

УДК 631.46+502/504

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МОНИТОРИНГА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОБНОЙ БИОМАССЫ В ПОЧВАХ (НА ПРИМЕРЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ЗАПОВЕДНЫХ ЛЕСОВ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА)

© 2024 г. О. В. Чернова^{а, *}, К. С. Душанова^б, А. А. Петросян^б, Т. Э. Хомутова^б

^аИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, 33, Москва, 119071 Россия

^бИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пущино, Московская область, 142290 Россия

*e-mail: ovcher@mail.ru

Поступила в редакцию 29.11.2023 г.

После доработки 13.02.2024 г.

Принята к публикации 14.02.2024 г.

Содержание углерода микробной биомассы в почве служит одним из индикаторов ее биологической активности и часто используется при оценке влияния на почвенный микробиом антропогенной деятельности и природных изменений. Значительное пространственное и временное варьирование показателя на уровне экосистем, типологических единиц почв, видов землепользования затрудняет интерпретацию данных, получаемых при массовом мониторинге. Цель исследования – определение фоновых значений содержания микробной биомассы в поверхностном подподстилочном слое почв заповедных лесов Московской области. Проведено рекогносцировочное обследование типичных для региона разнообразных по генезису и гранулометрическому составу почв подзолистого ряда, автономных или с небольшим дополнительным увлажнением, сформированных под смешанными южно-таежными лесами на четырех охраняемых природных территориях. Оценено содержание углерода микробной биомассы в почвах, определенное двумя методами: по содержанию фосфолипидов и субстрат-индуцированному дыханию микробных сообществ. Значительная пространственная вариабельность содержания микробной биомассы отмечена как на уровне площадок, так и на уровне экосистем. Для сходных классификационно и по гранулометрическому составу автономных почв она сравнима с локальной вариабельностью в пределах экспериментальных площадок. Показано, что величина микробной биомассы зависит в основном от характера влажностного режима и гранулометрического состава, который во многом определяет сорбционную способность почвы и ее обеспеченность биофильными элементами, а также коррелирует с богатством напочвенного покрова, обеспечивающего почвенный микробиом элементами питания. Показано, что для получения корректных результатов при мониторинге содержания микробной биомассы в почвах большое значение имеет унификация методики и глубины пробоотбора в почвах фоновых и антропогенно-преобразованных экосистем.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, пространственная вариабельность, фоновые показатели, мониторинг, Retisols

DOI: 10.31857/S0032180X24070078, EDN: XUOXHX

ВВЕДЕНИЕ

Рост антропогенного воздействия на окружающую среду вызывает развитие деградационных процессов в почвенном покрове и обуславливает необходимость ведения почвенного мониторинга, что признается в настоящее время в научном обществе и в системе государственного управления [35]. Важным показателем состояния почвы и

степени ее нарушенности является биологическая активность, индикатором которой может служить состояние почвенного микробиома. Это состояние связано с основными почвенными характеристиками, и его показателем, в частности, является содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) – один из четырех наиболее часто используемых индикаторов биологической активности почвы. Показатель микробной биомассы используется почти

в трети работ, посвященных оценке качества почвы, наряду с почвенным дыханием, содержанием минерализуемого азота и численностью земляных червей [20]. В настоящее время используется целый ряд методов определения микробной биомассы в почве. В массовых обследованиях для определения содержания микробной биомассы почв широко применяется метод субстрат-индуцированного дыхания. Метод активно используется для определения $S_{\text{мик}}$ как в России [1–3, 6, 7, 14, 36], так и за рубежом [28, 37]. Другие методы, основанные на анализе содержания специфических компонентов микробных клеток, используются реже, но также могут применяться в почвенном мониторинге. В частности, таким компонентом являются фосфолипиды, которые входят в состав клеточных мембран всех живых микроорганизмов. Количество фосфолипидов оценивается по содержанию фосфатов после экстракции липидного материала из почвы, пересчетные коэффициенты позволяют выразить величину микробной биомассы в единицах $S_{\text{мик}}$ [17, 22, 23].

Принято считать, что антропогенное воздействие, сельскохозяйственное или техногенное, провоцирует уменьшение активности почвенного микробиома и снижение содержания микробной биомассы [1, 3, 6]. По мнению некоторых исследователей содержание микробной биомассы в почвах и микробные метаболические коэффициенты могут расцениваться как характеристики активности и степени ненарушенности микробного сообщества, а также служить индикаторами изменения окружающей среды и характера землепользования [19, 27]. Имеются данные о связи микробной биомассы почв с типом и возрастом растительности, увлажненностью местообитаний, некоторыми почвенными характеристиками: содержанием углерода и азота, гранулометрическим составом и др. [21, 25, 30, 31, 33, 34, 38]. Однако показано, что варьирование фоновых значений содержания $S_{\text{мик}}$ затрудняет его использование в качестве индикатора экологических изменений в естественных и природно-антропогенных экосистемах или при мониторинге антропогенных воздействий и изменений окружающих природных условий [24]. Соответственно, при использовании данных о содержании микробной биомассы почв в экологическом мониторинге необходимо иметь представление о природной изменчивости фоновых показателей в конкретных регионах, что требует проведения специальных исследований.

При ведении мониторинга остро стоит проблема выбора фоновых показателей — характеристик реперных, эталонных объектов для сравнения с антропогенно-преобразованными аналогами. Четких представлений о том, какие природные объекты должны быть признаны эталонными так же как принципов их выделения в настоящее время нет.

Обращаясь к этой проблеме, специалисты обычно действуют интуитивно. В качестве точек отсчета при мониторинге используют характеристики природных почв, результаты предыдущих наблюдений или оптимальные для сельскохозяйственных целей параметры [29, 32]. По-видимому, наиболее объективными реперными объектами для сравнения их характеристик с антропогенно-измененными (сельскохозяйственными, загрязненными или иным образом нарушенными) почвами могут быть их целинные аналоги, по возможности, выделенные в пределах охраняемых природных территорий.

Наиболее актуально проблема слежения за состоянием почвенного покрова стоит в значительно антропогенно-измененных регионах, где также наиболее сложно выявить ненарушенные почвы для использования их характеристик в качестве фоновых показателей. В полной мере сказанное относится к высокоурбанизированной и густонаселенной территории Московского региона, имея в виду Москву и Московскую область. Так, в Московском регионе 36.5% территории занято сельскохозяйственными угодьями; земли застройки и дороги занимают соответственно более 8% и около 4% площади; около 0.7% территории приходится на нарушенные земли, т.е. около половины площади региона значительно изменена антропогенным воздействием. На остальной территории, в частности, на землях лесного фонда, к которым относятся 44% площади региона, антропогенное воздействие выражено в меньшей степени, но также не исключено.

Суммарное количество всех особо охраняемых природных территорий (ООПТ) региона превышает 250, а их общая площадь, включая водные, культурно-исторические объекты, охранные и рекреационные зоны и др., достигает 6% площади региона. При этом охраняемых территорий, в границах которых могут быть организованы объекты фонового почвенного/экологического мониторинга, значительно меньше. Они должны удовлетворять следующим условиям: обладать стабильным и достаточно высоким охранным статусом (оптимально — федеральным); антропогенное воздействие на природные комплексы должно быть минимальным в течение длительного времени; набор и количество таких территорий должны представлять природное разнообразие типичных для региона почв с соответствующими экосистемами. Также немаловажное значение имеет доступность территории для ведения комплексных экологических исследований, оптимальный вариант — база стационарных, регулярных или периодических обследований научных и/или учебных организаций.

Таким образом, высокая антропогенная преобразованность территории Московского региона обуславливает актуальность получения фоновых характеристик типичных преобладающих по площади почв региона.

