и неизменно встречаемую в природе степень разложения [26]. Так, степень разложения древесного торфа составляет 40–50%, травяного 30–40% и мохового 25% и меньше. Однако присутствие в торфах других видов растений существенно влияет на химический состав торфа. Заметим, что особенности состава растений-торфообразователей проявляются не только в различии химического состава, но и в их биохимической устойчивости, которая в свою очередь обуславливают уровень интенсивности микробиологического и энзимологического распада и приводят к образованию различных видов торфа. Исследования, основанные на учете видового состава малочисленны [4, 5, 12, 13, 30].

Цель работы — изучение ОВ и биологической составляющей представителей торфов лесных болот и их изменение в процессе функционирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили с торфами таежной зоны Западной Сибири, которая занимает 60% территории Западной Сибири и выделяется по преобладанию растительных сообществ бореального типа [22, 27]. Если на европейской территории России известно, что из 40 видов торфа, слагающих профили болот, лишь 10 видов являются

представительными (пластообразующими), то Западная Сибирь в этом отношении изучена слабо. На основании обработки данных геологических отчетов по территории таежной зоны с привлечением карты торфяных месторождений Западной Сибири М 1 : 1 000 000 и схем районирования болот [22], выделены 15 представительных торфов. Характеристики некоторых торфов представлены в настоящей статье. Пробы отбирали торфяным буром ТБГ-1 в 3–4 пунктах с наиболее мощными слоями представительного торфа из середины генетического слоя. Всего отобрали 12 видов торфа. Каждый вид торфа по ботаническому составу представлен выборкой из 6–12 образцов одинаковой зольности и степени разложения. В образцах определяли ботанический состав, степень разложения, валовой азот и углерод, групповой состав ОВ торфов по Инсторфу [29]. Дополнительно привлекали результаты из базы данных [16].

Изучение скорости деструкции ОВ проводили в лабораторном эксперименте на 11 представительных торфах по методике Иванниковой [15]. В полевых условиях изучали процесс трансформации ОВ торфов в торфяном профиле сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза на отрогах Васюганского болота в пределах бассейна р. Ключ (Бакчарский район, Томская область, координаты 56°58' N, 82°36' E) с использованием представителей растений-торфообразователей: *Eriophorum latifolium* Hoppe, *Carex caespitosa*, *Sphagnum fuscum* и *Sphagnum magellanicum*. Пробы торфов в капсулах из стеклоткани размером 15 × 15 см помещали в торфяной профиль на глубину 10–15 см на 2 года [4]. Из воздушно-сухого торфа последовательно выделяли компоненты группового состава. Битумы экстрагировали хлороформом в соотношении 1 : 3 при перемешивании в течение 1 ч, растворитель удаляли на ротаторном испарителе при температуре 30°C. Затем выделяли водорастворимые вещества горячей водой при температуре 95°C. Гуминовые вещества извлекали 0.1 М раствором NaOH. Гуминовые кислоты в щелочном растворе осаждали 4%-ным раствором HCl, осадок промывали дистиллированной водой до pH 6.5–7.0 высушивали в вакуумном шкафу при комнатной температуре. Трудногидролизуемые вещества выделяли из лигнино-целлюлозного остатка путем обработки 80%-ной H₂SO₄ в течение 2.5 ч [23].

Исследование фрагментного состава проводили на ЯМР-спектрометре Avance 300 фирмы Bruker (Германия) с рабочей частотой для ядер ¹³C 125 МГц с использованием методики Фурье-преобразования с накоплением. Исследуемые образцы ГК растворяли в 0.5 М растворе дейтерированной NaOH. Для исключения ядерного эффекта Оверхаузера запись спектров ЯМР-¹³C проводили с подавлением протонов в режиме INVGATE. В качестве внешнего стандарта использовали тетраметилсилан,

NS-30000 (Россия). Для полной релаксации всех ядер ^{13}C длительность релаксационной задержки составляла 5.7 с [7, 36].

Влияние агролесомелиорации на изменение состава ОВ изучали на низинном болоте Таган (южно-таежная зона Томской области, координаты 56°21' N, 84°47' E). На болоте преобладает растительность эвтрофного типа, представленная древесно-осоковым, осоковым, осоково-сфагновым травяно-кустарничковыми фитоценозами. В древесном ярусе преобладает *Pinus sylvestris* и *Betula populifolia*, встречается *Picea abies*, *Pinus abias*. Высота древостоя составляет 2–2.3 м, диаметр 2–32 см, плотность 0.4–0.8.

Общую численность и биомассу микроорганизмов определяли прямым методом с использованием люминесцентной микроскопии [11, 20, 25]. Образцы в течение двух лет отбирали на отрогах Васюганского болота в пределах бассейна р. Ключ (верховые торфа) и на болоте Таган (низинные торфа). Готовые препараты для учета бактерий и актиномицетного мицелия определяли на микроскопе ЛЮМАМ-ИЗ (Россия). Готовые грибные препараты просматривали на микроскопе БиОптик В-300 FL (Россия). Определение респирометрических микробиологических показателей (базальное дыхание (БД), микробная биомасса, микробный метаболический коэффициент) проводили методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) на газовом хроматографе Кристалл-5000.1 (Россия) [2, 32]. СИД оценивали по скорости выделения CO_2 торфом с глюкозо-минеральной смесью за 3 ч инкубации при температуре 25°C. Микробную биомассу торфа определяли на сухую навеску путем пересчета скорости СИД. Количественным критерием устойчивости микробных сообществ служит показатель микробного метаболического коэффициента (QR), представляющий собой отношение скоростей базального и СИД ($\text{QR} = \text{БД}/\text{СИД}$).

Ферменты определяли по методикам с дополнениями, изложенными в [17], с использованием спектрофотометра Гамма-Гелиос (Россия).

