

УДК 631.417.2

ОЦЕНКА БИОГЕННОСТИ И БИОАКТИВНОСТИ АГРОСЕРЫХ ГЛЕЕВАТЫХ НЕОСУШЕННЫХ И ОСУШЕННЫХ ПОЧВ

© 2021 г. И. В. Ковалев^{а, *}, В. М. Семенов^б, Н. О. Ковалева^а,
Т. Н. Лебедева^б, В. М. Яковлева^а, Н. Б. Паутова^б

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

^бИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБ РАН, ул. Институтская, 2, Пушкино Московской области, 142290 Россия

*e-mail: kovalevmsu@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020 г.

После доработки 07.12.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Выполнено сравнение биологической активности и биогенности осушенных и неосушенных агро-серых оглеенных почв (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozems) Московской области по таким показателям, как величина микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) и базального дыхания (БД), содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$), органического вещества твердых дискретных частиц ($C_{\text{тдч}}$), потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0). Обнаружено, что фракция $C_{\text{тдч}}$ оказалась одним из индикаторов начальных стадий заболачивания минеральных почв, а показатели $C_{\text{мик}}$ и БД были чувствительны к ослаблению или усилению степени гидроморфизма почв. Предложено оценивать биогенность почвы по показателям $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{тдч}}$, а биоактивность – по показателям C_0 , $C_{\text{мик}}$ и БД. Агросерые оглеенные почвы разных стадий гидроморфизма близки по биогенности, но отличаются по биоактивности. В период эффективного действия дренажа происходит изменение гумусного состояния агросерой глееватой почвы, которая по показателям биогенности и биоактивности приближается к автоморфным зональным аналогам.

Ключевые слова: гидроморфизм почв, дренаж, органический углерод, микробная биомасса, потенциально-минерализуемое органическое вещество, твердые дискретные частицы

DOI: 10.31857/S0032180X21070078

ВВЕДЕНИЕ

В центральной листовенно-лесной зоне широко распространены светло-серые и серые лесные суглинистые почвы начальных стадий гидроморфизма, сформированные на тяжелых бескарбонатных лёссовидных суглинках. Серые лесные глеевые и более заболоченные почвы грунтового типа увлажнения приурочены, как правило, к небольшим депрессиям, мелким западинам, днищам лощин [15]. Низкая водопроницаемость лёссовидных тяжелых суглинков, на которых залегают серые лесные почвы, способствует периодическому переувлажнению и развитию оглеения. В ряде случаев оглеение напрямую связано с распашкой, которая приводит к перераспределению влаги. Признаки оглеения в виде грязно-сизых и ржавых пятен характерны преимущественно для текстурного горизонта. Агросерые глееватые (глеевые) почвы поверхностного заболачивания отличаются от агросерых почв характерной особенностью по водному режиму: в их профиле с элювиально-иллювиальным строением весной и нередко осенью возни-

кает двухъярусная верховодка. Ее верхний ярус приурочен к пахотному слою, а нижний – к глубине 70–75 см. Эффективное использование почв временного переувлажнения возможно на фоне осушения. Под действием дренажа серые лесные глееватые и глеевые почвы оказываются в новых гидрологических условиях, изменяющих скорость и направленность почвообразовательных процессов. В результате происходит перестройка режима влажности почв, изменение их окислительно-восстановительного потенциала, физических и химических свойств, в том числе гумусного состояния [6].

Гумусное состояние почв традиционно оценивается по содержанию и запасам органического вещества ($C_{\text{орг}}$), его профильному распределению, обогащенности азотом, степени гумификации, типам гумусовых кислот и их особым признакам, устанавливаемым при анализе фракционного и группового состава гумуса [4, 14]. По данным [22] гумусовый горизонт светло-серых лесных почв отличается низким содержанием гу-

муса, гуматно-фульватным типом гумуса, средней степени гумификации, средним содержанием свободных гуминовых кислот (ГК), низким содержанием ГК, связанных с кальцием, высоким содержанием прочносвязанных ГК и средним содержанием неэкстрагируемого осадка. В пахотных горизонтах всех подтипов серых лесных почв уменьшается содержание гумуса и увеличивается отношение ГК к фульвокислотам преимущественно за счет возрастания относительного содержания суммы ГК и фракции ГК₂. Однако характеристики фракционного и группового состава гумуса скорее всего не релевантны нативному почвенному органическому веществу (ПОВ), поскольку при анализе используются сильнощелочные (рН 13) и сильнокислые (рН 1–2) среды, которые не встречаются в почве [27].

Основным требованием к способам фракционирования становится обеспечение минимального деструктирующего эффекта на ПОВ. С помощью ¹³C ЯМР спектроскопии были идентифицированы основные классы органических соединений в серых оглеенных почвах и присутствующих в них железисто-марганцевых конкрециях, что позволило получить новые данные о происхождении и структурных свойствах гуминовых кислот, фосфорсодержащих органических соединений и металл-органических комплексов, о природе взаимодействий органического вещества с поверхностями оксидов и гидроксидов железа и марганца [9].

На наш взгляд, система показателей гумусного состояния почв должна быть дополнена характеристиками, отображающими биогенность и биоактивность почвы. Биогенность характеризует биологическое происхождение веществ, которые образуются в результате роста, отмирания и разложения живых организмов в прошлом или в настоящем и обладают признаками, которые не могут быть сформированы чисто абиотическими процессами [29]. Индикатором биогенности почвы наряду с содержанием $S_{орг}$ может быть органическое вещество твердых дискретных частиц (Particulate Organic Matter), в которой группируются остатки растений и животных разных стадий разложения размером от 2 до 0.053 мм, включая семена, пыльцу, споры, грибные гифы, а также фитолиты и обугленные вещества [28]. Во фракции твердых дискретных частиц содержится до 48% от $S_{орг}$ почвы [20]. Биологическая активность почвы создается деятельностью почвенных микроорганизмов, использующих ПОВ в качестве источника питания и энергии. К биологически активным относятся незащищенные компоненты ПОВ, быстро утилизируемые микроорганизмами с продолжительностью существования менее 3–10 лет [16, 17]. Биологическая активность почвы оценивается по содержанию потенциально-минерализуемого органического вещества и

микробной биомассы [2, 17, 18]. Среди других параметров биоактивности наиболее употребляемыми являются численность групп микроорганизмов, соотношение биомассы бактерий и грибов, активность почвенных ферментов [1, 5, 19–21, 30].

