

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ЕСТЕСТВЕННО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

УДК 630*114: 631.417.1

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

© 2024 г. В. В. Киселева^{а,*} (<http://orcid.org/0000-0002-1901-2330>),
В. Н. Карминов^а, С. И. Чумаченко^а, А. Ю. Агольцов^а, Е. М. Митрофанов^а

^аМытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,
ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи 141005 Россия

*e-mail: vvkiseleva@bmstu.ru

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 26.06.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

В качестве объекта климатического мониторинга в 2022 г. в Щелковском районе Московской области заложен исследовательский полигон площадью 15 га. В границах полигона, представляющего собой один лесотаксационный выдел, выявлена значительная пестрота почвенного покрова — 18 почвенных разностей на уровне от подтипа до разновидности. Микрорельеф рассматривается как основной фактор неоднородности запасов углерода: почвы замкнутых понижений, занятых сфагновыми мхами, значительно отличаются по запасам углерода в подстилке и верхних 10 см почвы. Для остальной территории основными факторами, влияющими на запас углерода, являются доля физической глины в иллювиальной части профиля, состав и фитомасса живого напочвенного покрова. Наибольший коэффициент вариации запасов С (40%) отмечен для слоя 10–30 см и обусловлен, в первую очередь, варьированием мощности генетических горизонтов, его составляющих. Геопространственный анализ позволяет перейти к площадным оценкам варьирования почвенных свойств и дальнейшему моделированию и прогнозированию динамики запасов углерода с учетом пространственной неоднородности территории. Выявление факторов, определяющих запасы углерода в почвах, поможет сформировать сценарии моделирования, направленные на разработку мероприятий по увеличению аккумуляции углерода в лесных экосистемах через изменение структуры растительности.

Ключевые слова: органический углерод почвы, геопространственный анализ, факторы неоднородности почв, дерново-глееподзолистые почвы, лесная подстилка

DOI: 10.31857/S0032180X24110032, **EDN:** JOXBDH

ВВЕДЕНИЕ

Вклад лесных почв в общие запасы углерода в почвах России оценивается в 46% [21]. Общие запасы углерода (С) в почве, включая подстилку, могут составлять от 30% запасов углерода экосистемы в тропических лесах до 70% в бореальных [36]. В бореальных и умеренных лесах Европы доля почвенного углерода составляет 60–85% от общего запаса углерода в экосистеме [27].

Оценка комбинированного влияния факторов на накопление углерода в почвах лесов лежит в основе разработки мер по смягчению последствий изменений климата, прогноза экосистемных

функций и услуг лесов [9]. Всесторонний и исчерпывающий сбор данных с обязательным учетом варьирования и пространственной неоднородности свойств компонентов биогеоценоза необходим для создания и верификации моделей экосистемного уровня [20].

Басевич [1] выделяет первичную неоднородность, унаследованную от почвообразующих пород или возникшую уже непосредственно в процессе почвообразования, и вторичную, связанную с ценоотическими механизмами. Проявление вторичной неоднородности связано, в том числе с деятельностью человека — режимом прошлой

и современной лесохозяйственной деятельности, лесными пожарами, возникшими по вине человека [36].

Пространственная составляющая является самым мощным фактором варьирования содержания и запаса органического углерода в почвах, причем запас — ключевой показатель долгосрочного мониторинга — отличается большей изменчивостью, что требует высокой точности и репрезентативности данных [19]. Дополнительным фактором, который может оказать существенное влияние на варьирование содержания органического углерода в почве, является процесс отбора образцов и пробоподготовка [15].

Пространственные закономерности варьирования почвенных свойств устанавливаются через структуру почвенного покрова. Минимальными пространственными единицами являются элементарные почвенные ареалы, которые на разных пространственных уровнях формируют микро- или мезокомбинации почв. Факторами формирования структуры почвенного покрова выступают изменения геолого-геоморфологических и биологических компонентов ландшафта: рельеф, неоднородность почвообразующих пород, мерзлотные явления и неоднородность снежного покрова, грунтовые воды, разнообразие растительного покрова, животный мир, деятельность человека [18]. На региональном уровне вариации общего и лабильного почвенного углерода объясняются как совокупностью факторов окружающей среды, так и свойствами подстилки и самой почвы. Запасы углерода напрямую зависят свойств почвы (pH, объемного веса и общего содержания азота) и косвенно — от внешних факторов окружающей среды. Из внешних факторов наиболее значимыми в условиях выраженного рельефа являются положение на склоне и экспозиция склона [39]. К факторам локального уровня относятся гранулометрический и химический состав почвообразующих пород.

Влияние биоты на запасы почвенного углерода может рассматриваться на разных пространственных уровнях [9]. На межценотическом уровне в качестве основных факторов, оказывающих влияние на запасы углерода в лесных почвах южной тайги и хвойно-широколиственных лесов, рассматриваются доля деревьев хвойных пород, возраст древостоя, проективное покрытие хвойного подроста, отношение C/N, видовая насыщенность напочвенного покрова. Для подстилок хвойно-широколиственных лесов большое значение имеет биомасса червей [10]. Данные факторы хорошо проявляются на уровне растительных ассоциаций [4]. На уровне биогеоценоза важную роль играет структурное биоразнообразие, характеризующее пространственную организацию растительности (вертикальная и горизонтальная структура) [9].

Неоднородность почв в лесных экосистемах вызвана природой и структурой леса — фитогенными полями деревьев-эдификаторов и нарушениями почвы в процессе смены поколений леса с образованием выворотов, бугров, западин, перемешиванием верхних слоев почвы, выходом на поверхность более глубоких горизонтов [7]. Таким образом, в границах одного фитоценоза может формироваться несколько элементарных почвенных ареалов [18].

На локальном уровне (элементарных биогеоценотических ареалов) происходит взаимодействие напочвенного покрова, опада и формирующихся в данных условиях подстилок [11]. Лесные подстилки рассматриваются как связующее звено между факторами среды и почвенными свойствами [39]. Общий запас подстилок, фракционный состав подстилок, а также отношение величин запасов их горизонтов определяется положением относительно кроны дерева [16, 17].