Все анализы выполняли в аккредитованной лаборатории Томского государственного педагогического университета (№ РОСС RU.0001.516054). Массивы данных обрабатывали с использованием пакета программ Statistica 8.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства торфяных залежей болот изменяются в широких пределах, что определяется многообразием растений-торфообразователей, характеристикой ОВ и условиями торфонакопления. Особенности ботанического состава торфов Западной Сибири позволили выделить ряд видов торфа, не встречающихся на европейской территории

России: согровый, листовичный, пихтовый, осоково-злаковый, сосново-осоковый и др. [24]. Наиболее широкое распространение получили 40 видов, которые вошли в генетическую классификацию торфов [26]. Геохимические и климатические особенности Западной Сибири несомненно находят отражение в особенностях состава и структуры ОВ западносибирских торфов. Выявлено, что западносибирские торфа как верхового, так и низинного типа имеют повышенную зольность, при этом степень их разложения несколько ниже европейских аналогов, что связано с резко континентальными условиями торфообразования и пониженной активностью биохимических процессов [3].

Вместе с тем торфа Западной Сибири отличаются широким разнообразием химических свойств (табл. 1). Характеристика каждого представительного вида торфа получена выборкой из 6–12 образцов одинаковой зольности и степени разложения. Степень разложения является важнейшим показателем качественной характеристики торфа, при этом для каждого вида торфа существует типичное значение степени разложения. Например, широко распространенные в Сибири сфагновые малоразложившиеся торфа, которые нередко составляют торфяную залежь на всю глубину, содержат много водорастворимых и легкогидролизуемых веществ в отличие от торфов европейской территории России.

Важно отметить, что углеводный комплекс почти полностью переходит из растений в торф и имеет низкую биохимическую устойчивость. Возможно, это объясняется высокой обводненностью болот и значительным присутствием в них сфагновых мхов [22]. Пределы изменения содержания битумов по видам торфов составляют 0.2–10.0%, при этом невысокие значения отмечаются в низинных торфах (осоковый и травяной), верховом сфагново-мочажинном, а наибольшие – в верховом комплексном и сосново-пушицевом, переходном травяно-гипновом и низинном осоковом торфах. Лигнин торфов обладает высокой биохимической устойчивостью и является потенциальным источником формирования молекул ГК. В исследуемых торфах среднее содержание лигнина составляет 6.9–14.5%, но в экстремальных значениях интервал шире – 2.4–22.4%.

Содержание ГК в торфах Западной Сибири ниже на 3.0–11.0% по сравнению с торфами европейской территории России. Их средние значения в исследованных торфах (ГК + ФК) имеют интервал варьирования 19.4–50.8%. Более высокими значениями ГК отличаются верховой комплексный, травяно-гипновый переходный, низинные осоково-гипновый и осоковый. Элементный состав торфов разного вида в средних значениях колеблется менее существенно. Содержание углерода изменяется от 38.4 до 56.5%, азота – от 0.8 до 2.4%.

Таблица 1. Групповой состав торфов болот таежной зоны (в пределах Томской области)

Вид торфа	Степень разложения	Зольность	Азот общий	Углерод	Содержание, мас. %					
	%					Б	ВРВ+ЛПВ	ГК	Л	Ц
	Верховой тип									
Сфагново-мочажинный	14.7±2.9	3.3±0.3	1.6±0.1	49.8±1.1	0.5±0.2	31.4±1.2	31.3±0.8	9.9±0.3	24.9±1.0	
	10.0–20.0	3.0–3.8	0.75–2.0	43.6–52.6	0.2–0.9	29.9–33.7	30.5–33.0	9.4–10.5	23.1–26.5	
Комплексный	29.7±2.3	2.8±0.7	0.8±0.1	48.9±0.7	7.8±1.1	37.8±4.4	40.8±6.1	10.0±1.0	3.8±1.5	
	25.0–32.0	1.2–8.6	0.5–1.4	45.3–51.1	6.6–10.0	33.2–46.5	32.1–52.5	8.8–10.9	1.0–6.2	
Фускум	6.2±0.75	5.5±1.9	1.0±0.1	50.6±0.9	2.6±0.5	35.9±7.5	24.7±2.1	9.5±3.6	23.4±3.6	
	5.0–8.0	10.8–2.1	0.6–1.6	46.5–56.2	1.7–4.0	17.8–56.3	19.2–29.5	3.2–16.4	15.0–38.5	
Магелланикум	7.5±2.0	3.4±1.1	1.0±0.0	–	1.0±0.3	33.5±0.4	19.4±0.3	12.3±1.6	33.9±1.3	
	5.0–10.0	2.1–4.7	0.9–1.0	–	0.6–1.4	33.0–33.9	19.0–19.8	10.3–14.3	32.3–35.4	
Сосново-пушицевый	43.3±5.6	5.7±0.2	2.0±0.2	–	5.9±2.2	29.3±3.1	37.5±3.6	10.1±2.6	22.5±7.3	
	27.0–51.0	5.5–5.9	1.7–2.2	–	0.7–9.6	23.9–34.6	27.6–44.7	4.2–15.1	4.9–40.3	
Переходный тип										
Древесно-пушицевый	53.3±4.4	8.7±0.5	2.4±0.1	56.5±0.3	2.4±0.8	33.6±2.3	28.5±5.7	9.4±0.8	26.1±6.0	
	45.0–60.0	7.7–9.4	2.3–2.5	56.2–57.1	0.9–3.6	29.9–37.8	22.7–39.8	8.1–11.0	15.2–37.5	
Травяно-гипновый	29.3±3.7	20.7±4.2	1.8±0.1	54.7±0.8	8.5±0.9	30.6±2.4	42.8±2.4	14.5±0.7	2.7±1.3	
	15.0–38.0	6.3–43.8	1.6–2.0	53.5–57.7	6.8–9.5	26.4–34.7	40.2–49.6	13.1–15.2	0.2–4.8	
Осоковый	30.0±3.3	4.8±0.1	1.9±0.1	52.6±0.4	6.5	29.2	48.9	(Л+Ц)	–	
	25.0–45.0	4.7–4.9	1.6–2.1	51.5–53.3				15.4		
Низинный тип										
Травяной	40.0±3.5	8.9±1.1	2.0±0.1	45.1±2.7	2.0±0.6	36.5±5.7	34.3±5.0	11.5±1.1	13.0±4.4	
	30.0–50.0	6.3–12.1	2.3–2.5	30.9–56.3	0.2–3.9	14.8–47.1	21.2–47.9	8.8–16.0	5.2–7.0	
Осоково-гипновый	26.1±2.3	20.7±4.2	2.0±0.2	38.4±4.6	3.8±0.6	32.1±3.4	50.8±3.8	6.9±2.3	5.3±3.5	
	15.0–38.0	6.3–43.8	1.8–2.2	27.9–50.4	2.8–5.0	25.3–36.2	45.0–58.1	2.4–9.8	1.4–12.2	
Древесно-осоковый	28.0±0.6	15.9±3.8	2.3±0.17	39.3±2.4	8.2±0.5	25.1±2.3	41.9±3.8	12.9±4.9	10.1±4.9	
	27.0–29.0	10.0–23.1	1.0–2.8	30.1–48.2	7.3–8.6	21.5–29.4	34.4–46.0	6.5–22.4	1.1–17.9	
Осоковый	38.0±6.2	6.25	2.4±0.14	44.9±3.6	3.9±1.9	24.2±4.1	44.4±9.9	10.0±4.1	17.8±11.8	
	29.0–50.0	6.0–6.5	1.8–3.7	31.5–52.5	0.2–6.1	16.6–30.6	25.2–58.1	3.1–17.2	1.4–40.8	

