

УДК 631.4

ПОЧВЫ И ПУЛЫ УГЛЕРОДА НА ШУНГИТОВЫХ ПОРОДАХ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2023 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 13.03.2023 г.

После доработки 17.06.2023 г.

Принята к публикации 21.06.2023 г.

Исследованы азональные органо-аккумулятивные почвы на шунгитовых породах и влияние типа землепользования на их свойства и экосистемные запасы углерода. Проанализированы изменения в строении почвенных профилей, основные химические и микробиологические показатели верхних горизонтов, запасы $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{мик}}$ почвы в метровом слое и структура углеродных пулов участков. Исследовали сосняк в качестве контроля, пашню, сенокос, а также молодой ольшаник и средневозрастной смешанный лес. В отличие от зональных почв изменение землепользования не ведет к значительной трансформации свойств шунгитовых почв. Наибольшее влияние оказывает удаление камней, способствующее образованию развитых пахотных горизонтов. Для почв характерны высокая скелетность, слабодифференцированный маломощный профиль, низкие значения плотности и близкая к нейтральной реакция среды. Большой разброс значений содержания $C_{\text{орг}}$ от 1.6 до 11.7% обусловлен неоднородным составом почвообразующих пород. Сельскохозяйственное освоение способствует накоплению обменных оснований, подвижных калия и фосфора, содержание которых в шунгитовых почвах повышено изначально. Для всех участков характерна высокая скорость минерализации органического вещества (C/N не выше 17). В почвах отмечено небольшое содержание $C_{\text{мик}}$ (84–245 мг С/кг), что может быть следствием малой доступности субстрата вследствие литогенного происхождения углерода и повышенных концентраций тяжелых металлов и лантаноидов в шунгитовых породах. Запасы органического углерода почв колеблются в пределах 17–251 т С/га, а запасы $C_{\text{мик}}$ – в пределах 6–43 г С/м². Общие экосистемные запасы углерода (надземная и подземная фитомасса, дербис, подстилка и почва) максимальны на сенокосе (259 т С/га) и минимальны в молодом лесу (74 т С/га). Общий запас углерода на участках пашни, средневозрастного и контрольного лесов находится в пределах 169–211 т С/га.

Ключевые слова: изменение землепользования, почвенные функции, запасы углерода, органический углерод почвы, углерод микробной биомассы, органо-аккумулятивные почвы

DOI: 10.31857/S0032180X23600464, **EDN:** AIGFIQ

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климата и рост глобальной температуры обусловлены в основном антропогенной эмиссией, в целях снижения которой необходимо не только ограничение выбросов парниковых газов, но и применение стратегий активной секвестрации углерода. Наиболее эффективным и воспроизводимым методом считается биологическое улавливание и фиксация CO_2 посредством фотосинтетического поглощения наземными экосистемами, которые являются значимым звеном глобального цикла углерода [51]. Часть растительного органического углерода поступает в почву в виде экссудата и с растительными остатками, которые затем долгосрочно аккумулируют-

ся в органическом веществе почвы посредством микробиоты. Образование стабильных соединений органического углерода почвы зависит от типа растительности, почвенных и ландшафтных характеристик местности, а также от агротехнических методов управления. В широком смысле тип, продуктивность и распространение тех или иных землепользований влияет на общий баланс потерь/накопления углерода в растительности и почвах [40, 46].

Считается, что деградировавшие экосистемы обладают большим потенциалом связывания углерода и увеличения запасов органического вещества [51]. Среди подходов управления землепользованиями с потенциалом увеличения накопления уг-

лерода выделяются шадящее сельское хозяйство, агролесоводство, лесовосстановление и обводнение водно-болотных угодий и торфяников. Известно, что восстановленные леса обладают высоким потенциалом связывания углерода и могут компенсировать до 68% глобальных выбросов CO₂ [39]. Скорость поглощения углерода посредством лесовосстановления зависит от климатических условий, типа почвы и вида деревьев. Большая интенсивность накопления углерода биомассы наблюдается в молодых насаждениях, лиственных лесах и во влажном холодном климате. При этом динамика пула углерода почвы при лесовосстановлении неоднозначна и недостаточно изучена. С другой стороны, масштабное восстановление лесов может конкурировать с сельскохозяйственными угодьями, что может снижать продовольственную безопасность, поскольку земли, отведенные под сельское хозяйство, являются ограниченным ресурсом и обеспечивают материальную базу для жизни [45]. Для оптимизации стратегического управления выбросами углерода и соблюдения баланса между различными землепользованиями необходим пространственно-ориентированный подход с учетом местных условий [41, 51].