Большая часть результатов по оценке биогенности и биоактивности серых лесных почв получена для автоморфных рядов [3, 17, 18], тогда как серые оглеенные почвы и их осушенные аналоги нуждаются в дополнительном изучении. Открытым остается вопрос о зависимости качества ПОВ от гидрологического режима почв, влияния дренажа на динамику органического вещества в светло-серых лесных оглеенных (агросерых) почвах.

Цель работы – изучить биогенность и биоактивность органического вещества в неосушенных и осушенных агросерых оглеенных почвах зоны южной тайги Восточно-Европейской равнины. Определяли межгодовую динамику (1990–2000–2001–2010–2018 гг.) содержания органического вещества, влияние усиления гидроморфизма агросерых почв от микроповышения к микропонижению (глубокооглеенная “автоморфная”, глееватая и глееватая “экстремально выраженная”) и последствие дренажа на качественные показатели ПОВ, по которым оценивали биогенность и биоактивность почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Почвы района исследований агросерые (светло-серые лесные – по классификации почв 1977 г., Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic, Aric) – по классификации WRB; Gleyic Greyzem – по классификации FAO) Коломенского ополья (Московская область, Россия) разной степени заболоченности, сформированы на крупнопылеватом-иловатом легком суглинке с низкими и средними величинами коэффициента водопроницаемости. В профиле агросерой глубокооглеенной почвы (P–EL–BEL–BT1–BT2–BT3–BCg'–Cg') на микроповышении (55°06'51" N, 38°18'32" E) признаки гидроморфизма проявляются в виде редких Mn-Fe конкреций в четко выраженном горизонте BEL, кремнеземистой присыпки по всему профилю, пятен оглеения в горизонтах BC и C с глубины 100 см, темноокрашенных крупных пятен аморфных гидроксидов Fe и Mn с той же глубины. Профиль агросерой глееватой почвы (Pfs,g'–BELfs,g'–BT1g'–BT2g'–BT3g'–BCg'') обладает мраморовидной окраской иллювиальных горизонтов (особенно горизонта BT2g'), большим количеством орштейнов в горизонтах P и BEL, сизыми кутанами. Тяжелый гранулометрический состав почв Коломенского ополья является одной из причин их временного избыточного увлажнения. Агросерые неоглеенные и глубоко-

оглеенные (автоморфные) почвы микроповышенных Коломенского ополья обладают периодически промывным типом водного режима, а их влажность на протяжении всего теплого периода не превышает наименьшую влагоемкость, что способствует преобладанию окислительных условий. Реакция почвенной среды нейтральная и близкая к нейтральной.

В 1989 г. в районе исследований был создан экспериментальный мелиоративный полигон "Кочкарево" (55°06'58" N, 38°18'37" E). На полигоне было построено 6 автономных дренажных систем площадью 2–4 га каждая. Системы строились в трехкратной повторности. Укладка пластмассового и гончарного дренажа производилась на одну и ту же глубину – 1–1.2 м с одним и тем же междренним расстоянием в 16 м [6]. Наиболее эффективная работа дренажной системы была в период с 1990 по 2008 гг., затем эффективность действия дренажных систем снизилась из-за заливания дренажных труб. Начиная с 1989 г. на осушенных участках отбирали пробы агросерой глееватой почвы по средней линии междренного пространства, то есть на расстоянии 8 м от дрены. Отбор образцов во все годы исследований производили в третьей декаде августа. Отобранные в разные годы образцы неосушенных и осушенных почв хранили в воздушно-сухом состоянии.

Определение органического вещества фракции твердых дискретных частиц. Фракцию твердых дискретных частиц (ТДЧ) выделяли по методу [23]. Образцы почвы предварительно измельчали до частиц <2 мм. К навеске почвы массой 10 г добавляли 30 мл 0.5%-ного раствора гексаметафосфата натрия ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$) и диспергировали на шейкере в течение 15 ч при скорости 180 об./мин. Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0.05 мм. Остаток на сите несколько раз промывали дистиллированной водой, до получения прозрачной промывной жидкости, далее сушили в течение часа при 40°C, после чего количественно переносили в емкость для высушивания при 65°C в течение суток. В каждом анализируемом образце почвы измеряли массу фракции в трех повторностях и содержание углерода во фракции ($C_{\text{ТДЧ}}$).

Определение потенциально-минерализуемого органического вещества. Потенциально-минерализуемое органическое вещество в почве определяли путем инкубации почвенных образцов массой 10 г при постоянных условиях температуры (22°C) и влажности (25 мас. %), измеряя количество выделяющийся $\text{C}-\text{CO}_2$ на газовом хроматографе (Кристалл Люкс 4000 М) [17]. Постоянную влажность образцов поддерживали периодическим добавлением воды до исходной массы. Продолжительность инкубации составляла 182 сут. Повторность – трехкратная. За весь период инку-

бации проведено 36 отборов газовых проб. После каждого измерения флаконы проветривали. Скорость потока $\text{C}-\text{CO}_2$ (мг/(100 г сут)) рассчитывали по разнице концентраций CO_2 за время экспозиции. Содержание углерода потенциально-минерализуемого органического вещества (C_0) в почве на момент начала инкубации рассчитывали по кумулятивному количеству $\text{C}-\text{CO}_2$, выделившемуся за весь период инкубации, используя однокомпонентное уравнение кинетики первого порядка:

$$C_t = C_0(1 - \exp(-kt)), \quad (1)$$

где C_t – кумулятивное количество $\text{C}-\text{CO}_2$ (мг/100 г почвы) за время t (сут); C_0 – содержание потенциально-минерализуемого углерода ПОВ (мг/100 г); k – константа скорости минерализации ПОВ (сут^{-1}).