Примечание. Над чертой – средние значения, под чертой – экстремальные значения; Б – битумы; ВРВ – водорастворимые; ЛГВ – легкогидролизуемые; Ц – целлюлоза; ГК – гуминовые кислоты (ГК+ФК); Л – лигнин, ± – стандартное отклонение; прочерк – не определено.

Количество азота в верховых торфах невысокое, в пределах 0.8–1.6%, и только в сосново-пушицевом торфе достигает 2.0%. Содержание углерода в данных торфах стабильное и изменяется от 43.6 до 56.2%. В переходных торфах содержание азота и углерода увеличивается. Наибольшее значение содержания азота (до 3.7%) определено в осоковом низинном торфе. Таким образом, состав ОВ разных видов торфов иногда существенно отличается, и связано это с исходным составом растений, входящих в состав торфа.

Химический состав торфообразователей играет существенную роль в процессе гумификации, обуславливая выход и структуру ГК. Рассмотрим процесс гумификации на примере полевого эксперимента в торфяном профиле сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза с использованием представительных растений торфообразователей — *Eriphorum latifolium* Норре, *Carex caespitosa*, сфагновых мхов *Sphagnum fuscum* и *Sphagnum magellanicum*. В результате двухлетних полевых экспериментов установлено, что при разложении ОВ растений-торфообразователей биомасса — *Eriphorum latifolium* Норре и *Carex caespitosa* уменьшилась на 20–35 мас. %, сфагновых мхов *Sphagnum fuscum* и *Sphagnum magellanicum* — на 3–13 мас. %. В табл. 2 представлен групповой состав гумифицированных растений. Уже на стадии отмирания в образцах *Eriphorum latifolium* Норре и *Carex caespitosa* обнаружены гуминоподобные вещества, растворимые в щелочи. Однако в *Carex caespitosa* их содержание в 1.6 раза больше, чем в *Eriphorum latifolium* Норре. В сфагновых мхах эти вещества отсутствуют.

В процессе гумификации на протяжении двух лет количество гуминоподобных веществ в *Carex caespitosa* и *Eriphorum latifolium* Норре возросло в 2–2.5 раза по сравнению с их содержанием в исходных растениях-торфообразователях. При этом в них сократилось содержание битумов, водорастворимых, легкогидролизуемых веществ и лигнина, что свидетельствует об их участии в образовании

Таблица 2. Групповой состав ОВ торфообразователей и гумифицированных растений в торфяном профиле сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза (полевой эксперимент)

Образец	Содержание, мас. %				
	Б	ВРВ	ЛГВ	ГК	Л
Растения-торфообразователи					
<i>Carex caespitosa</i>	4.1	19.6	40.2	8.7	21.4
<i>Eriphorum latifolium</i>	3.5	25.7	43.0	5.3	16.5
Гумифицированные растения, 2 года					
<i>Carex caespitosa</i>	4.1	17.2	39.0	18.5	18.8
<i>Eriphorum latifolium</i>	2.6	17.9	41.1	20.2	13.1
<i>Sph. magellanicum</i>	3.5	14.2	37.4	10.2	31.6
<i>Sph. fuscum</i>	3.8	16.3	35.1	10.1	31.3

Примечание. Б — битумы, ВРВ — водорастворимые; ЛГВ — легкогидролизуемые; Л — лигнин; ГК — гуминовые кислоты.

ГК. Следует отметить образование через два года щелочерастворимой фракции в гумифицированных образцах сфагновых мхов в количестве 10%, что в 1.8–2 раза меньше, чем в аналогичных фракциях в *Carex caespitosa* и *Eriphorum latifolium* Норре.

Оценку преобразований гуминоподобных веществ в процессе двухлетней трансформации ОВ разных растений-торфообразователей проводили по результатам анализа фрагментного состава (табл. 3). Алифатическая часть спектра ГК гумифицированных растений содержит хорошо разрешенные сигналы с максимумом при 29–30 м.д., что характерно для линейных полиметиленовых цепей. Однако слабые сигналы концевых CH_3 -групп (химический сдвиг (ХС) 13.9 м.д.) в спектрах свидетельствуют, что алифатические фрагменты являются мостиковыми структурами между ароматическими

Таблица 3. Фрагментарный состав ГК гумифицированных растений по данным ЯМР¹³С в торфяном профиле сосново-кустарничково-сфагнового биогеоценоза (полевой эксперимент)

Образец ГК	Содержание атомов углерода в структурных фрагментах, относительные интенсивности, отн. %							
	C=O, COO—	C _{ар} —ON	C _{ар} —C,H	C _{алк} —ON	C _{α,β} —O—4	CH ₃ O	C _{алк}	F*
<i>Carex caespitosa</i>	0.9	4.6	25.8	13.4	17.2	19.6	18.4	30.0
<i>Eriphorum latifolium</i>	4.5	4.3	20.6	9.2	14.9	18.2	27.7	25.1
<i>Sph. magellanicum</i>	7.0	4.6	11.1	8.4	20.9	13.6	34.9	16.1
<i>Sph. fuscum</i>	6.6	2.6	16.5	9.2	16.3	13.9	33.7	19.2

* Степень ароматичности.