Наиболее выраженные изменения морфологических свойств почв отмечаются в верхних органических горизонтах, минеральная толща более инертна к пространственной неоднородности растений напочвенного покрова [2]. В нижних горизонтах сосредоточивается стабильное органическое вещество почв, которое обеспечивает надежную и долговременную фиксацию C в лесных экосистемах, сохраняющуюся даже при нарушениях растительного покрова. В том числе высокой стабильностью отличается органическое вещество, связанное с фракциями глины и ила [28].

Последние достижения в области геопространственных технологий дистанционного зондирования (системы лазерного сканирования, гиперспектральная съемка) позволяют получать все больше данных о свойствах леса. Понимание пространственной изменчивости почв можно расширить, используя методы геостатистики для поиска наиболее значимых для изменчивости почв экологических ковариат, определяемых дистанционно [35].

Представленные в настоящей статье исследования — часть крупного проекта МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию цифрового двойника насаждения в целях детального моделирования динамики лесной экосистемы для оценки и долгосрочного прогнозирования ее способности депонировать углерод, в том числе при разных способах ведения лесного хозяйства [6]. Детальные исследования необходимы для точной калибровки комплекса имитационных моделей многовидовых лесных насаждений и характеристик почвы в целях климатического мониторинга, включая настройку комплекса моделей динамики таксационных показателей многовидовых разновозрастных лесных насаждений FORRUS-S [5, 24] и модели минерализации и

гумификации почвенного органического вещества Romul_Hum [22, 23, 31].

Цель работы — определение пределов варьирования почвенных свойств, связанных со способностью почв депонировать углерод, оценка их пространственной неоднородности и поиск характеристик-предикторов. Изначально предполагалось, что накопление углерода в подстилках и почвах возможно математически описать, исходя из характеристик рельефа (микрорельефа), состава и структуры древостоя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика исследовательского полигона. Исследования лесных почв проводятся на территории исследовательского полигона МГТУ им. Н.Э. Баумана общей площадью 15 га, расположенного на востоке Московской области (56.112 N, 38.371 E). Для удобства получения и обработки данных территория полигона разделена на 16 секций площадью от 0.6 до 1.2 га.

Полигон расположен на моренно-водноледниковой равнине, в верхней части очень пологого склона северо-западной экспозиции под 70-летними культурами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), имеющими примесь березы повислой (*Betula pendula* Roth) и ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst.). В напочвенном покрове преобладает кислица (*Oxalis acetosella* L.) и бореальное мелкотравье, отдельными пятнами встречаются черника (*Vaccinium myrtillus* L.) и неморальные виды — осока волосистая (*Carex pilosa* Scop.) и ландыш майский (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt). Насаждение неоднородно, имеются разреженные участки и небольшие понижения, где сосна выпала из состава древостоя, господствует береза, а в напочвенном покрове — сфагновые мхи.

Исследования на полигоне имеют комплексный характер и включают в себя дистанционные и наземные измерения. Дистанционные измерения — съемка с беспилотных аппаратов, воздушное и наземное лазерное сканирование. По результатам лидарной съемки получены облака точек на каждую секцию, осуществлена точная географическая привязка положения каждого дерева и созданы дендропланы. Наземные исследования включают поперечный перемер с определением породы и диаметра ствола, картографирование и определение фитомассы напочвенного покрова, исследование почв, измерение освещенности под пологом леса.

Методы отбора и анализа образцов. Методы полевых исследований объединяют требования российских проектов по изучению почвенного углерода [12] и проекта CarboEurope [38]. Образцы почв отбирали по регулярной сети с размером ячейки 33 × 33 м. К настоящему времени исследовано

52 профиля на 6 секциях полигона площадью 5.5 га. Допускали отклонения ±3 м от регулярной сети, если точка отбора попадала в приствольные повышения, или на участок, нарушенный вывалами или занятый валежом. Все почвенные разрезы располагали в подкроновом или реже в межкroновом пространстве.

Образцы подстилок отбирали с площадки 0.5 × 0.5 м на всю глубину до минерального горизонта. Подстилки высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали для определения запаса.

В квадрате, с которого была взята подстилка, производили отбор образцов минеральных горизонтов почв и описание профилей: 4 основных разреза глубиной 150 см и 48 прикопок глубиной до 70 см. Выделение диагностических горизонтов и классификация почв производили по [13].

В образцах подстилок и почв определяли pH солевой вытяжки (потенциометрически), общее содержание углерода и азота (методом газовой хроматографии), в образцах основных разрезов — гидролитическую кислотность (потенциометрически: метод Каппена в модификации ЦИНАО) и сумму обменных оснований (титриметрически). Для основных разрезов и выборочно для прикопок исследовали гранулометрический состав пипеточным методом. Все определения проводили в экоаналитической лаборатории Федерального исследовательского центра “Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук” (сертифицирована в Global Soil Laboratory Network).

Статистическую обработку результатов выполняли в пакете Statistica версии 12 с уровнем доверительной вероятности 0.95. Для уменьшения исходной размерности собранных данных применялся метод главных компонент. Для построения количественных зависимостей применяли модуль Fixed Nonlinear Regression (фиксированная нелинейная регрессия) этого же пакета с пошаговым включением переменных в регрессионную модель.

Цифровая модель рельефа и геопространственный анализ. Цифровая модель рельефа была получена на основе облака точек наземного лидара с плотностью свыше 8000–10000 точек на 1 м² путем его обработки в открытом ПО Cloud Compare. Что позволяет отделить облако точек растительности от поверхности почв и получить детальную характеристику рельефа. Для получения цифровой модели рельефа в условиях лесной растительности применяются специализированные алгоритмы [37], которые способны четко разделять поверхность почвы и древостой. Наиболее удачным решением, реализованном в открытом программном обеспечении, представляется плагин 3DFin: Forest Inventory (Copyright © 2023 Carlos Cabo & Diego Laino) к среде обработки данных лазерного сканирования CloudCompare.

Модули геопространственного анализа SAGA и GRASS GIS, доступные в ПО QGIS, позволили выделить 10 типов элементарных геоморфонов [30]. Для последующей математической обработки им присвоены индексы, соответствующие выраженности положительных или отрицательных форм микрорельефа и положению на склоне: от 1 (вершина микроповышения) до 10 (бессточное микропонижение).