Вычисление биокинетических параметров C_0 и k проводили методом нелинейной оценки программы Statistica 10.0. Устанавливали процент минерализации ПОВ (C_0 , % от $C_{\text{орг}}$) и индекс биологической стабильности (ИБС) органического вещества:

$$\text{ИБС} = (C_{\text{орг}} - C_0)/C_0. \quad (2)$$

Определение микробной биомассы и базального дыхания. Углерод микробной биомассы в почве ($C_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) в модификации [2, 3]. Метод основан на измерении первоначального максимального выделения CO_2 из почвы, обогащенной глюкозой. Образец воздушно-сухой почвы, пропущенной через сито с диаметром отверстий 2 мм массой 1 г, помещали во флакон емкостью 15 мл, увлажняли дистиллированной водой до 60% полной влагоемкости и предынкубировали в течение 7 сут при 22°C. После предынкубации к образцу почвы добавляли 0.2 мл 5%-го раствора глюкозы, инкубировали в течение 3–4 ч при 22°C, затем отбирали газовую пробу из флакона и измеряли концентрацию $\text{C}-\text{CO}_2$ на газовом хроматографе Кристалл Люкс 4000 М. $C_{\text{мик}}$ (мкг С/г почвы) рассчитывают по скорости СИД (мкл $\text{C}-\text{CO}_2/\text{г}$ почвы/ч), используя формулу:

$$C_{\text{мик}} = \text{СИД} \cdot 40.04 + 0.37. \quad (3)$$

Базальное дыхание (БД) определяли по скорости выделения CO_2 предынкубированной почвой за 24 ч инкубации при температуре 22°C и влажности 60% от полной влагоемкости. Процедура измерения БД (мкг $\text{C}-\text{CO}_2/\text{г}$ почвы/ч) та же, как для СИД, только вместо раствора глюкозы в почву вносили 0.2 мл/г дистиллированной воды. Удельное дыхание микробной биомассы (микробный метаболический коэффициент, $q\text{CO}_2$)

Таблица 1. Содержание $C_{\text{орг}}$, $N_{\text{общ}}$, потенциально-минерализуемого (C_0) углерода и индекс биологической стабильности (ИБС) в агросерых оглеенных неосушенных и осушенных почвах (слой 0–20 см)

Почва	Горизонт	Год	$C_{\text{орг}}$	N	C/N	C_0	*k, сут ⁻¹	ИБС	
			%			мг/100 г			% от $C_{\text{орг}}$
Агросерые оглеенные почвы с естественным водным режимом									
Глубокооглеенная	**P	2000	1.01 ± 0.03	0.10 ± 0.00	9.8 ± 0.5	98 ± 1	9.7	0.042 ± 0.000	9
Глееватая	P, fs, g'	2000	2.03 ± 0.01	0.21 ± 0.00	9.7 ± 0.0	150 ± 0	7.4	0.046 ± 0.003	13
Глееватая "экстремально выраженная"	P, fs, g"	2000	1.85 ± 0.05	0.19 ± 0.00	9.7 ± 0.4	124 ± 0	6.7	0.043 ± 0.002	14
Агросерые глееватые почвы, осушенные пластмассовым дренажом									
Междренье (8 м от дрены)	P, fs	1990	1.62 ± 0.13	0.14 ± 0.03	11.7 ± 1.2	151 ± 1	9.3	0.036 ± 0.000	10
	P, fs	2000	1.78 ± 0.06	0.17 ± 0.00	10.4 ± 0.1	146 ± 1	8.2	0.034 ± 0.000	11
	P, fs	2001	1.74 ± 0.02	0.17 ± 0.00	10.4 ± 0.4	144 ± 2	8.3	0.036 ± 0.002	11
	P, fs	2010	2.10 ± 0.01	0.20 ± 0.00	10.4 ± 0.0	151 ± 1	7.2	0.040 ± 0.002	13
	P, fs	2018	1.85 ± 0.09	0.18 ± 0.01	10.5 ± 0.0	150 ± 0	8.1	0.041 ± 0.000	11
	Среднее			1.82 ± 0.18	0.17 ± 0.02	10.7 ± 0.6	148	8.2	0.037

* Константа скорости минерализации.

** P – пахотный горизонт (по Классификации почв 1977 г. – Ap).

рассчитывали по соотношению скорости базального дыхания к микробной биомассе:

$$q\text{CO}_2 = \text{БД}/C_{\text{мик}} \quad (4)$$

Численность клеток бактерий и длину грибного мицелия в почве определяли методом люминесцентной микроскопии [12], расчет биомассы бактерий (ББ) и грибного мицелия (БМГ) по формулам (5) и (6) соответственно [13]:

$$\text{ББ} = \text{ЧБ} \times 2 \times 10^{-14}, \quad (5)$$

где ЧБ – численность бактерий в 1 г образца почвы, а биомасса сухого вещества для 1 бактериальной клетки объемом 0.1 мкм³ составляет 2×10^{-14} г.

$$\text{БМГ} = 0.628r^2 \times \text{ДМГ} \times 10^{-6}, \quad (6)$$

где r – замеренный усредненный радиус обрывков грибного мицелия, ДМГ – длина грибного мицелия в 1 г образца почвы.

Содержание $C_{\text{орг}}$ и $N_{\text{общ}}$ в почве определяли на CNHS-анализаторе (Leco 932, USA) в растертых до частиц <0.25 мм образцах. Исходные данные представлены в виде среднего ± стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее содержание органического вещества в агросерых оглеенных почвах. Агросерые оглеенные почвы с естественным водным режимом и агросерые глееватые почвы, осушенные пластмассовым дренажом, содержат в верхнем слое минерального профиля от 1.01 до 2.10% $C_{\text{орг}}$ (табл. 1), что соответствует интервалу содержания $C_{\text{орг}}$ в пахот-

ных светло-серых лесных почвах [22]. По классификации [14] агросерые оглеенные почвы могут быть отнесены к почвам с малым ($C_{\text{орг}}$ 0.6–1.2%) и низким ($C_{\text{орг}}$ 1.2–2.3%) содержанием гумуса. В первые 10–12 лет после укладки дренажа произошло обеднение почвы органическим веществом по сравнению с контролем ($C_{\text{орг}}$ 1.71 и 1.85% соответственно), возможно, из-за активизации его минерализации, вызванной осушением. В последующие два десятилетия наметилась тенденция восстановления запасов $C_{\text{орг}}$ в осушенной агросерой почве. Влияние осушения проявилось также в расширении соотношения C/N в органическом веществе агросерой глееватой почвы по сравнению с неосушенной (10.4–11.7 и 9.7 соответственно). Основные причины расширения C/N – это увеличение поступления в почву растительных остатков, либо систематическое расходование почвенного азота без компенсации минеральными удобрениями.