Цель настоящего исследования – определение содержания углерода микробной биомассы в почвах некоторых ООПТ с использованием методов субстрат-индуцированного дыхания (С-СИД) и определения содержания фосфолипидов (С-ФЛ). В соответствии с этой целью поставлены следующие задачи:

1. Подобрать в пределах ООПТ Московской области естественные почвы подзолистого ряда (с учетом их разнообразия по генезису и гранулометрическому составу) для получения фоновых характеристик типичных для региона почв как образцов для сравнения с антропогенно-измененными аналогами.
2. Определить содержание микробной биомассы в естественных почвах методами С-СИД и С-ФЛ.
3. Оценить природную изменчивость содержания микробной биомассы в ненарушенных лесных почвах подзолистого ряда.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

При выборе объектов исследования ориентировались на Карту почвенно-экологического районирования Российской Федерации масштаба 1 : 8 000 000 [15]. Большая часть территории Московской области относится к Среднерусской южно-таежной провинции дерново-мелко- и неглубокоподзолистых почв (рис. 1). В пределах области представлены четыре округа этой провинции, где основными почвами являются: дерново-подзолистые почвы различного гранулометрического состава (от песчаного до тяжелосуглинистого); подзолы глеевые и торфянисто-подзолисто-глеевые песчаные и супесчаные; серые лесные почвы. В Московской области в границах Среднерусской южно-таежной провинции проведено рекогносцировочное исследование содержания микробной биомассы в почвах подзолистого ряда четырех ООПТ, при этом стремились выбрать ненарушенные варианты основных почв провинции под естественной южно-таежной растительностью с учетом их разнообразия по генезису и гранулометрическому составу. Принято считать, что практически все автоморфные почвы центральной части Европейской территории страны на протяжении последних нескольких сотен лет неоднократно прошли стадию распашки, поэтому в качестве фоновых объектов были подобраны участки с картографически подтвержденным длительным периодом формирования под пологом лесной растительности и без морфологических признаков сельскохозяйственного использования в почвенном профиле.

Почвы единственного в Московской области заповедника – Приокско-Тerrasного государственного природного биосферного заповедника им. М.А. Заблочно-го (ПТЗ) – сформированы под хвойными, смешанными и широколиственными лесами, преимущественно на песках, подстилаемых глинами, реже – известняками и доломитами. В пределах заповедной территории выделяются контуры типичных для региона песчаных и супесчаных дерново-подзолистых почв (дерново-подзолов) (Entic Podzols), с северной стороны на границе заповедника и в охраняемой зоне встречаются дерново-подзолистые почвы легкосуглинистого гранулометрического состава (Retisols) [5]. В северной части заповедника и в охраняемой зоне вблизи его северной границы в пределах ареалов распространения дерново-подзолов и дерново-подзолистых почв заложено 8 площадок размером 10×10 м, по углам которых отобраны образцы почв с глубины 0–15 см. В центрах 1 и 7 площадок находятся опорные разрезы ПТЗ-1 и ПТЗ-7 соответственно. Все площадки заложены под пологом смешанного леса в пределах квадрата 1×1 км [5]. Краткая характеристика площадок, растительного покрова и почв приводится в табл. 1, 2. Анализ исторических картографических материалов [<http://retromap.ru/>]¹ показал, что обследованная территория более 200 лет находится под пологом лесной растительности.

Национальный парк “Государственный комплекс “Завидово” (НП) расположен на границе Тверской и Московской областей в пределах Верхневолжской низменности. Большая часть территории национального парка представлена экосистемами смешанных лесов и обширными заболоченными участками, чередующимися с полями. Почвенный покров ранее не обследовался, однако, в соответствии с Цифровой среднемасштабной почвенной картой Московского региона² на охраняемой территории могут быть найдены целинные представители типичных для области дерново-подзолистых почв различного гранулометрического состава (Retisols). В южной части НП Завидово проведено рекогносцировочное обследование почвенного покрова. Заложено 3 разреза под смешанным мелколиственно-еловым лесом, вблизи разрезов по углам площадок 10×10 м, отобраны почвенные образцы с глубины 0–10 и 10–20 см. Расстояние между почвенными разрезами не превышает 3 км.

Анализ архивной картографической информации показал, что на месте площадки НП-1 в XVIII в. находился луг, в середине XIX в. – лес, в конце XIX в. – выпас. Участок расположения площадки НП-2 последовательно проходил стадии поля, луга, леса, соответственно; существование

¹ Сайт Retromap <http://retromap.ru/>

² Болдырева В.Э., Голозубов О.М., Литвинов Ю.А., Минаева Е.Н., Пулин А.В. Цифровая среднемасштабная почвенная карта Московского региона. М., 2019. <https://soildb.ru/map/moscow-region>

