

ЭКОСИСТЕМНЫЕ ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗИСТО-МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОЧВАХ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

© 2024 г. И. А. Дубровина^{а, *}, Е. В. Мошкина^б, А. В. Туюнен^б,
Н. В. Геникова^б, А. Ю. Карпечко^б, М. В. Медведева^б

^аИнститут биологии КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

^бИнститут леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, 185910 Россия

*e-mail: vorgo@mail.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 17.05.2024 г.

Исследовали железисто-метаморфические почвы нормального увлажнения в средне-таежной подзоне Карелии. Изучили 100-летний сосняк в качестве контроля, пашню, сенокос, а также 15-и 75-летний сосняки естественного лесовозобновления на бывших сельскохозяйственных угодьях. Анализировали влияние разных типов землепользования на морфологическое строение почв и основные химические и микробиологические показатели верхних горизонтов. Изучили запасы органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) почв в метровом слое и структуру углеродных пулов участков. В почвах наблюдался равномерно-аккумулятивный тип распределения углерода и близкие значения соотношения C/N (16–18) на всех участках. Для почв характерно слабое естественное плодородие и низкие агрохимические показатели, которые значительно улучшаются при аграрном освоении. На пашне отмечено наибольшее содержание $C_{\text{орг}}$ (4.9%) и $N_{\text{общ}}$ (0.3%) при низкой плотности сложения и нейтральном pH. В почве молодого леса зафиксировано наибольшее содержание $C_{\text{мик}}$ (419 мг С/кг), на участках пашни и сенокоса оно составляет 209–211 мг С/кг и минимально в почвах зрелых лесов (144–175 мг С/кг). На исследованных землепользованиях запасы $C_{\text{мик}}$ в слое почвы 0–100 см находятся в пределах 76.5–132.4 г С/м², в почвах лесов запасы $C_{\text{мик}}$ подстилки составляют 12.7–27.4 г С/м². Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы в метровом слое максимальны на пашне и составляют 272 т С/га, и уменьшаются в ряду сенокос – спелый лес от 98 до 39 т С/га. Общие экосистемные запасы углерода максимальны на пашне (275 т С/га), что превышает запасы в зрелых лесах – 206–221 т С/га. Запасы $C_{\text{орг}}$ на сенокосе и в молодом лесу составляют 105–115 т С/га.

Ключевые слова: почвенные функции, органический углерод почвы, углерод микробной биомассы, железисто-метаморфические почвы

DOI: 10.31857/S0032180X24100026, **EDN:** JYDBIQ

ВВЕДЕНИЕ

Органический углерод почвы является важнейшим компонентом глобального углеродного цикла. Он активно взаимодействует с пулами углерода наземной биоты и атмосферы и превышает их в 2–3 раза [44, 48]. Изменения в запасах углерода растительности и почв происходят естественным образом по мере развития, созревания и деградации экосистем. Однако значительное прямое и косвенное воздействие на растительный покров и запасы углерода в почве оказывает антропогенная

деятельность. Прежде всего, это изменения в землепользовании и составе растительности, нарушающие баланс между накоплением и потерями углерода в экосистемах [40, 52, 53]. Несмотря на множество полевых исследований, существуют значительные разногласия относительно направления и масштабов изменений в запасах почвенного углерода в зависимости от землепользования. Встречается представление, что в мировом масштабе перевод лесов в сельскохозяйственные угодья истощает запасы почвенного углерода, в то время как лесовосстановление способствует его

накоплению [26, 27, 31]. В то же время получены данные о том, что разумное земледелие и применение лучших практик управления в сельском хозяйстве может в долгосрочной перспективе увеличить запасы почвенного углерода. Долговременная фиксация углерода в почвах повышает их плодородие и увеличивает урожайность культур, а также борется с климатическими изменениями [37, 39].

В связи с ростом населения и увеличением потребностей в продуктах питания нагрузки на сельскохозяйственные почвы будут возрастать. Высокий спрос может быть удовлетворен как за счет расширения пахотных угодий, так и с помощью интенсификации сельскохозяйственного производства и повышения урожайности [43]. Интенсификация может служить защитой природных экосистем от перевода их в аграрный сектор, поскольку расширение площадей пахотных угодий связано со значительными социальными и экологическими издержками. Оно ведет к сокращению ареалов и биоразнообразия естественных биоценозов, а также к утрате предоставляемых ими экосистемных услуг [29]. Сельскохозяйственные почвы с низким плодородием имеют потенциал связывания углерода при должных методах управления. Существуют исторические примеры высокоплодородных искусственных почв с увеличенным содержанием органического вещества, которые обычно создавались на месте бедных сильновыветрившихся или песчаных почв. Это почвы типа Terra Preta в Южной Америке, Западной Африке и Австралии, Plaggen и Dark Earth в Европе [28, 30, 45–47].

Исследования экосистемных запасов углерода различных землепользований в средне-таежной подзоне Карелии на почвах различного генезиса показали существенное влияние сельскохозяйственных практик на динамику накопления и распределения $C_{орг}$ [10–12]. В данной работе по принятой ранее схеме проведены исследования на почвах, развитых на продуктах выветривания малиновых кварцитов и кварцито-песчаников. Месторождение данных красноцветных пород расположено на берегу Шокшинской губы Онежского озера в юго-западном Прионежье. Малиновые кварциты приурочены к шокшинской свите вепися и залегают над серыми песчаниками петрозаводской свиты. Шокшинская свита достигает мощности 1000 м и имеет трехчленное строение [7]. Время формирования песчаного материала, слагающего шокшинскую свиту, оценивается в 1.91–1.75 млрд лет. Кварциты и кварцито-песчаники сформированы за счет накопления продуктов разрушения кристаллических комплексов позднеархейского и раннепротерозойского возраста. Для пород характерен кварцевый состав обломочного материала и широкая фациальная изменчивость [20, 35]. Основу минерального состава малиновых кварцитов составляет кварц (94–96%) с примесями халцедона

(2–3%), серицита (0.5–1.0%) и оксидов железа (до 0.5%). Структура кварцитов тонко- и мелкозернистая, она обусловлена рекристаллизацией более мелких зерен в условиях высокотемпературного метаморфизма. Средний размер зерен кварца составляет около 0.3 мм, при этом отдельные песчинки окружены тонкой пленкой оксида железа (гематита), имеющего биогенную природу. В шокшинских кварцитах обнаружены бактериальные остатки, участвовавшие в формировании гематитового пигмента, которые морфологически схожи с современными железобактериями [1, 21].

Цель работы – исследование влияния разных типов землепользования на структуру углеродных пулов участков, морфологическое строение профиля, химические свойства и функции почв, сформированных на продуктах выветривания малиновых кварцитов и кварцито-песчаников.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в пределах Шокшинской гряды в окрестностях пос. Шокша Прионежского района Карелии. Участок расположен в Южном приозерном агроклиматическом районе, характеризуется средней температурой января –10°C, июля +16°C и безморозным периодом 120–130 дней. Сумма эффективных температур за вегетационный период составляет 1500°C при 650 мм осадков в год [2]. Район исследования находится на южной границе средне-таежной подзоны зеленомошных хвойных лесов и отличается разнообразием видового состава напочвенного покрова, наличием редких и неморальных видов [22].

