

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ СМЫТОСТИ И НАМЫТОСТИ НА МАЛОМ ВОДОСБОРЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

© 2024 г. Ю. Р. Фарходов^{а,*} (<https://orcid.org/0000-0002-0210-380X>),

Д. А. Никитин^а, Н. В. Ярославцева^а, С. В. Максимович^а, А. Р. Зиганшина^а,
И. В. Данилин^а, В. А. Холодов^а, М. В. Семенов^а, А. П. Жидкин^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.02.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 16.04.2024 г.

Проанализировано влияние землепользования и эрозионно-аккумулятивных процессов на некоторые физические, химические и биологические свойства почв малого водосбора в Курской области. Исследованы распахиваемые черноземы (Haplic Chernozems) и стратоземы (Fluvic Chernic Phaeosems (Loamic, Pachic)), а также нераспахиваемые стратоземы днища балки. Агрегатный состав (сухое просеивание) отличался высокой долей частиц >10 мм на пашне и низкой — в нераспахиваемом днище балки. Различия в содержании углерода, азота и показателя C/N не выявлены. По данным аналитического пиролиза, идентифицировано 26 пиролизатов, отражающих состав почвенного органического вещества. Относительные содержания пиррола, пиридина, толуола и индана были выше в составе пиролизатов органического вещества пашни, чем днища балки. Высокие доли фурфурола и метилфурфурола наблюдались среди пиролизатов днища балки по сравнению с пашней. Различия по содержанию алканов и фенола не выявлены. Биомасса микроорганизмов представлена преимущественно грибами (от 97 до 99%), высокое обилие которых характерно для непашотных почв днища балки. Различия в дыхательной активности исследуемых почв не выявлены. Показано значительное влияние эрозионно-аккумулятивных процессов и обработки почвы на пространственную неоднородность состава органического вещества и микробиологические показатели. Пахотные почвы характеризуются высоким содержанием азотсодержащих компонентов почвенного органического вещества, формирование почв днища балки происходит в условиях относительно высокого содержания углеводных компонентов зрелого органического вещества. Высокий коэффициент структурности почв днища балки в условиях накопления грибной биомассы свидетельствует об активном участии намытого материала в образовании агрегатов.

Ключевые слова: эрозия почвы, коэффициент структурности, аналитический пиролиз, биомасса микроорганизмов, люминесцентная микроскопия, биологическая активность почвы, базальное дыхание почвы, субстрат-индуцированное дыхание почвы

DOI: 10.31857/S0032180X24090059, **EDN:** WMAOGI

ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальным изменением климата и проблемами продовольственной безопасности все более актуальным становится изучение биосферных функций почвы в условиях проявления водной эрозии [6, 57]. Одним из перспективных подходов оценки ее влияния на функционирование почвы является изучение почвенного покрова в пределах

водосборного бассейна [20]. Такой подход дает возможность учитывать влияние геохимических потоков на процесс почвообразования. Свойство иерархичности водосборных бассейнов позволяет сопоставлять, экстраполировать и обобщать получаемые данные, что обеспечивает возможность решения проблем природопользования как локального, так и глобального характера [12, 20].

На формирование и функционирование почвы в пределах отдельного водосборного бассейна может влиять множество факторов как естественного (рельеф, климат, растительность, почвообразующая порода), так и антропогенного происхождения (механическая обработка, мелиорация, применение удобрений и средств защиты растений) [84]. При этом для оценки их воздействия на почвенные свойства важно учитывать роль водных потоков, так как вызываемые ими эрозионно-аккумулятивные процессы могут существенно влиять на характер и интенсивность проявления других почвообразовательных процессов [52].

Глобальные функции почвы во многом реализуются при участии почвенного органического вещества (ПОВ), наиболее активной частью которого является микробная биомасса (МБ) [28, 58]. МБ имеет фундаментальное значение для обеспечения экологических почвенных функций, так как регулирует циклы биогенных элементов и ответственна за аккумуляцию и деструкцию ПОВ [28, 33]. Положительная взаимосвязь между содержаниями микробного и органического углерода ($C_{орг}$) убедительно доказывает возможность использования МБ в качестве хорошего индикатора трансформации ПОВ [28, 33, 66].

В соответствии с общепринятыми представлениями влияние эрозионных процессов на ПОВ связано с его смывом, переносом и отложением [42]. При этом смыв сопровождается разрушением почвенных агрегатов и минерализацией ранее защищенного внутри них ПОВ, поэтому процессы трансформации ПОВ в ходе эрозии связаны с его устойчивостью [39]. В свою очередь, стабильность ПОВ во многом обусловлена его составом и доступностью для микроорганизмов [62, 71], а их активность определяет особенности его трансформации [28, 43]. Основные закономерности развития сообществ микроорганизмов в условиях проявления водной эрозии связаны с доступностью биогенных элементов: их низкое содержание в смытых почвах, по сравнению с ненарушенными и намытыми почвами, приводит к снижению разнообразия прокариот и микроскопических грибов [49, 59, 83]. Поэтому рассмотрение МБ в контексте оценки стабилизации и деградации ПОВ в условиях проявления водной эрозии является актуальной задачей [75].

Цель работы – оценка состава органического вещества и характеристика микробной биомассы почв малого водосбора, расположенного в центральной части Среднерусской возвышенности – региона с большой долей распахиваемых земель и при этом в значительной степени подверженного эрозии почв. Эта работа продолжает цикл статей, посвященных ПОВ водосбора “Хвошин лог”. Ранее были описаны оптические

свойства водозэкстрагируемого органического вещества [23, 24], представляемая работа посвящена молекулярному строению общего ПОВ, в котором доминируют трудноэкстрагируемые компоненты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Малый водосбор “Хвошин лог” расположен в Курском районе Курской области. Почвенный покров водосбора представлен типичными и выщелоченными черноземами. На распахиваемых склонах формируются черноземы типичные (Haplic Chernozems) разной степени смытости [8, 80]. В днищах распахиваемых ложбин встречаются намытые почвы: черноземы выщелоченные стратифицированные и стратоземы темногомусовые водноаккумулятивные (Fluvic Chernic Phaeosems (Loamic, Pachic)). В нераспахиваемом днище балки формируются стратоземы темногомусовые водноаккумулятивные (Fluvic Chernic Phaeosems (Loamic, Pachic)), выщелоченные от карбонатов [8, 80].

Места отбора образцов были расположены в максимально контрастных условиях антропогенного воздействия и проявления эрозионно-аккумулятивных процессов. Изучены пахотные почвы, расположенные в трех частях склона: а) чернозем типичный неэродированный на приводораздельном участке склона (П1); б) чернозем типичный среднесмытый в средней части склона (П2); в) намытая почва в днище распахиваемой ложбины (П3). А также намытые почвы в трех различных частях нераспахиваемого днища балки: в устьевой (Д1), центральной (Д2) и верхней (Д3) части. Отбор образцов проводили в августе 2022 г., глубина пробоотбора – 0–25 см. Подробная физико-географическая характеристика территории отбора образцов представлена ранее [11, 23, 24].

В образцах оценивали структуру почвы, микробиологические характеристики, содержание углерода (С), азота (N), а также состав ПОВ. Общая характеристика образцов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Физические и химические свойства почв

Почва	$K_{стр}$	С, %	N, %	С/N	pH H ₂ O
П1	1.38	3.78	0.34	11.04	6.21
П2	1.72	3.36	0.30	11.16	6.88
П3	1.08	3.23	0.30	10.57	6.60
Д3	4.37	3.70	0.35	10.61	6.56
Д2	2.13	3.40	0.29	11.63	6.26
Д1	4.82	3.50	0.42	8.27	6.28

Качество **структуры почв** оценивали при помощи агрегатного анализа методом сухого просеивания [3] на ситах с размером ячеек: 10, 7, 5, 3, 2, 1, 0.5 и 0.25 мм, с последующим расчетом коэффициента структурности ($K_{стр}$) по формуле:

$$K_{стр} = \frac{\sum (10 \text{ мм} - 0.25 \text{ мм})}{\sum (> 10 \text{ мм}, < 0.25 \text{ мм})}. \quad (1)$$

Актуальную кислотность оценивали в водной суспензии почвы (1 : 5) потенциометрическим методом с помощью рН-метра рН 211 (Hanna instruments, США) [2].