Для оценки региональных особенностей различных землепользований ранее были исследованы экосистемы, приуроченные к типичным зональным почвам средней тайги Карелии [8, 9]. В данной работе изучены землепользования на азональных темноцветных почвах Заонежского полуострова, связанных с месторождениями шунгитов. Собираемый термин “шунгит” объединяет породы с высоким содержанием общего органического углерода (<10–98 мас. %), в состав которых также входят кремнезем, оксиды алюминия и железа [42, 49]. Район распространения шунгитов приурочен к палеопротерозойской Онежской структуре на востоке Фенноскандинавского щита. Шунгиты залегают в регионально метаморфизованных отложениях верхней подсвиты заонежской свиты. До 60–70% общей мощности заонежской свиты представлено магматическими породами, но также встречаются осадочные и вулканогенно-осадочные образования [16, 47]. Месторождения шунгитов характеризуются минералого-петрографическим разнообразием пород, они включают туфы, алевриты, известняки и габбро-долериты [25]. Массовое отложение углерода в заонежской свите получило название феномен “Шуньга”, и описывается как глобальная и синхронная эпоха (2.1–1.85 млрд лет назад) масштабного накопления органического вещества в ряде регионов Земли [33, 48]. Шунгиты представляют собой неграфитизируемое неупорядоченное углеродистое вещество с глобулярной фуллереноподобной надмолекулярной структурой с низким индексом Н/С [44]. Наиболее известная классификация шунгитов основывается на процентном со-

держании углерода и делит их на 5 классов [5]. Генезис шунгитов связывают с окаменением раннепалеопротерозойской нефти возрастом около 2 млрд лет [32]. Биогенную природу шунгитов подтверждает их биогеохимический и изотопный состав [4, 31, 53].

Почвообразование в Заонежье идет на элювации шунгитовых сланцев и шунгитовой морене. Почвообразующие породы очень разнообразны по химическому и гранулометрическому составу, а содержание шунгитового материала в породах сильно варьирует, поэтому регион характеризуется сложностью и пестротой почвенного покрова [17, 38]. Коренные породы заонежской свиты отличаются высокими концентрациями некоторых элементов (As, U, Mo, V, Ni) [32]. Четвертичные отложения наследуют элементы из коренных пород, но общий уровень их природного загрязнения значительно ниже. В целом почвы на шунгитовых породах отличаются от фоновых региональных почв повышенным содержанием как макроэлементов, важных для питания растений, так и редкоземельных и токсичных элементов. Концентрация некоторых из них может превышать кларковые значения [14, 21].

О плодородии местных почв было известно давно, согласно историческим данным освоение Заонежья произошло ранее XIV в., это один из основных сельскохозяйственных районов Карелии [13]. По некоторым оценкам, в период максимального развития территории около 30% полуострова было окультурено и использовалось в качестве пашен и сенокосов, а площадь лесных массивов значительно сократилась [3, 12]. До настоящего времени здесь ведется активное сельскохозяйственное производство.

Целью работы являлось исследование влияния разных типов землепользования на свойства и функции почв, сформированных на шунгитовых породах Карелии, а также на структуру общих запасов углерода участков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в пределах Заонежского полуострова в окрестностях пос. Толвуй Медвежьегорского района Карелии. Участок расположен в Южном приозерном агроклиматическом районе, характеризующемся наиболее благоприятными климатическими условиями. Средняя температура января находится в пределах от –8 до –10°C, июля +16°C. Продолжительность безморозного периода составляет 120–130 дней. Сумма эффективных температур за вегетационный период около 1500°C при 650 мм осадков в год [2]. Естественная растительность района исследования относится к средне-таежной подзоне зеленомошных хвойных лесов. Заонежье характе-

Таблица 1. Характеристика участков

Рельеф, координаты	Землепользование	Растительность	Почва
Плоский выровненный участок 62°28'0.7" N, 35°18'41.9" E	Пашня, дискование, двупольный севооборот (картофель — многолет- ние травы)	Козлятник восточный (<i>Galega orientalis</i> Lam.) 30%, посевы сильно засорены, в основном злаковыми травами	Агрогумусовая темнопрофильная Mollic Umbrisol (Aric)
Верхняя часть пологого склона 62°30'34.0" N, 35°18'17.5" E	Сенокос, сенокосение регулярное, 1—2 раза в год	Луг злаково-разнотравный с преобла- данием тимopheевки луговой (<i>Phleum</i> <i>pratense</i> L.), ежи сборной (<i>Dactylis glom-</i> <i>erata</i> L.), пырея ползучего (<i>Elytrigia rep-</i> <i>ens</i> L.) и крапивы двудомной (<i>Urtica</i> <i>dioica</i> L.)	Агрогумусовая темнопрофильная Endoleptic Mollic Umbrisol (Hyperhumic)
Верхняя часть пологого склона 62°29'57.5" N, 35°16'50.1" E	17-летний лес, молодой древостой, I класс бонитета	Ольшаник злаково-разнотравный, в напочвенном покрове доминируют щучка дернистая (<i>Deschampsia</i> <i>cespitosa</i> L.), земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.), ястребинка зонтич- ная (<i>Hieracium umbellatum</i> L.)	Литозем серогумусо- вый темнопрофиль- ный Skeletal Umbric Lepto- sol
Верхняя часть гряды 62°30'01.8" N, 35°16'52.8" E	70-летний лес средневозрастной древостой, II класс бонитета	Сосняк разнотравно-кустарничковый, в напочвенном покрове преобладают ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i> L.), малина обыкновенная (<i>Rubus idaeus</i> L.) и герань лесная (<i>Geranium sylvaticum</i> L.)	Серогумусовая темнопрофильная постагрогенная Skeletal Umbrisol
Верхняя часть каменистой гряды 62°28'49.5" N, 35°17'28.4" E	70-летний лес средневозрастной древостой (контроль), III класс бонитета	Сосняк чернично-брусничный, в напочвенном покрове преобладают черника обыкновенная (<i>Vaccinium</i> <i>myrtillus</i> L.), брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.), ландыш май- ский (<i>Convallaria majalis</i> L.)	Серогумусовая темнопрофильная Epi- leptic Skeletal Umbrisol

ризуется денудационно-тектоническим холми-сто-грядовым рельефом. Как сказано выше, почвообразование на большей части Заонежского полуострова идет на элюво-делювии шунгитовых сланцев и шунгитовой морене, что способствует развитию специфических темноцветных органо-аккумулятивных почв (Umbrisols).