тическими кольцами [18]. Отличительной особенностью ГК гумифицированных растений является значительное (до 20% в ГК *Carex caespitosa*) количество атомов углерода в метоксильных группах (ХС 58–54 м.д.) и $C_{\alpha,\beta}$ O-4-связях (ХС 93–80 м.д.). В молекулах ГК исследуемых растений доля метоксильных групп высока. В слабопреобразованных ГК из гумифицированных растений доля $C_{алк}ON$ высокая, а окисленных ароматических структур $C_{ар}ON$, наоборот, ниже. В диапазоне ХС 160–120 м.д. проявляются интенсивные сигналы ароматических атомов углерода и атомов, связанных с кислородом. Так, отмечено большее количество ароматических фрагментов в ГК *Carex caespitosa* и *Eriphorum latifolium* Норре, чем в ГК сфагновых мхов. В сфагновых мхах преобладают алкильные фрагменты. Содержание карбоксильных, карбонильных и хиноидных групп (ХС 160–220 м.д.) в ГК гумифицированных *Carex caespitosa* и в *Eriphorum latifolium* Норре невысокое. Особенно низкое их количество отмечено в ГК из *Carex caespitosa*. Разница между количеством углерода в карбонилсодержащих группах в ГК генетического ряда сфагновых мхов существенна.

Таким образом, в процессе трансформации ОВ растений-торфообразователей фрагментный состав гуминоподобных веществ изменяется в зависимости от вида растения.

Влияние агролесомелиорации продолжительно в 60 лет на процесс трансформации ОВ торфов рассмотрено в слое 0.75 м низинного болота Таган (южно-таежная зона, Томский район, Томская область), расположенного в древней ложбине стока, на которой подстилающими породами служат пески, супеси и суглинки. На небольшой территории болота в 1963 г. была осуществлена агролесомелиорация: проведены борозды глубиной 0.5 м с расстоянием между бороздами 2–4 м. В настоящее

время здесь растет березовый лес 2–3 бонитета. Степень разложения торфа травяного и осокового вида в условиях агролесомелиорации увеличилась на 5% во всем слое 0.75 м. Снизилось содержание битумов, легкогидролизуемых веществ и увеличилось — ГК и лигнина (табл. 4). В количественном выражении наибольшие изменения характерны для поверхностного слоя 0–25 см и меньше проявляются в слое 25–75 см.

Таким образом, за длительный период мелиорация оказала существенное влияние на трансформацию ОВ торфов травяного вида и в большей степени в поверхностном слое.

Как известно, одним из показателей интенсивности процессов разложения ОВ торфа служит выделение CO_2 . Для сравнения скорости трансформации ОВ в торфах разного вида был проведен модельный опыт с шестью представительными видами торфов верхового и пятью — низинного типа с близкими значениями зольности и степени разложения. Длительность опыта составила 16 сут. Характеристика ОВ торфов приведена в табл. 5. Важно отметить, что по сравнению с видами торфов низинного типа, верховые торфа характеризуются высоким содержанием легкогидролизуемых веществ (за исключением шейхцериевого вида), битумов (исключение составил фускум торф), невысоким — гидролизуемого азота (в 1 М H_2SO_4) и высокими значениями C/N. Последние показатели свидетельствуют о преобладании в торфах верхового типа углеводов над азотсодержащими веществами.

Во всех представительных торфах скорость разложения ОВ изменяется в пределах 2.0–16.3 мг $C-CO_2/(100$ г сут) (рис. 1). Активность трансформации верховых торфов в отдельные сроки различалась. В наибольшей степени это относится к шейхцери-

Таблица 4. Изменение группового состава органического вещества торфов под влиянием агролесомелиорации, мас. %

Вид торфа	Глубина, см	R, %	Б	ГК	ФК	ЛГВ	Ц	Л
Естественное состояние								
Травяной	0–25	30	2.7 ± 0.1	18.6 ± 1.4	15.1 ± 0.9	44.2 ± 2.4	11.2 ± 0.8	6.4 ± 0.4
Травяной	25–50	30	1.0 ± 0.0	17.3 ± 1.5	16.1 ± 1.3	47.1 ± 2.6	11.3 ± 1.1	5.2 ± 0.7
Осоковый	50–75	40	3.1 ± 0.1	16.7 ± 2.4	16.3 ± 2.1	45.7 ± 4.8	8.8 ± 0.9	7.5 ± 1.2
В условиях агролесомелиорации								
Травяной	0–25	35	1.5 ± 0.3	26.5 ± 3.1	13.0 ± 0.9	37.5 ± 2.7	11.2 ± 2.0	8.4 ± 1.9
Травяной	25–50	35	0.6 ± 0.3	22.6 ± 4.1	16.5 ± 1.1	42.3 ± 4.1	10.4 ± 1.6	5.7 ± 0.7
Осоковый	50–75	40	2.8 ± 0.2	18.2 ± 2.7	16.7 ± 2.3	44.4 ± 3.2	7.0 ± 0.8	8.9 ± 0.6

Примечание. R — степень разложения, Б — битумы, ГК — гуминовые кислоты, ФК — фульвовые кислоты, ЛГВ — легкогидролизуемые соединения, Ц — целлюлоза, Л — лигнин, $\pm$ — стандартное отклонение.