Пространственные данные, полученные в процессе почвенной съемки по регулярной сети точек, интерполировали в сплошное покрытие на основе растрового изображения разрешением 1×1 м. Растеризацию выполняли с помощью открытого геоинформационного ПО SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) [25]. Интерполяцию осуществляли методом Thin Plate Spline (TIN) через построение триангуляционной модели [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая характеристика почв исследовательского полигона. Почвы исследовательского полигона классифицированы как дерново-глееподзолистые маломощные легкосуглинистые на средних или тяжелых суглинках, подстилаемых песками и супесями, часто ожеженными (Gleyic Albic Dystric Retisols (Siltic)) по [29]. Полный набор генетических горизонтов O–AY–AEL(g)–ELg–BELg–BT(g)–D(g).

Подстилка в большинстве случаев представлена одним подгоризнтом L мощностью не более 4 см. В почвах микропонижений под сфагновыми мхами формируются подстилки большей мощности (до 9 см) и более сложного строения, с набором подгоризнтов L, F, H. Подробнее варьирование свойств подстилок обсуждается ниже. Горизонт AY маломощный, средняя мощность 5, максимальная 8–10 см, в ряде профилей выражен фрагментарно или отсутствует. Горизонт AEL имеет в среднем мощность 10 см, элювиальный ELg – 15–16 см, переходный BELg – 10–12 см, BT – 40–45 см. Гранулометрический состав почв обсуждается далее при описании варьирования почвенных свойств.

Почвы сильнокислые: среднее значение показателя pH солевой вытяжки подстилок $4.47 (\pm 0.26)$, минеральных горизонтов 3.34–3.74 (со стандартным отклонением 0.10–0.15). Сумма обменных оснований в минеральных горизонтах не превышает 14 смоль(+)/кг, минимальна в горизонтах AEL и ELg (0.8–2.0 смоль(+)/кг). Почвы сильно ненасыщенные; наименьшая насыщенность основаниями наблюдается в горизонте AEL – 9–10%, в горизонте AY составляет 11–16%, в нижней части профиля увеличивается до 30%.

Цифровая модель рельефа. На рис. 1а представлена цифровая модель рельефа изучаемой территории с размером пикселя 1×1 м и разбиением на классы по высоте через 25 см. Территория имеет очень слабый уклон к северо-западу, общий перепад высот не превышает 3 м, средний уклон 0.7° .

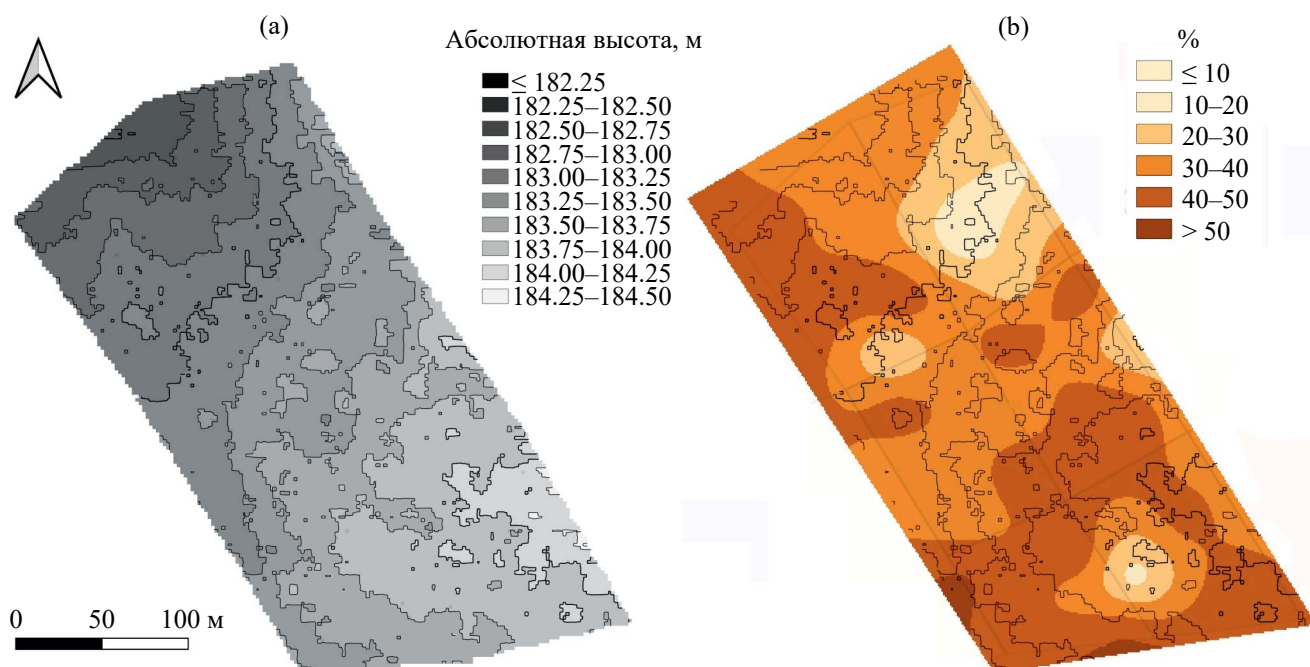


Рис. 1. Литологические факторы неоднородности почв полигона: (а) цифровая модель рельефа; (б) содержание физической глины в горизонте BT(g).

В северной части и по западной границе располагаются пологие ложбины стока. В центральной и южной части имеются замкнутые блюдцеобразные понижения диаметром от 10 до 40 м и глубиной 30–50 см. При малом уклоне местности этого оказывается достаточно, чтобы здесь происходил сезонный застой влаги и начали развиваться сфагновые мхи.

Варьирование почвенных свойств. Гранулометрический состав. Почвы полигона характеризуются как вертикальной, так и пространственной неоднородностью гранулометрического состава. Верхняя часть профиля (гумусово-аккумулятивные и элювиальные горизонты) сложена легкими пылеватými суглинками и сравнительно однородна по всей территории полигона. В большинстве профилей ниже располагается средне- или тяжелосуглинистый иллювиальный текстурный горизонт ВТ, иногда опесчаненный. В 10 профилях из 52, описанных в 2022–2023 гг., на глубине от 40 до 90 см вскрыты пески или супеси. Смена пород происходит либо на нижней границе горизонт ВТ, либо в самом горизонт ВТ, в последнем случае почва классифицируется как двучленная. Профильное распределение содержания фракций песка, пыли и ила в преобладающих суглинистых и двучленных почвах приведено в табл. 1.