Ключевые участки (табл. 1) выбирали на возвышенных элементах рельефа с почвами нормального увлажнения. Сельскохозяйственные землепользования (пашня и сенокос) принадлежат ОАО «Совхоз «Толвуйский» и находятся в длительном хозяйственном использовании. Молодой лес произрастает на заброшенном неулущенном пастбище. Средневозрастной лес представляет собой участок заросшей пашни с хорошо сохранившимися «ровнищами» из камней. Контрольный участок леса расположен на завалуненной возвышенности с близким залеганием коренных пород. Несмотря на то, что контрольный древостой не старовозрастной, его производительность и каче-

ство (сосна без примеси лиственных пород) типичны для зональных сообществ, произрастающих в схожих топо-экологических условиях. Выбор некоторых участков на неудобье обусловлен тем, что изучаемая территория в прошлом подвергалась активному сельскохозяйственному освоению [12], которое поддерживается и в настоящее время. В районе исследования отсутствуют относительно недавно заброшенные пашни (сенокосы) и старовозрастные леса, поэтому невозможно подобрать некоторые типы землепользований с более адекватными почвенными и растительными условиями.

На ключевых участках проводили геоботаническое описание, определение возраста и запасов древостоя и расчет запасов углерода в растительности. Основные экосистемные запасы углерода определяли в пяти пулах: надземная фитомасса (древостой и напочвенный покров); подземная фитомасса; дебрис — сухостой и валеж; лесная подстилка; углерод почвы в слое 0—100 см. Запасы

напочвенной фитомассы исследовали методом укосов, а запасы древостоя рассчитывали на основании таксационных измерений по ОСТ 56–69–83 и показателей плотности древесины, после чего данные по общей фитомассе распределялись по отдельным фракциям. При пересчете запасов фитомассы в запасы углерода для древесных фракций и хвои использовали коэффициент 0.5, для листьев и трав – 0.45.

Производили морфологическое описание почв, отбирали образцы почв (по горизонтам и из верхних минеральных горизонтов в прикопках) и лесной подстилки в шести повторностях. В почвах и подстилках определяли плотность сложения (ρ) весовым методом, содержание и запасы органического углерода ($C_{орг}$) и углерода микробной биомассы ($C_{мик}$). Поскольку разделение литогенного углерода шунгитов и педогенного углерода методически непроработано [15], в мелкоземке определяли общий углерод методом высокотемпературного каталитического сжигания на анализаторе TOC-L CPN Shimadzu, который принимали как общий органический углерод. Углерод микробной биомассы определяли методом субстрат-индуцированного дыхания, которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой и инкубации в течение 1.5–2 ч при температуре 22°C. Изменение концентрации CO_2 регистрировали газоанализатором на основе NDIR-сенсора SenseAir.

Также в почвах определяли кислотность (pH_{KCl}) потенциометрически; содержание общего азота ($N_{общ}$) по Кьельдалю на анализаторе азота Buchi; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) со спектрофотометрическим окончанием на спектрофотометре UV-1800 Shimadzu и калия (K_2O) с атомно-эмиссионным окончанием на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 Shimadzu по Кирсанову; сумму обменных оснований (S) по Каппену–Гильковицу; микробный метаболический коэффициент QR , соотношения C/N и $C_{мик}/C_{орг}$ расчетными методами. Подробная схема отбора проб, анализа почв и растительности, а также статистической обработки данных описана ранее [8]. Поскольку почвы на шунгитах в основном каменистые, то запасы углерода в почве рассчитывали по следующей 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, %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфология профиля. Почвы исследованных участков имеют легкосуглинистый грануломет-