Таблица 5. Характеристика химического состава торфов в модельном опыте по скорости их разложения

Виды торфа	рН	Б	ФК	ЛГВ	Азот общий, %	Азот гидролизуемый, % от общего азота		C/N
		% от общего углерода				0. М Н ₂ SO ₄	80% Н ₂ SO ₄	
Верховые торфа								
Комплексный	3.4–3.7	12.8 ± 2.2	11.9 ± 1.0	13.5 ± 6.6	1.3 ± 0.2	7.8 ± 1.5	7.1 ± 0.7	28–8
Фускум	2.4–2.8	5.9 ± 2.5	13.4 ± 1.0	14.4 ± 1.0	0.8 ± 0.0	7.2 ± 0.7	4.4 ± 0.4	53–8
Шейхцериевый	3.3–5.6	15.1 ± 5.7	16.3 ± 2.0	5.3 ± 3.1	1.0 ± 0.0	7.4 ± 0.1	6.6 ± 0.4	26–2
Низинные торфа								
Вахтовый	—	7.6 ± 0.8	15.1 ± 2.3	7.2 ± 1.8	2.3 ± 0.1	8.7 ± 0.5	4.7 ± 0.6	16–2
Гипновый	5.2–7.3	5.8 ± 1.2	13.3 ± 1.2	10.0 ± 2.0	1.8 ± 0.1	9.2 ± 0.5	6.1 ± 0.8	23–2
Древесно-осоковый	3.8–6.5	6.6 ± 0.5	18.6 ± 3.4	6.1 ± 1.4	2.0 ± 0.1	10.2 ± 0.6	6.2 ± 0.4	17–2
Древесный	4.7–6.5	5.2 ± 1.0	19.8 ± 1.2	4.6 ± 1.4	1.8 ± 1.0	9.5 ± 0.6	8.6 ± 1.2	21–3
Осоково-гипновый	4.1–7.0	6.5 ± 2.5	17.3 ± 1.6	11.6 ± 3.1	1.7 ± 0.2	10.8 ± 1.3	7.2 ± 0.9	17–2
Осоковый	3.7–6.9	7.0 ± 1.9	18.3 ± 1.4	7.7 ± 2.0	2.0 ± 0.1	11.1 ± 0.7	8.3 ± 0.7	17–2

Примечание. Б – битумы, ЛГВ – легкогидролизуемые вещества, ± – стандартное отклонение, прочерк – не определяли.

евому торфу, скорость трансформации ОВ которого небольшая (2.2–4.0 мг С–СО₂/(100 г сут)), а ее динамика не совпадает с общей закономерностью, отмечаемой для верховых торфов. Невысокими значениями скорости разложения ОВ характеризуется и пушицевый торф. Заметим, что шейхцериевый и пушицевый виды торфа относятся к одной травяной группе в классификации торфов. В то же время высокая активность разложения ОВ зарегистрирована в комплексном торфе, в составе которого преобладают сфагновые мхи: *Sph. fuscum*, *Sph. magellanicum*, *Sph. angustifolium* (>70%). Химический

состав ОВ этого торфа изначально характеризуется высоким содержанием легкогидролизуемых веществ и широким отношением C/N. Наибольшую скорость трансформации имеет сфагновый мочажинный торф, в составе которого до 55% занимают мочажинные растения: *Carex limosa*, *Eriophorum latifolium* Норре, *Sph. Balticum* и другие виды низинных сфагновых мхов. Предполагается, что вспышка активности трансформации в начале эксперимента происходит за счет первоначального наличия наиболее доступных органических веществ (простые сахара, гемицеллюлозы), после разложе-

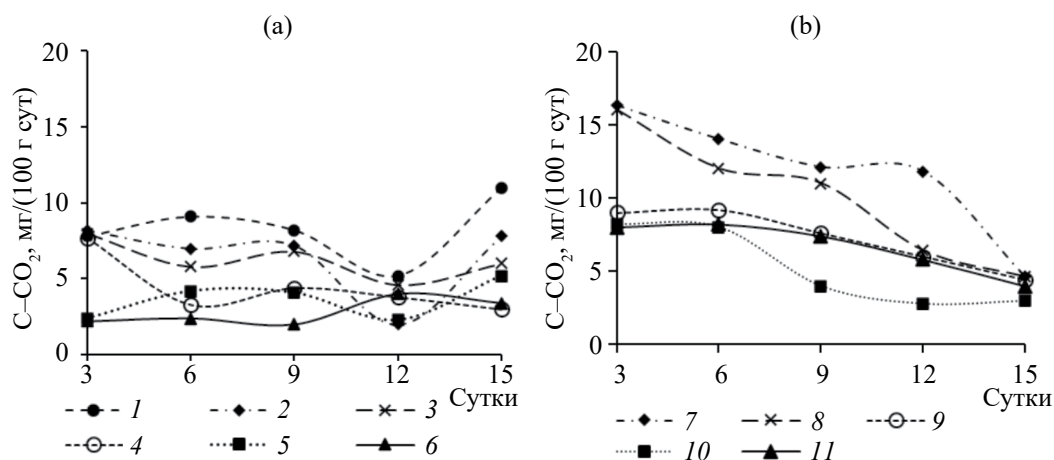


Рис. 1. Интенсивность разложения торфов в модельном опыте: верховые виды торфа (а): 1 – комплексный, 2 – пушицево-сфагновый, 3 – сфагновый мочажинный, 4 – фускум, 5 – пушицевый, 6 – шейхцериевый; низинные виды торфа (б): 7 – вахтовый, 8 – древесно-осоковый, 9 – древесный, 10 – осоково-гипновый, 11 – осоковый.

ния которых, интенсивность трансформации постепенно снижается. Однако получили не экспоненциальную зависимость, а синусоидальную, что свидетельствует о влиянии неучтенных факторов на процесс разложения.

В низинных торфах активность трансформации ОВ изначально больше у вахтового и древесно-осокового торфов, но со временем ее скорость постепенно уменьшается, принимая вид экспоненциальной кривой. Исключение составляет древесно-осоковый торф, динамика трансформации ОВ которого больше напоминает аналогичную динамику пушицевого торфа верхового типа. Возможно, это определяется конкретным видом древесных остатков, образованных листовенными породами, которые входят в ботанический состав этого торфа. Как отмечено в работе [8], изучавшая активность трансформации разного состава лесных подстилок, последняя возрастает в ряду: кедр < сосна < лиственница < ель < осина < береза.

В результате по активности трансформации (накоплению С—СО₂) в условиях опыта было получено, что верховые торфа располагаются в следующий ряд: сфагново-мочажинный > комплексный > фускум > пушицево-сфагновый > шейхцериевый > пушицевый, а низинные торфа: гипновый > осоковый > осоково-гипновый > вахтовый > древесный > древесно-осоковый.

При трансформации ОВ торфов функционирует сложный комплекс ферментов. Ранее [14, 31] установлено, что ферментативная активность и ее

характер в значительной мере определяются видом торфа.