Рельеф территории представляет собой моренную холмистую равнину, пересеченную денудационно-тектоническими грядами. Шокшинская гряда сложена кварцитами и диабазами и является цепью возвышенностей высотой 90–120 м с плоскими вершинами и пологими склонами. Почвообразование в окрестностях пос. Шокша идет на продуктах разрушения малиновых кварцитов и кварцито-песчаников, представленных мореной и связанными с ней водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми песками и супесями, реже суглинками [17]. На данных отложениях развиваются красноцветные железисто-метаморфические почвы со слабодифференцированным профилем (Cambisols).

Ключевые участки (табл. 1) выбирали на возвышенных элементах рельефа с песчаными почвами нормального увлажнения. Пашня находится в длительном сельскохозяйственном использовании. Участок сенокоса представлен разнотравно-злаковым лугом с нерегулярным сенокосением. Молодой лес произрастает на заброшенном сенокосе или пастбище, а средневозрастной лес представляет участок естественного лесовозобновления на

бывшей пашне. Спелый лес произрастает на территории, не подвергавшейся земледельческому освоению.

Экосистемные запасы углерода определяли в пяти пулах: надземная фитомасса (древостой и напочвенный покров); подземная фитомасса; дёрис — сухостой и валеж; лесная подстилка; углерод почвы в слое 0–100 см. На каждом ключевом участке проводили геоботаническое описание растительности на площадках 20 × 20 м. Запасы напочвенной растительности определяли методом укосов на 30 площадках размером 30 × 30 см. Для расчета запасов фитомассы картофеля использовали средние многолетние данные по урожайности Федеральной службы государственной статистики. Запас фитомассы древостоя рассчитывали на основании таксационных измерений по ОСТ 56-69-83 и показателей плотности древесины. Запасы фитомассы распределяли по отдельным фракциям и пересчитывали в запасы углерода с использованием коэффициента 0.5 для древесных фракций и хвои, и 0.45 для листьев и трав.

На каждом участке закладывали почвенный разрез, проводили морфологическое описание и определяли классификационную принадлежность [16, 50]. Из генетических горизонтов отобра-

ли образцы в трехкратной повторности для определения обменной кислотности (pH_{KCl}), содержания органического углерода ($C_{орг}$) и углерода микробной биомассы ($C_{мик}$), а также плотности сложения (ρ) весовым методом. Для расчета запасов органического и микробного углерода в подстилках на лесных участках исследовали образцы подстилки в шестикратной повторности. На каждом участке в верхних минеральных горизонтах почв отобрали образцы для анализа варибельности общих агрохимических свойств и микробиологической активности. Помимо вышеперечисленных анализов в почвах определяли содержание общего азота ($N_{общ}$) по Кьельдалю, подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) по Кирсанову, сумму обменных оснований (S) по Каппену–Гильковицу, соотношение C/N . Изучали долю углерода микробной биомассы в органическом углероде почвы $C_{мик}/C_{орг}$. Микробный метаболический коэффициент QR рассчитывали как отношение базального дыхания к субстрат-индуцированному.

Углерод микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания, которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения

Таблица 1. Характеристика участков

Рельеф, координаты	Землепользование	Растительность	Почва
Средняя часть пологого склона 61°26'48.4" N 35°03'04.7" E	Пашня, частный надел, внесение органических удобрений	Картофель	Агрозем железисто-метаморфический типичный Pretic Cambisol (Aric)
Верхняя часть пологого склона 61°26'28.8" N 35°03'31.8" E	Сенокос, сенокосение нерегулярное	Луг злаково-разнотравный с преобладанием пырея ползучего (<i>Elytrigia repens</i> L.), ежи сборной (<i>Dactylis glomerata</i> L.), подмаренника мягкого (<i>Galium mollugo</i> L.) и льнянки обыкновенной (<i>Linaria vulgaris</i> Mill.)	Агрозем железисто-метаморфический типичный Umbric Cambisol
Верхняя часть пологого склона 61°27'10.5" N 35°03'25.3" E	15-летний лес молодой древостой, I класс бонитета	Сосняк злаково-разнотравный, в напочвенном покрове доминируют луговик извилистый (<i>Deschampsia flexuosa</i> L.) и тимopheевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L.)	Ржавозем типичный Skeletic Umbric Cambisol
Пологий участок в средней части крутого склона 61°27'18.7" N 35°02'58.8" E	75-летний лес средневозрастный древостой, I класс бонитета	Сосняк разнотравно-кустарничковый, в напочвенном покрове преобладают луговик извилистый (<i>Deschampsia flexuosa</i> L.), черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) и брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	Органо-ржавозем иллювиально-гумусированный Chromic Cambisol (Sombric)
Плоский выровненный участок 61°28'06.4" N 35°02'10.8" E	100-летний лес спелый древостой, II класс бонитета	Сосняк чернично-брусничный, в напочвенном покрове преобладают черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) и брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	Органо-ржавозем иллювиально-гумусированный Chromic Cambisol (Sombric, Raptic)

почвы глюкозой и инкубации в течение 1.5–2 ч при температуре 22°C.

Запасы органического углерода в почве рассчитывали по формуле:

$$Q = Ch\rho(100 - s)/100,$$

где Q – запас углерода, т С/га; C – содержание углерода, %; h – мощность горизонта, см; ρ – плотность сложения, г/см³; s – содержание камней, %.

При статистической обработке данных применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным анализом по критерию Тьюки для анализа различий средних значений в исследованных показателях. В таблицах и диаграммах приведены средние значения $\pm$ ошибка среднего, значимые различия (при $p \leq 0.05$) обозначены разными буквами. Статистическую обработку данных проводили в программах Microsoft Excel и PAST Statistics.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфология профиля. Исследованные почвы сформированы на красноцветных моренных и озерно-ледниковых песках и супесях, имеют мелко- и среднезернистый песчаный гранулометрический состав и слабодифференцированный профиль. Верхние горизонты почв имеют мелкокомковатую, либо мелкоглыбистую структуру. На всех участках, за исключением 75-летнего леса, почвы в нижней части профиля содержат значительное количество камней. Почва пашни диагностирована как агрозем железисто-метаморфический типичный (Pretic Cambisol). Агрогумусовый горизонт мощный (около 50 см), темноокрашенный, 10YR 3/2–3/3 по шкале Манселла [38]. Горизонт Р подразделяется на два подгоризонта по плотности и включает большое количество угляков (рис. 1). Далее располагается уплотненный железисто-метаморфический горизонт BFM около 20 см, постепенно переходящий в породу. Почва сенокоса имеет сходное строение с почвой пашни, мощность горизонта Р около 40 см с темно-бурой окраской (7.5YR 3/4), в верхней части развитая дернина. Уплотненный горизонт BFM около 20 см плавно переходит в породу. Почва диагностирована как агрозем железисто-метаморфический типичный (Umbric Cambisol). На участке 15-летнего леса почва представлена ржавоземом типичным (Skeletal Umbric Cambisol). Рыхлый серогумусовый горизонт AY мощностью около 13 см подстилается плотным мощным горизонтом BFM, постепенно переходящим в породу. Над серогумусовым горизонтом сформирована оторфованная лесная подстилка до 2 см. На участках леса 75 и 100 лет почвенный профиль имеет схожее строение. Непосредственно под мощной лесной подстилкой верхняя часть

железисто-метаморфических горизонтов имеет более темную окраску за счет мигрирующего органического вещества, что позволяет выделить маломощные горизонты BFMhi. В зрелых лесах железисто-метаморфические горизонты BFM мощные и яркоокрашенные, они имеют тона окраски 10R 4/6–5/6 по шкале Манселла и слабо заметный переход в породу. Почвы диагностированы как органо-ржавоземы иллювиально-гумусированные (Chromic Cambisol (Sombric)). В почве 100-летнего леса присутствует выраженная двучленность профиля (Raptic).