Содержание С, N и показатель C/N определяли методом каталитического сжигания в токе кислорода при температуре +960°C [53] на элементном анализаторе vario-MACRO cube (Elementar, Германия). У всех образцов $pH_{H_2O} < 7$ и реакция на содержание карбонатов отрицательная, поэтому весь определенный углерод был отнесен к органическому.

Состав ПОВ оценивали методом одностадийного аналитического пиролиза с газовой хроматографией с масс-спектрометрическим окончанием на пиролизере EGA/PY-3030D (Frontier Laboratories, Япония) и газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором GCMS-QP2010 (Shimadzu, Япония). Условия хроматографирования: начальная температура колонки 50°C, температурный градиент 40°C/мин до 300°C с задержкой 3 мин, температура инжектора 300°C. Капиллярная хроматографическая колонка GsBP-5MS (Gs-Tek, США), 30 м, масс-детектор квадрупольного типа, ионизация — электронный удар, 70 эВ, диапазон детекции 45–600 m/z . Деконволюцию пирогамм проводили на платформе веб-сервиса GNPS (Global Natural Products Social Molecular Networking) [27], идентификацию пиков — в программе MS Search (версия 2.0, FairCom Co., США) с помощью библиотеки масс-спектров NIST11 (National Institute of Standards and Technology, США). Площади всех компонентов пробы суммировали и вычисляли относительную долю всех компонентов [38]. Продукты пиролиза разделяли на группы по химическому строению: алканы, фенол, азотсодержащие соединения, ароматические углеводороды, фураны.

Биомассу прокариот оценивали с помощью метода люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя акридина оранжевого (микроскоп Биомед 5 ПР ЛЮМ, Россия) при увеличении 1000× с масляной иммерсией [7]. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи ультразвуковой установки УЗДН-1. Число клеток прокариот на 1 г субстрата рассчитывали по формуле:

$$N = \frac{S_1 a n}{V S_2 C}, \quad (2)$$

где N — число клеток на 1 г субстрата; S_1 — площадь препарата (мкм²); a — количество клеток в одном

поле зрения (усреднение производится по всем препаратам); n — показатель разведения бактериальной смеси (мл); V — объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 — площадь поля зрения микроскопа (мкм²); C — навеска субстрата, г.

Длину актиномицетного и грибного мицелия в 1 г образца (NMA) определяли по формуле:

$$NMA = \frac{S_1 a n}{V S_2 C 10^6}, \quad (3)$$

где S_1 — площадь препарата (мкм²); a — средняя длина фрагментов актиномицетного мицелия в поле зрения (мкм); n — показатель разведения суспензии (мл); V — объем капли, наносимой на стекло (мл); S_2 — площадь поля зрения микроскопа (мкм²); C — навеска образца, г.

Биомассу грибов определяли методом люминесцентной микроскопии с применением флуоресцентного красителя калькофлуора белого [7]. Учет спор и длины мицелия осуществляли на люминесцентном микроскопе Биомед 5 ПР ЛЮМ (Россия) при увеличении ×400. Десорбцию клеток с почвы проводили при помощи вортекса MSV-3500 (Латвия) при скорости 3500 об/мин в течение 10 мин. Количество грибных клеток на 1 г субстрата рассчитывали по формуле:

$$M = \frac{4 a n}{p} \times 10^{10}, \quad (4)$$

где M — количество клеток в 1 г почвы; a — среднее число клеток в поле зрения; p — площадь поля зрения (мкм²); n — показатель разведения.

Расчет грибной биомассы (мг/г почвы) осуществляли, полагая по [16], что плотность спор равна 0.837 г/см³, а плотность мицелия — 0.628 г/см³. Содержание грибной биомассы на 1 г сухой почвы рассчитывали с учетом ее влажности.

Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода и энергии — глюкозой [4]. Навеску почвы (2 г) помещали во флакон (объем 15 мл), добавляли раствор глюкозы (0.2 мл/г почвы), конечная концентрация которой составляла 10 мг/г, герметично закрывали и фиксировали время. Обогащенный глюкозой образец почвы инкубировали (3–5 ч при температуре 22°C), затем отбирали шприцем пробу газовой фазы из флакона (0.5–1 мл) и вводили в газоанализатор LI-COR LI-850 для регистрации CO₂. Время отбора газовой пробы также фиксировали.

Скорость СИД выражали в $\frac{\text{мкл CO}_2}{\text{г почвы ч}}$. Углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) почвы определяли пересчетом скорости СИД по формуле [4]:

$$C_{\text{мик}}, \frac{\text{мкг С}}{\text{г почвы}} = \text{СИД} 40.04 + 0.37. \quad (5)$$

Базальное дыхание определяли по скорости выделения CO_2 почвой за 24 ч инкубации при температуре $+22^\circ\text{C}$ и 60% полной влагоемкости (ПВ). Измерения БД выполняли так же, как для СИД, только вместо раствора глюкозы в почву вносили воду (0.2 мл/г почвы). Скорость базального дыхания выражали в $\frac{\text{мкг С}-\text{CO}_2}{\text{г почвы ч}}$.

Статистический анализ данных и визуализацию проводили с помощью языка программирования R в среде разработки RStudio [65]. Для разведочного анализа использовали метод главных компонент, сравнение по группам проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа и критерия Тьюки, неоднородность почвенных свойств оценивали с помощью коэффициента вариации (V).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химические и физические свойства почв. Максимальное содержание $C_{\text{орг}}$ 3.8% было выявлено в несмытой почве (П1), а минимальное — 3.2% — в намытой почве в днище распахиваемой ложбины (П3). Намытые почвы в нераспахиваемом днище балки характеризуются варьированием содержания углерода от 3.4 до 3.7%.

Содержание азота практически одинаково во всех исследованных почвах — 0.3%. Наибольшее количество азота было выявлено в несмытой (П1) и намытой в днище балки (Д1) почве. Показатель C/N во всех образцах составлял ≈ 11 , только в Д1 данный он уменьшался до 8.3. Значение pH варьировало от 6.21 (П1) до 6.88 (П2). Состав структурных отдельностей проанализированных почв в основном отличался высоким содержанием глыбистых частиц $>10\text{ мм}$ на пашне и высокой долей агрономически ценных агрегатов (особенно фракций 3–5 и 1–2 мм) в днище балки (рис. S3). В результате $K_{\text{стр}}$ намытых почв в днище балки значительно выше по сравнению с распахиваемыми почвами. В целом по химическим и физическим свойствам исследованные почвы характеризуются различной пространственной изменчивостью ($V = 2.6\text{--}38.2\%$): наибольшей изменчивостью обладают намытые почвы (Д) по показателям $K_{\text{стр}}$, N , C/N (табл. S1).

Состав ПОВ по данным аналитического пиролиза. В исследуемых почвах идентифицировано 26 пиролизатов, отражающих состав ПОВ. Наибольшее относительное содержание характерно для фурурола (23%), толуола (15%), фенола (12%), пиридина (11%), метилфурана (9%) и пиррола (7%) (табл. S4). На рис. 1 представлено расположение точек, соответствующих объектам исследования в

координатах первых двух главных компонент в зависимости от состава пиролизатов ПОВ. Первая компонента объясняет 34% изменчивости исходных данных, а вторая — 17%. В поле главных компонент хорошо выражены кластеры, разделяющие почвы пашни и нераспахиваемого днища балки по первой компоненте. На основе информации о вкладе отдельных признаков (пиролизатов) в изменчивость исходного набора данных (рис. S6) пиролизаты были разделены на группы: алканы, фенол, азотсодержащие, ароматические, фураны, среди фуранов отдельно выделен метилфуран.

На рис. 2 показано относительное содержание групп пиролизатов ПОВ по объектам исследования. Их вариабельность и результаты парных множественных сравнений по группам приведены в табл. S5, S7, S8. Наименьшей изменчивостью обладают данные о содержании групп пиролизатов ПОВ варианта пашня ($V = 5.4\text{--}16.9\%$) по сравнению с днищем балки ($V = 19.7\text{--}46.1\%$). По содержанию алканов и фенолов достоверных различий между вариантами пашни и днище балки не обнаружено, при этом после оценки различий между образцами выявлены различия по содержанию фенолов между П3 и Д1. Содержание азотсодержащих и ароматических соединений было значимо больше на пашне по сравнению с днищем балки. Относительное содержание фуранов было статистически значимо больше в составе пиролизатов ПОВ днища балки, содержание метилфурана, напротив, было значимо выше в образцах пашни.