В агросерых глееватых почвах с естественным водным режимом независимо от влажности года непосредственно после снеготаяния и осенью в период выпадения обильных осадков формируется двухъярусная верховодка – характерная особенность этих почв. В профиле устанавливаются восстановительные условия (270–280 мВ). Летом влажность почвы опускается ниже наименьшей влагоемкости, а в отдельные сухие годы она может уменьшиться в верхних горизонтах на короткий период и до влажности завядания растений. Окислительно-восстановительный потенциал возрастает до 420–470 мВ, обеспечивая преобладание окислительной обстановки на протяжении сухого периода. Под действием дренажа в агросерых гле-

Таблица 2. Содержание органического вещества твердых дискретных частиц (ТДЧ) в пахотном горизонте (Р, 0–20 см) агросерых оглеенных почв

Почва	Горизонт	Масса ТДЧ, % от массы почвы	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от массы фракции	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от массы почвы	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от $C_{\text{орг}}$ почвы	% $C_{\text{ТДЧ}}/C_{\text{орг}}$ почвы	$(C/N)_{\text{ТДЧ}}$	$(C/N)_{\text{ТДЧ}}/(C/N)_{\text{почвы}}$
Глубокооглеенная	Р	7.2	2.44 ± 0.05	0.18	17.3	2.40	13.6 ± 0.5	1.39
Глееватая	Р, fs,g'	9.4	4.15 ± 0.40	0.39	19.2	2.04	13.6 ± 1.1	1.41
Глееватая "экстремально выраженная"	Р, fs,g"	10.5	3.80 ± 0.24	0.40	21.6	2.06	13.3 ± 1.1	1.37

Таблица 3. Динамика содержания органического вещества твердых дискретных (ТДЧ) частиц в горизонте Р, fs (0–20 см) осушенной агросерой глееватой почвы

Год отбора	Масса ТДЧ, % от массы почвы	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от массы фракции	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от массы почвы	$C_{\text{ТДЧ}}$, % от $C_{\text{орг}}$ почвы	% $C_{\text{ТДЧ}}/C_{\text{орг}}$ почвы	$(C/N)_{\text{ТДЧ}}$	$(C/N)_{\text{ТДЧ}}/(C/N)_{\text{почвы}}$
1990	<u>6.2</u>	<u>4.44 ± 0.13</u>	<u>0.28</u>	<u>17.0</u>	<u>2.75</u>	<u>15.3 ± 0.3</u>	<u>1.31</u>
	–3.2	0.29	–0.07	–2.2	0.69	1.7	–0.10
2000	<u>6.4</u>	<u>5.20 ± 0.05</u>	<u>0.33</u>	<u>18.7</u>	<u>2.92</u>	<u>15.6 ± 0.3</u>	<u>1.50</u>
	–3.0	1.05	–0.06	–0.5	0.86	2.0	0.09
2001	<u>6.5</u>	<u>5.12 ± 0.19</u>	<u>0.33</u>	<u>19.2</u>	<u>2.95</u>	<u>15.5 ± 1.5</u>	<u>1.48</u>
	–2.9	0.97	–0.06	0	0.89	1.9	0.07
2010	<u>7.6</u>	<u>5.40 ± 0.27</u>	<u>0.41</u>	<u>19.6</u>	<u>2.57</u>	<u>15.9 ± 0.4</u>	<u>1.52</u>
	–1.8	1.25	0.02	0.4	0.51	2.3	0.11
2018	<u>6.7</u>	<u>5.14 ± 0.27</u>	<u>0.34</u>	<u>18.6</u>	<u>2.78</u>	<u>15.0 ± 1.4</u>	<u>1.43</u>
	–2.7	0.99	–0.05	–0.6	0.72	1.4	0.02
Среднее	<u>6.7</u>	<u>5.06</u>	<u>0.34</u>	<u>18.6</u>	<u>2.79</u>	<u>15.5</u>	<u>1.45</u>
	–2.7	0.91	–0.05	–0.6	0.74	1.9	0.04

Примечание. Над чертой – фактическое значение, под чертой – увеличение (уменьшение) по сравнению с неосушенной почвой контроля.

еватых почвах устраняется двухъярусная верховодка, а в нижних горизонтах – гравитационная влага, что в итоге приводит к выравниванию значений окислительно-восстановительного потенциала по всему профилю [26]. Отмеченные различия в гидрологическом и окислительно-восстановительном режимах агросерых почв разной степени оглеения с естественным водным режимом и осушенных пластмассовым дренажом отражаются на содержании и качестве почвенного органического вещества.

Органическое вещество твердых дискретных частиц в агросерых оглеенных почвах. От 17 до 22% от всего органического вещества в агросерых оглеенных почвах с естественным водным режимом и в агросерых глееватых почвах, осушенных пластмассовым дренажом, было представлено твердыми органическими частицами размером 2–0.05 мм (табл. 2, 3). Фракция ТДЧ почти в 2 раза богаче

органическим углеродом, чем цельный образец почвы, что обусловлено присутствием в ее составе полуразложившихся растительных остатков. В пользу этого аргумента свидетельствуют данные по содержанию лигнина и степени окисленности лигниновых фенолов: фракции мелкого песка (0.25–0.02 мм) свойственны максимальное содержание лигнина и низкая степень окисленности лигниновых фенолов по сравнению с фракциями пыли (0.02–0.002 мм) и ила (<0.002 мм) [25]. Можно заметить также, что отношение C/N во фракции ТДЧ было больше, чем в цельных образцах оглеенных почв. Источником ТДЧ были возделываемые зерновые культуры, а в последние годы луговые травы залежи. Поступление в почву свежего органического вещества с растительной массой приводит к более сильному обогащению ТДЧ углеродом, чем азотом, расширяя тем самым отношение C/N. Подобная закономерность была

показана ранее для почв лесостепной и степной зон [18].