Агрофизические и агрохимические показатели почв. В исследованных почвах наименьшие показатели плотности сложения в верхних горизонтах отмечены на пашне (1.16 г/см³), а также в молодом лесу (1.19 г/см³) (рис. 2, табл. 2). На других землях плотность достигает 1.33–1.37 г/см³. Плотность почв плавно возрастает с глубиной и достигает значений 1.5–1.6 г/см³ на всех участках. Почвы в лесах сильноокислые, кислотность возрастает в ряду молодой – средневозрастной – спелый лес с 4.1 до 3.3 ед. pH. Для сенокоса характерна среднекислая реакция (pH_{KCl} 4.9), а для пашни – нейтральная (pH_{KCl} 6.5). Показатели pH незначительно меняются с глубиной, но для всех участков отмечено уменьшение кислотности в средней части профиля почв.

Распределение органического углерода в профилях почв имеет равномерно аккумулятивный характер и различается лишь содержанием $C_{орг}$. Содержание углерода в верхних минеральных горизонтах почв максимально на пашне (4.9%), снижается под сенокосом и 15-летним лесом до 2.2–2.3%, в 75-летнем лесу до 1.1%, и минимально

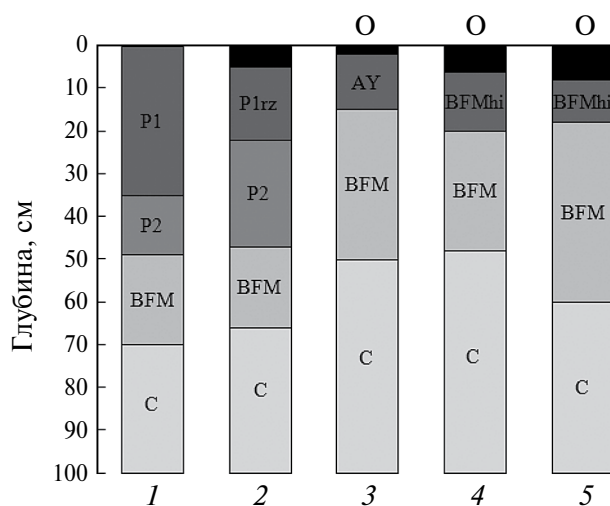


Рис. 1. Схематическое строение почвенных профилей: 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 15 лет; 4 – лес, 75 лет; 5 – лес, 100 лет.

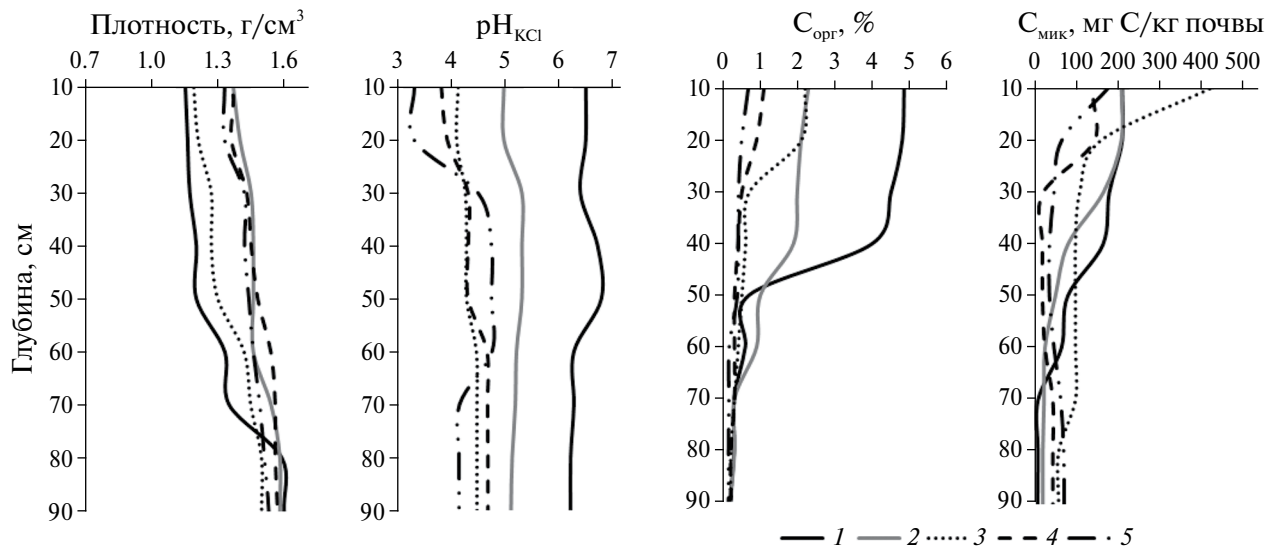


Рис. 2. Изменение почвенных свойств по профилю (среднее, $n = 3$): 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 15 лет; 4 – лес, 75 лет; 5 – лес, 100 лет.

Таблица 2. Показатели почвенного плодородия и микробиологической активности в верхних минеральных горизонтах почв ($n = 6$)

Показатель	Пашня	Сенокос	Лес		
			15 лет	75 лет	100 лет
Горизонт	Р	Р	АУ	BFMhi	BFMhi
Глубина, см	5–20	5–22	3–15	7–20	10–18
ρ , г/см ³	1.16 ± 0.04 a	1.37 ± 0.05 b	1.19 ± 0.07 ab	1.36 ± 0.03 b	1.33 ± 0.03 ab
pH _{KCl}	6.50 ± 0.04 a	4.97 ± 0.34 b	4.13 ± 0.03 c	3.77 ± 0.09 cd	3.32 ± 0.07 d
P ₂ O ₅ , мг/кг	1342.5 ± 39.4 a	521.3 ± 56.6 b	64.8 ± 13.0 c	95.9 ± 7.5 c	4.8 ± 1.2 d
K ₂ O, мг/кг	406.6 ± 37.3 a	100.6 ± 16.4 b	67.6 ± 9.0 b	19.5 ± 1.8 bc	9.3 ± 0.5 cd
S, смоль(экв)/кг	27.87 ± 0.75 a	5.44 ± 0.71 b	2.44 ± 0.28 c	0.38 ± 0.07 cd	0.25 ± 0.01 d
C _{орг} , %	4.85 ± 0.13 a	2.30 ± 0.18 b	2.23 ± 0.14 b	1.13 ± 1.13 c	0.68 ± 0.18 c
N _{общ} , %	0.32 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 b	0.15 ± 0.01 b	0.08 ± 0.01 c	0.04 ± 0.01 d
C/N	17.8 ± 0.17 a	18.4 ± 0.69 a	17.8 ± 0.82 a	16.3 ± 1.10 a	17.9 ± 3.35 a
C _{мик} , мг С/кг	211.3 ± 25.0 a	208.5 ± 23.9 a	418.6 ± 35.5 b	144.4 ± 19.1 a	175.4 ± 25.5 a
C _{мик} /C _{орг} , %	0.43 ± 0.05 a	0.92 ± 0.07 ab	1.87 ± 0.11 c	1.32 ± 0.08 cb	2.62 ± 0.30 d
QR	0.43 ± 0.02 ab	0.41 ± 0.02 ab	0.47 ± 0.05 a	0.39 ± 0.04 ab	0.31 ± 0.05 b

Примечание. Приведены средние значения $\pm$ ошибка среднего, значимые различия при $p \leq 0.05$ обозначены разными буквами.