Ферментативная характеристика представительных торфов приведена в табл. 6. В целом более активны ферменты в низинных торфах. В торфах низинного типа высокая инвертазная активность характерна для травяного вида торфа, в меньшей степени инвертаза проявляет активность в древесно-травяном торфе и еще более уменьшается в осоковом и древесном торфах. Дегидрогеназа активна в древесном виде торфа и практически одинакова в других видах торфов низинного типа. Другие оксидоредуктазы в этих торфах также проявляют высокую активность, но степень их активности в разных торфах существенно различается. Так, папоротниковый торф выделяется низкой активностью общей и ферментативной каталазы (средние значения соответственно 1.6 и 0.6 мл О₂/(г 2 мин)) и высокими значениями активности полифенолоксидазы и пероксидазы (соответственно 2.2 и 24.7 мг 1.4-бензохинона/(г 30 мин)). К сожалению, в торфах верхового типа не были определены гидролитические ферменты. Не останавливаясь далее на анализе активности ферментов, отметим, что биологическая составляющая торфов чрезвычайно чувствительна к изменению внешних условий в отличие от минеральных почв, что и отмечается исследователями [21].

Наконец, нельзя не отметить роль ботанического состава торфов, которая проявляется и при анализе микробиологического состава, выполненного

Таблица 6. Ферментативная активность представительных торфов разного генезиса

Вид торфа	R, %	Инвертаза, мг глюкозы за 4 ч/г	Дегидро-геназа, ТТФ мг/г	Каталаза общая	Каталаза ферментативная	ПФО	ПД
				мл O ₂ /(г 2 мин)			
мг 1.4-бензохинона/ (г 30 мин)							
Верховые торфа							
Фускум	5	—	—	2.8 ± 0.7	2.0 ± 0.7	0.3 ± 0.1	1.7 ± 0.9
Магелланикум	5	—	—	4.1 ± 1.9	3.3 ± 1.2	0.1 ± 0.0	3.5 ± 1.5
Магелланикум	10	—	—	3.8 ± 1.8	2.4 ± 0.4	2.0 ± 1.7	5.6 ± 3.9
Сосново-пушицевый	50	—	—	2.7 ± 1.2	2.1 ± 0.1	2.0 ± 1.7	20.5 ± 11.3
Низинные торфа							
Травяной	35	133.3 ± 1.1	0.7 ± 0.1	4.7 ± 0.8	4.3 ± 0.8	0.2 ± 0.1	10.8 ± 0.6
Осоковый	40	17.4 ± 0.4	0.5 ± 0.0	6.7 ± 1.0	6.2 ± 1.1	0.3 ± 0.1	8.9 ± 0.4
Древесный	40	19.4 ± 0.8	1.7 ± 0.3	6.9 ± 0.4	6.0 ± 0.4	0.8 ± 0.1	12.7 ± 0.2
Древесно-травяной	55	41.2 ± 0.2	0.6 ± 0.1	6.2 ± 0.6	5.6 ± 0.6	0.7 ± 0.0	12.4 ± 0.2
Папоротниковый	40	—	—	1.6 ± 0.4	0.6 ± 0.2	2.2 ± 0.8	24.7 ± 8.3

Примечание. ПФО — полифенолоксидаза, ПД — пероксидаза, R — степень разложения, ± — стандартное отклонение, прочерк — не определяли.

методом люминесцентной микроскопии. В табл. 7 приведены средние значения из 15 определений верховых и низинных видов торфа с близкими значениями степени разложения и зольности. Метод позволяет дифференцировать как активный компонент микромицетного комплекса — мицелий, так и неактивный компонент — споры [35]. Максимальная численность бактерий отмечается в травяном низинном торфе 60.6 млрд/г. В двух видах торфа (древесно-травяном и сосново-пушицевом) — наименьшие значения плотности бактериальных популяций соответственно 19.3 и 7.5 млрд/г, что объясняется присутствием включений древесины, в том числе сосны. Следует отметить, что степень разложения торфа отражает суммарный эффект действия ускоряющих и тормозящих факторов трансформации остатков растений при торфообразовании. Сосново-пушицевый вид торфа имеет высокую степень разложения и в этом случае важным оказывается эффект торможения вследствие содержания антисептиков и лигнина в сосновых остатках. Споры грибов преобладают в верховом магелланикум и фускум торфах. Далее по численности следуют травяной и осоковый низинные торфа. Известно, что верховые торфа, как правило, бедны актиномицетным мицелием и богаты грибным мицелием. Представляет интерес как их содержание распределяется по видовому составу торфов. Актиномицетного мицелия больше в сосново-пушицевом торфе, но это превышение незначительно. Можно констатировать, что актиномицетный мицелий в рассматриваемых верховых торфах содержится в очень небольших количествах и практически одинаково по видам верховых

торфов. В значительной степени они различаются по грибному мицелию, которого больше в фускум торфе по сравнению с магелланикум и сосново-пушицевым видами торфа, соответственно на 87.6 и 57.2%. В низинных видах торфов грибной мицелий отсутствует. Но хорошо проявляет активность актиномицетный мицелий, которого больше в травяном виде торфа, и его содержание уменьшается в осоковом и древесно-травяном торфе. Эти показатели свидетельствуют о представительности данных по грибному мицелию для видов торфов верхового типа и по активности актиномицетного мицелия — для торфов низинного типа, что определяется доступностью питательных веществ в разных видах торфов для проявления их активности.