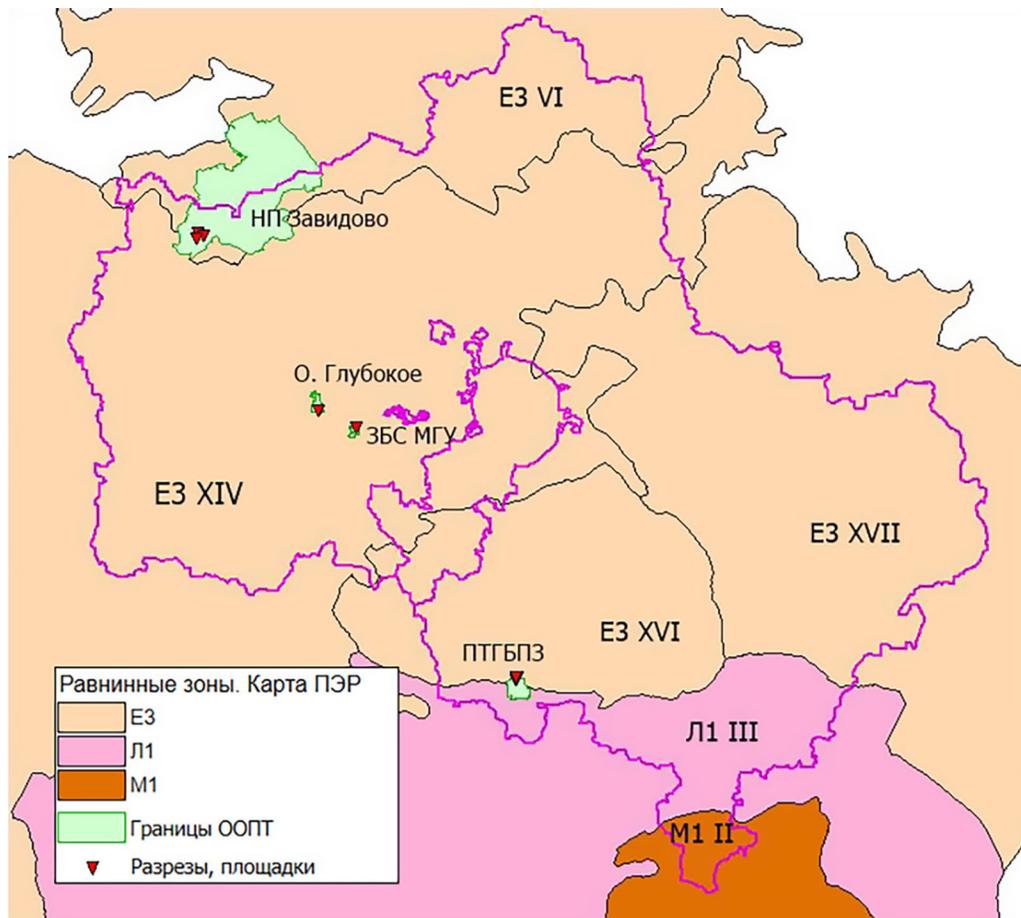


Рис. 1. Фрагмент карты Почвенно-экологического районирования Российской Федерации масштаба 1 : 8 000 000 [15] для территории Московского региона с расположением обследованных ООПТ. Обследованные ООПТ (полные названия в тексте). Провинции, округа почвенно-экологического районирования: Е – зона дерново-подзолистых почв южной тайги, ЕЗ – Среднерусская южно-таежная провинция дерново-мелко- и неглубокоподзолистых почв, VI – Кимрский округ дерново-мелко- и неглубокоподзолистых, подзолов глеевых и торфян(ист)о-подзолисто-глеевых песчаных и супесчаных почв на флювиогляциальных и древнеаллювиальных отложениях, подстилаемых моренными суглинками, XIV – Смоленско-Московский округ дерново-мелко- и неглубоко- подзолистых глинистых и суглинистых почв на покровных отложениях, XVI – Москворецко-Окский округ дерново-мелко- и неглубокоподзолистых и серых лесных глинистых и тяжелосуглинистых почв на слабокарбонатных покровных отложениях, XVII – Мещерский округ подзолов глеевых торфян(ист)ых и дерново- подзолистых иллювиально-железистых песчаных почв на древнеаллювиальных и флювиогляциальных отложениях и торфяных болотных верховых и низинных почв. Л1 – Среднерусская широколиственно-лесная провинция серых лесных почв (зоны серых лесных почв лиственных лесов), М1 – Среднерусская лесостепная провинция черноземов оподзоленных, выщелоченных и типичных мощных и среднемощных, мало- и среднегумусных и серых лесных почв (зоны оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи).

леса на обоих участках с 1940 г. подтверждено картографически. Местность вблизи разреза НП-3 находится под лесом более 160 лет [<http://retromar.ru/>].

Для ведения регулярных обследований природных объектов также пригодны территории природных заказников областного значения: Звенигородская биостанция МГУ и карьер Сима (ЗБС) – база учебных практик и стационарных научных исследований биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Озеро Глубокое с

прилегающими к нему массивами леса (ОГ), где расположена Гидробиологическая станция Глубокое озеро им. Н.Ю. Зографа – научный стационар Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН.

Почвенный покров ЗБС довольно разнообразен, что обусловлено разнообразием рельефа и пестротой четвертичных отложений на этой территории; 83% площади заказника покрыта хвойными лесами, преимущественно еловыми

Таблица 1. Характеристика площадок отбора образцов и заложения разрезов

ООПТ	Площадка	Координаты, °N/°E	Глубина, см	Геоморфологическая позиция	Древесная растительность	Эколого-ценотические типы напочвенного покрова	Почва (1977)
ПТТБЗ	ПТЗ-1	54.9137/37.6046	0–15	Слаборасчлененная моренная равнина окского оледенения	Широколиственно-сосновый (дубово-липово-сосновый)	Борсально-боровый	Дерново-подзолистая слабо дифференцированная песчаная (Folic Entic Podzol (Arenic))
	ПТЗ-2	54.9148/37.6075	0–15		Мелколиственно-сосновый (дубово-елово-сосновый)	Неморально-боровый	
	ПТЗ-3	54.9191/37.6170	0–15		Мелколиственно-сосновый (березово-сосновый с липой)	Неморально-боровый	
	ПТЗ-4	54.9211/37.6149	0–15		Сосново-мелколиственный (березняк с елью)	Неморально-боровый	
	ПТЗ-5	54.9218/37.6127	0–15		Широколиственно-сосновый (березово-сосновый)	Неморально-боровый	
	ПТЗ-6	54.9212/37.6081	0–15		Широколиственно-еловый (березово-еловый)	Неморально-борсальный	
	ПТЗ-7	54.9210/37.6027	0–15		Ельник с липой и березой (березово-еловый с липой)	Неморально-борсальный	Дерново-подзолистая слабо дифференцированная контактно оглеенная супесчаная (Stagnic Folic Entic Podzol (Arenic))
	ПТЗ-8	54.9216/37.6175	0–15		Мелколиственно-еловый (березово-еловый с дубом)	Болотно-борсальный	
НП Завидово	НП-1	56.2916/35.8609	0–10; 10–20	Пологий склон неглубокой долины временного водотока	Елово-мелколиственный	Влажнолугово-борсальный	Дерново-лугово-глеяватая тяжелосуглинистая (Umbritic Gleysol (Loamic, Uterquic))
	НП-2	56.2822/35.8906	0–10; 10–20	Волнистая равнина	Мелколиственно-еловый	Неморально-борсальный	Дерново-глубокоподзолистая контактно-глубокоглеяватая легкосуглинистая (Retisol (Siltic))
	НП-3	56.2753/35.8525	0–10; 10–20	Нижняя часть склона озового холма, хорошо выраженный микрорельеф	Мелколиственно-еловый	Болотно-борсальный	Подзол глинно-глеяватый иллювиально-железистый супесчаный (Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic))
ЗБС ОГ Губское	ЗБС	55.6886/36.7430	0–15	Выровненный участок водораздельного плато	Ельник с сосной и березой	Неморально-борсальный	Дерново-подзолистая легкосуглинистая (Fragic Retisol (Siltic))
	ОГ	55.7421/36.5197	0–15	Повышенная часть водораздельного плато	Мелколиственно-еловый	Неморально-борсальный	Дерново-подзолистая среднесуглинистая (Retisol (Loamic))

Таблица 2. Физико-химические свойства поверхностных горизонтов почв

ООПТ	Площадка	C, %	pH _{сол}	Гидролитическая кислотность, смоль(+)/кг	Физическая глина <0.01 мм, %	Название почвы, 1977/2004*
ПТГПБЗ	ПТЗ-1	0.94	3.30	3.40	4.5	Дерново-подзолистая слабо-дифференцированная песчаная/Дерново-подзол слабодифференцированный (Folic Entic Podzol (Arenic))
	ПТЗ-2	2.61	3.12	4.88	8.2	
	ПТЗ-3	0.97	3.62	3.26	8.9	
	ПТЗ-4	2.02	3.70	5.37	12.0	
	ПТЗ-5	2.71	3.53	6.25	14.9	Дерново-подзолистая слабодифференцированная контактно-оглеенная супесчаная/Дерново-подбур оподзоленный глееватый (Stagnic Folic Entic Podzol (Arenic))
	ПТЗ-6	2.05	4.10	4.14	13.1	
	ПТЗ-7	1.89	3.85	3.96	17.2	
	ПТЗ-8	4.93	3.21	9.23	20.8	
НП Завидово	НП-1	3.56	5.65	1.34	41.6	Дерново-грунтово-глееватая тяжелосуглинистая/Серогумусовая (дерновая) глееватая (Umbric Gleysol (Loamic, Uterquic))
	НП-2	1.88	4.62	2.91	20.9	Дерново-глубокоподзолистая контактно-глубокоглееватая легкосуглинистая/Агродерново-подзолистая реградированная (Retisol (Siltic))
	НП-3	6.12	3.86	3.33	13.0	Подзол глубинно-глееватый иллювиально-железистый супесчаный/Подзол грубогумусированный глееватый (Gleyic Folic Albic Podzol (Arenic))
ЗБС	ЗБС	1.61	4.25	5.08	30.0	Дерново-подзолистая легкосуглинистая/Дерново-палево-подзолистая (Fragic Retisol (Siltic))
Оз. Глубокое	ОГ	1.61	3.97	3.85	42.7	Дерново-подзолистая среднесуглинистая/Дерново-подзолистая (Retisol (Loamic))

*Названия почв. Классификация и диагностика почв СССР, 1977 [10]/Классификация и диагностика почв России, 2004 [11].

и мелколиственно-еловыми, встречаются березняки и осинники. В западной части биостанции водораздельное плато сложено флювиогляциальными разнозернистыми песками, местами с прослойками гальки, гравия или моренного суглинка, перекрытыми в верхней части супесями, на которых формируются супесчаные и песчаные дерново-подзолистые почвы. В восточной части территории флювиогляциальные отложения перекрыты чехлом суглинков различной мощности от 30–40

до 60–80 см, на этих двучленных наносах описаны дерново-подзолистые почвы суглинистого гранулометрического состава (Retisols) [13]. В северо-восточной части заказника заложен разрез под смешанным мелколиственно-хвойным лесом с преобладанием ели. Согласно информации архивных карт, эта территория более 160 лет находится под пологом лесной растительности, которая периодически вырубалась, на карте 1940 г. на участке расположения разреза ЗБС показана вырубка

[<http://retromap.ru/>]. Вблизи разреза с площадки 10 × 10 м отобрано 9 образцов почв с глубины 0–15 см.