в 100-летнем лесу (0.7%). Содержание общего азота в верхних горизонтах имеет похожую тенденцию. Максимальное содержание на пашне (0.32%), в почве сенокоса и молодого леса – 0.15%, в средневозрастном и спелом лесах зафиксированы низкие значения показателя – 0.08 и 0.04% соответственно.

В исследованных почвах независимо от типа землепользования зафиксированы близкие значения соотношения C/N в верхних минеральных горизонтах почв в пределах 16.3–18.4. Для показателей доступного фосфора и калия характерны большие колебания значений.

Содержание P_2O_5 очень высокое в почве пашни (1343 мг/кг) и сенокоса (521 мг/кг), на участках 15-летнего и 75-летнего лесов составляет 65–96 мг/кг, и в 100-летнем лесу около 5 мг/кг. Содержание K_2O максимально на пашне (407 мг/кг), снижается до 101 мг/кг на сенокосе и до 68 мг/кг в молодом лесу. Минимальное содержание калия зафиксировано в средневозрастном (20 мг/кг) и спелом лесах (9 мг/кг). Сумма обменных оснований (S) максимальна в почве пашни (28 смоль(экв)/кг), гораздо меньше она на участках сенокоса и молодого леса (2–5 смоль(экв)/кг) и минимальна в почве средневозрастного и спелого лесов (0.3–0.4 смоль(экв)/кг).

Микробиологические показатели почв. Распределение углерода микробной биомассы по профилю почв имеет равномерно аккумулятивный характер аналогично органическому углероду. На участках пашни, сенокоса и молодого леса содержание $C_{мик}$ плавно уменьшается с глубиной. На участках зрелых лесов показатели содержания углерода микробной биомассы достигают минимума в средней части профиля, а затем увеличиваются. В верхних горизонтах почв содержание $C_{мик}$ максимально под 15-летним лесом (419 мг С/кг). В почве пашни и сенокоса показатели близки и составляют 208–211 мг С/кг, а в зрелых лесах содержание $C_{мик}$ снижается до 144–175 мг С/кг. Доля $C_{мик}$ в общем $C_{орг}$ минимальна в почве пашни (0.43%) и сенокоса

(0.92%), возрастает в почвах 15-летнего (1.87%) и 75-летнего (1.32%) лесов, и максимальна на участке 100-летнего леса (2.62%). Микробный метаболический коэффициент QR максимален на участках молодого леса (0.47), пашни (0.43) и сенокоса (0.41). В почвах зрелых лесов значение показателя снижается до 0.31–0.39.

Анализ структуры запасов углерода землепользований. Запасы органического углерода почвы в слое 0–100 см на исследованных землепользованиях колеблются в широких пределах (рис. 3а). На пашне запасы $C_{орг}$ максимальны и составляют 272 т С/га, на участке сенокоса – 98 т С/га. В молодом и средневозрастном лесах запасы углерода почвы составляют 63–65 т С/га, и минимальны в спелом лесу – 39 т С/га. Вклад верхних 50 см в запасы углерода почвы максимален на участке пашни (92%) и 15-летнего леса (82%). В слое почвы 0–50 см сенокоса сосредоточено 78% углерода, а в зрелых лесах 64–69%. Запасы $C_{орг}$ в лесной подстилке возрастают в ряду 15-летний (6.6 т С/га), 75-летний (19.4 т С/га) и 100-летний (21.4 т С/га) лес. Запасы $C_{орг}$ в подстилке в процентном соотношении к запасам $C_{орг}$ почвы составляют в молодом лесу 11%, в средневозрастном – 30%, а в спелом – 55%. На лесных участках наибольший суммарный запас углерода почвы и подстилки зафиксирован в 75-летнем лесу (84.1 т С/га) и несколько ниже

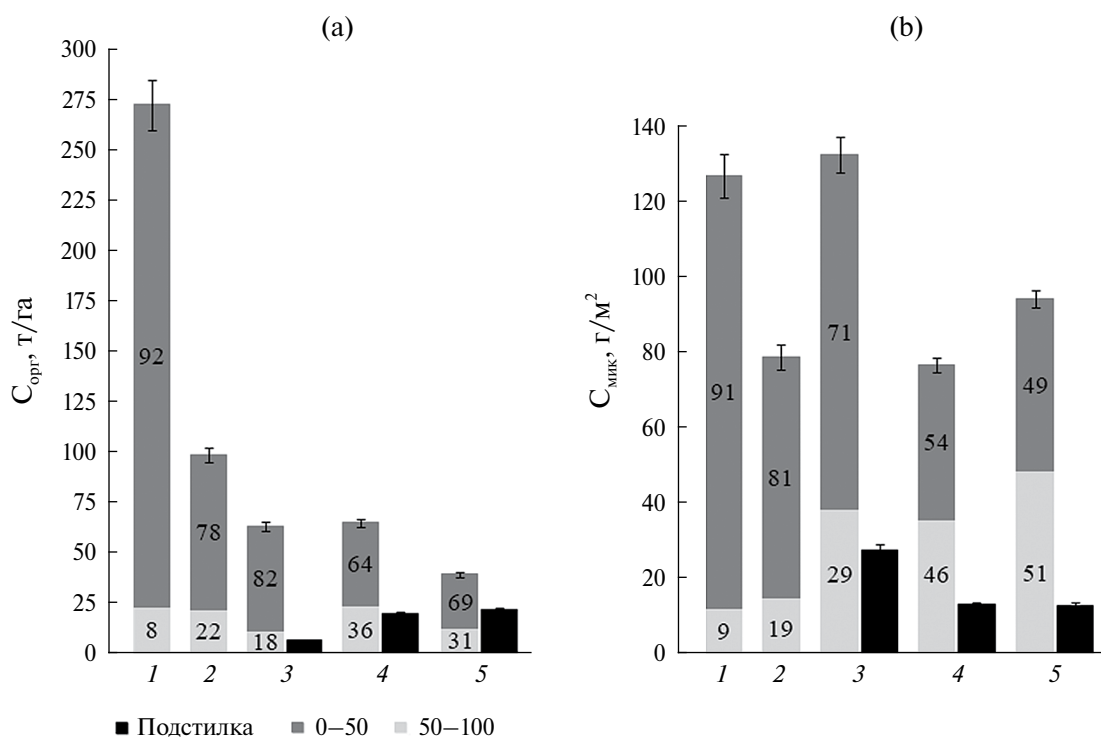


Рис. 3. Вклад разных слоев (%) и общие запасы органического углерода (а) и углерода микробной биомассы (б) в почве ($n = 3$) и подстилке ($n = 6$).

в 15-летнем (69.5 т С/га) и 100-летнем (60.4 т С/га) лесах.

Запасы углерода микробной биомассы в слое почвы 0–100 см максимальны на участке 15-летнего леса (132.4 г С/м²) и пашни (126.8 г С/м²) (рис. 3b). Несколько меньше запасы С_{мик} в почве 100-летнего леса (93.9 г С/м²). На участках сенокоса и 75-летнего леса запасы С_{мик} составляют 76.5–78.6 г С/м². На участках пашни, сенокоса и молодого леса большая часть запасов углерода микробной биомассы сосредоточена в слое почвы 0–50 см (71–91%). В зрелых лесах вклад верхних 50 см почвы в запасы С_{мик} значительно меньше и составляет 49–54%. Запасы С_{мик} в лесных подстилках составляют 27.4 г С/м² в молодом лесу, и 12.7–12.8 г С/м² в зрелых лесах. На лесных участках запасы С_{мик} в подстилке в процентном соотношении к запасам С_{мик} почвы невелики и составляют 21% в 15-летнем, 17% в 75-летнем и 14% в 100-летнем лесах. Суммарные запасы углерода микробной биомассы почвы и подстилки максимальны на участке молодого леса (159.8 г С/м²), и значительно меньше в спелом (106.6 г С/м²) и средневозрастном (89.3 г С/м²) лесах.