Масса фракции ТДЧ адекватно отражала усиление степени гидроморфизма агросерых оглеенных почв, закономерно увеличиваясь в глееватых почвах по сравнению с глубокооуглеенными почвами на микроповышении (табл. 2). “Экстремально выраженная” глееватая почва была выделена Зайдельманом [6] как переходный вид почвы между агросерой глееватой и глеевой почвой. Интересно отметить, что все показатели фракции ТДЧ в глееватой “экстремально выраженной” почве имеют почти те же значения, что и в типичной глееватой почве. Таким образом, фракция ТДЧ является одним из индикаторов начальных стадий гидроморфизма минеральных почв, а глееватая “экстремально выраженная” почва по показателям ТДЧ соответствует переходному виду между глееватой и глеевой почвой.

Изменение водного режима под влиянием дренажа в значительной мере отражается на продуктивности растений, биологической активности почвы и других почвенных процессах. Как следствие в первые 10 лет последствий дренажа (1990–2001 гг.) произошло уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$, массы ТДЧ и $C_{\text{тдч}}$ по сравнению с неосушенной глееватой почвой (табл. 3). Это вполне согласуется и с деструкцией лигнина в осушенных агросерых глееватых почвах по сравнению с контролем. Сумма продуктов окисления лигнина уменьшалась с 12.9 до 9.6 мг/г $C_{\text{орг}}$, а степень окисленности боковых цепочек лигнина по отношению к исходным растительным тканям возрастала с 4.6 до 6.5 [8]. В то же время в первые годы после осушения наблюдалось расширение отношения $C_{\text{тдч}}$ от общего $C_{\text{орг}}$ почвы и $C_{\text{тдч}}/N_{\text{тдч}}$, что могло быть связано с большей надземной и подземной биомассой сельскохозяйственных культур на осушенных почвах. Например, урожайность озимой пшеницы на контроле (неосушенной глееватой почве) составила 0.62 т/га, а под влиянием дренажа (1990 г.) – 4.50 т/га, соответственно биомасса корней в слое 0–20 см – 2.3 и 7.1 т/га [25].

По мере адаптации почвенных процессов к новым гидрологическим условиям в осушенной почве увеличивалась масса фракции ТДЧ, возрастала концентрация органического углерода в этой фракции и доля $C_{\text{тдч}}$ в составе ПОВ. При этом в экстремально теплом и засушливом 2010 г. увеличение этих показателей было более значительным, чем в предыдущие годы или при отборе в 2018 г. Можно предположить, что резкое уменьшение влажности почвы в 2010 г. на протяжении почти двух месяцев (июль–август) до уровня влажности завядания приводило к отмиранию и опаданию надземных органов растений. На фоне замедления микробной активности почв поступив-

ший опад сохранялся в почве, что и стало причиной прироста $C_{\text{орг}}$, увеличения вклада ТДЧ в ПОВ и расширения отношения C/N в ТДЧ. Известно, что фракция ТДЧ обладает большей чувствительностью к изменениям систем землепользования и агротехники, чем валовое содержание органического углерода [11, 18, 23, 24].

Потенциально-минерализуемое органическое вещество и микробная биомасса в агросерых неосушенных и осушенных почвах. Потенциально-минерализуемое органическое вещество (C_0) почвы неоднородно по своему качественному составу и имеет достаточно широкий спектр соединений с большей и меньшей скоростью минерализации [16]. Содержание C_0 в почве дает общее представление о минерализационной способности органического вещества: чем больше доля потенциально-минерализуемого углерода, тем органическое вещество почвы менее устойчиво и более подвержено минерализующим воздействиям. По предположенной ранее классификации агросерые глееватые почвы относятся к почвам, в средней степени обеспеченным углеродом активного органического вещества [17]. В глубокооуглеенной (автоморфной) почве на микроповышении, где на протяжении всего вегетационного периода создаются окислительные условия, содержание C_0 закономерно меньше, а доля C_0 от $C_{\text{орг}}$ больше по сравнению с более гидроморфными глееватыми почвами (табл. 1). Эти данные согласуются с ранее проведенными исследованиями. В глубокооуглеенных почвах на микроповышении по сравнению с глееватыми в микрозападине окисленность и преобразованность боковых цепочек лигнина по отношению к исходным растительным тканям была сильнее (8.1 и 2.9% соответственно), отношение лигнина от азота шире (60.0 и 52.3 соответственно), содержание полисахаридов меньше (78.5 и 92.0 мг/г N), а степень ароматичности по данным ^{13}C -ЯМР-спектроскопии несколько больше (24 и 21% соответственно) [7].

Агросерая почва после осушения сначала обеднялась потенциально-минерализуемым органическим веществом, а после постепенного заиливания дренажной системы, содержание C_0 восстанавливалось до исходного уровня (табл. 1). Однако в среднем по четырем срокам отбора, за исключением экстремально сухого 2010 года, доля C_0 в $C_{\text{орг}}$ осушенной почвы была достоверно выше, а константа скорости минерализации меньше по сравнению с контролем неосушенной глееватой почвы (8.5 и 7.4%, 0.037 и 0.046 сут⁻¹ соответственно). Это свидетельствует об изменении качественного состава ПОВ в осушенной почве, которая по биологическим характеристикам ПОВ стала походить на глубокооуглеенную (автоморфную) почву на микроповышении.