рический состав, среднюю и сильную степень каменистости и укороченный слабодифференцированный профиль (рис. 1). Для верхних почвенных горизонтов характерна мелкокомковатая структура, а преобладающими тонами окраски почв являются 7.5YR 3/1–2/1 (темно-коричневый, черный) по шкале Манселла [50]. На контрольном участке леса почва диагностирована как серогумусовая темнопрофильная (Epileptic Skeletic Umbrisol). Под лесной подстилкой мощностью в среднем 3.5 см развит серогумусовый горизонт, подразделяющийся на два подгоризонта по плотности, подстилаемый на глубине 48 см плотной породой. Аналогичный профиль характерен для участка средневозрастного леса с незначительными признаками постагрогенной трансформации в нижней части серогумусового горизонта, который подстилается элювием шунгита. Почва диагностирована как серогумусовая темнопрофильная постагрогенная (Skeletic Umbrisol). На участке молодого леса лесная подстилка маломощная, около 1.5 см, серогумусовый горизонт с большим содержанием камней на глубине 14 см подстилается обломками шунгитовых сланцев, переходящих на глубине 40 см в плотную породу. Почва данного участка не подвергалась значительному освоению и представляет собой литозем серогумусовый темнопрофильный (Skeletic Umbric Lertisol). На участках пашни и сенокоса, напротив, проводились мероприятия по окультуриванию и удалению камней. Почвы данных участков диагностированы как агрогумусовые темнопрофильные. Почва пашни (Mollic Umbrisol (Aric)) имеет наиболее развитый профиль, в верхней части агрогумусового горизонта мощностью 25 см сформирована дернина до 5 см. (В год исследования были посеы козлятника, засоренного злаковыми травами, корни которых и составляют дернину). Горизонт Р подразделяется на два подгоризонта по плотности, подстилается серогумусовым горизонтом, плавно переходящим в шунгитовую морену. Почва сенокоса (Endoleptic Mollic Umbrisol (Hyperhumic)) имеет мощную дернину до 8 см, агрогумусовый и серогумусовый горизонты, подстилаемые элювием шунгита, который переходит в плотную породу на глубине 65 см.

Агрофизические и агрохимические показатели почв. Исследованные почвы характеризуются низкой плотностью сложения в пределах 0.65–1.19 г/см³ в верхних горизонтах (рис. 2, табл. 2). На участке контроля и молодого леса значения плотности не меняются с глубиной, тогда как на сельскохозяйственных угодьях и участке средневозрастного леса плотность незначительно возрастает до 1.14–1.24 г/см³. Реакция среды почв на участках пашни, молодого и средневозрастного лесов близка к нейтральной и составляет 5.6–5.9 ед. pH. Для почвы сенокоса характерна нейтральная реакция (pH_{KCl} 6.3), а для контроль-

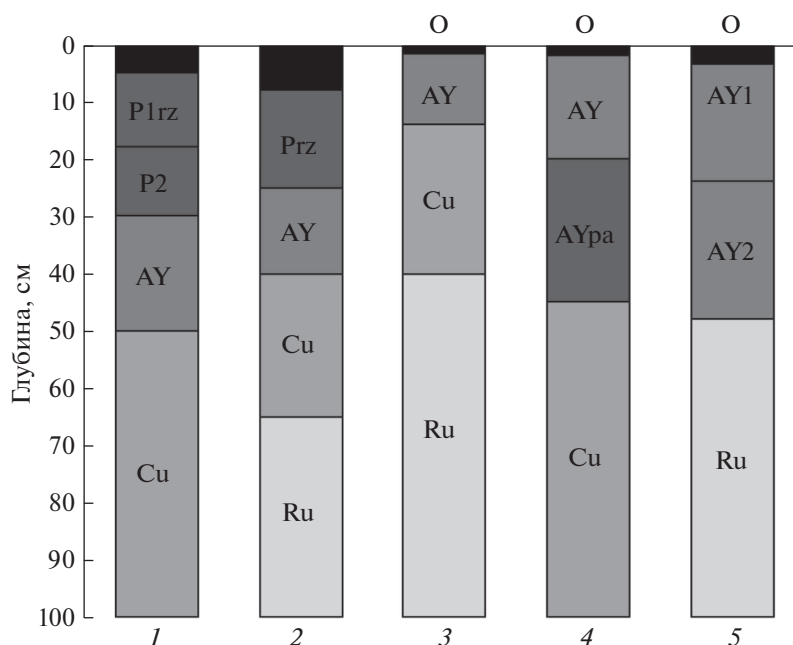


Рис. 1. Схематическое строение почвенных профилей: 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 17 лет; 4 – лес, 70 лет; 5 – лес, 70 лет (контроль).

ного леса – сильноокислая (рН 3.7). В средневозрастном и молодом лесах значения рН снижаются с глубиной до 4.6–5.1, тогда как на других участках рН_{KCl} практически не меняется по профилю.

Распределение органического углерода в профилях имеет равномерно-аккумулятивный тип

на всех участках и различается лишь содержанием $C_{орг}$. Содержание углерода в верхних горизонтах почв пашни, средневозрастного и контрольного лесов очень близко и составляет 6.3–6.4%. Для литозема под молодым лесом отмечено низкое содержание $C_{орг}$ (1.6%), тогда как в почве сенокоса