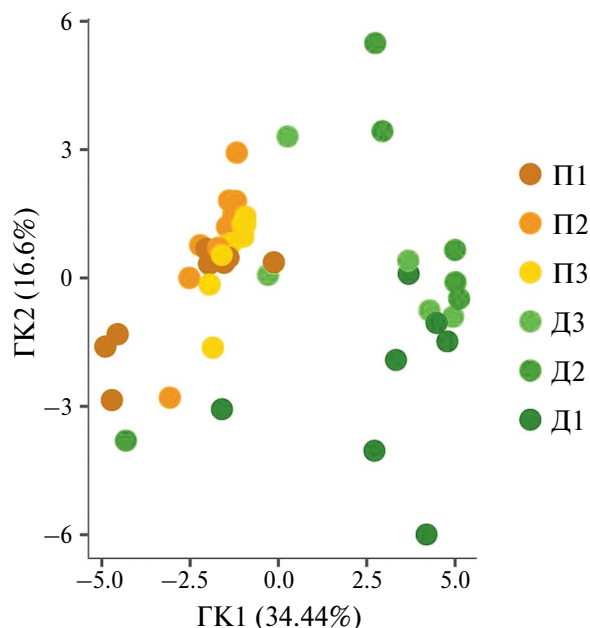


Рис. 1. Расположение объектов на плоскости первых двух главных компонент на основе состава пиролизатов их ПОВ. Объекты сгруппированы по расположению в водосборном бассейне.

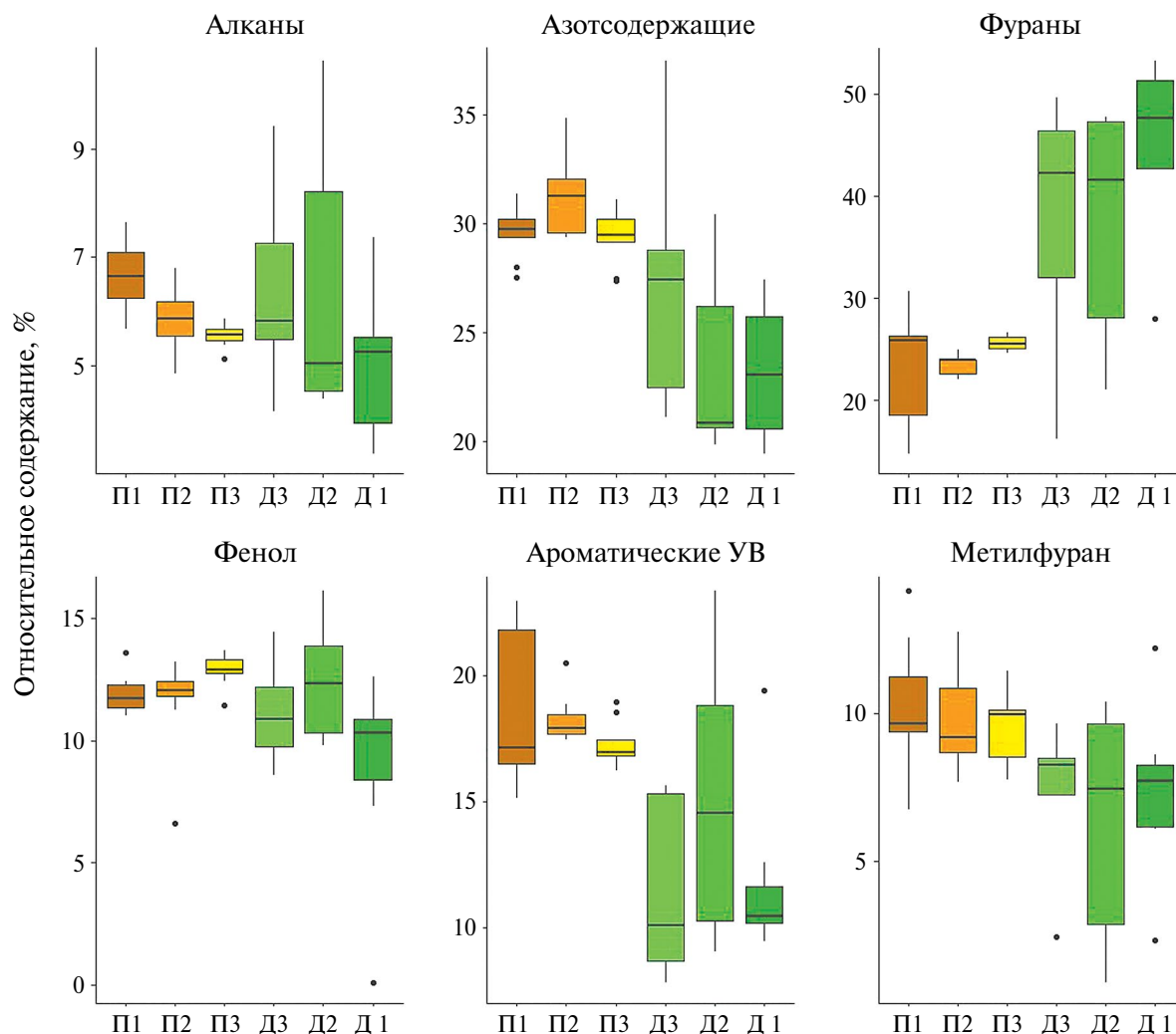


Рис. 2. Относительное содержание пиролизатов ПОВ.

Биомасса грибов изменялась от 0.075 до 0.315 мг/г почвы (табл. 2). В среднем для пашни биомасса грибов составляла сотые доли мг/г почвы, а для балки — на порядок больше. Доля мицелия — активного компонента грибной биомассы — в биомассе микобиоты изученных почв в днище балки имела большее варьирование: от 32 Д3 до 81% в Д2; а в почвах пашни — меньшее: от 56 в П3 до 70% в П2. Длина мицелия грибов изменялась от 27 до 212.3 м/г почвы. В большинстве образцов протяженность грибных гиф не превышала десятков метров на грамм почвы, а варьирование значений также существенно выше для днища балки по сравнению с пашней. Доля тонкого (менее 3 мкм в диаметре) мицелия грибов исследованных почв существенно отличалась и была относительно велика (32–38%) в почвах пашни, но меньше (21–25%) — в почвах нераспахиваемого днища балки. Базидиомицетный пряжковый мицелий грибов

обнаруживали редко (около 6–9% встречаемости от всех гиф), и лишь в почвах нераспахиваемого днища балки. Для большинства образцов численность одноклеточных грибных propagул (спор и дрожжей) составляла порядка 104 кл./г почвы, однако для нераспахиваемого днища балки (образец Д2) достигала 105 кл./г почвы. Большая часть (от 76 до 100%) propagул микобиоты представлена экземплярами мелких размеров 2–3 мкм. Она минимальна в пашне и максимальна в днище балки. Численность крупных propagул (5 мкм и более) составила порядка 103 кл./г почвы, и они выявлены только в П1, П2, П3 и Д2.

Биомасса прокариот составила от 2.0 до 4.7 мкг/г почвы. Отмечено меньшее варьирование значений биомассы для образцов днища балки (от 2.0 до 3.3 мкг/г почвы) по сравнению с почвами пашни (от 2.1 до 4.7 мкг/г почвы). Биомасса прокариот от проанализированных образцов представлена