Таблица 4. Содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$), базальное дыхание (БД) и дыхательный коэффициент ($q\text{CO}_2$) в агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв (слой 0–20 см)

Почва	Горизонт	Год	$C_{\text{мик}}$			БД, мкг $C-\text{CO}_2/(\text{г ч})$	$q\text{CO}_2$
			мкг/г	% от $C_{\text{орг}}$	% от C_0		
Агросерые оглеенные почвы с естественным водным режимом							
Глубокооглеенная	P	2000	303 ± 18	3.0	31	0.59 ± 0.04	1.94 ± 0.06
Глееватая	P, fs, g'	2000	411 ± 42	2.0	27	1.18 ± 0.10	2.92 ± 0.55
Глееватая “экстремально выраженная”	P, fs, g”	2018	359 ± 12	1.9	29	0.89 ± 0.06	2.49 ± 0.09
Агросерые глееватые почвы, осушенные пластмассовым дренажом							
Междренье (8 м от дрены)	P, fs	1990	302 ± 52	1.9	20	1.31 ± 0.12	4.49 ± 1.26
	P, fs	2000	368 ± 10	2.1	25	1.14 ± 0.05	3.10 ± 0.14
	P, fs	2001	289 ± 5	1.7	20	0.76 ± 0.03	2.64 ± 0.14
	P, fs	2010	324 ± 21	1.5	21	0.90 ± 0.12	2.78 ± 0.23
	P, fs	2018	327 ± 10	1.8	22	0.70 ± 0.04	2.14 ± 0.17
	Среднее			322	1.8	22	0.96

На долю микробной биомассы приходилось 1.5–3% от $C_{\text{орг}}$ или 21–30% от потенциально-минерализуемого органического вещества, но содержание микробной биомассы, скорость базального дыхания и дыхательный коэффициент $q\text{CO}_2$ давали хорошее представление о биологической активности почвы (табл. 4).

Среди неосушенных почв наибольшие значения содержания $C_{\text{мик}}$ и скорости БД были свойственны для агросерой глееватой почвы, для “экстремально выраженной” глееватой почвы они были меньше, а наименьшие – для глубокооглеенной (автоморфной) почвы на микроповышении. Следовательно, микробное сообщество почвы довольно чувствительно к ослаблению или усилению гидроморфизма почвы. Как следствие, в осушенной почве содержалось в 1.1–1.4 раз меньше $C_{\text{мик}}$, а скорость БД в среднем по отборам в разные годы была в 1.2 раза меньше, чем в неосушенной глееватой почве. Обращает на себя внимание высокое значение дыхательного коэффициента в отборе 1990 г. (первый год последствий дренажа), указывающее на стрессовое состояние микробного сообщества, вызванного строительством дренажа и еще не установившимся гидрологическим режимом. Со временем последствия нарушающего воздействия ослабевали и эко-физиологическое состояние микробного сообщества, в целом, нормализовалось.

Определение численности бактерий и длины грибного мицелия с помощью люминисцентной микроскопии показало, что для биомассы бактерий более благоприятны условия, складывающиеся в глубокооглеенной автоморфной почве, тогда как для грибов – в глееватой гидроморфной почве (табл. 5). В глубокооглеенной почве на до-

лю грибов приходилось 63% от общей биомассы, в глееватой – 74%. В других исследованиях на серой лесной почве под залежью и лесом биомасса грибов составляла 82–87% от всей микробной биомассы [21]. При иссушении почвы в экстремально засушливое лето 2010 г. численность бактерий в автоморфной и гидроморфной почвах была 7 и 5 раз больше по сравнению с умеренно влажным 2009 г., а длина грибного мицелия, на оборот, в 2 раза меньше. Можно предположить, что бактерии более чувствительны к текущим погодным условиям сезона, чем грибы, для которых важно наличие повышенной влажности почвы.

Профильное распределение численности бактерий в неосушенной глееватой почве – равномерно убывающее с максимумом в пахотном горизонте P (рис. 1). Максимальные величины длины и биомассы грибного мицелия приурочены к горизонту BEL, что связано с увлажненностью слоя на границе горизонта BEL и тяжелосуглинистого иллювиального горизонта BT1. Под влиянием осушения профильное распределение численности бактерий становится аналогичным распределению грибного мицелия.

Биогенность и биоактивность как сопряженные признаки качества почвы. Биогенность почвы создается биологическим фактором почвообразовательного процесса во взаимодействии с другими факторами на протяжении исторически длительной эволюции, тесно связана с гусосообразованием (гумусонакоплением), поддерживается поступлением растительных остатков, обеспечивающих непрерывное пополнение ПОВ. Значительная доля $C_{\text{тдч}}$ в составе ПОВ (табл. 3) и наличие линейной связи общего $C_{\text{орг}}$ почвы с $C_{\text{тдч}}$ (рис. 2) дают основание считать, что количественные изменения

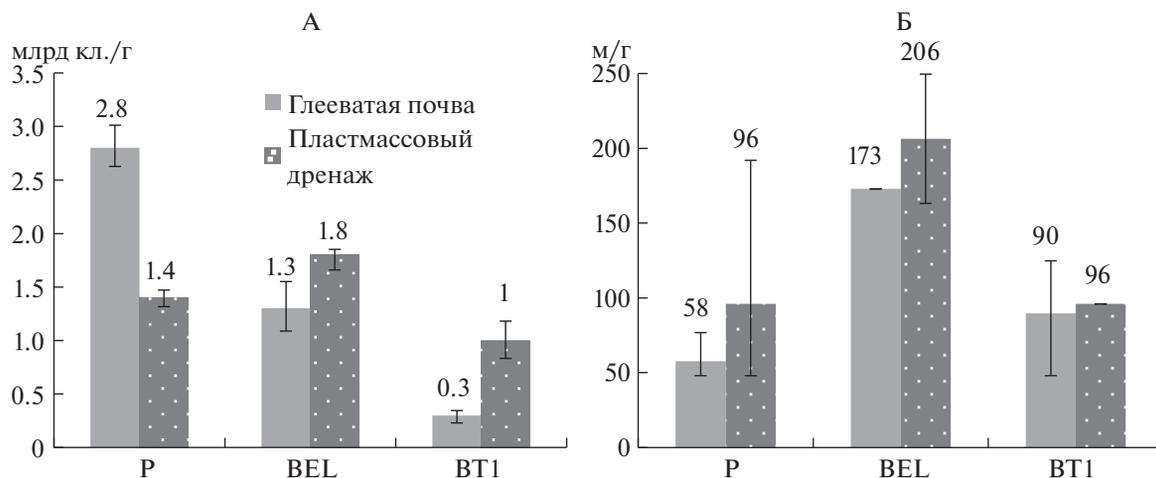


Рис. 1. Численность бактерий в млрд клеток/г (А) и длина грибного мицелия в м/г (Б) в горизонтах P, BEL, BT1 агро-серых глееватых неосушенных и осушенных пластмассовым дренажом почвах. Исследования 2018 г.