Пространственное распределение почв по процентному содержанию физической глины в

иллювиальной части профиля представлено на рис. 1б. Видно, что на общем фоне средних и тяжелых суглинков выделяется несколько групп точек с супесчаным или легкосуглинистым составом горизонта ВТ, причем присутствуют они как в верхней, так и в нижней частях склона.

Проявления глеевого процесса. Во всех описанных разрезах наблюдались признаки оглеения. Элювиальный горизонт оглеен всегда, что позволило отнести почвы к подтипу дерново-глееподзолистых. Как правило, признаки оглеения выявляются и в нижележащих горизонтах – переходном BELg и ВТg. В некоторых случаях примазки отмечались и в горизонте AEL. Соответственно, по глубине оглеения почвы подразделяются на поверхностно- и профильно-глееватые. Степень выраженности оглеения различна. Железисто-марганцевые примазки имеются во всех оглеенных горизонтах, часто выражены пятна оглеения; в пяти прикопках, преимущественно в пониженной северной части полигона, выявлены обильные крупные конкреции (рис. 2).

Структура почвенного покрова полигона. Неоднородность пространственного распределения отдельных диагностических признаков приводит к тому, что на площади 5.5 га почвы отличаются значительным таксономическим разнообразием. На общем фоне подтипа дерново-глееподзолистых почв присутствуют отдельные профили иных

Таблица 1. Профильное распределение фракций гранулометрического состава фоновых и двучленных почв на территории полигона, %

Горизонт	Песок 0.05–2.0 мм		Пыль 0.002–0.05 мм		Глина <0.002 мм		Физическая глина <0.01 мм	
	$\bar{X}$	s	$\bar{X}$	s	$\bar{X}$	s	$\bar{X}$	s
Фоновые почвы ($n = 10$)								
AY	26.5	7.7	60.6	8.5	12.9	2.1	29.8	3.8
AEL	21.5	5.2	8.5	4.0	11.1	1.9	29.4	1.7
ELg	21.5	5.3	61.7	5.1	8.1	2.2	24.7	3.1
BEL(g)	22.5	9.8	63.7	8.2	14.2	4.7	30.1	5.5
BT(g)	31.8	11.6	71.9	6.4	22.1	6.5	38.3	8.6
D	66.9	15.1	70.4	13.1	6.8	3.0	17.2	8.1
Двучленные почвы ($n = 5$)								
AY*	29.8	—	58.7	—	11.5	—	26.2	—
AEL	24.3	4.6	64.2	3.0	11.5	2.9	26.6	3.0
ELg	28.4	12.4	64.8	11.9	6.8	0.7	21.9	10.0
BEL(g)	40.8	10.9	48.4	9.1	10.9	2.5	24.3	4.7
BT(g)	55.8	8.1	26.8	8.5	17.4	0.5	27.5	3.3

Примечание. Горизонт AY выражен в 1 из 5 профилей. $\bar{X}$ – среднее, s – стандартное отклонение, n – размер выборки.

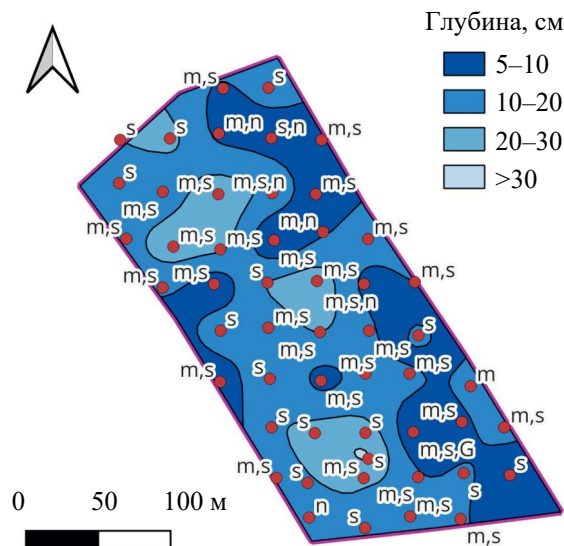


Рис. 2. Верхняя граница проявления признаков оглеения (см) и выраженность оглеения: s — примазки, m — пятна, n — конкреции, G — глеевый горизонт.

подтипов: языковатые, контактно-осветленные, псевдофибровый, грубогумусированный. На уровне видов почвы подразделяются: по мощности горизонт АУ — на маломощные (абсолютно преобладают) и среднемощные (два профиля); по нижней границе элювиального горизонта — неглубоко- и глубоководзолистые; по глубине проявления оглеения — поверхностно-, профильно- и контактно-глееватые. На уровне разновидностей по гранулометрическому составу нижней части профиля выделяются супесчаные, легко-, средне- и тяжелосуглинистые.

Попытка представить структуру почвенного покрова в границах исследовательского полигона сделана на рис. 3. Частота расположения точек отбора позволяет оценить таксономическое разнообразие почв, но не позволяет провести четкие границы между почвенными разностями, в связи с чем для перехода от точек к площади были использованы полигоны Вороного, с объединением одинаковых смежных почвенных разностей в один контур.

Всего на уровне разновидностей выделено 18 почвенных разностей, формирующих 41 элементарный почвенный ареал. Таким образом, представлена сложная микрокомбинация, в которой дерново-подзолистую маломощную профильно-глееватую легкосуглинистую почву на тяжелых моренных суглинках можно рассматривать как фоновую.