Биологическая станция на берегу озера Глубокое была основана еще в 1891 г., соответственно природные комплексы заказника уже более 130 лет находятся в сфере научных исследований, преимущественно зоологов и ботаников. Западную и центральную часть заказника занимает древняя ложбина стока с котловиной оз. Глубокое и долиной реки Малая Истра. На этой территории преобладают сырые и заболоченные черноольховые, березово-осиновые и березовые леса и луга; более трети площади заказника занимают болотные массивы, большей частью мелиорированные. В более дренированных условиях в северной и восточной частях заказника встречаются участки условно-коренных лесов и их производных (хвойно-широколиственных, преимущественно еловых, с березой и осинкой), сформированных на относительно богатых суглинистых покровных отложениях³. В восточной части заказника в автоморфных позициях на холмистой равнине в массиве старовозрастного елового леса с осинкой, единичными дубами и кленами заложен разрез слабодерново-глубокоподзолистой почвы (Retisol (Loamic)). Вблизи разреза с площадки 10 × 10 м отобрано 9 образцов из поверхностного горизонта почвы с глубины 0–15 см. Архивные картографические материалы показали, что на всей территории вблизи озера Глубокое более 160 лет сохраняется лесная растительность [<http://retromap.ru/>].

Все образцы почв с площадок были отобраны из поверхностных горизонтов под подстилкой буром *d* = 5 см, глубина отбора проб указана в табл. 1.

В образцах, отобранных по профилям опорных разрезов, а также из смешанных образцов с каждой площадки определены общие физико-химические характеристики почв стандартными методами, которые позволили уточнить классификационную принадлежность обследованных почв: рН водный и солевой потенциометрически⁴, гидролитическая кислотность⁵. При определении гранулометрического состава для характеристики мелкозема был использован метод лазерной дифракции на приборе Mastersizer 3000E [16], а более крупные фракции были определены седиментационным методом [18] (табл. 2). Эдафические факторы, диагностируемые по особенностям наземного растительного покрова и отраженные в морфологии почв, оценены в баллах (табл. 3). Для каждого образца определено содержание органического углерода методом

Таблица 3. Балльная оценка эдафических условий площадок пробоотбора

Показатель	Критерий	Балл
Эколого-ценотический тип напочвенного покрова	Бореально-боровая	1
	Неморально-боровая	2
	Неморально-бореальный	3
	Болотно-бореальный Влажно-лугово-бореальный	3
Наличие влаголюбивых видов	Нет	1
	Редко встречаются	2
	Преобладают	3
Признаки увлажнения в профиле	Нет	1
	Слабовыраженные	2
	Выраженные	3

Тюрина в модификации Никитина со спектрофотометрическим окончанием [12].

Во всех поверхностных образцах почв четырех ООПТ (74 образца) определено содержание микробной биомассы методом С-ФЛ; в тех же образцах, за исключением отобранных на территории ПТЗ (42 образца) содержание микробной биомассы определено методом С-СИД. Определение углерода микробной биомассы по содержанию фосфолипидов и методом С-СИД проводили из свежих (естественно увлажненных) образцов в трех повторностях из каждого предварительно гомогенизированного образца, которые до проведения исследования хранили в холодильнике при температуре +4°C.

Субстрат-индуцированное дыхание. СИД почвы оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы дополнительным источником углерода и энергии (глюкоза) [1, ISO 16072, 2002⁶]. Навеску почвы 2 г (в пересчете на абсолютно сухую почву) помещали во флакон (объем 15 мл), довели влажность до 50–60% от полной влагоемкости и оставляли на 5–7 сут. при 22°C для предварительной инкубации. Проветрив образцы, снимали начальную пробу воздуха. Во флаконы добавляли раствор глюкозы из расчета 10 мг глюкозы на 1 г почвы, герметично закрывали и фиксировали

³ Положение о государственном природном заказнике областного значения “Озеро Глубокое с прилегающими к нему массивами леса”. Утверждено постановлением Правительства Московской области от 27.06.2017 № 511/21.

⁴ ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО.

⁵ ГОСТ 26212-91 Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО.

⁶ ISO 16072. Soil quality – laboratory methods for determination of microbial soil respiration. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 2002.

время. Обогащенный образец инкубировали в течение 4 ч при 22°C, затем отбирали пробу воздуха из флакона и анализировали ее с использованием газового хроматографа. Время отбора газовой пробы также фиксировали. Скорость СИД выражали в мкл CO₂/(г почвы час), C_{мик} (мкг С/г почвы) рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{мик}} = \text{СИД (мкл CO}_2\text{/(г почвы ч))} \times 40.04 + 0.37.$$

Определение микробной биомассы по содержанию фосфолипидов. В основу метода определения микробных фосфолипидов в почвах взята методика Фростегарда [23]. Навески почвенных образцов (1 г) суспендировали в 18.3 мл однофазной смеси, состоящей из хлороформа, метанола и фосфатного буферного раствора (50 мМ, рН 7.4) в соотношении 1 : 2 : 0.8 (объемные доли). Липидный материал экстрагировали в течение 2 ч встряхиванием при комнатной температуре. Почвенный осадок осаждали центрифугированием при 2000 об/мин в течение 15 мин. Супернатанты отбирали, к почвенному осадку прибавляли 5 мл однофазной смеси, перемешивали и центрифугировали снова. Полученные супернатанты объединяли, к ним добавляли по 6.2 мл хлороформа и фосфатного буферного

раствора для расслоения органической и водной фаз. Нижний органический слой, содержащий липиды, в том числе и фосфолипиды, анализировали. Измеряли объем слоя, отбирали три аликвоты по 1 мл, которые упаривали под азотом, прибавляли 0.9 мл насыщенного раствора персульфата аммония и ставили на окисление в течение четырех суток при температуре 95°C, затем к ним прибавляли 0.2 мл 2.5%-го раствора кислого молибдата аммония и окрашивали малахитовым зеленым. Спустя 30 мин спектрофотометрировали при длине волны 610 нм. В качестве калибровочного раствора использовали 0.1 мМ глицерофосфат натрия. Полученные данные переводили в единицы углерода используя соотношение 190 нмоль Р/мг С_{орг} [22].

Результаты обрабатывали статистически стандартными методами в программах Excel и Statistica и методом главных компонент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе полученных данных выявлена высокая вариабельность значений содержания микробной биомассы в почвах, обусловленная природными факторами: разнообразием почв, растительных ассоциаций, а также пестротой параметров

Таблица 4. Описательная статистика содержания углерода микробной биомассы в почвах ООПТ ($n = 4$)

Площадка	Глубина, см	Метод ФЛ			Метод СИД		
		среднее, мкг/г	стандартное отклонение, мкг/г	коэффициент вариации, %	среднее, мкг/г	стандартное отклонение, мкг/г	коэффициент вариации, %
ПТЗ-1	0–15	208	109	52	Не опр.		
ПТЗ-2	0–15	611	318	52	—"		
ПТЗ-3	0–15	455	127	28	—"		
ПТЗ-4	0–15	897	124	14	—"		
ПТЗ-5	0–15	745	83	11	—"		
ПТЗ-6	0–15	1019	268	26	—"		
ПТЗ-7	0–15	908	101	11	—"		
ПТЗ-8	0–15	1717	1085	63	—"		
НП-1	0–10	2054	163	8	733	393	54
	10–20	1619	140	9	563	242	43
НП-2	0–10	1298	261	20	199	124	62
	10–20	845	97	12	205	81	40
НП-3	0–10	2078	175	8	164	52	32
	10–20	947	403	43	79	59	75
ЗБС	0–15	725	191	26	354	78	19
ОГ	0–15	785	246	44	604	182	32

внутри экспериментальных площадок; кроме того, свой вклад вносят аналитические погрешности, накапливающиеся в процессе оценки биологической активности – величин микробной биомассы по содержанию фосфолипидов (С-ФЛ) и методом С-СИД (табл. 4).