В дополнение к приведенной оценке микробиологической активности исследуемых торфов методом люминесцентной микроскопии, в тех же образцах использовали метод СИД. Метод дает информацию о взаимосвязи величины микробной биомассы, ее дыхательной активности и параметров экофизиологического статуса микробного сообщества [33, 34, 37]. Работы, оценивающие микробоценозы торфов методом СИД, пока немногочисленны [9, 10]. В табл. 7 представлены результаты, полученные методом СИД. Повышенное БД 2.5 мкг С—СО₂/(г ч) наблюдается в травяном низинном торфе и сосново-пушицевом верховом торфе — 2.1 мкг С—СО₂/(г ч). Остальные торфа характеризуются примерно одинаковыми значениями БД. Пределы изменения биомассы в верховых торфах составляют 1.2–1.9 мг/г с наибольшим значением в сосново-пушицевом торфе. В низинных

Таблица 7. Микробиологическая активность видов торфа разного генезиса, средние значения за летние периоды

Вид торфа	R, %	Бактерии, млрд/г	Актиноми- цетный мицелий, м/г	Грибной мицелий, м/г	Споры грибов, млн/г	БД, мкг C—CO ₂ /(г ч)	БМ, мг/г	QR
		метод люминесцентной микроскопии				метод СИД		
Верховые торфа								
Фускум	5	42.3 ± 4.1	300 ± 36	4040 ± 320	54.6 ± 3.1	1.4 ± 0.2	1.2 ± 1.8	0.4 ± 0.1
Магелланикум	5	26.9 ± 5.8	220 ± 27	3540 ± 183	40.7 ± 5.0	1.7 ± 0.2	1.7 ± 1.3	0.6 ± 0.1
Сосново-пушице- вый	40	7.5 ± 1.6	380 ± 78	2310 ± 170	4.2 ± 0.2	2.1 ± 0.3	1.9 ± 0.2	1.1 ± 0.2
Низинные торфа								
Травяной	35	60.6 ± 3.8	1940 ± 421	0.0	24.3 ± 1.2	2.5 ± 0.2	3.5 ± 0.4	5.9 ± 0.3
Осоковый	40	38.9 ± 6.4	560 ± 146	3 ± 1	10.4 ± 1.4	1.3 ± 0.4	1.7 ± 0.1	4.4 ± 0.2
Древесно-травяной	40	19.3 ± 1.6	850 ± 127	0.0	4.7 ± 1.3	1.3 ± 0.4	1.5 ± 1.1	3.2 ± 0.2

Примечание. СИД — субстрат-индуцированное дыхание, БД — базальное дыхание, БМ — биомасса, QR — коэффициенты метаболической активности, R — степень разложения, ± — стандартное отклонение.

торфах высокие значения биомассы характерны для травяного торфа 3.5 мг/г. Коэффициенты метаболической активности в верховых торфах чаще не превышали 1, но их экстремальные значения могут быть и выше и иногда достигали значения 2.3. Высокие значения QR показывает в низинных торфах 3.2–5.9, при этом наибольшие значения характерны для низинного травяного торфа. Важно отметить, что для данного вида торфа характерно высокое содержание ГК и валового азота, что благоприятствует активной трансформации ОВ травяного торфа и подтверждается его, как правило, высокой степенью разложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках создаваемой национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов важен обязательный учет ботанического (видового) состава торфов лесных болот. Проведенными исследованиями показана неоднородность профиля торфяных почв лесных экосистем по составу ОВ, биологической активности и, соответственно, биохимической устойчивости к процессам разложения, что определяется ботаническим составом торфов, и должно учитываться при оценке запасов углерода в торфяных почвах лесных экосистем.

Преобразования ОВ в органогенном профиле лесных болот характеризуются следующими особенностями: наличие неспецифических соединений (целлюлоза, липиды, лигнин), малыми количествами минеральных соединений и вследствие этого разной устойчивостью их ОВ к биологической деструкции. Выявлено, что пределы изменения содержания битумов по видам торфов составляют 0.2–10.0%, лигнина 6.9–14.5%, суммы ГК и ФК – 19.4–50.8.

Эксперименты по трансформации ОВ представительных торфов показали, что их активность определяется видом и ботаническим составом торфов. По величине активности разложения верховые торфа располагаются в ряд: сфагново-мочажинный > комплексный > фускум > шейхцерицево-сфагновый > пушицево-сфагновый > шейхцерицевый > пушицевый; низинные торфа: гипновый > осоковый > осоково-гипновый > вахтовый > древесный > древесно-осоковый.

В результате двухлетних полевых экспериментов установлено, что при разложении ОВ растений-торфообразователей биомасса *Carex limosa* и *Eriophorum latifolium* Норре уменьшилась на 20–35 мас. %, сфагновых мхов: *Sph. fuscum*, *Sph. magellanicum* – на 3–13 мас. %. В процессе трансформации торфообразователей существенно меняется химический состав ОВ, но индивидуально по каждому растению, а также увеличивается содержание ароматических полисопряженных систем,

карбоксильных групп, уменьшается количество углеводных фрагментов.

Агролесомелиорация, продолжительностью в 60 лет, оказала влияние на процесс трансформации ОВ торфов. Степень разложения торфа травяного и осокового вида в условиях агролесомелиорации увеличилась на 5% во всем слое 0–75 см. В составе ОВ торфов снизилось содержание битумов, легко-гидролизуемых веществ, увеличилось – ГК и лигнина.

Показано, что трансформация ОВ торфов, слагающих торфяные почвы, неразрывно связана с активностью микрофлоры и ферментов. Уровень микробиологического и биохимического разложения ОВ торфов (степень разложения торфа) и его результат (компонентный состав торфов) определяются особенностями растительного покрова исходных фитоценозов, отражающихся в ботаническом составе торфа.

Полученные результаты могут быть использованы при изучении структурно-функциональной организации болотных экосистем, а также для прогнозирования последствий их освоения на глобальные изменения в биосфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-26-00161) и госзадании Минобрнауки РФ (№ 5.7004.2017/64).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
2. Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васнев В.И. Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи Европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20100044>
3. Архипов В.С., Маслов С.Г. Состав и свойства типичных видов торфа центральной части Западной Сибири // Химия растительного сырья. 1998. № 4. С. 9–16.