Таблица 2. Параметры биологической активности почвы

Группа	Показатель	Пашня			Днище балки		
		П1	П2	П3	Д1	Д2	Д3
Дыхательная активность МБ	СИД, мкг С/г почвы	383	489	309	425	477	420
		393 ± 90			441 ± 32		
	БД, CO ₂ , мкг С–CO ₂ /(г ч)	1.04	1.33	1.16	0.78	0.98	1.13
		1.18 ± 0.15			0.96 ± 0.18		
Характеристика грибного сообщества	Длина мицелия грибов, м/г почвы	45.3	189.0	27.0	73.2	212.3	99.2
		87 ± 89			128 ± 74		
	Биомасса грибов (споры), мг/г почвы	0.032	0.041	0.055	0.048	0.094	0.060
		0.04 ± 0.01			0.07 ± 0.02		
	Биомасса грибов (мицелий), мг/г почвы	0.043	0.179	0.026	0.101	0.225	0.075
		0.08 ± 0.08			0.13 ± 0.08		
	Общая биомасса грибов, мг/г почвы	0.075	0.220	0.081	0.149	0.315	0.135
		0.13 ± 0.08			0.2 ± 0.1		
	Отношение грибного мицелия к спорам	1.3	4.4	0.5	2.1	2.4	1.3
		2.1 ± 2.0			1.9 ± 0.6		
Характеристика бактериального сообщества	Длина мицелия актиномицетов, м/г почвы	13.5	26.7	4.8	2.8	59.5	6.2
		15 ± 11			23 ± 32		
	Биомасса прокариот (одноклеточные), мкг/г почвы	2.1	4.7	2.1	2.8	1.4	1.8
		3 ± 1			2 ± 1		
	Биомасса прокариот (актиномицеты), мкг/г почвы	0.5	1	0.2	0.1	2.0	0.2
		0.5 ± 0.4			0.8 ± 1.1		
	Биомасса прокариот, мкг/г почвы	2.5	4.7	2.1	3.0	3.3	2.0
		3.1 ± 1.4			2.8 ± 0.7		
	Актиномицеты/одноклеточные	0.2	0.2	0.1	0.0	1.4	0.1
		0.2 ± 0.1			0.5 ± 0.8		
Общая характеристика МБ	Общая биомасса микроорганизмов, мг/г почвы	0.077	0.225	0.083	0.152	0.316	0.137
		0.128 ± 0.018			0.202 ± 0.021		
	Грибы/бактерии	29	47	40	51	94	66
		39 ± 9			70 ± 22		

Примечание. Приведены среднее ± стандартное отклонение. БД – базальное дыхание.

преимущественно (от 81 до 96%) одноклеточными формами, а не мицелием. Длина актиномицетного мицелия варьирует от 2.8 в Д1 до 59.5 м/г почвы в П3. Длина актиномицетного мицелия в образцах пашни составила от 4.8 до 26.7 м/г почвы, а в днище балки — от 2.8 до 59.5 м/г почвы. Численность прокариот колебалась от 6.5×10^8 до 1.8×10^9 кл./г почвы. Количество клеток прокариот было в 3–5 раз выше в почвах днища балки по сравнению с пашней.

Общая биомасса микроорганизмов составила от 0.077 до 0.316 мг/г почвы. Основная часть (97–99%) МБ проанализированных почв состояла из грибов, а не прокариот.

Величина **субстрат-индуцированного дыхания (СИД)** почвы варьировала от 309 до 489 мкг С/г почвы. В противоположность данным по люминесцентной микроскопии, биомасса микроорганизмов по СИД практически одинакова во всех образцах почв днища балки (от 420 до 477 мкг С/г почвы), но сильно варьирует на пашне (от 309 до 489 мкг С/г почвы).

Величина **базального дыхания (БД)** почвы изменяется от 0.78 до 1.33 мкг С–CO₂/(г ч). Базальное дыхание на пашне варьирует не так существенно (от 1.04 до 1.33 мкг С–CO₂/(г ч)), как в днище балки (от 0.78 до 1.13 мкг С–CO₂/(г ч)).

Объекты исследования характеризуются сильным варьированием биологической активности почвы практически по каждому показателю. Для пашни максимальное варьирование обнаружено по характеристикам грибного сообщества ($V = 28–102\%$), а для днища балки — по характеристикам прокариот ($V = 31–148\%$). Относительно небольшой разброс значений наблюдается по показателям дыхательной активности МБ ($V = 3.5–20.6\%$) (табл. S9). Достоверные различия ($p < 0.05$) между объектами исследования по микробиологическим показателям не выявлены, однако четко прослеживается тенденция к увеличению доли грибной биомассы в почвах днища балки по сравнению с пашней ($p = 0.08$) (табл. S10).

ОБСУЖДЕНИЕ

Химические и физические свойства почв. На основе полученных данных между почвами на пашне и в нераспахиваемом днище балки выявлены достоверные различия ($p < 0.05$) по коэффициенту структурности почвы ($K_{стр}$). Исследованные почвы имели хорошее (П3) и отличное (П1, П2, Д3, Д2, Д1) агрегатное состояние [26]. Относительное низкое значение $K_{стр}$ на пашне, вероятно, связано с механической обработкой почвы, что в совокупности с влиянием эрозии почв приводит к разрушению структуры почвы [34, 37]. В днище балки в условиях достаточного увлажнения, аккумуляции

биогенных элементов и отсутствия обработки почвы ускоряется процесс агрегатобразования с участием почвенной биоты, что улучшает структурное состояние почвенной массы [62].

По остальным показателям статистически значимых различий между исследованными почвами не выявлено, однако наблюдаются отчетливые тенденции. Наибольшее значение рН характерно для среднесмытой почвы (П2), вероятно, в связи с близким к поверхности залеганием карбонатов на глубине 40 см (по вскипанию). Высокое залегание карбонатов в эродированной почве, возможно, обусловлено приближением к поверхности карбонатных горизонтов и почвообразующих пород (лёссовидных суглинков) в связи со смывом верхних горизонтов почв.

Содержание углерода на пашне уменьшалось вниз по склону и резко увеличивалось в нераспахиваемом днище балки. Представляется любопытным, что намытая почва в распахиваемой ложбине характеризовалась минимальным в данном водосборе содержанием органического углерода, значительно меньшим, чем намытые почвы в нераспахиваемом днище балки. Данный результат свидетельствует о том, что содержание органического углерода определяется эрозийно-аккумулятивными процессами в сочетании с особенностями землепользования. Отметим, что мощность наносов в точке отбора проб в ложбине на пашне и точках в нераспахиваемом днище балки приблизительно одинаковая (от 110 до 155 см), что говорит о близких темпах накопления наносов. Несмотря на близкие темпы накопления и практически единый источник наносов, содержание углерода в этих почвах существенно отличается. Представляется перспективным дальнейшее исследование намытых почв в различных условиях землепользования.

Отношение С/Н в исследованных почвах примерно соответствует значениям в других типичных черноземах вблизи от района исследования [21]. Узкое отношение С/Н может указывать на высокую степень трансформации ПОВ [63], поэтому минимальное значение С/Н, характерное для намытой почвы в днище балки (Д1), видимо, связано с накоплением зрелого ПОВ [44, 73].

Состав ПОВ по данным аналитического пиролиза. Вариабельность данных по составу ПОВ для пашни значительно ниже, чем для днища балки. Вероятно, это связано с влиянием обработки почвы, которая снижает общую неоднородность свойств почвенного покрова за счет перемешивания пахотного горизонта [74], а также с тем, что намытые почвы состоят из разнородного материала, смытого с различных частей водосбора [11].

Алканы являются основными пиролизатами липидов [61]. Фенолы образуются при пиролизе лигнинов и танинов [55]. В совокупности высокое

содержание этих пиролизатов свидетельствует о накоплении дискретного ПОВ преимущественно растительного происхождения различной степени разложения [41, 46, 79]. Отсутствие статистически значимых различий между исследованными почвами, возможно, связано с поступлением дискретного ПОВ с различными по составу наносами в днище балки в условиях проявления дернового процесса, а также неоднородностью распределения ПОВ на пашне, которая зависит от характера проявления эрозионно-аккумулятивных процессов [50].

Азотсодержащие пиролизаты свидетельствуют о наличии аминокислот, белков, нуклеиновых кислот и аминокислот [48], а ароматические углеводороды могут образовываться при пиролизе органического вещества различного происхождения: углеводов, липидов, лигнина [36, 60], в том числе углистых частиц [56]. Наибольший вклад в содержание азотсодержащих соединений и ароматических углеводородов вносят такие пиролизаты, как пиррол (7.1%), пиридин (11.1%) и толуол (14.5%) (табл. S4). Ранее на черноземах показано, что высокое содержание этих пиролизатов характерно для ПОВ наиболее устойчивых к механическому истиранию почвенных агрегатов [22]. Отметим, что потерю углерода в процессе эрозии во многом связывают с дезагрегированием почвы [50, 79], поэтому содержание устойчивых почвенных агрегатов связано не только с содержанием ПОВ, но и с его составом. Можно предположить, что высокая доля азотсодержащих соединений и ароматических углеводородов среди пиролизатов ПОВ пашни характеризует органическое вещество устойчивых к размыву почвенных частиц. Также заметно, что наибольшее медианное значение содержания рассматриваемых групп пиролизатов характерно для среднесмытого чернозема (П2), где сильнее всего проявляются процессы эрозии, что приводит к накоплению устойчивых к размыву почвенных частиц. Подобные закономерности по увеличению доли азотсодержащих компонентов ПОВ были показаны для почв склонов водосбора Балтийского моря [54]. Если рассматривать почвы на пашне отдельно, то высокое содержание азотсодержащих пиролизатов в среднесмытом черноземе (П2), вероятно, связано с влиянием на состав ПОВ хитина — азотсодержащего полисахарида, структурного компонента грибного мицелия. Содержание грибного мицелия в среднесмытом черноземе (П2) в несколько раз превышало содержание в несмытом черноземе (П1) и намытой почве на пашне (П3). Следует отметить, что грибной мицелий является важным структурообразователем почвы [67], поэтому максимальное значение $K_{стр}$ в среднесмытом черноземе (П2) можно связать с влиянием грибного мицелия. Для почв днища балки подобные закономерности не наблюдаются, видимо, это связано

с различием специфик влияния эрозионных и аккумулятивных процессов на общие условия формирования ПОВ [79].