Наибольшие запасы углерода в фитомассе напочвенной растительности отмечены на сенокосе (6.4 т С/га), и значительно ниже на пашне (2.5 т С/га) (рис. 4а). На лесных участках данный показатель наименьший и составляет 0.5 т С/га в молодом, и около 1 т С/га в зрелых лесах. На всех землепользованиях вклад подземной фитомассы в запасы углерода напочвенной растительности составляет 56–64%, кроме спелого леса, где надземная фитомасса превалирует, и эта доля составляет 40%. В лесах отмечена линейная зависимость запасов углерода древесной растительности от возраста древостоя (рис. 4б). Запасы углерода в древесной фитомассе увеличиваются в ряду 15-летний (44.6 т С/га) – 75-летний (119.6 т С/га) – 100-летний (154.4 т С/га) лес. Доля надземной фитомассы древесной растительности доминирует над подземной и составляет 80–86%. Запасы углерода в

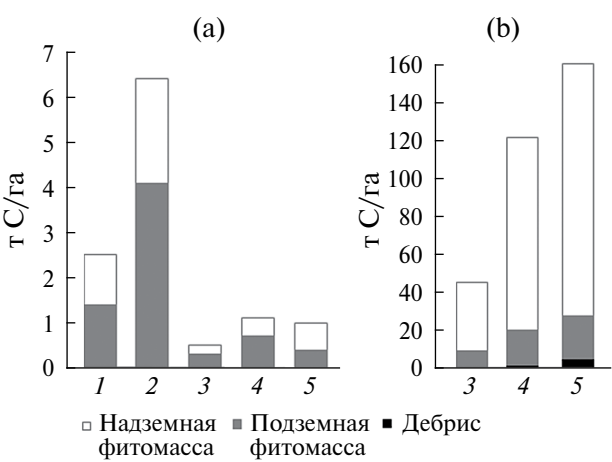


Рис. 4. Структура запасов углерода фитомассы напочвенной (а) и древесной (б) растительности.

дебрисе невелики, возрастают пропорционально древесной фитомассе и составляют 0.1 т С/га в молодом, 1.5 т С/га в средневозрастном и 5.1 т С/га в спелом лесах. Мертвые органические остатки составляют очень небольшую долю от углерода древостоя, на них приходится 0.3% в 15-летнем, 1.2% в 75-летнем и 3.3% в 100-летнем лесах.

Общие экосистемные запасы углерода (табл. 3) максимальны на пашне (274.8 т С/га), они значительно превышают запасы в спелом (220.9 т С/га) и средневозрастном (206.3 т С/га) лесах. Запасы углерода на сенокосе и в молодом лесу близки – 104.8 и 114.7 т С/га соответственно. В исследованном ряду землепользований доля углерода почвы уменьшается от пашни к спелому лесу и составляет на пашне 99%, на сенокосе 94%, в 15-летнем лесу – 55%, в 75-летнем лесу – 31%, и в 100-летнем лесу – 18%. В молодом лесу доля углерода надземной фитомассы в общих запасах составляет 31%. В зрелых лесных экосистемах данный пул является преобладающим – от 49 до 60%. Доля подземной фитомассы невелика на сельскохозяйственных землепользованиях (0.5–4%) и последовательно увеличивается в

Таблица 3. Общие экосистемные запасы углерода (т С/га)/доля каждого пула (%)

Пул, участок	Пашня	Сенокос	Лес		
			15 лет	75 лет	100 лет
Надземная фитомасса	1.1/0.5	2.3/2	35.8/31	101.5/49	132.7/60
Подземная фитомасса	1.4/0.5	4.1/4	9.3/8	19.2/9	22.7/10
Дебрис	—	—	0.1/0.2	1.5/2	5.1/2
Подстилка	—	—	6.6/5.8	19.4/9	21.4/10
Почва, 0–100 см	272.3/99	98.4/94	62.9/55	64.7/31	39.0/18
Сумма	274.8/100	104.8/100	114.7/100	206.3/100	220.9/100

ряду молодой — спелый лес от 8 до 10%. Доля мертвого органического вещества дебриса и подстилки увеличивается с 6% в 15-летнем лесу до 11–12% в зрелых лесах.

ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованных почвах особенности почвообразовательных процессов обусловлены железосодержащими красноцветными породами — локальной мореной и связанными с ней песчаными отложениями. В отличие от других красноцветных почв, распространенных в таежной зоне Европейской России [5, 6, 19], представленные почвы изучены недостаточно. Основным процессом в современной эволюции данных почв является превращение и перераспределение оксидов и гидроксидов железа. Может обнаруживаться слабая тенденция к элювиально-иллювиальному переносу без морфологически выраженного оподзоливания [17]. Гематит ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), обладающий высокой пигментирующей способностью [8], определяет цвет пород и почв. На участках 75-летнего и 100-летнего лесов под сосняками были диагностированы органо-ржавоземы иллювиально-гумусированные, характерные для таежной зоны востока Европейской России и Сибири [14, 16]. В почвах сформированы мощные железисто-метаморфические горизонты с типичной для горизонтов BFM равномерной яркой окраской красноватых тонов [18], в верхней части которых наблюдается миграция органического вещества лесной подстилки. В профиле почвы 75-летнего леса отсутствуют морфологические признаки агрогенной трансформации, обычно обнаруживаемые в постагрогенных лесах данного возраста [10–12]. Возможно, отсутствие листовых пород в составе древостоя и легкий гранулометрический состав почвы способствует ускорению процессов реградации [24, 32]. При этом на участке 15-летнего леса в профиле выделен хорошо выраженный горизонт АУ небольшой мощности. При земледельческом освоении почв на участках пашни и сенокоса формируются идентичные агрозоны железисто-метаморфические с развитыми агрогумусовыми горизонтами. На пашне горизонт Р имеет качественно отличный состав, он сформирован при регулярном добавлении органических остатков, навоза и угля, имеет значительно более темную окраску и ряд химических свойств, позволяющих применить для его обозначения квалификатор Pretic [50]. Для почв пашни, сенокоса и молодого леса характерны признаки цветового метаморфизма, побурения (браунификации) почвенного профиля вследствие диспергирования и растворения оксидов и гидроксидов железа [5, 8], чему способствует сельскохозяйственное освоение.

В почвах отмечено довольно ровное распределение плотности сложения и кислотности по

профилю, при этом показатели находятся в пределах характерных для зональных почв [10, 11]. Значительно отличается почва пашни, где зафиксирована наименьшая плотность сложения (обычно на пахотных почвах плотность максимальна), а также нейтральная реакция по всей глубине. В отличие от зональных почв распределение органического углерода в профилях почв имеет равномерно-аккумулятивный характер. В зрелых лесах содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ крайне низкое по всему профилю, что характерно для почв с преобладанием кварца [34]. Сельскохозяйственное освоение вызывает накопление углерода в гумусовых горизонтах, особенно это выражено на пашне. В исследованных почвах содержание углерода микробной биомассы плавно снижается с глубиной в отличие от зональных почв. Легкий гранулометрический состав и аэрация могут способствовать проникновению растворенного органического вещества в глубокие слои, что объясняет особенности распределения $\text{C}_{\text{мик}}$ и $\text{C}_{\text{орг}}$ в данных почвах [36, 51].