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

Показатель	Пашня	Сенокос	Лес		
			17 лет	70 лет	70 лет (контроль)
Горизонт	Р	Р	AY	AY	AY
Глубина взятия образца, см	10–18	10–20	4–14	5–15	10–20
Плотность, г/см ³	$0.89 \pm 0.04a$	$0.65 \pm 0.04b$	$1.19 \pm 0.01c$	$0.72 \pm 0.07ab$	$0.65 \pm 0.06b$
рН _{KCl}	$5.94 \pm 0.06ab$	$6.33 \pm 0.06b$	$5.61 \pm 0.20a$	$5.66 \pm 0.11a$	$3.74 \pm 0.16c$
P ₂ O ₅ , мг/кг	$1143.8 \pm 72.8a$	$1977.5 \pm 103.5b$	$14.5 \pm 2.1c$	$14.5 \pm 1.2c$	$34.3 \pm 1.0c$
K ₂ O, мг/кг	$345.2 \pm 34.3ab$	$532.4 \pm 92.2b$	$179.1 \pm 28.4ac$	$293.1 \pm 35.3ac$	$84.4 \pm 4.1c$
S, смоль(экв)/кг	$34.6 \pm 1.11a$	$45.9 \pm 0.45b$	$16.10 \pm 1.48c$	$26.15 \pm 2.05d$	$4.10 \pm 1.06e$
C _{орг} , %	$6.37 \pm 0.12a$	$11.70 \pm 0.32b$	$1.59 \pm 0.18c$	$6.28 \pm 1.01a$	$6.41 \pm 0.98a$
N _{общ} , %	$0.45 \pm 0.01a$	$0.87 \pm 0.03b$	$0.18 \pm 0.02c$	$0.44 \pm 0.07a$	$0.43 \pm 0.07a$
C/N	$16.50 \pm 0.15ad$	$15.78 \pm 0.15ab$	$10.22 \pm 0.24c$	$16.63 \pm 0.12d$	$17.51 \pm 0.14e$
C _{мик} , мг C/кг	$184.3 \pm 21.3a$	$244.8 \pm 38.3b$	$83.5 \pm 13.5c$	$236.9 \pm 30.4b$	$124.2 \pm 33.1a$
C _{мик} /C _{орг} , %	$0.32 \pm 0.02a$	$0.23 \pm 0.03b$	$0.56 \pm 0.03c$	$0.40 \pm 0.04a$	$0.22 \pm 0.03b$
QR	$0.17 \pm 0.02ab$	$0.12 \pm 0.03b$	$0.37 \pm 0.05c$	$0.34 \pm 0.06ac$	$0.41 \pm 0.05c$