Фураны — основные пиролизаты углеводов [85] — часто отмечается, что они как пиролизаты ПОВ характеризуют наиболее трансформированную (зрелую) часть углеводов [51, 68]. Показано, что средний возраст предшественников фурфурола и метилфурфурола составляет 44 и 35 лет соответственно [47], что относится к медленному пулу ПОВ [77]. Часто при пиролизе ПОВ идентифицируют левоглюкозан и левоглюкозенон, которые являются маркерами свежих углеводных компонентов ПОВ [35]. В ходе анализа состава ПОВ этих пиролизатов в объектах исследования не выявлено, содержание углеводов характеризовалось исключительно фуранами, указывая на высокую трансформацию ПОВ [68], что объясняется совместным влиянием механической обработки почвы и эрозионных процессов. Отметим, что среди идентифицированных фуранов содержание метилфурана по объектам исследования имеет отличную от остальных фуранов закономерность. Предположительно метилфуран в условиях недостатка свежесформированных углеводов ПОВ характеризует наименее трансформированную часть ПОВ. Низкое содержание метилфурана в нераспахиваемом днище балки относительно пашни, вероятно, связано с высоким потенциалом активности МБ, который проявляется при наличии легкоусвояемых компонентов ПОВ. Содержание остальных фуранов было практически в 2 раза выше, чем в пашне. Как отмечено ранее, фураны характеризуют сильно трансформированную часть ПОВ, также их высокое содержание связывают с накоплением продуктов микробной деградации ПОВ. Наибольшее содержание фуранов выявлено при пиролизе образца намытой почвы в днище балки (Д1), также для него характерно наименьшее среди объектов исследования значение C/N, что дополнительно указывает на высокую степень зрелости ОВ почв днища балки.

Таким образом, выявленные по данным аналитического пиролиза различия в составе ПОВ почв пашни и днища балки водосборного бассейна “Хвошин лог”, вероятно, преимущественно связаны с влиянием эрозионно-аккумулятивных процессов: размыв и перенос почвенного материала пашни сопровождается увеличением доли азотсодержащих пиролизатов ПОВ, аккумуляция эродированного материала в днище балки сопровождается увеличением доли фуранов — пиролизатов сильно трансформированного ПОВ.

Биомасса грибов. В исследованных черноземах биомасса микобиоты в 1.7 раза больше, чем в выщелоченных черноземах Нижегородской области [18] и в 2–2.5 раза выше, чем в обыкновенных черноземах заповедника Каменная степь (Воронежская область) [13, 14], что объясняется

меньшим содержанием органического вещества в этих почвах [78] по сравнению с анализируемыми в настоящей статье. Большие значения биомассы грибов в образцах почв в нераспахиваемом днище балки, по сравнению с пашней, могут быть обусловлены различными условиями увлажнения почв и различиями в составе растительности, а также косвенно могут быть обусловлены переносом грибов, смываемых вместе с почвенным материалом. Длина мицелия грибов в проанализированных образцах в 4–5 раз выше относительно значений для черноземов Челябинской области, республики Башкортостан и Алтайского края [17], а также в 2 раза больше по сравнению с таковой для обыкновенных черноземов заповедника Каменная степь [13]. По-видимому, в проанализированных образцах высока гетерогенность условий, особенно в намытых почвах в днище балки. На пашне интенсивная обработка почв способствует гомогенизации почвенного покрова, что, вероятно, заставляет грибы искать более благоприятные условия и, соответственно, увеличивать длину гиф [45, 69].

Доля тонкого мицелия грибов изученных почв выше в почвах на пашне, чем в нераспахиваемом днище балки, что может указывать на стрессовое состояние микобиоты [15, 45, 76]. Базидиомицетный пряжковый мицелий грибов обнаруживали редко (около 7–10% от всех гиф) и лишь в образцах днища балки. Этот факт косвенно может свидетельствовать о низком количестве микоризных симбиозов [10, 76], формирующихся только в луговой растительности балки. Высокий процент мицелия в общей биомассе грибов проанализированных почв днища балки опосредовано указывает на активную трансформацию и гумификацию органического вещества [31].

Несмотря на то, что почва — естественная среда обитания большей части грибов, в ней часто складываются неблагоприятные условия для развития propagул микобиоты [45]. Поэтому необходимо оценивать не только долю активной биомассы — мицелия, но и процент покоящихся клеток [7, 15, 17, 18]. Количество одноклеточных propagул грибов в проанализированных почвах на 1–2 порядка меньше, чем в черноземах Челябинской области, республики Башкортостан и Алтайского края [17], а также в обыкновенных черноземах заповедника Каменная степь [13], но соответствует по порядку значений для дерново-подзолистых почв Московской области [15]. По литературным данным, основная часть (более 66%) грибной биомассы в черноземах представлена мицелием [17, 18], но в данном исследовании показано, что доля спор (покоящихся propagул) для отдельных образцов может достигать до 68%. Данный факт можно объяснить локальными стрессовыми условиями для микобиоты [10, 15], например, аккумуляцией пестицидов. Обилие одноклеточных propagул микобиоты

в целом коррелирует с биомассой и длиной мицелия микобиоты, однако для образцов днища балки данная закономерность не соблюдается: в них отмечается аномально большое содержание почкующихся propagул, что может свидетельствовать о значительной активности олиготрофных дрожжей [15, 45], по-видимому, из-за периодического (весеннего) переувлажнения данных почв. Дрожжи в основном одноклеточны, поэтому их трудно отличить от покоящихся грибных propagул (спор, конидий и др.) [45]. Отсутствие крупных propagул диаметра 5–7 мкм для части образцов может быть связано со стрессовыми условиями в исследуемых почвах.

Биомасса прокариот. Численность прокариот в большинстве исследованных почв по порядку значений соответствует таковым для черноземов Башкортостана, но на порядок больше, чем для черноземов Челябинской области и Алтайского края [17] и на порядок меньше по сравнению с таковой для обыкновенных черноземов заповедника Каменная степь [13]. Выявленный максимум прокариот (порядка 109 кл./г почвы) в проанализированных почвах днища балки по порядку значений сопоставим с таковым для обыкновенных черноземов заповедника Каменная степь [13] и дерново-подзолистых почв средней полосы России [15, 17]. Большая неоднородность в значениях численности клеток и биомассы прокариот в днище балки по сравнению с пашней может быть объяснена более высокой гомогенностью обрабатываемой почвы по сравнению с нераспахиваемым днищем балки. Основная часть учетных клеток прокариот имела объем около 0.08–0.20 мкм³, что согласуется с другими исследованиями черноземов, выполненными методом люминесцентной микроскопии, и не превышает средний объем бактериальной или архейной клетки, равный 0.1 мкм³, который обычно берут в качестве эталона для расчета биомассы прокариот [17, 72].

Значения биомассы прокариот в исследованных почвах пашни и днища балки в 2 раза различаются, что может быть обусловлено эрозионно-аккумулятивными процессами, т.е. уменьшением численности микроорганизмов вследствие смыва почвы, либо увеличением в результате ее намыва [30, 64]. Длина актиномицетного мицелия в большинстве изученных образцов невелика (до 60 м/г почвы), что подтверждает сведения об относительно низкой доле представителя данного порядка грамположительных бактерий в большинстве агрочерноземов [14, 17, 18]. Длина мицелия актиномицетов для проанализированных почв в 2–3 раза меньше, по сравнению со значениями для выщелоченных черноземов Нижегородской области [18] и обыкновенных черноземов заповедника Каменная степь [13].