Запасы углерода в подстилках и почвах. В большинстве случаев подстилки отличаются небольшой мощностью и, по классификации Богатырева [3], относятся к деструктивному типу (недифференцированный опад прошлых лет). В микропонижениях или на плоских бессточных участках, заселенных

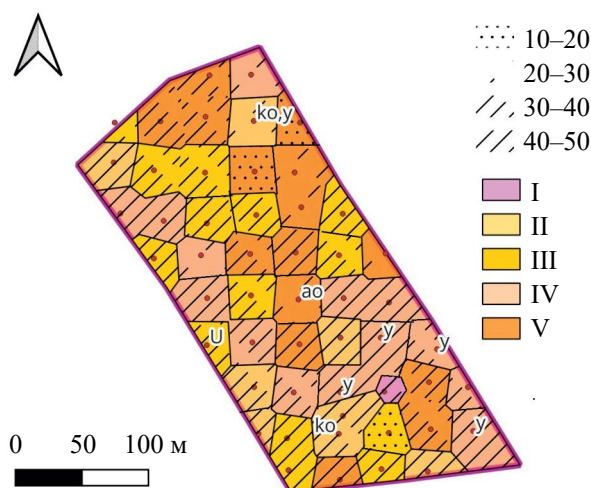


Рис. 3. Таксономическое разнообразие почв исследовательского полигона. I — дерново-глееподзолистая среднемощная псевдофибровая, Gleyic Stagnic Albic Dystric Retisol (Humic, Ferric); II — дерново-неглубоководзолистая маломощная поверхностно-глееватая, Epigleyic Albic Dystric Retisol (Ochric), albic layer above 20 cm; III — дерново-неглубоководзолистая маломощная профильно-глееватая, Amphigleyic Albic Dystric Retisol (Ochric), albic layer above 20 cm; IV — дерново-глубоководзолистая маломощная поверхностно-глееватая, Epigleyic Albic Dystric Retisol (Ochric), albic layer below 20 cm; V — дерново-глубоководзолистая маломощная профильно-глееватая, Amphigleyic Albic Dystric Retisol (Ochric), albic layer below 20 cm. Буквенные обозначения: ao — грубогумусированная, Histic Gleyic Stagnic Albic Dystric Retisol; ko — контактно-осветленная, Stagnic Albic Dystric Retisol; y — языковатая, Glossic Gleyic Albic Dystric Retisol; U — дерново-глееподзолистая среднемощная, Gleyic Albic Dystric Retisol (Humic). Цифрами обозначен процент физической глины в составе горизонта ВТ.

сфагновыми мхами, формируются подстилки ферментативного типа мощностью 3–5 см (имеются 1–2 ферментативных подгоризонта), реже — гумифицированного типа (с наличием однородного темноокрашенного подгоризонта) мощностью 6–9 см (рис. 4а). Такие подстилки представляют собой тонкий слой торфа слабой и средней степени разложения, однако, поскольку его мощность не достигает 10 см, их нельзя отнести к торфянистым горизонтам.

Пространственное распределение запасов углерода подстилок имеет тенденцию к повышению в пониженной северо-западной части полигона; на этом фоне точечно выделяются почвы замкнутых микропонижений. Максимальные запасы подстилок отмечаются в почвах, сформированных во временно переувлажненных микропонижениях, занятых сфагновыми мхами (рис. 4б). Запасы углерода подстилок в таких профилях выходят за пределы

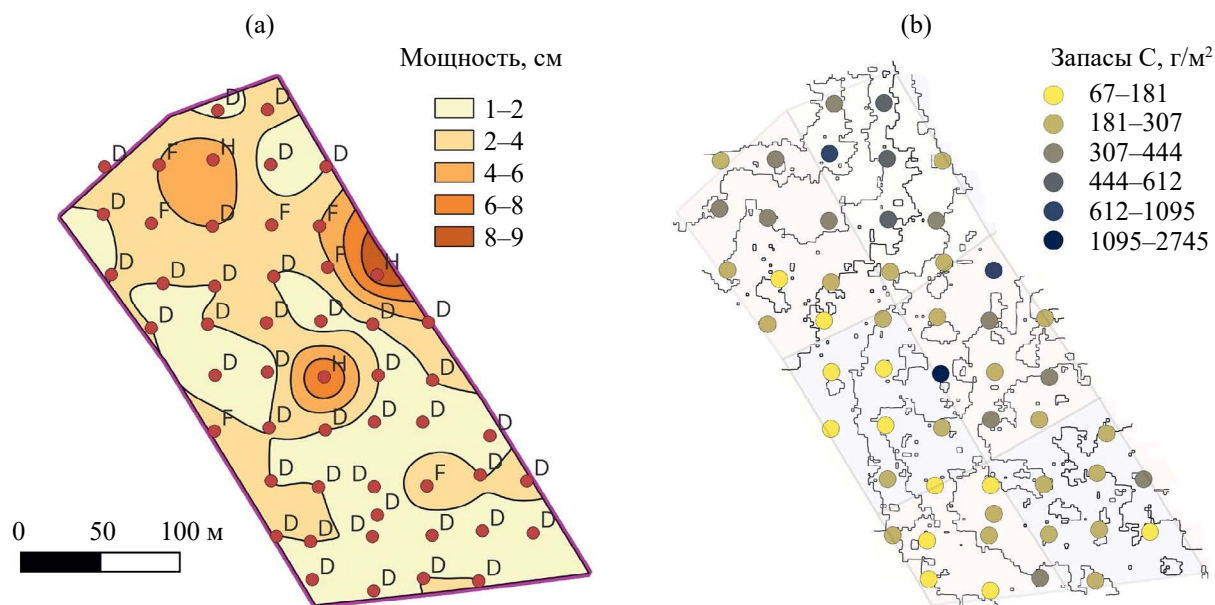


Рис. 4. Мощность и типы подстилок в границах исследовательского полигона (а) и запасы углерода в подстилках (б). D – подстилки деструктивного типа, F – ферментативного типа, H – гумифицированного типа.

тройного стандартного отклонения, в связи с чем эти три профиля не были включены в регрессионный анализ.

Мощности подстилок, а соответственно и запасы варьируют значительно, коэффициент вариации превышает 40% (табл. 2). При этом все подстилки характеризуются близким содержанием углерода и широким отношением C/N, что связано со слабой степенью их минерализации во всех изученных профилях.

Оторфованные подстилки гумифицированного типа отличаются более высоким содержанием углерода, но более узким отношением C/N, что может указывать на меньшую активность почвенных микроорганизмов, участвующих в круговороте азота.

В минеральной части профиля основные запасы C сосредоточены в верхних 20 см. Содержание

общего C по генетическим горизонтам приведено в табл. 3. Видно, что значительно варьируют как мощности горизонтов, так и содержание в них углерода. Соответственно, в зависимости от сочетания горизонтов разной мощности изменяется их вклад в общий запас углерода в разных слоях. Наибольшее варьирование по мощности выявлено для гумусово-аккумулятивного горизонта АУ.