фракции ТДЧ в почве — одна из причин динамики ПОВ, а показатели $C_{орг}$ и $C_{ТДЧ}$ являются индикаторами биогенности почвы.

Биоактивность характеризует современную, текущую взаимосвязь между почвенными микроорганизмами, ПОВ и факторами окружающей среды. Эффекты взаимодействий этих трех составляющих биоактивности почвы могут быть охарактеризованы C_0 , $C_{мик}$ и БД. При инкубировании почвенных образцов с постоянными условиями температуры и влажности, не лимитирующими жизнедеятельность микроорганизмов, биоактив-

ность почвы зависит преимущественно от наличия и доступности микроорганизмам органического субстрата. Содержания C_0 и $C_{мик}$ зависели от $C_{орг}$ и $C_{ТДЧ}$ (рис. 2), подтверждая принципиальную связь между биогенностью и биоактивностью почвы. Базальное дыхание, будучи варибельным параметром биоактивности, коррелировало только с потенциально-минерализуемым ПОВ.

Хотя биоактивность и биогенность почвы связаны между собой, они не равнозначны друг другу и характеризуют специфические стороны качества почвы. Судя по содержанию $C_{орг}$, органоген-

Таблица 5. Изменение численности бактерий и длины грибного мицелия в агросерых оглеенных почвах (слой 0–20 см) в зависимости от условий влажности года

Год	Глубооуглеенная почва (автоморфная)		Глееватая почва (гидроморфная)	
	Численность, млрд клеток/г почвы	Биомасса бактерий, мкг/г	Численность, млрд клеток/г почвы	Биомасса бактерий, мкг/г
2010 г. — экстремально сухой	1.468	29	0.960	19
2009 г. — умеренно влажный	0.198	4	0.188	4
2008 г. — умеренно сухой	0.328	7	0.192	4
Среднее за 3 года	0.665	13	0.445	9
Год	Длина грибного мицелия, м/г	Биомасса грибного мицелия, мкг/г	Длина грибного мицелия, м/г	Биомасса грибного мицелия, мкг/г
2010 г. — экстремально сухой	37.20	15	40.10	16
2009 г. — умеренно влажный	75.56	29	84.44	33
Среднее за 2 года	56.38	22	62.27	25

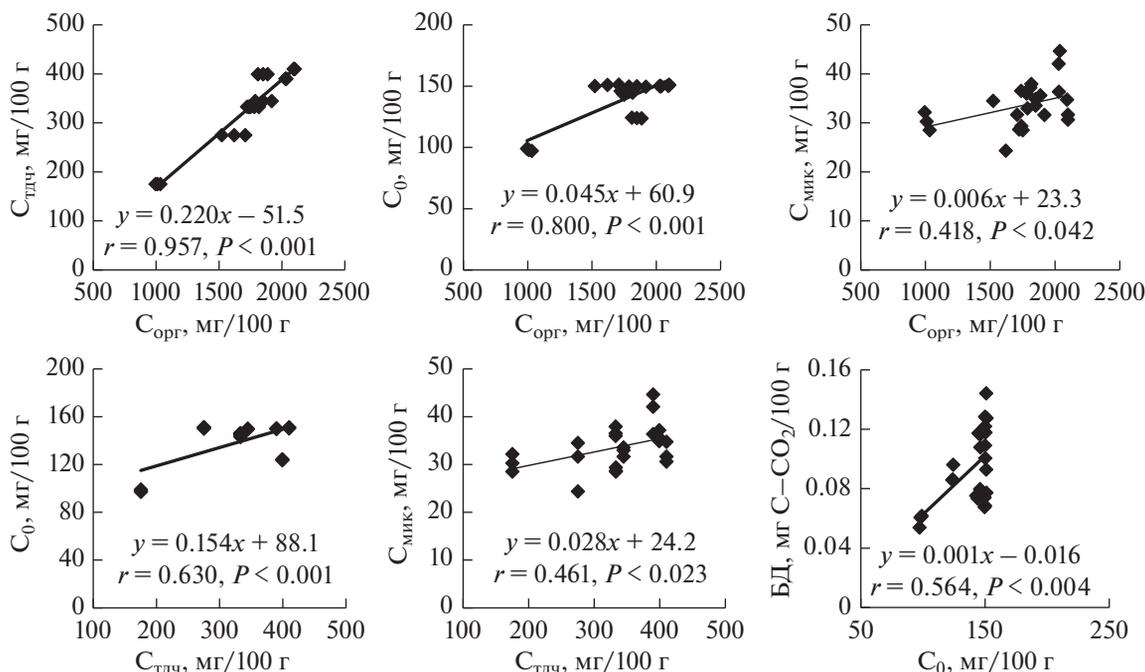


Рис. 2. Регрессионные зависимости и корреляционные связи между показателями биогенности и биоактивности агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв.

ные почвы обладают большей биогенностью, чем минеральные почвы [17]. В то же время органическое вещество органических торфяных почв отличается одной из самых низких способностью к минерализации. По другим данным органическое вещество тундровой почвы гораздо сильнее обеднено микробным компонентом по сравнению с другими почвами, имеющими такое же содержание $C_{\text{орг}}$, но залегающих в зонах с более благоприятным для микроорганизмов тепловым и водным режимом [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оценке качества и гумусного состояния почв следует использовать показатели, характеризующие биогенность и биоактивность почвы. Биогенность почвы характеризует источники образования и обновления почвенного органического вещества, а биоактивность — вовлеченность $C_{\text{орг}}$ в биологические процессы, осуществляемые почвенными микроорганизмами. Ключевым показателем биогенности почвы является содержание органического вещества в твердых дискретных частицах — промежуточной фракции между органическими остатками и гумифицированным органическим веществом. Биоактивность почвы оценивается по содержанию потенциально-минерализуемого органического вещества, микробной биомассы, базальному дыханию, общему количеству бактерий и длине грибного мицелия. Аг-