Относительная аналитическая погрешность при использовании метода С-ФЛ изменялась от 0.2 до 29.5%, причем в большинстве случаев она составляла единицы процентов, в 10 образцах – превышала 10%, в одном случае из них достигла 29.5%, т.е. в одном случае из 74 проанализированных образцов при трехкратной повторности определений отмечалась аналитическая погрешность 29.5%. При использовании метода С-СИД, относительная аналитическая погрешность варьировала от 0.3 до 31.1%. Из 42 образцов в 11 случаях ошибка превышала 10%, из них в 2 случаях – 20%, в остальных случаях ошибка составляла доли или единицы процентов.

Высокая пространственная вариабельность значений на локальном уровне в пределах площадок показана при использовании обоих методов. Статистические характеристики представлены в табл. 4 и на рис. 2. Минимальные и максимальные значения часто различаются в 1.5–2 раза, в отдельных случаях – в несколько раз, как, например, в случае использования метода С-ФЛ для площадок ПТЗ-2 и ПТЗ-8 или метода С-СИД для площадки НП-1 Завидово (рис. 2). Показатели локальной пространственной изменчивости (коэффициенты вариации) содержания $C_{\text{мик}}$, определенные методами С-СИД и С-ФЛ сходны. Следует отметить, что увеличение числа проанализированных образцов с

каждой площадки с 4 до 9 не изменяло кардинально выявленную картину: среднеарифметические значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации близки (табл. 5).

Показатели содержания $C_{\text{мик}}$ в 6 дерново-подзолистых слабодифференцированных почвах ПТЗ (площадки с 2 по 7), определенные по содержанию фосфолипидов, различаются незначительно. Эти почвы близки классификационно и по гранулометрическому составу (от связного песка до супеси), сформированы под смешанными лесами с различным видовым составом древесной растительности и напочвенного покрова, относящегося к двум эколого-ценотическим типам. Вариабельность содержания $C_{\text{мик}}$ в легких дерново-подзолистых слабодифференцированных почвах на небольшом участке (1 × 1 км) невысока ($\text{ФЛ ср} = 773$, ст. откл 211, $C_v = 27\%$) и сравнима с локальной вариабельностью в пределах площадок, несмотря на то что видовой состав растительных ассоциаций экспериментальных площадок заметно различается. Наиболее легкая по гранулометрическому составу песчаная почва, сформированная под широколиственно-сосновым лесом с напочвенной растительностью бореально-борового типа (ПТЗ-1), характеризуется минимальной микробной биомассой. Легкосуглинистая почва площадки ПТЗ-8, формирующаяся в условиях дополнительного увлажнения под мелколиственно-еловым лесом с болотно-бореальным напочвенным покровом, отличается самыми высокими показателями микробной биомассы при максимальной локальной вариабельности ($C_v = 63\%$).

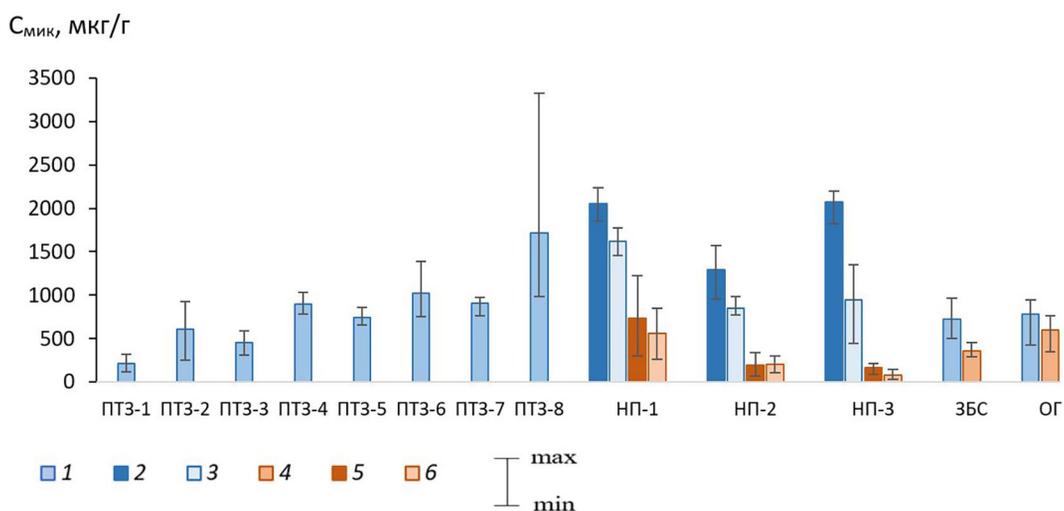


Рис. 2. Содержание углерода микробной биомассы в почвах ООПТ Московской области (площадки 10 × 10 м, среднее арифметическое). Метод ФЛ: 1 – слой 0–15 см, 2 – 0–10 см, 3 – 10–20 см; метод СИД: 4 – слой 0–15 см, 5 – 0–10 см, 6 – 10–20 см. Обозначения экспериментальных площадок в табл. 1.

Таблица 5. Статистические характеристики содержания углерода микробной биомассы в почвах ООПТ при отборе 4 и 9 образцов с площадки

Площадка	Количество образцов	Метод ФЛ			Метод СИД		
		среднее, мкг/г	стандартное отклонение, мкг/г	коэффициент вариации, %	среднее, мкг/г	стандартное отклонение, мкг/г	коэффициент вариации, %
ЗБС	4	725	191	26	354	78	19
	9	850	206	24	419	106	25
Оз. Глубокое	4	785	246	44	604	182	32
	9	755	168	22	569	145	26

В НП Завидово, в почвах, сформированных в пределах небольшой территории в разных геоморфологических позициях под смешанными лесами разного состава, содержание микробной биомассы оказалось выше, чем в рассмотренных выше почвах ПТЗ, причем явно выражена обогащенность поверхностных слоев (0–10 см) относительно более глубоких (10–20 см). Этот факт свидетельствует о необходимости унификации глубины отбора почвенных проб при ведении мониторинга, поскольку в естественных почвах микробная биомасса различно распределяется по глубине в отличие от гомогенизированных в результате регулярных обработок пахотных горизонтов сельскохозяйственных почв.

Близки между собой оказались показатели содержания $S_{\text{мик}}$ в суглинистых дерново-глубокоподзолистых почвах, сформированных под смешанными неморально-бореальными лесами на территориях ЗБС и ОГ. Почвы и экспериментальные площадки расположены в автоморфных позициях в 15 км одна от другой. По содержанию микробной биомассы эти почвы близки к супесчаным дерново-слабоподзолистым почвам ПТЗ и менее обогащены ею по сравнению с почвами НП Завидово, сформированными в условиях дополнительного увлажнения.

Полученные методом С-СИД результаты сходны с показателями, характерными для почв смешанных лесов европейской части России [3, 4] и для почв различных типов землепользования южного Подмосковья [6, 7]. В большинстве случаев микробная биомасса исследованных почв, полученная методом С-ФЛ (208–845 мкг С/г) также находится на уровне данных метода С-СИД для смешанных лесов европейской части России и южного Подмосковья [3, 4, 6, 7], при этом необходимо отметить, что показатели содержания микробной биомассы для разных почв этих регионов могут различаться в десятки раз, например, в почвах южного Подмосковья – от 43 до 1394 мкг С/г [7].