Исследованные железисто-метаморфические почвы характеризуются низким естественным плодородием. В верхнем минеральном горизонте почвы 100-летнего леса основные агрохимические параметры близки к показателям изученного ранее подзола иллювиально-железистого [11]. Здесь отмечены наименьшие значения pH и суммы обменных оснований, минимальное содержание подвижного фосфора и калия, а также общего азота и углерода. В 75-летнем лесу, несмотря на морфологическое сходство почвы с контрольным лесом, наблюдается повышенное содержание P_2O_5 и K_2O , а также меньшая кислотность, что является типичными остаточными признаками аграрного использования участка в прошлом [10, 11]. Сельскохозяйственное освоение способствует значительному улучшению агрохимических показателей, а, следовательно, функций продуктивности и депо элементов питания почв, которые постепенно снижаются в ряду пашня — сенокос — молодой лес. Для почвы пашни характерны нейтральная реакция и очень высокое содержание P_2O_5 и K_2O , а также $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$. Существенное улучшение общего плодородия почвы может объясняться применением компоста с древесной золой и углем, который богат углеродом, калием и обменными основаниями. Применение угля в качестве удобрения почв способствует нейтрализации высокой кислотности, увеличению содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ и доступных элементов питания [4, 9]. Для гумусовых горизонтов характерны близкие значения соотношения C/N, похожая тенденция была отмечена в почвах на шунгитовых породах [12]. По-видимому, отсутствие существенного элювиального переноса и легкий гранулометрический состав почв способствует одинаковой скорости минерализации органического вещества при разных типах землепользования.

В верхних минеральных горизонтах почв зрелых лесов отмечено незначительное содержание углерода микробной биомассы, характерное для сосняков на песчаных почвах [23]. На участках пашни и сенокоса содержание $C_{\text{мик}}$ выше за счет высокого содержания органического углерода сельскохозяйственных почв. В почве молодого леса зафиксированы наиболее высокие показатели $C_{\text{мик}}$, отражающие как достаточное постагрогенное содержание $C_{\text{орг}}$, так и поступление большого количества легкогидролизуемого опада [13]. Доля углерода микробной биомассы в общем содержании органического углерода почвы $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ наиболее высока в спелом лесу, снижается во вторичных лесах, и минимально на сенокосе и пашне, что типично для сельскохозяйственных почв лесной зоны. При этом для всех участков характерны низкие значения микробного метаболического коэффициента QR , диагностирующие экологическое благополучие микробиоценозов. В целом, можно отметить, что микробиологическая активность и трансформационная функция исследованных почв не имеет резких колебаний и не сильно зависит от типа землепользования, как в зональных почвах.

Равномерно-аккумулятивное распределение углерода способствует инверсии накопления $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{мик}}$ в слое почв 0–50 см. Накопление углерода в верхней части профиля обычно наблюдается в лесах, в отличие от сельскохозяйственных угодий, где распределение более равномерное [49]. В железисто-метаморфических почвах, напротив, наибольшие запасы органического и микробного углерода в верхней части профиля наблюдаются на сельскохозяйственных угодьях и в молодом лесу, тогда как в зрелых лесах слой 50–100 см обеспечивает более 30% $C_{\text{орг}}$ и до половины запасов $C_{\text{мик}}$. Структура и величина запасов $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{мик}}$ исследованных почв сопоставима с данными показателями в песчаных подзолах [11]. Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы в слое 0–100 см максимальны на пашне и уменьшаются в ряду пашня – спелый лес. В почвах лесных экосистем запасы $C_{\text{орг}}$ составляют 39–65 т С/га, а суммарный запас углерода в подстилке и почве лесных землепользований (60–84 т С/га) меньше чем в почве сенокоса (98 т С/га). Максимальные запасы углерода микробной биомассы зафиксированы в почве пашни и молодого леса, на остальных участках запасы близки и несколько ниже. Запасы $C_{\text{мик}}$ в лесной подстилке невелики, по-видимому, из-за преобладания на всех участках хвойного древостоя, опад которого обладает пониженной микробной биомассой по сравнению с лиственными породами [3, 10]. Запасы органического углерода пашни в слое 0–100 см составляют 272 т С/га и превышают запасы $C_{\text{орг}}$ спелого леса в 7 раз. Данное значение является максимальным в серии исследованных минеральных почв нормального увлажнения [10–12]. Известно, что почвы с низким

природным плодородием могут накапливать значительные запасы органического углерода при сельскохозяйственном использовании, вместе с тем накопление происходит не в поверхностных, а в более глубоких слоях [25]. Почва пашни является примером искусственно созданной, благодаря длительному периоду окультуривания, внесению органических удобрений и угля [46, 47]. Данный район Карелии уже с IX–XI вв. был населен народами с высокоразвитой культурой земледелия, здесь несколько столетий ведется интенсивное сельскохозяйственное производство [15]. Наличие в почве минералов гематита и гетита, обладающих большим потенциалом связывания углерода, может способствовать накоплению высоких запасов $C_{\text{орг}}$ [41].

В экосистемных запасах углерода железисто-метаморфических почв прослеживаются тренды, характерные для таежной зоны и отмеченные ранее [10, 11]. В лесных экосистемах растительная фитомасса находится в линейной зависимости от возраста древостоя, она составляет основной пул углерода зрелых лесов (58–70%). Доля связанных с фитомассой пулов мертвого органического вещества дебриса и подстилки возрастает с 6% в молодом до 11–12% в средне- и старовозрастных лесах. Доля почвенного $C_{\text{орг}}$ в общих экосистемных запасах углерода очень высока на сельскохозяйственных землепользованиях (99–94%), уменьшается до 55% в молодом лесу и минимальна под зональной растительностью, составляя 31–18%. Общие экосистемные запасы органического углерода нетипичны для таежной зоны, поскольку минимальны на сенокосе и в молодом лесу, имеют средние значения в зрелых лесах и максимальны на пашне. Высокие запасы $C_{\text{орг}}$ в почве пашни являются примером значительного накопления углерода при длительном сельскохозяйственном использовании и грамотном управлении. Полученные данные подчеркивают важность оценки запасов $C_{\text{орг}}$ глубоких слоев почвы, учитывая их большой потенциал связывания углерода [33, 42]. В исследованных землепользованиях максимальная функция секвестрации углерода отмечена на пашне за счет $C_{\text{орг}}$ почвы и в зрелых лесных экосистемах за счет растительной фитомассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На красноцветных моренных и озерно-ледниковых песках и супесях Южной Карелии формируются слабодифференцированные железисто-метаморфические почвы, ведущим почвообразующим процессом в которых является превращение и перераспределение оксидов и гидроксидов железа. При изменении землепользования происходит формирование развитых гумусовых горизонтов и побурение (браунификация) почвенного профиля.