Общая биомасса микроорганизмов. В исследованных почвах биомасса микроорганизмов в 1.6 раза

выше, чем в черноземах Челябинской области, Республики Башкортостан и Алтайского края [17], но в почти в 5 раз меньше, чем в дерново-подзолистых почвах Московской области [15]. Такие существенные различия между результатами для черноземной и нечерноземной зон могут объясняться сезонной динамикой биологической активности почвы (существенно повышается при высоких температурах и достаточной влажности) и сменой растительного покрова (одни растения стимулируют рост микроорганизмов в большей, а другие — в меньшей степени). Большие значения МБ являются важным фактором стабильности агроэкосистем и одним из критериев способности их систем поддерживать гомеостаз [25].

Высокая доля грибов (97–98%) в общей биомассе микроорганизмов для проанализированных почв характерна и для дерново-подзолистых почв Московской области [15]. Факт преобладания грибов в МБ почвенных микроорганизмов показан спектром методов (прямого микроскопирования, фумигации–экстракции, селективного ингибирования СИД антибиотиками) для почв различных типов землепользования [1, 15, 17–19]. Однако это не означает, что всю биологическую активность местных почв обеспечивают грибы [5, 45]. Высокий процент биомассы микобиоты в биомассе микроорганизмов обычно свидетельствует об устойчивости экосистемы [40]. Ввиду доминирования микобиоты в составе биомассы микроорганизмов, основные тенденции ее распределения в почвах разной степени смытости и намытости аналогичны тенденциям, описанным выше для биомассы микроорганизмов.

В целом исследованные почвы характеризуются большим количеством мелких спор грибов, тонкого мицелия микобиоты и актиномицетов, а также малыми размерами клеток прокариот. Известно, что чем меньше размеры клеток, тем больше их удельная поверхность, что потенциально может ускорить обмен веществ между микроорганизмами и окружающей средой [25, 72]. Поэтому полученные результаты могут говорить о потенциально высокой биологической активности почвы [17, 18].

Субстрат-индуцированное дыхание почвы. Схожие значения СИД выявлены для выщелоченных черноземов Пензенской области [1] и черноземов Молдавии [25] и в 1.2–1.6 раза меньше по сравнению с черноземом типичным Центрально-Черноземного биосферного заповедника (ЦЧБЗ, Курская область) [19]. ЦЧБЗ и анализируемый водосбор расположены в непосредственной близости друг от друга (менее 2 км), можно предположить, что тип землепользования и степень смытости–намытости почв являются ведущими факторами, определяющими уровень МБ в почве [25, 81].

Метод СИД основан на потреблении микроорганизмами легкодоступного субстрата (глюкозы) за короткий период (3–5 ч) [4]. Поэтому можно предположить, что выделяющийся из почвы углекислый газ образуется из-за участия в СИД лишь г-стратегов [81]. Длительная традиционная обработка почвы (применяется на исследуемых объектах) снижает количество легкодоступной органики в почве и, соответственно, должна уменьшать численность г-стратегов [25, 32, 81]. Эти два предположения могут объяснять, почему полученные значения СИД для пашни меньше, чем для днища балки.

Базальное дыхание почвы. В исследованных образцах величина базального дыхания в 1.6 раза меньше, чем в черноземах типичных ЦЧБЗ [19]. Вероятно, что аналогично СИД, тип землепользования и степень смытости–намытости почв являются ведущими факторами, определяющими уровень МБ в почве. Интенсивная обработка почвы способствует быстрой минерализации органического вещества и, соответственно, ускоренной эмиссии углекислого газа [29, 82], что оказывает влияние на базальное дыхание [19]. Аналогичные результаты снижения биологической активности почвы (в том числе уменьшения уровня базального дыхания) при распахке земель показаны в разных исследованиях [4, 9, 19, 70].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принято считать, что преобладающее воздействие эрозионно-аккумулятивных процессов на почвенный покров связано со смывом почв на склонах. В связи с этим основное внимание исследователей направлено на сравнение свойств почв разной степени смытости, при этом намытые почвы долгое время оставались без должного внимания.

В настоящей работе в результате комплексного исследования ПОВ и МБ почв в различных частях малого водосбора “Хвошин лог” выявлено, что намытые почвы в нераспахиваемом днище балки существенно отличаются от черноземов разной степени смытости на пашне. Установлено, что намытые почвы в нераспахиваемом днище балки обладают положительными с агрономической точки зрения свойствами, в некоторых случаях лучшими, чем распахиваемые черноземы и намытые почвы распахиваемых ложбин.

По данным аналитического пиролиза, идентифицировано 26 пиролизатов, отражающих состав ПОВ. Выявлено, что состав ПОВ пахотных почв характеризуется высоким содержанием азотсодержащих компонентов, в составе органического вещества почв днища балки доминируют сильно трансформированные углеводные компоненты. Агрегатный состав отличается высокой долей

частиц >10 мм на пашне и низкой — в нераспахиваемом днище балки. Биомасса микроорганизмов представлена преимущественно (от 97 до 99%) грибами, высокое обилие которых характерно для днища балки. Преобладание грибов в структуре МБ и хорошее структурное состояние почв нераспахиваемого днища балки указывают на участие преобразованного водными потоками материала наносов в процессе образования агрегатов. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о комплексном воздействии эрозионно-аккумулятивных процессов и характера использования земель на указанные выше свойства почв. Однако при этом не выявлены значимые различия в содержании углерода, азота, показателя C/N, дыхательной активности, а также содержанию алканов и фенола среди пиролитов в исследуемых почвах.

Проведенные исследования в значительной степени пионерные, отмеченные общие и разнящиеся свойства почв нуждаются в дальнейшей проверке. Тем не менее полученные результаты однозначно свидетельствуют о перспективности изучения свойств намывных почв как в пределах пашни, так и в овражно-балочной сети для дополнения существующих представлений о почвах в сельскохозяйственных регионах России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена молодежной лабораторией Почвенного углерода и микробной экологии в рамках государственного задания FGUR-2022-0018 “Исследование микробных драйверов секвестрации и депонирования органического углерода в почвах агроэкосистем” (характеристика микробной биомассы), а также при поддержке Российского научного фонда: проект № 22-17-00071 (отбор образцов, характеристика объектов исследования), проект 24-26-00293 (характеристика состава ПОВ).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24090059>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М: ГЕОС, 2006. 400 с.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986.
4. *Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.
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.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1087.
6. *Жидкин А.П., Комиссаров М.А., Шамигурина Е.Н., Мищенко А.В.* Эрозия почв на Среднерусской возвышенности (обзор) // Почвоведение. 2023. № 2. С. 259–272.
7. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М: Изд-во МГУ, 1991.
8. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. *Ковалев И.В., Семенов В.М., Ковалева Н.О., Лебедева Т.Н., Яковлева В.М., Паутова Н.Б.* Оценка биогенности и биоактивности агросерых глееватых неосушенных и осушенных почв // Почвоведение. 2021. № 7. С. 827–837.
10. *Корнейкова М.В., Никитин Д.А., Долгих А.В., Сошина А.С.* Микобиота почв города Апатиты (Мурманская область) // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 4. С. 264–277.
11. *Кошовский Т.С., Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Иванова Н.Н.* Диагностика, генезис и локализация педоседиментов в пределах мало-го водосбора (Среднерусская возвышенность) // Почвоведение. 2019. № 5. С. 529–543.
12. *Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожная А.Г.* Применение бассейновой концепции природопользования для почво-водоохранного обустройства агроландшафтов // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1–9. С. 2432–2435.
13. *Манучарова Н.А., Белова Э.В., Воробьев А.В., Полянская Л.М., Степанов А.Л.* Сукцессия хитинолитических микроорганизмов в черноземе // Микробиология. 2005. Т. 74. № 5. С. 693–698.
14. *Манучарова Н.А., Ксенофонтова Н.А., Каримов Т.Д., Власова А.П., Зенова Г.М., Степанов А.Л.* Изменение филогенетической структуры метаболически