Во всех исследованных почвах показатели содержания микробной биомассы, полученные методом С-ФЛ заметно выше, чем полученные методом С-СИД, при этом соотношение показателей различно для разных почв и горизонтов и изменяется от 1.3 : 1 до 12.6 : 1. Наибольшая микробная биомасса, превышающая известные показатели, получена методом С-ФЛ на двух площадках НП Завидово: 2054 мкг С/г (НП-1) и 2078 мкг С/г (НП-3), на которых и содержание $S_{\text{орг}}$ было максимальным (3.6 и 6.1% соответственно). Например, для тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почвы под смешанным хвойно-широколиственным лесом (Пермский край) она составляла 1236 мкг С/г ($S_{\text{орг}}$ 1.57%) [9]. При этом микробная биомасса С-СИД на тех же площадках не выходила за пределы типичного уровня и составляла 733 (НП-1) и 164 мкг С/г (НП-3).

Таким образом, на основании анализа данных о содержании микробной биомассы в 42 образцах почв, отобранных с 5 площадок ненарушенных почв под смешанными лесами трех ООПТ Московской области и проанализированных указанными двумя методами, выявить определенное соотношение между результатами полученных обоими методами не удалось, наиболее близкие величины микробной биомассы были получены для ООПТ оз. Глубокое. При очевидной недостаточной универсальности пересчетных коэффициентов от измеряемых величин к единицам микробного углерода, которые используются в обоих методах, следует отметить, что в основе С-СИД лежит измерение дыхательного отклика микробных сообществ, а в методе С-ФЛ измеряется содержание фосфатных групп фосфолипидов клеточных мембран. В методе С-СИД пониженные значения микробной биомассы могут отражать различия в физиологическом состоянии микробных клеток сообщества, не откликающихся на внесение глюкозы (например, глубокий покой). Метод С-ФЛ охватывает все жизнеспособные клетки микробного сообщества независимо от их физиологического состояния. Сами фосфолипиды являются обязательным

компонентом клеточных мембран, не входят в состав запасных веществ в микробных клетках и после их отмирания подвергаются быстрой биохимической деградаци [22, 23].

Ранее на катенах серых почв и черноземов заповедника Белогорье показано, что в случаях черноземов оба метода дают одинаковые величины микробной биомассы, но уже в серых почвах биомасса, измеренная методом С-ФЛ, превышает таковую, измеренную методом С-СИД при одинаковой общей динамике изменения показателей по катене [8]. В полученных данных различия в величине углерода микробной биомассы, определенной методами С-СИД и С-ФЛ, уменьшаются по мере утяжеления почв и увеличиваются в почвах с признаками временного дополнительного увлажнения.

Можно предположить, что в почвах, испытывающих регулярное временное переувлажнение, микробный комплекс формируют две экологические группы микроорганизмов: адаптированные к автоморфным условиям и адаптированные к переувлажнению. В период переувлажнения вторая группа активно работает, а при высыхании переходит в покоящееся состояние. Возможно, находящиеся в глубоком покое клетки не учитываются или учитываются не полностью методом С-СИД, но определяются С-ФЛ.

Принято считать, что доля микробного углерода в общем содержании углерода почвы ($C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$) является показателем доступности субстрата для микробного роста и связана с устойчивостью микробного сообщества. В целом ряде работ отмечено увеличение $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ в ходе залежных сукцессий

при зарастании заброшенных пашен, также отмечены более высокие значения в поверхностных горизонтах по сравнению с нижележащими, что обычно связывают с более высоким количеством доступных форм органического углерода в подстилочных и гумусовых горизонтах [26, 36].

В исследованных фоновых почвах доля микробного углерода в органическом углероде почв варьировала от 2.1 до 7.2% (метод С-ФЛ), 0.2–4% (метод С-СИД). Причем, обоими методами в трех различающихся классификационно и по гранулометрическому составу почвах НП Завидово фиксируются более высокие значения в слое 10–20 см, по сравнению с подподстилочным слоем 0–10 см (рис. 3). Таким образом, в случае использования этого показателя в почвенном мониторинге, отбор образцов из генетических горизонтов или по слоям почвы с учетом их гумусированности не позволяет получить фоновые значения, пригодные для сравнения с характеристиками антропогенно-измененных почв. Необходима стандартизация методов и глубин пробоотбора на фоновых территориях, коррелирующая с таковыми, используемыми в экологическом и агрохимическом мониторинге.

Статистический анализ данных методом главных компонент (рис. 4) показал, что основной вклад в изменчивость содержания микробной биомассы почв четырех ООПТ вносили содержание физической глины и увлажненность почв. Почвы с наиболее высоким содержанием физической глины (оз. Глубокое и ЗБС, НП Завидово и две площадки ПТЗ-7 и ПТЗ-8) на факторных координатах компоновались в левой полуплоскости в противоположность почвам облегченного грансостава. (ПТЗ площадки 1–6). При этом повышенная увлажненность

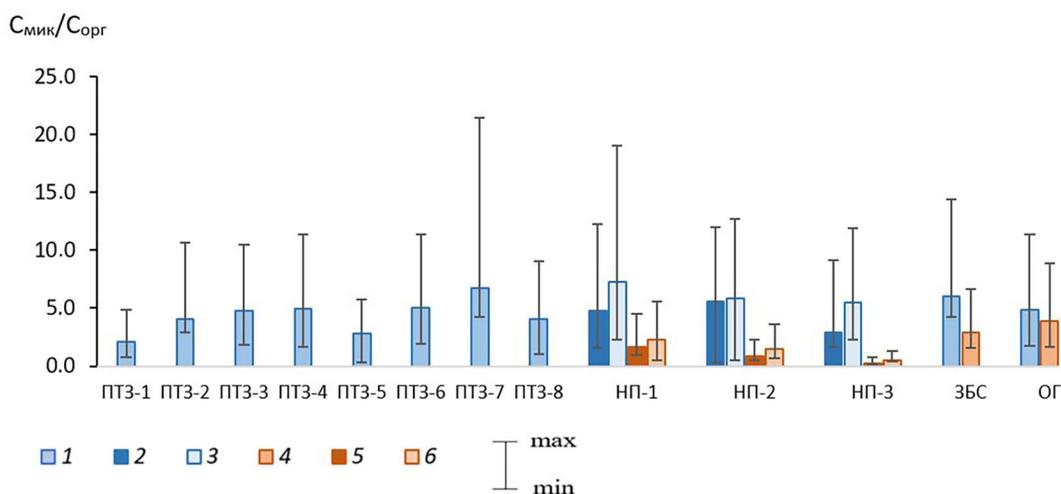


Рис. 3. Доля микробного углерода $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ в почвах ООПТ Московской области, %. (площадки 10 × 10 м, среднее арифметическое). Метод ФЛ: 1 – слой 0–15 см, 2 – 0–10 см, 3 – 10–20 см; метод СИД: 4 – слой 0–15 см, 5 – 0–10 см, 6 – 10–20 см.