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

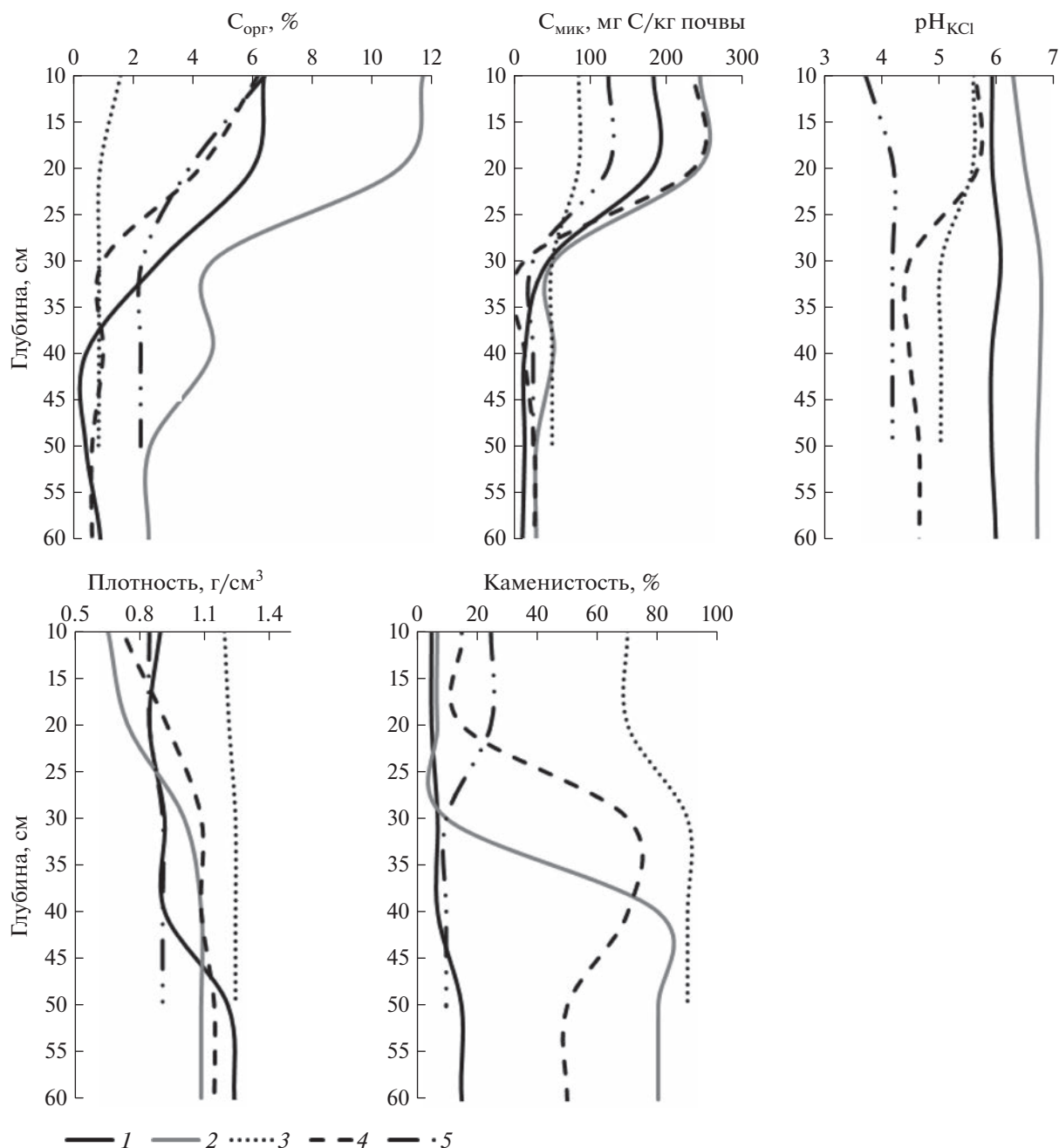


Рис. 2. Изменение почвенных свойств по профилю (среднее, $n = 3$): 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 17 лет; 4 – лес, 70 лет; 5 – лес, 70 лет (контроль).

са зафиксирован максимум углерода (11.7%). Похожая тенденция наблюдается и для общего азота, его содержание составляет 0.43–0.45% в почвах пашни, средневозрастного и контрольного лесов. Самое низкое содержание $N_{общ}$ отмечено в почве молодого леса (0.18%), а максимальное – на сенокосе (0.87%). В почве 17-летнего леса соотношение C/N узкое (10), тогда как на остальных участках оно имеет близкие значения и составляет 16–17.

Для показателей доступного фосфора характерны большие колебания значений. В сельскохозяйственных почвах содержание P_2O_5 очень высокое (1144–1978 мг/кг), тогда как оно составляет всего 14.5 мг/кг на участках молодого и средневозрастного лесов и 34.3 мг/кг в контрольном лесу. Содержание доступного калия колеблется от 532 мг/кг на сенокосе до 84 мг/кг в почве контрольного леса. Значение суммы обменных оснований (S) максимально в почвах пашни и сенокоса.

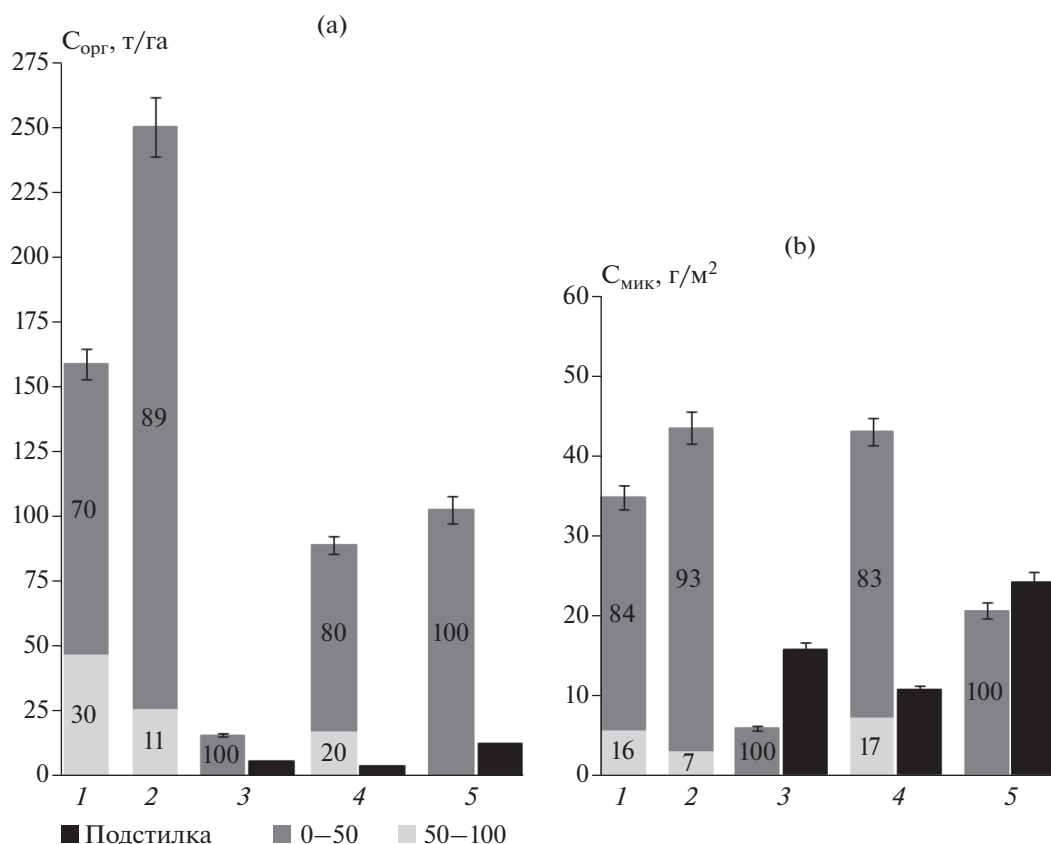


Рис. 3. Вклад разных слоев (%) и общие запасы органического углерода (а) и углерода микробной биомассы (б) в почве ($n = 3$) и подстилке ($n = 6$). Планки погрешности – ошибка среднего.

са (35–46 смоль(экв)/кг), несколько снижается на участках молодого и средневозрастного лесов (16–26 смоль(экв)/кг) и минимально в почве контрольного участка (4 смоль(экв)/кг).