- активного прокариотного комплекса почв под влиянием нефтяного загрязнения // Микробиология. 2020. Т. 89. № 2. С. 222–234.
15. Никитин Д.А., Чернов Т.И., Железова А.Д., Тхакахова А.К., Никитина С.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Кутовая О.В. Сезонная динамика биомассы микроорганизмов в дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1356–1364.
16. Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатели экологического состояния почв // Почвоведение. 2005. № 6. С. 706–714.
17. Полянская Л.М., Приходько В.Е., Ломакин Д.Г., Чернов И.Ю. Численность и биомасса микроорганизмов в древних погребенных и современных черноземах разного землепользования // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1191–1204.
18. Полянская Л.М., Суханова Н.И., Чакмазян К.В., Звягинцев Д.Г. Особенности изменения структуры микробной биомассы почв в условиях залежи // Почвоведение. 2012. № 7. С. 792–792.
19. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудряков В.Н. Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
20. Трифонова Т. А. Развитие бассейнового подхода в почвенных и экологических исследованиях // Почвоведение. 2005. № 9. С. 1054–1061.
21. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Айдиев А.Ю., Лазарев В.И., Ильин Б.С., Иванов А.Л., Куликова Н.А. Термолабильное и термостабильное органическое вещество черноземов разного землепользования // Почвоведение. 2020. № 8. С. 970–982.
22. Холодов В.А., Фарходов Ю.Р., Ярославцева Н.В., Зиганишина А.Р., Максимович С.В. Неоднородность органического вещества агрегатов типичных черноземов // Почвоведение. 2022. № 7. С. 940–946.
23. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Зиганишина А.Р., Данченко Н.Н., Данилин И.В., Фарходов Ю.Р., Жидкин А.П. Водоекстрагируемое органическое вещество почв разной степени смытости и намытости на малом водосборе в центральной лесостепи Среднерусской возвышенности: намытые почвы в днище балки // Почвоведение. 2024. № 7. С. В печати.
24. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Зиганишина А.Р., Данченко Н.Н., Фарходов Ю.Р., Максимович С.В., Жидкин А.П. Водоекстрагируемое органическое вещество почв разной степени смытости и намытости на малом водосборе в центральной лесостепи Среднерусской возвышенности: распахиваемые почвы // Почвоведение. 2024. № 6. С. В печати.
25. Фрунзе Н.И. Суммарная микробная биомасса и метаболическое состояние микроорганизмов в черноземе типичном молдавии // Почвоведение. 2013. № 4. С. 454–454.
26. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
27. Aksenov A.A., Laponogov I., Zhang Z., Doran S.L.F., Belluomo I., Veselkov D., Bittremieux W. et al. Auto-deconvolution and molecular networking of gas chromatography–mass spectrometry data // Nature Biotechnology. 2021. Т. 39. № 2. С. 169–173.
28. Angst G., Mueller K.E., Nierop K.G.J., Simpson M.J. Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter // Soil Biol. Biochem. 2021. V. 156. P. 108–189.
29. Awale R., Emeson M.A., Machado S. Soil Organic Carbon Pools as Early Indicators for Soil Organic Matter Stock Changes under Different Tillage Practices in Inland Pacific Northwest // Frontiers in Ecology and Evolution. 2017. V. 5.
30. Bakermans C., Emili L.A. Chapter 1 – Terrestrial systems of the Arctic as a model for growth and survival at low temperatures / Model Ecosystems in Extreme Environments / Rampelotto P. Academic Press, 2019. P. 1–21.
31. Banwart S.A., Nikolaidis N.P., Zhu Y.-G., Peacock C.L., Sparks D.L. Soil Functions: Connecting Earth's Critical Zone // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2019. V. 47. № 1. P. 333–359.
32. Blagodatskaya E.V., Blagodatsky S. A., Anderson T. H., Kuzyakov Y. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies // Appl. Soil Ecology. 2007. V. 37. № 1. P. 95–105.
33. Böhme L., Böhme F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilisation // European Journal of Soil Biology. 2006. V. 42. № 1. P. 1–12.
34. Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: a review // Geoderma. 2005. V. 124. № 1-2. P. 3–22.
35. Buurman P., Jongmans A.G., Nierop K.G.J. Comparison of Michigan and Dutch Podzolized Soils: Organic Matter Characterization by Micromorphology and Pyrolysis-GC/MS // Soil Sci. Soc. Am. J. 2008. V. 72. № 5. P. 1344–1356.
36. Cheng F., Bayat H., Jena U., Brewer C.E. Impact of feedstock composition on pyrolysis of low-cost, protein- and lignin-rich biomass: A review // J. Analytical Appl. Pyrolysis. 2020. V. 147. P. 104780.
37. Daraghme O.A., Jensen J.R., Petersen C.T. Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam // Geoderma. 2009. V. 150. № 1. P. 64–71.
38. De la Rosa J. M., Knicker H., Lopez-Capel E., Manning D.A.C., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J. Direct detection of black carbon in soils by Py-GC/MS, carbon-13 NMR spectroscopy and thermogravimetric

- techniques // Soil Sci. Soc. of Am. J. 2008. V. 72. № 1. P. 258–267.
39. *de Nijls E.A., Cammeraat E.L.H.* The stability and fate of Soil Organic Carbon during the transport phase of soil erosion // *Earth-Sci. Rev.* 2020. V. 201. P. 103067.
 40. *de Vries F.T., Hoffland E., van Eekeren N., Brussaard L., Bloem J.* Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management // *Soil Biol. Biochem.* 2006. V. 38. № 8. P. 2092–2103.
 41. *Dieckow J., Mielniczuk J., González-Vila F.J., Knicker H., Bayer C.* No-till cropping systems and N fertilisation influences on organic matter composition of physical fractions of a subtropical Acrisol as assessed by analytical pyrolysis (Py-GC/MS) // *Geoderma.* 2006. V. 135. P. 260–268.
 42. *Doetterl S., Berhe A.A., Nadeu E., Wang Z., Sommer M., Fiener P.* Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes // *Earth-Sci. Rev.* 2016. V. 154. P. 102–122.
 43. *Domeignoz-Horta L.A., Shinfuku M., Junier P., Poirier S., Verrecchia E., Sebag D., DeAngelis K.M.* Direct evidence for the role of microbial community composition in the formation of soil organic matter composition and persistence // *ISME Communications.* 2021. V. 1. № 1. P. 64.
 44. *Ellerbrock R.H., Gerke H.H., Deumlich D.* Soil organic matter composition along a slope in an erosion-affected arable landscape in North East Germany // *Soil Till. Res.* 2016. V. 156. P. 209–218.
 45. *Finlay R.D., Thorn R.G.* The fungi in soil // *Modern Soil Microbiology.* 2019. P. 65–90.
 46. *Geng J., Cheng S., Fang H., Pei J., Xu M., Lu M., Yang Y., Cao Z., Li Y.* Different Molecular Characterization of Soil Particulate Fractions under N Deposition in a Subtropical Forest // *Forests.* 2019. V. 10. № 10. P. 914.
 47. *Gleixner G., Poirier N., Bol R., Balesdent J.* Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil // *Org. Geochem.* 2002. V. 33. № 3. P. 357–366.
 48. *Granada E., Blasco J., Comellas L., Gassiot M.* Pyrolysis—gas chromatographic analyses of organic matter in soils using nitrogen-selective detection // *J. Analyt. Appl. Pyrolysis.* 1991. V. 19. P. 193–202.
 49. *Hao W., Xia B., Xu M.* Erosion-deposition positively reconstruct the bacterial community and negatively weaken the fungal community // *Catena.* 2022. V. 217. P. 106471.
 50. *Holz M., Augustin J.* Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis // *Geoderma.* 2021. V. 397. P. 115045.
 51. *Huang Y., Eglinton G., Van der Hage E. R. E., Boon J. J., Bol R., Ineson P.* Dissolved organic matter and its parent organic matter in grass upland soil horizons studied by analytical pyrolysis techniques // *Eur. J. Soil Sci.* 1998. V. 49. № 1. P. 1–15.
 52. *Hurni H.* Soil Erosion and Soil Formation in Agricultural Ecosystems: Ethiopia and Northern Thailand // *Mountain Research and Development.* 1983. V. 3. № 2. P. 131–142.
 53. *ISO 10694:1995* — Soil quality Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). 1995.
 54. *Jandl G., Baum C., Heckrath G., Greve M.H., Kanal A., Mander Ü., Maliszewska-Kordybach B., Niedzwiecki J., Eckhardt K.-U., Leinweber P.* Erosion Induced Heterogeneity of Soil Organic Matter in Catenae from the Baltic Sea Catchment // *Soil Systems.* 2019. V. 3. № 2. P. 42.
 55. *Jiang G., Nowakowski D.J., Bridgwater A.V.* Effect of the Temperature on the Composition of Lignin Pyrolysis Products // *Energy Fuels.* 2010. V. 24. № 8. P. 4470–4475.
 56. *Kaal J., Cortizas A.M., Nierop K.G.J.* Characterisation of aged charcoal using a coil probe pyrolysis-GC/MS method optimised for black carbon // *J. Analyt. Appl. Pyrolysis.* 2009. V. 85. № 1-2. P. 408–416.
 57. *Li Z., Fang H.* Impacts of climate change on water erosion: A review // *Earth-Science Reviews.* 2016. V. 163. C. 94–117.
 58. *Liang C., Kästner M., Joergensen R.G.* Microbial necromass on the rise: The growing focus on its role in soil organic matter development // *Soil Biol. Biochem.* 2020. V. 150. P. 108000.
 59. *Liu K., Li T., Duan X., Zhang S., Chen M., Hou H., Wang Z., Yu A., Chen D., Zhang X., Hu J., Dong Y., Liu D., Che R.* The degradation of subalpine meadows significantly changed the soil microbiome // *Agriculture, Ecosystems Environment.* 2023. V. 349. P. 108470.
 60. *Mu W., Ben H., Ragauskas A., Deng Y.* Lignin Pyrolysis Components and Upgrading—Technology Review // *BioEnergy Res.* 2013. V. 6. № 4. P. 1183–1204.
 61. *Nierop K.G.J.* Origin of aliphatic compounds in a forest soil // *Org. Geochem.* 1998. V. 29. № 4. P. 1009–1016.
 62. *Oades J.M.* The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure // *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships* / Brussaard L., Kooistra M. J. Amsterdam: Elsevier, 1993. P. 377–400.
 63. *Ostrowska A., Porębska G.* Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils // *Ecological Indicators.* 2015. V. 49. P. 104–109.
 64. *Pastor A., Freixa A., Skovsholt L.J., Wu N., Romaní A.M., Riis T.* Microbial Organic Matter Utilization in High-Arctic Streams: Key Enzymatic Controls // *Microbial Ecology.* 2019. V. 78. № 3. — P. 539–554.
 65. *R Core Team (2022).* R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for

- Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
66. Ren F., Sun N., Xu M., Zhang X., Wu L., Xu M. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A meta-analysis // *Soil Till. Res.* 2019. V. 194. P. 104291.
 67. Ritz K., Young I.M. Interactions between soil structure and fungi // *Mycologist.* 2004. V. 18. № 2. P. 52–59.
 68. Saiz-Jimenez C., De Leeuw J.W. Chemical characterization of soil organic matter fractions by analytical pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry // *J. Analyt. Appl. Pyrolysis.*
 69. Schwalb S.A., Li S., Hemkemeyer M., Heinze S., Jørgensen R.G., Mayer J., Mäder P., Wichern F. Long-term differences in fertilisation type change the bacteria:archaea:fungi ratios and reveal a heterogeneous response of the soil microbial ionome in a Haplic Luvisol // *Soil Biol. Biochem.* 2023. V. 177. P. 108892.
 70. Singh P., Benbi D.K. Soil organic carbon pool changes in relation to slope position and land-use in Indian lower Himalayas // *Catena.* 2018. V. 166. P. 171–180.
 71. Sollins P., Homann P., Caldwell B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls // *Geoderma.* 1996. V. 74. № 1–2. P. 65–105.
 72. Stepanauskas R., Fergusson E.A., Brown J., Poulton N.J., Tupper B., Labonté J.M., Becraft E.D. et al. Improved genome recovery and integrated cell-size analyses of individual uncultured microbial cells and viral particles // *Nature Commun.* 2017. V. 8. № 1. P. 84.
 73. Suleymanov A., Gabbasova I., Suleymanov R., Abakumov E., Polyakov V., Liebelt P. Mapping soil organic carbon under erosion processes using remote sensing // *Hungarian Geographical Bull.* 2021. V. 70. № 1. P. 49–64.
 74. Sun B., Roberts D.M., Dennis P.G., Caul S., Daniell T.J., Hallett P.D., Hopkins D.W. Microbial properties and nitrogen contents of arable soils under different tillage regimes // *Soil Use and Management.* 2014. V. 30. № 1. P. 152–159.
<https://doi.org/10.1111/sum.12089>
 75. Tao F., Huang Y., Hungate B.A., Manzoni S., Frey S.D., Schmidt M.W.I., Reichstein M. et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage // *Nature.* 2023. V. 618. № 7967. P. 981–985.
 76. Tedersoo L., Bahram M. Mycorrhizal types differ in ecophysiology and alter plant nutrition and soil processes // *Biological Rev.* 2019. V. 94. № 5. P. 1857–1880.
 77. von Lützw M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model // *J. Plant Nutrition Soil Sci.* 2008. V. 171. № 1. P. 111–124.
 78. Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems // *Soil Biol. Biochem.* 2021. V. 162. P. 108422.
 79. Wang X., Cammeraat E.L.H., Cerli C., Kalbitz K. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition // *Soil Biol. Biochem.* 2014. V. 72. P. 55–65.
 80. IUSS Working Group WRB. 2014. World reference base for soil resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
 81. Yang S., Wu H., Wang Z., Semenov M.V., Ye J., Yin L., Wang X., Kravchenko I., Semenov V., Kuzyakov Y., Jiang Y., Li H. Linkages between the temperature sensitivity of soil respiration and microbial life strategy are dependent on sampling season // *Soil Biol. Biochem.* 2022. V. 172. P. 108758.
 82. Yang Y.-S., Chen G.-S., Guo J.-F., Xie J.-S., Wang X.-G. Soil respiration and carbon balance in a subtropical native forest and two managed plantations // *Plant Ecology.* 2007. V. 193. № 1. P. 71–84.
 83. Zhang R., Rong L., Zhang L. Soil nutrient variability mediates the effects of erosion on soil microbial communities: results from a modified topsoil removal method in an agricultural field in Yunnan plateau, China // *Environ. Sci. Poll. Res.* 2022. V. 29. № 3. P. 3659–3671.
 84. Zhang S., Fan W., Li Y., Yi Y. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 574. P. 34–45.
 85. Zhao C., Jiang E., Chen A. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin // *J. Energy Institute.* 2017. V. 90. № 6. P. 902–913.

Composition of Organic Matter and Biological Properties of Eroded Soils and Sediments in a Small Catchment in the Central Forest-Steppe Zone of the Central Russian Upland

**Yu. R. Farkhodov^{1, *}, D. A. Nikitin¹, N. V. Yaroslavtseva¹,
S. V. Maksimovich¹, A. R. Ziganshina¹, I. V. Danilin¹,
V. A. Kholodov¹, M. V. Semenov¹, and A. P. Zhidkin¹**

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: yulian.farkhodov@yandex.ru*

The impact of land use and erosion-deposition processes on some physical, chemical, and biological soil properties in a small agricultural catchment in Kursk oblast is analyzed. Plowed Haplic Chernozems and stratozems (Fluvic Chernic Phaeozems (Loamic, Pachic)), as well as unplowed stratozems of a dry valley bottom have been studied. The proportion of large soil aggregates (clods) >10 mm in soils is high on plowed land and low in the dry valley bottom. Differences in the carbon and nitrogen content and in the C/N ratio have not been detected. The analytical pyrolysis has revealed 26 pyrolysates in the composition of soil organic matter (SOM). The relative abundances of pyrrole, pyridine, toluene, and indan among SOM pyrolysates are higher in plowed soils as compared to the soils at the dry valley bottom. Proportions of furfural and methyl furfural among SOM pyrolysates are higher in soils of the dry valley bottom than in plowed soils. Differences in the content of alkanes and phenol are absent. The biomass of microorganisms is mainly formed by fungi (97–99%), and their abundance is greater in soils of the dry valley bottom than in soils of the plowland. Differences in the respiratory activity of the studied soils have not been revealed. The significant influence of erosion-deposition processes and soil cultivation on the spatial heterogeneity of the SOM composition and microbiological parameters is shown. Plowed soils are characterized by the high relative abundance of nitrogen-containing SOM components, while soils at the dry valley bottom have a relatively high abundance of carbohydrate components of mature SOM. The accumulation of fungal biomass and an increase in the structure coefficient in soils of the dry valley bottom indicate the participation of material redeposited from slopes in soil aggregation.

Keywords: soil erosion, structure coefficient, analytical pyrolysis, soil microorganisms' biomass, luminescent microscopy, soil biological activity, basal soil respiration, substrate-induced soil respiration