Запасы углерода по слоям минеральной почвы представлены в табл. 4. На верхние 10 см приходится 53% общего запаса. Нижние горизонты, несмотря на низкое содержание углерода, также вносят заметный вклад в общую аккумуляцию углерода почвами. Больше всего варьирует запас углерода в слое 10–30 см, что связано с отношением мощности горизонтов, его слагающих: нижней части переходного горизонта AEL и элювиального ELg.

Таблица 2. Варьирование запасов углерода в подстилках

Параметр	Маломощные подстилки ($n = 49$)			Мощные оторфованные подстилки ($n = 3$)		
	$\bar{X}$	s	$V, \%$	$\bar{X}$	s	$V, \%$
Мощность горизонта, см	2.1	0.9	42.8	7.5	1.8	24.0
Запас подстилок, г/м ²	664	272	41.0	3526	2061	58.4
Запас C в подстилках, г/м ²	274	124	45.1	1623	972	59.9
Содержание общего C, %	40.7	4.4	10.8	45.8	1.1	2.4
C/N	30.8	4.0	13.0	25.1	1.1	4.4

Примечание. $\bar{X}$ – среднее, s – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации, n – размер выборки.

Таблица 3. Содержание общего углерода в генетических горизонтах дерново-глееподзолистых почв ($n = 49$)

Горизонт	Мощность горизонта			$C_{\text{общ}}, \%$		
	$\bar{X}$	s	$V, \%$	$\bar{X}$	s	$V, \%$
AY	4.9	2.7	56.0	4.99	1.35	27.00
AEL	10.4	3.1	30.3	2.19	0.69	31.53
ELg	15.9	4.2	26.5	0.47	0.26	55.09
BELg	11.4	5.4	47.6	0.22	0.04	19.40
BT(g)	43.3	8.6	19.9	0.22	0.05	22.98

Примечание. $\bar{X}$ – среднее, s – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации.

Таблица 4. Запасы углерода в слоях почвы, г/м² ($n = 49$)

Слой, см	$\bar{X}$	s	$V, \%$	Доля от общего запаса, %
0–10	3274	746	22.8	53.0
10–30	2077	825	39.7	33.7
30–50	821	175	21.3	13.3

Пространственное распределение запасов углерода в слоях 0–10 и 0–50 см не показывает какой-либо четкой закономерности, за исключением приуроченности максимального накопления углерода к наиболее выраженным микропонижениям.

Факторы, определяющие варьирование запасов углерода. Расчет описательных статистик для исследуемых почвенных показателей показал, что после исключения трех объектов с исключительно высоким запасом углерода в подстилке их

статистическое распределение близко к нормальному (дополнительные материалы, табл. S1).

Анализ парной корреляции между значениями характеристик почв, растительности и рельефа показал, что почти все коэффициенты корреляции по модулю не превышают 0.4. С учетом объема выборки [14], критическое значение коэффициента корреляции при $n = 49$ и $P = 0.95$ составляет 0.282, следовательно, большинство зависимостей является статистически значимыми. Однако данный метод не позволил выделить ведущие факторы неоднородности запасов углерода в подстилках и почвах.

Метод главных компонент позволил разделить весь массив объектов на две группы, отличающиеся по содержанию физической глины в иллювиальной части профиля: (1) супеси и легкие суглинки, (2) средние и тяжелые суглинки.

Множественный регрессионный анализ также выделяет гранулометрический состав почвообразующих пород среди наиболее значимых факторов, определяющих общий запас углерода в профиле. Помимо гранулометрического состава важным оказывается наличие и мощность горизонта AY; заметный вклад вносят свойства подстилки, определяющие условия жизни почвенной микробиоты – кислотность и относительная обогащенность азотом.

Уравнение множественной линейной регрессии для запаса C в слое 0–50 см выглядит как

$$y = 1.23X_1 - 54.10X_2 + 135.94X_3 + 1281.55X_4 + 46.73X_5 - 7.55X_6 - 2973.36,$$

где y – запас C в слое 0–50 см (г/м²). Коэффициент множественной регрессии уравнения $R^2 = 0.75$, значим на уровне 0.05.

Расшифровка значений переменных, уровень значимости и их вклад в варьирование запасов углерода приведены в табл. 5. Таблица содержит

Таблица 5. Переменные уравнения множественной линейной регрессии

Переменная	Показатель	Уровень значимости	Вклад каждой переменной (коэффициент β), %
X_1	Запас углерода в слое 0–10 см	0.0001	34
X_2	Содержание физической глины в горизонте BT, %	0.0003	18
X_3	Мощность горизонта AY, см	0.0003	16
X_4	pH солевой вытяжки подстилки	0.0043	14
X_5	Отношение C/N в подстилке	0.0181	10
X_6	Доля бореальных видов в проективном покрытии напочвенного покрова, %	0.0470	8

Примечание. В случае отсутствия горизонта AY X_3 принят равным 0.

стандартизованные коэффициенты β , для удобства выраженные в процентах. Это коэффициенты, которые оцениваются по стандартизованным данным, поэтому величины коэффициентов β позволяют сравнить вклады каждого предиктора (X) в предсказание отклика (y).

ОБСУЖДЕНИЕ

На сравнительно небольшой площади исследовательского полигона была выявлена большая пестрота почв, в том числе на уровне подтипов. Однако для оценки способности почв депонировать углерод важны не все таксономические различия. В частности, не имеют существенного значения разделение на виды по глубине оподзоливания или характеру оглеения, выделение контактно-оглеенных или языковатых подтипов. Поэтому изучение собственно структуры почвенного покрова полигона с этой точки зрения имеет подчиненное значение. Более важным представляется вопрос об уровне (детальности) оценки неоднородности содержания и запасов почвенного углерода. Модель динамики насаждений FORRUS-S работает с квадратными пространственными ячейками с длиной стороны 16.7 м [24]; экстраполяцию значений, сделанную с помощью инструментов пространственного анализа, можно считать соответствующей такому масштабу. Детализация на уровне тессер, размер которых сопоставим с диаметром кроны (5–10 м), для задач моделирования представляется излишней.

Удобным инструментом для оценки неоднородности почвенных свойств является геопрограммный анализ. Цифровая модель рельефа позволяет выделить элементы микрорельефа, в границах которых проявляются начальные стадии торфообразования и повышенная аккумуляция углерода в подстилках и почвах. Предполагаем, что продолжающееся торфобразование со временем приведет к формированию торфянисто-подзолистых глеевых почв, контрастность почвенных свойств между условно дренированными и бессточными элементами микрорельефа возрастет.