Микробиологические показатели почв. Распределение углерода микробной биомассы имеет регрессивно-аккумулятивный тип для всех участков, кроме 17-летнего леса, где содержание $C_{мик}$ снижается более равномерно. Максимальное содержание углерода микробной биомассы зафиксировано в верхних горизонтах почв сенокоса (245 мг С/кг) и средневозрастного леса (237 мг С/кг). На пашне и контрольном участке значения показателя несколько ниже (124–184 мг С/кг), а минимум $C_{мик}$ отмечен в почве молодого леса (84 мг С/кг). Доля $C_{мик}$ в общем $C_{орг}$ минимальна в почвах сенокоса и контрольного участка (0.22–0.23%) незначительно возрастает в почвах пашни и средневозрастного леса (0.32–0.40%), и максимальна в молодом лесу (0.56%). Значения микробного метаболического коэффициента QR минимальны на сельскохозяйственных почвах (0.12–0.17), а на лесных участках имеют значения в пределах 0.34–0.41 (табл. 2).

Анализ структуры запасов углерода землепользований. На исследованных землепользованиях

запасы органического углерода почвы в слое 0–100 см имеют сильный разброс значений от 16.5 т С/га в литоземе 17-летнего леса до 250.7 т С/га в почве сенокоса (рис. 3а). На лесных участках запасы $C_{орг}$ почвы составляют 89.8–103.2 т С/га, а на пашне достигают 159.4 т С/га. На участках молодого и контрольного лесов, где плотная подстилаяющая порода находится близко к поверхности, вклад верхних 50 см почвы в запасы углерода составляет 100%. На остальных участках в слое почвы 0–50 см сосредоточено от 70 до 89% углерода. Запасы $C_{орг}$ подстилки невелики и возрастают в ряду средневозрастной лес (4.4 т С/га), молодой лес (6.6 т С/га) и контроль (13.1 т С/га). Запасы углерода в подстилке в процентном соотношении к запасам $C_{орг}$ почвы составляют 40% в молодом лесу, 5% в средневозрастном лесу и 13% на участке контроля. Суммарный запас органического углерода почвы и подстилки максимален на участке контроля (116.3 т С/га), несколько снижается в средневозрастном лесу (94.2 т С/га) и минимален в молодом лесу (23.1 т С/га).

Запасы углерода микробной биомассы почвы в слое 0–100 см составляют около 43 г С/м² на сенокосе и в средневозрастном лесу, несколько сни-

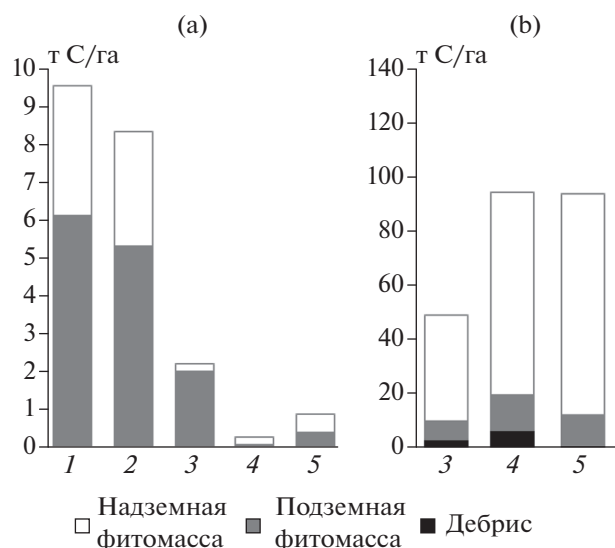


Рис. 4. Структура запасов углерода фитомассы напочвенной (а) и древесной (б) растительности.

жаются на пашне (34.9 г С/м^2) и в контрольном лесу (20.7 г С/м^2) и минимальны в 17-летнем лесу (6 г С/м^2) (рис. 3б). Большая часть $\text{С}_{\text{мик}}$ сосредоточена в слое почвы 0–50 см (83–93%), а на участках молодого и контрольного лесов – 100%. В лесных подстилках запасы $\text{С}_{\text{мик}}$ максимальны на контрольном участке (24.3 г С/м^2), и значительно ниже в молодом (15.9 г С/м^2) и средневозрастном лесах (10.8 г С/м^2). Запасы углерода микробной биомассы в подстилках превышают запасы $\text{С}_{\text{мик}}$ в почвах в 2.7 раза в 17-летнем лесу и в 1.2 раза в контрольном лесу. Суммарные запасы углерода микробной биомассы почвы и подстилки максимальны на участке средневозрастного леса (53.9 г С/м^2), несколько меньше на участке контроля (45.0 г С/м^2) и минимальны в молодом лесу (21.9 г С/м^2).