Агрогенная трансформация почв приводит к образованию агроземов железисто-метаморфических, представленных на участках пашни и сенокоса. Постагрогенная трансформация профиля под молодым лесом проявляется в виде преобразования агрогумусового горизонта в серогумусовый. Для почв характерна быстрая реградация, поскольку под средневозрастным и спелым лесами сформированы органо-ржавоземы иллювиально-гумусированные с идентичным морфологическим строением. Кварцевый состав почвообразующих пород обуславливает слабое естественное плодородие исследованных почв. В минеральном горизонте почвы 100-летнего леса отмечены самые низкие агрохимические показатели, которые несколько возрастают в почве 75-летнего леса, являясь остаточными признаками аграрного использования участка в прошлом. При сельскохозяйственном освоении происходит значительное улучшение агрохимических свойств почв, а также функций продуктивности и депо элементов питания. Почва пашни характеризуется нейтральной реакцией и очень высоким содержанием углерода и элементов питания, чему способствует применением компоста с древесной золой и углем. Отсутствие существенного элювиального переноса и легкий гранулометрический состав почв способствуют равномерно аккумулятивному типу распределения $C_{\text{мик}}$ и $C_{\text{орг}}$, а также близким значениям соотношения C/N на всех участках. Тип землепользования незначительно влияет на трансформационную функцию железисто-метаморфических почв в отличие от зональных. Почвы пашни, сенокоса и молодого леса отличаются как высоким содержанием, так и запасами $C_{\text{мик}}$ углерода микробной биомассы. Для всех почв зафиксированы низкие значения микробного метаболического коэффициента QR , при этом доля $C_{\text{мик}}$ в $C_{\text{орг}}$ выше в лесных экосистемах. Преобладание в лесах хвойного опада обуславливает небольшие запасы $C_{\text{мик}}$ в лесной подстилке. Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы пашни максимальны и составляют 272 т С/га благодаря длительному периоду окультуривания. На сенокосе запасы $C_{\text{орг}}$ почвы — 98 т С/га, при этом суммарный запас углерода в подстилке и почве лесных землепользований ниже и составляет 60–84 т С/га. Доля почвенного $C_{\text{орг}}$ в общих экосистемных запасах углерода традиционно высока на сельскохозяйственных землепользованиях (99–94%), уменьшается до 55% в молодом лесу и минимальна под зональной растительностью, составляя 31–18%. Общие экосистемные запасы углерода максимальны на пашне, уменьшаются в зрелых лесах и минимальны на сенокосе и в молодом лесу. Основной пул углерода зрелых лесов составляет растительная фитомасса (58–70%), доля связанных с ней пулов мертвого органического вещества дебриса и подстилки возрастает с 6% в молодом до 11–12% в зрелых лесах. Максимальная

функция секвестрации углерода отмечена на пашне за счет $C_{\text{орг}}$ почвы и в зрелых лесных экосистемах за счет растительной фитомассы.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Т.В. Богдановой, Н.Н. Ивашовой, А.Г. Каштановой, В.А. Карпину и Л.И. Скороходовой за помощь в проведении полевых и аналитических работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках госзадания КарНЦ РАН № FMEN-2022-0012 на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр 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. Астафьева М.М., Фелицын С.Б., Алфимова Н.А. Бактериальные остатки в нижнепротерозойских красноцветных кварцитах // Палеонтологический журнал. 2021. № 4. С. 94–102. <https://doi.org/10.31857/S0031031X21040024>
2. Атлас Карельской АССР / Под ред. Дурова А.Г. М.: ГУГК СССР, 1989. 40 с.
3. Богородская А.В., Шишикин А.С. Динамика микробной биомассы, ее структура и функциональная активность в почвах при лесовозобновлении на вырубках пихтарников Енисейского края // Почвоведение. 2020. № 1. С. 119–130. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010050>
4. Бургхардт В., Хайнц Д., Хоке Н. Показатели почвенного плодородия и запасы органического углерода в почвах овощных грядок и окружающих полей в центре городского промышленного региона Рур в Германии // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1384–1397. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18110114>
5. Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Гилев В.Ю. Минералы железа в почвах на красноцветных отложениях Предуралья // Почвоведение. 2007. № 4. С. 474–486.
6. Водяницкий Ю.Н., Горячкин С.В., Лесовая С.Н. Оксиды железа в буроземах на красноцветных отложениях Европейской России и цветовая диф-

- ференциация почв // Почвоведение. 2003. № 11. С. 1285–1299.
7. Геология Карелии / Под ред. Соколова В.А. Л.: Наука, 1987. 231 с.
 8. Горячкин С.В., Водяницкий Ю.Н., Конюшков Д.Е., Лесовая С.Н., Мергелов Н.А., Титова А.А. Биоклиматогенные и геогенные проблемы географии почв Северной Евразии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2008. № 62. С. 48–68.
 9. Дубровина И.А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21120054>
 10. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Туюнен А.В., Карпечко А.Ю., Геникова Н.В., Медведева М.В., Мамай А.В., Толстогузов О.В., Кулакова Л.М. Влияние типа землепользования на свойства почв и структуру экосистемных запасов углерода в среднетаежной подзоне Карелии // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1392–1406.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21110058>
 11. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Туюнен А.В., Геникова Н.В., Карпечко А.Ю., Медведева М.В. Динамика свойств почв и экосистемные запасы углерода при разных типах землепользования (средняя тайга Карелии) // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1112–1125.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22090052>
 12. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Туюнен А.В., Геникова Н.В., Карпечко А.Ю., Медведева М.В. Почвы и пулы углерода на шунгитовых породах Южной Карелии при разных типах землепользования // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1371–1384.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600464>
 13. Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргун Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14110045>
 14. Жангуров Е.В., Лебедева М.П., Шишков В.А. Минералого-микроморфологическая диагностика особенностей почвообразования северотаежных почв на средне-основных породах Тимана // Почвоведение. 2018. № 11. С. 1372–1383.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18110102>
 15. История Карелии с древнейших времен до наших дней / Под ред. Кораблевой Н.А. и др. Петрозаводск: Периодика, 2001. 944 с.
 16. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 17. Красильников П.В. Современная эволюция почв на красноцветных моренах Карелии и продуктах их переотложения // Экология и география почв. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. С. 5–17.
 18. Лебедева И.И., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 923–934.
 19. Лесовая С.И., Гойло Э.А., Чижикова Н.П. Минералогический состав красноцветных отложений и его влияние на почвообразование в северотаежной подзоне Европейской территории России // Почвоведение. 2005. № 8. С. 1001–1011.
 20. Медведев П.В., Голубев А.И., Куликова В.С. Вепсий // Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минералогия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 119–123.
 21. Минерально-сырьевая база Республики Карелия Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи / Под ред. Михайловой В.П., Анимовой В.Н. Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. 356 с.
 22. Природные комплексы Вепской волости: особенности, современное состояние, охрана и использование / Под ред. Громцева А.Н. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 278 с.
 23. Стольников Е.В., Ананьева Н.Д., Чернова О.В. Микробная биомасса, ее активность и структура в почвах старовозрастных лесов европейской территории России // Почвоведение. 2011. № 4. С. 479–494.
 24. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16010111>
 25. Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatté C. Atmosphere – soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature. 2018. V. 559 (7715). P. 599–602.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3>
 26. Dawson J.J.C., Smith P. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management // Science of The Total Environment. 2007. V. 382 (2–3). P. 165–190.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>
 27. Deng L., Zhu G.Y., Tang Z.S., Shangguan Z.P. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks // Global Ecology and Conservation. 2016. V. 5. P. 127–138.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.12.004>
 28. Downie A.E., Van Zwieten L., Smernik R.J., Morris S., Munroe P.R. Terra Preta Australis: reassessing the carbon storage capacity of temperate soils // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2011. V. 140(1–2). P. 137–147.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.020>
 29. Garnett T., Appleby M.C., Balmford A., Bateman I.J., Benton T.G., Bloomer P., Burlingame B. et al.