На остальной, условно дренированной территории, аккумуляция углерода определяется сочетанием целого ряда внешних (литогенных и фитогенных) факторов и собственно почвенных свойств.

Гранулометрический состав обычно рассматривается как фактор локального, но не внутрицелостического уровня [18]. Однако в случае исследуемой территории (характерной для восточного Подмосковья в целом) неоднородность литологического состава моренно-водноледниковых равнин проявляется в масштабе десятков или первых сотен метров.

Больше всего корреляционных связей замкнуто на фитомассу напочвенного покрова. При этом фитомасса сама по себе определяется рядом параметров: долей бореальных видов, расстоянием от центра кроны, суммой площадей сечений и долей ели в древостое.

Состав и фитомасса живого напочвенного покрова, наряду с составом древесного опада, определяют качество опада и скорость разложения подстилки. Так, в бореальных лесах отмечалось значительное увеличение запасов углерода, когда вклад разнотравья в общее проективное покрытие напочвенного покрова превышал 10% [33]. Это может быть справедливо и в случае полигона, где хвойный опад смягчается органическим материалом бореального или, реже, неморального разнотравья. Ранее для условий Подмосковья было показано, что на характер лесных подстилок наибольшее влияние оказывают видовое разнообразие напочвенного покрова, сравнительное долевое участие олиготрофных бореальных и нитрофильных видов, и в целом трофность мест обитания [17].

Таким образом, напочвенный покров в качестве предиктора оказывается более информативным, чем состав и сомкнутость древесного полога, что и подтверждает множественный регрессионный анализ.

Обращает на себя внимание отсутствие статистической зависимости между запасами углерода в подстилках и в почвах. Вероятно, генетическая связь между ними была нарушена. Поскольку лес имеет искусственное происхождение, поверхность почв была повреждена при рубке и создании лесных культур; следовательно, современные подстилки существенно моложе, чем минеральные горизонты. На разновозрастность почв и их отдельных горизонтов как характерную черту лесных биогеоценозов указывал Карпачевский [7].

В целом невысокие коэффициенты корреляции можно объяснить несколькими причинами: (а) связи между показателями нелинейные или опосредованные; (б) рубка спелого леса и создание на его месте лесных культур привела к нарушениям верхних горизонтов (подстилки и, возможно, мстами АУ) и к разрыву генетического единства профиля; (в) частота расположения точек отбора может быть недостаточна, чтобы выявить закономерности, связанные с неоднородностью древесного полога; (г) влияние фитогенных полей деревьев прослеживается слабо, так как с одной стороны, с момента смыкания полога прошло не более 60 лет, а с другой – насаждение высокополнотное, кроны, а следовательно, и фитогенные поля деревьев разных пород перекрываются.

Наиболее значимыми для вариативности запасов углерода оказываются собственно почвенные свойства, которые нельзя использовать в качестве

предикторов запасов углерода при дистанционных исследованиях. Из внешних по отношению к почвам факторов определенное значение имеют формы микрорельефа (геоморфоны), фитомасса и состав напочвенного покрова.

Более 50% запаса углерода в дерново-подзолистых глееватых почвах исследовательского полигона МГТУ им. Н.Э. Баумана приходится на верхние 10 см почвы, что делает их уязвимыми при возможной хозяйственной деятельности. Сходные данные получены для других объектов Московской области, в частности, Звенигородской биостанции МГУ [8].

Нижние горизонты, несмотря на низкое содержание углерода, вносят заметный вклад в общую аккумуляцию углерода почвами, доля слоя 30–50 см составила 13% от общего запаса. На значение этого слоя для аккумуляции С в малонарушенных буковых лесах указывают авторы [32]. Следовательно, моделирование динамики углерода в лесных почвах должно производиться, как минимум, для полуметровой толщи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание полноценной цифровой модели лесной экосистемы предполагает моделирование неоднородности выдела и ее влияние на динамику насаждения.

При оценке внутриценотической неоднородности накладываются факторы разного масштаба: более крупные контуры задаются формами рельефа и составом почвообразующих пород; на их фоне проявляется неоднородность, связанная с формами микрорельефа (блюдца), породным составом древостоя и освещенностью, которая влияет на состав и продуктивность напочвенного покрова, состав и скорость разложения подстилки. Внутренняя структура биоценоза влияет на его долгосрочную динамику.

Факторы, определяющие углеродный баланс лесных почв, действуют разнонаправленно, что осложняет определение предикторов содержания С в почвах. В масштабе полигона четким предиктором служат отрицательные формы микрорельефа, где формируются почвы с оторфованной подстилкой.

На остальной территории появляется комплексное воздействие состава почвообразующих пород, влияющего на кислотно-основные свойства подстилки и верхних горизонтов почвы, состава и структуры древостоя, в первую очередь, участия ели — через качество опада и условия освещенности.

Детальное картографирование всех компонентов биогеоценоза дает возможность моделировать процессы роста древостоя, отпада, поступления органического вещества в почвы и его дальнейшей

трансформации с учетом выявленной пространственной неоднородности. Выявленные факторы, определяющие запасы углерода в почвах, позволяют сформировать сценарии моделирования, направленные на разработку мероприятий по увеличению аккумуляции углерода в лесных экосистемах через изменение структуры растительности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Представленные в настоящей публикации исследования являются частью НИР “Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса как элемента системы климатического мониторинга” в рамках стратегического проекта “BaumanGoGreen” и финансировались Министерством науки и высшего образования РФ.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в ходе выполнения работы и публикации результатов исследований.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24110032>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басевич В.Ф. Неоднородность подзолистых почв: генезис, методологические и методические аспекты изучения (обзор) // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2022. № 3. С. 20–29.
2. Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мошкина Е.В., Ткаченко Ю.Н., Мамай А.В., Новиков С.Г., Мошников С.А., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю. Пространственная вариабельность свойств подзолов в зависимости от растительных микрогруппировок в сосняке брусничном // Лесоведение. 2022. № 1. С. 47–60.
3. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
4. Гаврилюк Е.А., Кузнецова А.И., Горнов А.В. Геопространственное моделирование содержания и запасов азота и углерода в лесной подстилке на основе разнотемпературных спутниковых изображений Sentinel-2 // Почвоведение. 2021. № 2. С. 168–182.
5. Грабарник П.Я., Чертов О.Г., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Быховец С.С., Фролов П.В. Интеграция имитационных

- моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы // Математическая биология и биоинформатика. 2019. Т. 14. № 2. С. 488–499.
6. Канев А.И., Якубов А.Р., Чумаченко С.И., Терехов В.И. Создание прототипа цифрового двойника локального участка леса как элемента системы климатического мониторинга // ENVIROMIS 2022: Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 12–17 сентября 2022 г. Томск, 2022. С. 423–442.
 7. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
 8. Копцик Г.Н., Копцик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1686–1702.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>
 9. Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 95.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-2021-44-95>
 10. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Смирнов В.Э., Горнова М.В., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–815.
 11. Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва–растительность // Лесоведение. 2010. № 5. С. 445–456.
 12. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Раздел IV. Проведение экспериментальных измерений запасов углерода в пулах подстилки и почвы на землях, предназначенных для лесовосстановления. Минприроды, 2017.
 13. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
 14. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 164–182.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-164-182>
 15. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филипова О.И., Кротов Д.Г., Морозова Т.М., Красильников П.В. Исследование неопределенности оценок запасов органического углерода в масштабах угодий // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1437–1449.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600725>
 16. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д. Оценка внутри-биогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
 17. Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырёв Л.Г. Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с напочвенным покровом в лесных экосистемах Подмосковья (на примере УОПЭЦ “Чашниково”) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. 2017. № 4. С. 11–20.
 18. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
 19. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запаса органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841>
 20. Шанин В.Н., Фролов П.В., Припутина И.В. и др. Моделирование динамики лесных экосистем с учетом их структурной неоднородности на разных функциональных и пространственных уровнях // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 3. С. 96–289.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-202252-112>
 21. Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–123.
 22. Chertov O., Komarov A., Shaw C., Bykhovets S., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Shashkov M. Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 125–139.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.10.024>
 23. Chertov O., Shaw C., Shashkov M., Komarov A., Bykhovets S., Shanin V., Grabarnik P., Frolov P., Kalinina O., Pripulina I., Zubkova E. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. III. Parameterisation of earthworm activity // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 140–149.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.013>
 24. Chumachenko S.I., Korotkov V.N., Palenova M.M., Politov D. V. Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous – Broad-leaved forests // Ecological Modelling. 2003. V. 170. P. 345–361.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00238-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00238-2)
 25. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8. P. 1991–2007.
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

26. Donato G., Belongie S. Approximation Methods for Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps // Computer Vision – ECCV 2002: 7th European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Denmark, May 28–31, 2002, Proceedings. Part III. Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. P. 21–31.
27. Framstad E., Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forests. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2013. 130 p.
28. Fujisaki K., Chapuis-Lardy L., Albrecht A., Razafimbelo T., Chotte J.L., Chevallier T. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands // Geoderma. 2018. V. 313. P. 41–51.
29. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. 2022. 236 p.
30. Jasiewicz, J., Stepinski, T. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms // Geomorphology. 2013. V. 182. P. 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
31. Komarov A., Bykhovets S., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E., Chertov O., Shaw C., Nadporozhskaya M. ROMUL_HUM model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017. V. 345. P. 113–124.
32. Leuschner C., Feldmann E., Pichler V., Glatthorn J., Hertel D. Forest management impact on soil organic carbon: A paired-plot study in primeval and managed European beech forests // Forest Ecol. Managem. 2022. V. 512. P. 120163. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120163>
33. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S. Linking Forest Vegetation and Soil Carbon Stock in Northwestern Russia // Forests. 2020. V. 11. P. 979.
34. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // Forest Ecol. Managem. 2020. V. 466. P. 118–127.
35. Maynard J.J., Johnson M.G. Uncoupling the complexity of forest soil variation: Influence of terrain indices, spectral indices, and spatial variability // Forest Ecol. Managem. 2016. V. 369. Pp. 89–101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.018>
36. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. // Science. 2011. V. 333. P. 988–993.
37. Prendes, C., Cabo, C., Ordoñez, C., Majada, J., Canga E. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in Pinus pinaster // GIScience and Remote Sensing. 2021. V. 58. P. 1130–1150. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1972712>
38. Schrumpp M., Schulze E.D., Kaiser K., Schumacher J. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1193–1212.
39. Wang B., Liu D., Yang J., Zhu Zh., Darboux F., Jiao J., An Sh. Effects of forest floor characteristics on soil labile carbon as varied by topography and vegetation type in the Chinese Loess Plateau // Catena. 2021. V. 196. P. 104825. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104825>

Evaluation of Spatial Heterogeneity of Soil Properties in the Organization of Carbon Stocks Monitoring on Forest Ecosystems

V. V. Kiseleva^{1, *}, V. N. Karminov¹, S. I. Chumachenko¹,
A. Yu. Agoltsov¹, and E. M. Mitrofanov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi Branch, Mytishchi, 141005 Russia

*e-mail: vvkiseleva@bmstu.ru

A research polygon with the area of 15 ha was established as an object of climatic monitoring in 2022 in Shchelkovsky district of Moscow region. Within the polygon, representing one forest survey unit, a high taxonomic diversity of soil cover was revealed: 18 taxonomic unit of various hierarchical levels, from subtype to variation. Microrelief is regarded as a leading factor of carbon stock diversity: soils of drainless micro-depressions under sphagnum moss cover significantly differ from the main sampling by carbon

stock in litter and upper 10 cm of soil. For the greater part of the polygon, the most important factors determining carbon stock are the percent of physical clay in the subsoil, the composition and phytomass of forbs. The largest coefficient of variation of C stocks (40%) was obtained for the layer 10–30 cm and is related, first of all, to the variation of thickness of incorporated soil horizons. The geospatial analysis allows us to make spatial evaluation of soil properties diversity, model and forecast soil carbon stock dynamics considering spatial heterogeneity of the territory. Detecting the factors controlling soil carbon stocks would be helpful in the formulation of modelling scenarios; the latter simulate the activities aimed at the increase in carbon accumulation in forest ecosystems via the management of vegetation structure.

Keywords: soil organic carbon, geospatial analysis, factors of diversity, Gleyic Albic Dystric Retisols, forest litter