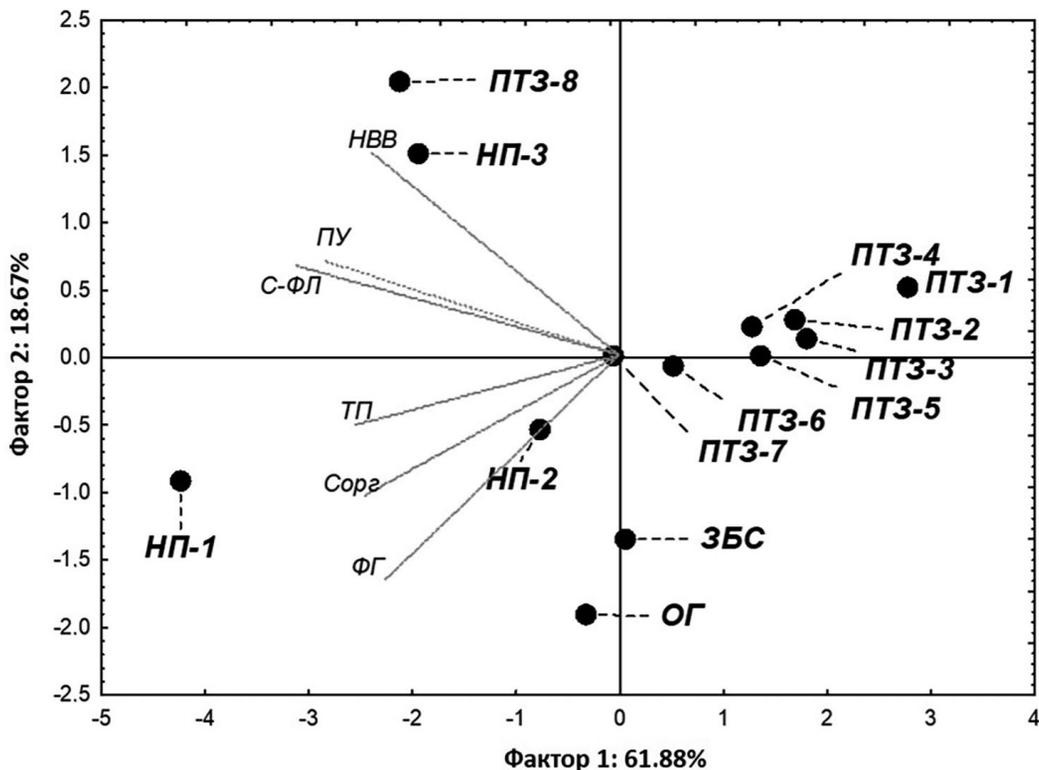


Рис. 4. Распределение почв ООПТ в плоскости главных компонент в зависимости от физико-химических и биологических свойств. *ФГ* – содержание физической глины (<0.01 мм); *ПУ* – признаки увлажнения в профиле; *НВВ* – наличие влаголюбивых видов; *ТП* – тип напочвенного покрова; *Сорз* и *С-ФЛ* – содержание органического углерода почвы и микробного углерода по содержанию фосфолипидов, соответственно.

почв, даже временная, способствовала развитию почвенного микробиома: для площадок с признаками дополнительного увлажнения НП-3 Завидово и ПТЗ-8, а также для сезонно увлажненной площадки лугового облика НП-1 Завидово был зафиксирован наибольший показатель микробной биомассы (1070–1840 мкг С/г). В автоморфных почвах площадок ЗБС и оз. Глубокого с богатым растительным покровом данный показатель был несколько меньше (785–725 мкг С/г). По мере облегчения гранулометрического состава почв показатель микробной биомассы последовательно снижался от 1000 до 208 мкг/г, это было характерно для площадок ПТЗ с дерново-подзолистыми слабодифференцированными супесчаными и песчаными почвами. Таким образом, биологическая активность почв исследованных ООПТ, оцененная по величине микробной биомассы, варьировала и зависела в основном от характера влажностного режима и гранулометрического состава почв, который определяет сорбционную способность почвы, во многом контролирует ее обеспеченность биофильными элементами и коррелирует с богатством напочвенного покрова, обеспечивающего почвенный микробиом элементами питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценена величина микробной биомассы поверхностных подподстильных горизонтов почв подзолистого ряда ненарушенных лесов южной тайги, что позволило рассмотреть пространственную вариабельность $S_{\text{мик}}$ в почвах фоновых территорий и рассмотреть возможности использования этого показателя в региональном мониторинге.

Обследовали типичные для региона почвы без выраженных признаков избыточного гидроморфизма, сформированные под минимально нарушенными смешанными лесами в пределах четырех ООПТ Московской области. Количество микробной биомассы определяли двумя методами: по содержанию фосфолипидов и субстрат-индуцированного дыхания из одних и тех же образцов, хранящихся минимальные сроки в одинаковых условиях.

Выявлена значительная пространственная вариабельность значений $S_{\text{мик}}$ при использовании обоих методов определения, как на локальном уровне в пределах экспериментальных площадок, так и на уровне экосистем. Для сходных классификационно и по гранулометрическому составу автономных почв, сформированных на территории

Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника им. М.А. Заблочно под смешанными лесами разного видового состава, $C_{\text{мик}}$, определенное методом С-ФЛ, сходно, а вариабельность значений сравнима с локальной вариабельностью в пределах экспериментальных площадок.

Несмотря на высокую вариабельность значений, по средним показателям, полученным обоими методами, отмечена обогащенность микробной биомассой поверхностных слоев почв (0–10 см) относительно более глубоких (10–20 см), что отличает естественные почвы лесов от гомогенизированных в результате регулярных обработок пахотных горизонтов сельскохозяйственных почв. Конкретные значения определяются генетическими и физико-химическими характеристиками рассматриваемых почв. Именно этот факт позволяет настаивать на необходимости унификации глубины отбора образцов для целей мониторинга. По-видимому, логично ориентироваться на глубину 0–20 см, поскольку такая мощность слоя находится в пределах пахотного горизонта большинства сельскохозяйственных почв, а равномерный отбор с той же глубины образцов из почв фоновых территорий позволяет получить пригодные для сравнения показатели.

Для ведения мониторинга может иметь значение, что увеличение числа проанализированных образцов с каждой площадки с 4 до 9 не изменяло кардинально выявленную картину вариабельности: среднеарифметические значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации оказались сходны.

Таким образом, для корректного использования данных о содержании микробной биомассы в массовом почвенном мониторинге необходима унификация методик пробоотбора, хранения и анализа образцов в фоновых и антропогенно-преобразованных экосистемах.

При ведении почвенного мониторинга практически невозможно корректно подобрать фоновые аналоги антропогенно-преобразованных объектов, а зависимости $C_{\text{мик}}$ почвы от природно-ландшафтных характеристик сложны и неоднозначны. Для использования показателя $C_{\text{мик}}$ в качестве индикатора экологических изменений в почвах при антропогенном воздействии или изменении природных условий необходимо иметь представление об основных факторах, определяющих природную изменчивость фоновых показателей в конкретных регионах. Исследования в Московской области показали, что природная изменчивость фоновых значений $C_{\text{мик}}$ в поверхностных подподстилочных горизонтах почв высока и зависит от степени и характера увлажнения почв, состава растительности и гранулометрического состава, который определяет сорбционную способность почв и во многом контролирует их плодородие. Проанализировать

раздельное влияние на $C_{\text{мик}}$ растительного покрова, ландшафтных и почвенных характеристик не представляется возможным, поскольку они тесно взаимосвязаны, однако результаты анализа с использованием метода главных компонент позволяют предположить, что наиболее значительное влияние на изменчивость содержания микробной биомассы оказывают увлажненность почв и их гранулометрический состав.

На основе анализа данных о содержании микробной биомассы в 42 образцах почв, отобранных с 5 площадок трех ООПТ, закономерных соотношений между показателями $C_{\text{мик}}$, полученными методами С-ФЛ и С-СИД, не выявлено, что, возможно, объясняется как недостаточной универсальностью общепринятых коэффициентов пересчета от измеряемых величин к единицам микробного углерода, так и физиологическим состоянием микробных клеток сообществ. Эти методы характеризуются разной чувствительностью к количественному определению различных популяций и жизненных форм микроорганизмов, составляющих микробиом почвы. Следует отметить, метод С-СИД является чувствительным, воспроизводимым методом, достаточно простым в исполнении и позволяющим проводить измерения больших серий образцов почв. Фосфолипидный метод представляется более чувствительным, полученные им показатели соотносятся с содержанием почвенного $C_{\text{орг}}$, однако, он более трудозатратный по сравнению с методом С-СИД.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-14-00107. В работе использованы материалы, полученные в рамках госзаданий № ААА-А-18-118042490060-1 ИПЭЭ РАН, № 0191-2022-0008 ИФХиБПП РАН.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьева Н.Д.* Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 223 с.
2. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Гавриленко Е.Г.* Особенности определения углерода микробной биомассы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1327–1333.

3. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольников Е.В.* Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.
4. *Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васнев В.И.* Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
5. Атлас карт Приокско-Террасного заповедника/ Отв. ред. Бобровский М.В., Брынских М.Н. Пушкино: Биопресс, 2005. 64 с.
6. *Гавриленко Е.Г., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Оценка качества почв разных экосистем (на примере Серпуховского и Подольского районов Московской области) // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1505–1515.
7. *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.
8. *Дуцанова К.С., Украинский П.А., Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Борисов А.В.* Биомасса и функциональное разнообразие микробных сообществ в катенах целинных и пахотных серых почв и черноземов // Почвоведение. 2024. № 2. С. 286–302. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020078>
9. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С.* Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2020. № 3. С. 372–378. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030120>
10. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
12. *Мамонтов В.Г., Гладков А.А., Кузелев М.М.* Практическое руководство по химии почв. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2012. 225 с.
13. Руководство по летней учебной практике студентов-биологов на Звенигородской биостанции им. С.Н. Скадовского. М.: Изд-во МГУ, 2004. 352 с.
14. *Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудеяров В.Н.* Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
15. *Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А.* Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-б 1:8 000 000. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. Факультет почвоведения, 2019.
16. *Хайдапова Д.Д., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Бутылкина М.А., Шеин Е.В., Дембовецкий А.В.* Практикум по физике твердой фазы почв. М.: Буки Веди, 2022. 132 с.
17. *Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Борисов А.В., Шишлина Н.И.* Состояние микробных сообществ подкурганых палеопочв пустынно-степной зоны эпохи средней бронзы (XXVII–XXVI вв. до н. э.) в связи с динамикой увлажненности климата // Почвоведение. 2017. № 2. С. 239–248.
18. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
19. *Anderson T.-H., Domsch K.H.* Soil microbial biomass: The eco-physiological approach // Soil Biol. Biochem. 2010. V. 42. № 12. P. 2039–2043.
20. *Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z, Creamer R.E., Deyn G.De., de Goede R., Fleskens L. et al.* Soil quality – A critical review // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 120. P. 105–125.
21. *Cheng F., Peng X., Zhao P., Yuan J., Zhong C., Cheng Y., Cui C., Zhang S.* Soil Microbial Biomass, Basal Respiration and Enzyme Activity of Main Forest Types in the Qinling Mountains // PLoS ONE. 2013. V. 8(6): e67353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353>
22. *Findlay R.H.* The use of phospholipid fatty acids to determine microbial community structure // Molecular Microbial Ecology Manual. 1996. V. 4. P. 1–17.
23. *Frostegard A., Tunlid A., Baath E.* Microbial biomass measured as a total lipid phosphate in soils of different organic content // J. Microbiological Methods. 1991. V. 14. P. 51–163.
24. *Hargreaves P.R., Brookes P.C., Ross G.J.S., Poulton P.R.* Evaluating soil microbial biomass carbon as an indicator of long term environmental change // Soil Biol. Biochem. 2003. V. 35. P. 401–407.
25. *Ivashchenko K., Sushko S., Selezneva A., Ananyeva N., Zhuravleva A., Kudayarov V., Makarov M., Blagodatky S.* Soil microbial activity along an altitudinal gradient: Vegetation as a main driver beyond topographic and edaphic factors. // Appl. Soil Ecol. 2021 V. 168. P. 104197. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104197>
26. *Jia G., Cao J., Wang C., Wang G.* Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. // Forest Ecology and Management. 2005. V. 217. № 1. P. 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.055>
27. *Jordan D., Kremer R.J., Bergfield W.A., Kim K.Y., Caccino V.N.* Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields // Biol. Fertil. Soils. 1995. V. 19. № 4. P. 297–302
28. *Lin Q., Brookes P.C.* An evaluation of substrate induced respiration method // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31. № 14. P. 1969–1983.

29. *McKenzie N., Henderson B., McDonald W.* Monitoring Soil Change. Principles and practices for Australian conditions // CSIRO Land and Water Technical Report. 2002. 112 p.
30. *Mohammad A.* Assessing changes in soil microbial population with some soil physical and chemical properties // *Int. J. Plant, Animal and Env. Sci.* 2015. V. 5. № 3. P. 116–123.
31. *Morris S.J., Boerner R.E.J.* Spatial distribution of fungal and bacterial biomass in southern Ohio hardwood forest soils: scale dependency and landscape patterns // *Soil Biol. Biochem.* 1999. V. 31. № 6. P. 887–902.
32. Proposal for a European soil monitoring and assessment framework. Project manager Gentile A.R. EEA. Copenhagen, 2001. 58 p.
33. *Raubuch M., Beese F.* Pattern of microbial indicators in forest soils along an European transect // *Biol. Fertil. Soils.* 1995. V. 19. № 4. P. 362–368.
34. *Saetre P.* Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce birch stand // *Ecography.* Copenhagen. 1999. V. 22. P. 183–192.
35. Soil Strategy for 2030. Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate SWD 2021. P. 323 https://environment.ec.europa.eu/publications/eu-soil-strategy-2030_en
36. *Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V.* Forest succession on abandoned arable soils in European Russia e Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity // *Eur. J. Soil Biol.* 2011. V. 47. P. 169–174.
37. *Wang Z., Zhao M., Yan Z., Yang Y., Niklas K.J., Huang H., Mipam D.T., He X., Hu H., Wright S.J.* Global patterns and predictors of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in terrestrial ecosystems // *Catena.* 2022. V. 211. P. 106037. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106037>
38. *Zhang Y., Zou J., Meng D., Dang S., Zhou J., Osborne B., Ren Y., Liang T., Yu K.* Effect of soil microorganisms and labile C availability on soil respiration in response to litter inputs in forest ecosystems: A meta-analysis // *Ecol. Evolution.* 2020. V. 10. № 24. <https://doi.org/10.1002/ece3.6965>. PMID

Problems of Estimation of Microbial Biomass in Soddy-Podzolic Soils (Forests of the Protected Areas of Moscow Region)

O. V. Chernova^{1,*}, K. S. Duschanova², A. A. Petrosyan², and T. E. Khomutova²

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

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

**e-mail: ovcher@mail.ru*

The carbon content of microbial biomass in the soil serves as one of the indicators of its biological activity and is often used in assessing the anthropogenic impact and natural changes on the soil microbiome. Significant spatial and temporal variation of the indicator at the level of ecosystems, soil typological units, land use types, etc. makes it difficult to interpret the data obtained during mass monitoring. The aim of the study is to determine the background values of microbial biomass content in the surface sub-litter layer of soils of protected forests of the Moscow region. A reconnaissance survey of soils of the podzolic series, which are typical for the region and diverse in genesis and granulometric composition, autonomous or with a little additional moisture, formed under mixed southern taiga forests in four protected natural territories, was carried out. The biological activity of soils was estimated by the amount of microbial biomass determined by two methods: by the content of phospholipids and substrate-induced respiration of microbial communities. Significant spatial variability of microbial biomass content was noted both at the site level and at the ecosystem level, and for similar by classification and granulometric composition autonomous soils, it is comparable with local variability within the experimental sites. It is shown that the value of microbial biomass depends mainly on the type of the humidity regime and the granulometric composition, which largely determines the sorption capacity of the soil, and its provision with biophilic elements, and also correlates with the richness of the ground cover that provides the soil microbiome with nutrients. It is shown that in order to obtain correct results for mass monitoring of soil biological activity, unification of the methodology and depth of sampling in the soils of background and anthropogenic-transformed ecosystems is of great importance.

Keywords: nature protected areas, soil microbial biomass, spatial variations, background indicators, monitoring