- Sustainable intensification in agriculture: premises and policies // *Science*. 2013. V. 341(6141). P. 33–34.
<https://doi.org/10.1126/science.123448>
30. *Glaser B., Birk J.J.* State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio) // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. V. 82. P. 39–51.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>
 31. *Guo L.B., Gifford R.M.* Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis // *Global Change Biology*. 2002. V. 8(4). P. 345–360.
<https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
 32. *Hansson K., Olsson B.A., Olsson M., Johansson U., Kleja D.B.* Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden // *Forest Ecology and Management*. 2011. V. 262. P. 522–530.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.021>
 33. *Jarmain C., Cummins T., Jovani-Sancho A.J., Nairn T., Premrov A., Reidy B., Renou-Wilson F., Tobin B., Walz K., Wilson D., Byrne K.A.* Soil organic carbon stocks by soil group for afforested soils in Ireland // *Geoderma Regional*. 2023. V. 32. P. e00615.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00615>
 34. *Kogel-Knabner I., Amelung W.* Soil organic matter in major pedogenic soil groups // *Geoderma*. 2021. V. 384. P. 114785.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114785>
 35. *Kuznetsov N.B., Kolodyazhnyi S.Yu., Romanyuk T.V., Strashko A.V., Baluev A.S., Terekhov E.N., Mezhelevskaya S.V., Dubensky A.S., Sheshukov V.S.* On the time and conditions of formation of the Shoksha quartzite-sandstones of the South Onega Depression based on the new data from isotope geochronology // *Geodynamics Tectonophysics*. 2023. V. 14(1). P. 0685.
<https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-1-0685>
 36. *Liang Y., Rillig M.C., Chen H.Y.H., Shan R., Ma Z.* Soil pH drives the relationship between the vertical distribution of soil microbial biomass and soil organic carbon across terrestrial ecosystems: A global synthesis // *Catena*. 2024. V. 238. P. 107873.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107873>
 37. *Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. V. 292. P. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
 38. *Munsell A.* Munsell Soil Color Charts. Revised Washable Edition. Munsell Color. New Windsor. N.Y. 2000.
 39. *Ostle N.J., Levy P.E., Evans C.D., Smith P.* UK land use and soil carbon sequestration // *Land Use Policy*. 2009. V. 26S. P. 274–283.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.006>
 40. *Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L. et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. V. 333(6045). P. 988–993.
<https://doi.org/10.1126/science.1201609>
 41. *Rodríguez-Albarracín H.S., Demattê J.A.M., Rosin N.A., Contreras A.E.D., Silvero N.E.Q., Cerri C.E.P., De Sousa Mendes W., Tayebi M.* Potential of soil minerals to sequester soil organic carbon // *Geoderma*. 2023. V. 436. P. 116549.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116549>
 42. *Rumpel C.* Opportunities and threats of deep soil organic matter storage // *Carbon Management*. 2014. V. 5. P. 115–117.
<http://dx.doi.org/10.1080/17583004.2014.912826>
 43. *Schiefer J., Lair G.J., Blum W.E.H.* Potential and limits of land and soil for sustainable intensification of European agriculture // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2016. V. 230. P. 283–293.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.021>
 44. *Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. V. 478. P. 49–56.
<https://doi.org/10.1038/nature10386>
 45. *Solomon D., Lehmann J., Fraser J.A., Leach M., Amanor K., Frausin V., Kristiansen S.M., Millimouno D., Fairhead J.* Indigenous African soil enrichment as a climate-smart sustainable agriculture alternative // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2016. V. 14(2). P. 71–76.
<https://doi.org/10.1002/fee.1226>
 46. *Urbanski L., Schad P., Kalbitz K., van Mourik J., Gehrt E., Kögel-Knabner I.* Legacy of plaggén agriculture: High soil organic carbon stocks as result from high carbon input and volume increase // *Geoderma*. 2022. V. 406. P. 115513.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115513>
 47. *Wiedner K., Schneeweiß J., Dippold M.A., Glaser B.* Anthropogenic Dark Earth in Northern Germany – the nordic analogue to terra preta de Índio in Amazonia // *Catena*. 2015. V. 132. P. 114–125.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.024>
 48. *Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., von Lützow M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B. et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. 2019. V. 333. P. 149–162.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
 49. *Wiesmeier M., von Lützow M., Sporlein P., Geuss U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Kögel-Knabner I.* Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: the importance of soil types // *Soil & Tillage Research*. 2015. V. 146. P. 296–302.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.003>
 50. *World Reference Base for Soil Resources 2014.* International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome.

51. Xia Q., Rufty T., Shi W. Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties // *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. V. 149. P. 107953.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>
52. Xiong X., Grunwald S., Myers D.B., Ross C.W., Harris W.G., Comerford N.B. Interaction effects of climate and land use / land cover change on soil organic carbon sequestration // *Science of The Total Environment*. 2014. V. 493. P. 974–982.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.088>
53. You M., Zhu-Barker X., Hao X-X., Li L-J. Profile distribution of soil organic carbon and its isotopic value following long term land-use changes // *Catena*. 2021. V. 207. P. 105623.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105623>

Ecosystem Carbon Stocks for Different Types of Land Use on Iron-Metamorphic Soils of South Karelia

I. A. Dubrovina^{1, *}, E. V. Moshkina², A. V. Tuyunen²,
N. V. Genikova², A. Yu. Karpechko², and M. V. Medvedeva²

¹*Institute of Biology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185910 Russia*

²*Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185910 Russia*

*e-mail: vorgo@mail.ru

Iron-metamorphic soils of normal moistening in the middle taiga subzone of Karelia were investigated. 100-year-old pine forest as a control, arable land, hayfield, and also 15-year-old and 75-year-old pine forests naturally reforestation on former farmland were studied. The influence of different types of land use on the morphological structure of soils and the main chemical and microbiological indicators of the upper horizons was analyzed. The stocks of organic carbon (C_{org}) and microbial biomass carbon (C_{mic}) in a meter layer of soils and sites carbon pools structure were investigated. At all sites a uniform accumulative type of carbon distribution and similar values of C/N ratio (16–18) were observed in the soils. The soils are characterized by poor natural fertility and low agrochemical indicators, which significantly improve with agricultural development. The highest content of C_{org} (4.9%) and N_{tot} (0.3%) at low bulk density and a neutral pH was noted on the arable land. In the soil of a young forest was recorded the greatest C_{mic} content (419 mg C/kg). In arable and hayfield areas, C_{mic} decreases to 209–211 mg C/kg and is minimal in soils of mature forests (144–175 mg C/kg). Microbial biomass carbon stocks in the 0–100 cm soil layer range from 76.5–132.4 g C/m² in the studied areas. In forest soils, litter C_{mic} stocks are 12.7–27.4 g C/m². Soil C_{org} stocks in a meter layer are maximum in arable land and amount to 272 t C/ha, and decrease in the range of hayfields – mature forest from 98 to 39 t C/ha. The total ecosystem carbon stocks are maximum in arable land (275 t C/ha), which exceeds stocks in mature forests – 206–221 t C/ha. C_{org} stocks in hayfield and young forest amount to 105–115 t C/ha.

Keywords: soil functions, soil organic carbon, microbial biomass carbon, Cambisols