4. Бамбалов Н.Н. Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения. Минск: Наука и техника. 1984. 175 с.
5. Бамбалов Н.Н. Минерализация и трансформация органического вещества торфяных почв при их сельскохозяйственном использовании (на примере торфяных почв Белоруссии). Дис. ... д-ра с.-х. наук. Минск, 1983. 497 с.
6. Бамбалов Н.Н., Беленькая Т.Я. Фракционно-групповой состав органического вещества целинных и мелиорированных торфяных почв // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1431–1437.
7. Бямбагар Б., Кушнарев Д.Ф., Федорова Т.Е. и др. Взаимосвязь фрагментного состава гуминовых кислот с их физиологической активностью // ХТТ. 2003. № 1. С. 83–90.
8. Ведрова Э.Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
9. Гродницкая И.Д., Карпенко Л.В., Пашкеева О.Э., Гончарова Н.Н., Старцев В.В., Батурина О.А., Дымов А.А. Влияние лесных пожаров на микробиологические свойства торфяных олиготрофных почв и торфяно-подзолов глеевых в болотах северной части Сым-Дубчесского междуречья (Красноярский край) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 454–468.
10. Гродницкая И.Д., Трусова М.Ю. Микробные сообщества и трансформация соединений в болотных почвах таежной зоны (Томская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1099–1107.
11. Добровольская Т.Г., Скворцова И.Н., Лысак Л.В. Методы выделения и идентификации почвенных бактерий. М.: Изд-во МГУ, 1989. 40 с.
12. Ефимов В.Н. Торфяные почвы. М.: Россельхозиздат, 1980. 120 с.
13. Ефремова Т.Т. Гумус и структурообразование в лесных торфяных почвах Западной Сибири. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 1990. 48 с.
14. Зименко Т.Г., Самсонова А.С., Мисник А.Г. Микробные ценозы торфяных почв и их функционирование. Минск: Наука и техника, 1983. 181 с.
15. Иванникова Л.А. Способ определения кинетики минерализации органического вещества почвы. Пат. СССР № 1806375.
16. Инишева Л.И., Дементьева Т.В., Пяткова С.И. Свидетельство об официальной регистрации БД № 970002. Химия торфов: автоматизированная информационная система. М., 1997.
17. Инишева Л.И., Ивлева С.Н., Щербакова Т.А. Руководство по определению ферментативной активности торфяных почв и торфов. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2003. 122 с.
18. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000. 407 с.
19. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
20. Кожевин П.А., Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Динамика развития различных микроорганизмов в почве // Микробиология. 1979. Т. 48. № 4. С. 490–494.
21. Козунь Ю.С., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние климата на ферментативную активность лесных почв Северного Кавказа // Лесоведение. 2022. № 3. С. 262–269.
<https://doi.org/10.31857/S002411482203010X>
22. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.В., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы их природоохранное значение. М., 2001. 584 с.
23. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.
24. Марков В.В., Оленин А.С., Оспенникова, Л.А., Скобеева Е.И., Хорошев П.И. Торфяные ресурсы мира. М.: Наука, 1988. 384 с.
25. Полянская Л.М., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. Определение жизнеспособности спор и мицелия почвенных грибов // Микробиология. 1998. Т. 67. № 6. С. 832–836.
26. Раковский В.Е., Пигулевская Л.В. Химия и генезис торфа. М.: Недра, 1978. 231 с.
27. Романова Е.А. Типы болотных массивов и закономерности распределения их на территории Западной Сибири // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука, 1974. С. 167–174.
28. Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В. Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв южной тайги // Почвоведение. 2009. № 10. С. 1233–1240.
29. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 358 с.
30. Широких П.С. Органическое вещество и соединения азота в низинных торфяных почвах с различным ботаническим составом // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 1981. № 1. С. 6–20.
31. Щербакова Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества. Минск: Наука и техника, 1983. 222 с.
32. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. № 3. P. 314–322.
33. Bouma J. Environmental Quality: a European Perspective // J. Environm. Quality. 1997. V. 26. P. 26–34.
34. Conrad R. Soil Microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO) // Microbiological Reviews. 1996. V. 60. № 4. P. 609–640.
35. Golovchenko A.V., Gracheva T.A., Lypcan V.A., Dobrovolskaya T.G., Manucharova N.A. Actinomycete

- complexes in eutrophic peatlands // Eurasian Soil Science. 2022. V. 55. № 8. P. 1064–1073.
36. Kovalevskii D.V., Permin A.B., Perminova I.V. Recover of Conditions for Quantitative Measuring the PMR Spectra of Humic Acids // Moscow University Chemistry Bulletin. 2000. V. 41. № 1. P. 39–42.
37. Sikora L.J., Yakovchenko V., Kaufman D.D. Comprasion of Rehydration Method for Biomass Determination to Fumigation-incubation and Substrate-induced Respiration Method // Soil Biol. Biochem. 1994. V. 26. № 10. P. 1443–1445.

Features of Organic Matter and Biological Properties of Forest Swamp Peats and Their Changes in the Process of Functioning

L. I. Inisheva^{1, *}, N. V. Yudina², and A. V. Golovchenko³

¹*Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, 634061 Russia*

²*Institute of Petroleum Chemistry SB the Russian Academy of Sciences, 634021 Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: inisheva@mail.ru

In Russia, when studying the carbon cycle in the biosphere, special attention is paid to the processes of transformation of organic matter in the surface layer of the hypergenesis zone. The article provides a description of the group composition of the organic matter of peats and provides a rationale for the importance of the botanical composition. The importance of taking into account the botanical composition of peats that make up natural and reclaimed forest swamps, as well as their spatial heterogeneity, is shown. This is important to know when estimating carbon stocks in peat soils of forest ecosystems. In an experiment on the activity of transformation of peat OM, it was revealed that their activity is determined by the type and botanical composition of peat. According to the amount of accumulation of C–CO₂ during the transformation process, high-moor peats are arranged in the following series: sphagnum-hollow peat > complex > fuscum > scheuchzeria-sphagnum > cotton grass-sphagnum > scheuchzeria > cotton grass; lowland: hypnum > sedge > sedge-hypnum > shift > woody > wood-sedge. Two-year experiments on the activity and direction of transformation of OM of peat-forming plants under field conditions showed that the component and chemical composition of their OM changes significantly, but individually for each plant, and the content of aromatic polyconjugated systems and carboxyl groups also increases and the number of carbohydrate fragments decreases. The characteristics of the microbiome and enzymes of representative peats of forest swamps in the taiga zone of Western Siberia are given. The conducted studies confirmed the position of V.E. Rakovsky that differences in marsh plants in the composition of peats are manifested in the chemical and biological characteristics of peats.

Keywords: botanical composition, Western Siberia, organic matter, microbiome, enzymes, transformation of OM