росерые оглеенные почвы с разной степенью гидроморфизма близки по биогенности, но отличаются по биоактивности, образуя убывающий ряд: глееватая > глееватая “экстремально выраженная” > глубокооглеенная на микроповышении. В период эффективного действия дренажа происходит изменение гумусного состояния агросерой глееватой почвы, которая по показателям биогенности и биоактивности становится похожа на глубокооглеенную (автоморфную) почву. По мере стабилизации водно-физических свойств осушенной почвы и заиления дренажной системы, гумусное состояние осушенной почвы начинает восстанавливаться к исходному состоянию, при-сущему глееватой почве с естественным водным режимом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные данные получены при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-14-01120п. Экспедиционные работы по отбору образцов на экспериментально-мелиоративном полигоне по годам и определения элементного состава почв были проведены в рамках тем Государственного задания №№ АААА-А16-117031410017-4, АААА-А18-118013190177-9 и 0191-2019-0045 и “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность д. б. н. Л.М. Полянкой за консультации и предоставление приборной базы по определению численности грибной и бактериальной биомассы в почвах, а также А.Л. Харлак за участие в работе в 2018 г.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов В.М., Личко Р.П., Лошакова Н.А., Степутина В.И. Ферментативная активность серых лесных почв // Почвоведение. 1976. № 11. С. 127–132.
2. Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.
3. Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв Южного Подмоскowsья // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.
4. Гришина Л.А. Гумусообразование и гумусное состояние почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
5. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1087. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
6. Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В. Эколого-гидрологическая оценка светло-серых оглеенных почв, осушенных бестраншейным и траншейным дренажом // Почвоведение. 1994. № 1. С. 116–127.
7. Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах. Автореф. дис. ... докт. с.-х. н. М., 2016. 50 с.
8. Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Биохимия лигнина в почвах периодического переувлажнения (на примере агросерых почв ополей Русской равнины) // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1205–1216.
9. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Особенности органического вещества железисто-марганцевых конкреций серых лесных почв (по данным ¹³C ЯМР-спектроскопии) // Вестник московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2003. № 2. С. 25–32.
10. Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н. Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества в почвах зонального ряда // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1232–1241. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15100068>
11. Лебедева Т.Н., Масютенко Н.П., Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Акименко А.С. Действие биологических способов оптимизации плодородия типичного чернозема на качество почвенного органического вещества // Агрохимия. 2018. № 7. С. 10–19. <https://doi.org/10.1134/S0002188118070086>
12. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.
13. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
14. Полянская Л.М. Микробная сукцессия в почве. Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 1996. 96 с.
15. Почвы Московской области и их использование. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2002. Т. 1. 500 с.
16. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Ходжаева А.К. Биокинетическая индикация минерализуемого пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1352–1361.
17. Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X>
18. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019. № 4. С. 440–450. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130>
19. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л. Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах правобережья р. Оки // Почвоведение. 2019. № 8. С. 974–985. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080124>
20. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Степанов А.Л. Распределение метаболически активных представителей прокариот (архей и бактерий) по профилям чернозема и бурой полупустынной почвы // Почвоведение. 2016. № 2. С. 239–248. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16020106>
21. Семенов М.В., Стольников Е.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В. Структура микробного сообщества почвы катены правобережья р. Оки // Известия РАН. Сер. биологическая. 2013. № 3. С. 299–308. <https://doi.org/10.7868/S0002332913030089>
22. Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С. Географо-генетические особенности гумусового состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. № 11. С. 1377–1390.
23. Cambardella C.A., Elliott E.T. Particulate Soil Organic Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // Soil Sci. Soc. Am. J. 1992. V. 56. № 3. P. 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
24. Chan K.Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management // Soil Use and Management. 2001. V. 17. № 4. P. 217–221. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00030.x>

25. Kovalev I.V., Kovaleva N.O. Evaluation of the effect of modern drainage technologies on the physical properties and productivity of mineral hydromorphic soils // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 368. № 012024. 10 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/368/1/012024>
26. Kovalev I.V., Kovaleva N.O. The role of lignin phenols in organic-mineral interactions in soils // Proceedings of the 19th International Conference of Humus Substances and their Contribution to the Climate Change Mitigation. Bulgarian Humic Substances Society. Sofia. 2018. P. 119–122.
27. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems // J. Environ. Quality. 2019. V. 48. P. 207–216. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036>
28. Lavalley J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century // Glob Change Biol. 2020. V. 26. P. 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
29. McLoughlin N. Biogenicity // Encyclopedia of Astrobiology. Berlin, Heidelberg. Springer. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4>
30. Merino C., Godoy R., Matus F. Soil enzymes and biological activity at different levels of organic matter stability // J. Soil Science and Plant Nutrition. 2016. V. 16(1). P. 14-30. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000002>

Estimation of the Biogenicity and Bioactivity of Agrogray Gleyed Non-Drained and Drained Soils

I. V. Kovalev¹*, V. M. Semenov², N. O. Kovaleva¹, T. N. Lebedeva², V. M. Yakovleva¹, N. B. Pautova²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Institute Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia

*e-mail: kovalevmsu@mail.ru

Comparison of the biological activity and biogenicity of drained and non-drained agrogray gleyed soils (Luvic Greyzemic Stagnic Phaeozems) of the Moscow region is carried out using such indicators as microbial biomass (C_{mic}) and basal respiration (BR), the content of organic carbon (C_{org}), particulate organic matter (C_{POM}), and potentially mineralizable organic matter (C_0). It was found, that the C_{POM} fraction turned out to be one of the indicators of the initial waterlogging stages, while the C_{mic} and BR indicators are sensitive to the degree of soil hydromorphism. It is proposed to evaluate soil biogenicity by C_{org} and C_{POM} indicators, and bioactivity - by C_0 , C_{mic} and BR indicators. Agrogray gleyed soils of different stages of waterlogging are close in biogenicity, but differ in bioactivity. The humus state of the agrogray gleyed soil changes during the period of efficient functioning of drainage. The agrogray gleyed soil in terms of biogenicity and bioactivity becomes similar to its automorphic zonal analogs.

Keywords: soil hydromorphism, drainage, organic carbon, microbial biomass, potentially mineralizable organic matter, particulate organic matter