Максимальные запасы углерода в фитомассе напочвенной растительности накапливаются на участках сенокоса и пашни ($8.3\text{--}9.5 \text{ т С/га}$). На

остальных землепользованиях данный показатель незначителен и составляет 2.2 т С/га в молодом лесу и $0.3\text{--}0.9 \text{ т С/га}$ в средневозрастном и контрольном лесах (рис. 4а). Доля углерода подземной фитомассы превалирует в напочвенной растительности 17-летнего леса (91%), а также на сенокосе и пашне (64%). В средневозрастном и контрольном лесах доля углерода надземной фитомассы выше и составляет 56–67%. На лесных участках запасы углерода в древесной фитомассе возрастают от 45.4 т С/га в молодом лесу до $87.2\text{--}92.7 \text{ т С/га}$ в средневозрастном и контрольном лесах (рис. 4б). Запасы углерода древесной растительности увеличиваются в основном за счет надземной фитомассы, доля которой составляет 85–88%. Запасы углерода в дебрисе контрольного участка незначительны и составляют 1.1 т С/га , увеличиваясь до $3.4\text{--}6.9 \text{ т С/га}$ на участках молодого и средневозрастного лесов. Доля углерода мертвых органических остатков от углерода древостоя составляет около 1% в контрольном лесу и 8% на остальных участках.

Общие экосистемные запасы углерода участков имеют широкий диапазон значений от 74.1 т С/га в молодом лесу до 259 т С/га на сенокосе (табл. 3). В ряду пашня – средневозрастной лес – контроль запасы углерода составляют $168.9\text{--}211 \text{ т С/га}$. Доля углерода почвы составляет 94–97% на сельскохозяйственных угодьях, 48–49% в средневозрастном и контрольном лесах и 22% в 17-летнем лесу. В молодом лесу доля углерода растительной фитомассы достигает 65%, а на остальных лесных участках 44–46%. Доля подземной фитомассы составляет 2–4% на сельскохозяйственных участках и 5–12% в лесных экосистемах. Доля углерода дебриса и подстилки на лесных участках в целом невелика и составляет 1–4% для дебриса и 2–9% для подстилки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы на шунгитах являются аazonальными, нетипичными для своей природной и климатической области. Особым фактором почвообразова-

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

Пул/участок	Пашня	Сенокос	Лес		
			17 лет	70 лет	70 лет (контроль)
Надземная фитомасса	3.4/2	3.0/1	39.0/53	74.7/39	82.1/39
Подземная фитомасса	6.1/4	5.3/2	8.6/12	12.8/7	11.5/5
Дебрис	0	0	3.4/4	6.9/4	1.1/1
Подстилка	0	0	6.6/9	4.4/2	13.1/6
Почва, 0–100 см	159.4/94	250.7/97	16.5/22	89.8/48	103.2/49
Сумма	168.9/100	259.0/100	74.1/100	188.6/100	211.0/100

ния для азональных почв являются шунгитовые породы, резко не соответствующие геохимическим условиям зоны подзолов и подзолистых почв. Исследованные почвы обладают значительным морфологическим сходством с горными почвами (горно-луговыми дерновыми), поскольку для них характерна малая мощность профиля, высокая скелетность и подстиление плотными породами на небольшой глубине [1]. Существенный вклад в изменение морфологии профиля шунгитовых почв вносит процесс окультуривания и расчистки от камней. Участки, расположенные вблизи крупных водоемов, с наиболее плодородными почвами осваивались в первую очередь, здесь мощность агрогумусовых горизонтов Р достигает 20–30 см, это в основном активно используемые пашни и сенокосы. Окультуривание сильнощепнистых почв сопровождалось удалением камней, которые складывались в кучи, чаще всего именуемые “ровницы”, являющиеся индикатором сельскохозяйственного освоения территории и неотъемлемым элементом культурного ландшафта Заонежья [3]. “Ровницы” представлены на участке средневозрастного леса, где довольно условно можно выделить старопашотный горизонт АУра. Как в средневозрастном, так и в контрольном лесах, серогумусовые горизонты достигают мощности более 40 см и разделяются на 2 подгоризонта по плотности и содержанию камней. Морфологически наиболее “естественной” почвой является литозем на участке молодого леса с маломощным горизонтом АУ 15 см, подстилаемый щебнистой и плотной породой.

Исследованные почвы имеют хорошую оструктуренность и слабо-дифференцированные по ряду показателей профили. Почвы в целом характеризуются общими низкими значениями плотности верхних горизонтов, которые незначительно меняются с глубиной. Для всех участков, за исключением контрольного леса, характерна нейтральная либо близкая к нейтральной реакция, при этом значения рН практически не меняются с глубиной. Данная особенность позволяет диагностировать почвы пашни и сенокоса в классификации [55] как Mollic Umbrisols, что нетипично для кислых гумидных условий Карелии. Сильнокислая реакция почвы в условиях контрольного леса обусловлена хвойным опадом без примесей лиственных пород [23, 28]. В отличие от большинства зональных почв [8, 9], распределение углерода в профилях шунгитовых почв имеет равномерно аккумулятивный характер. При этом аграрное освоение способствует накоплению органического углерода в верхней части профиля, особенно на участке сенокоса. Углерод микробной биомассы сконцентрирован в верхних горизонтах почв и имеет регрессивно-аккумулятивный тип распределения, поскольку глубже 30 см резко снижается на всех землепользованиях, за

исключением 17-летнего леса. Для литозема характерно невысокое содержание $C_{орг}$ и $C_{мик}$ в профиле, которое значительно ниже данных показателей в почвах других участков. Большой разброс значений содержания $C_{орг}$ в исследованных почвах объясняется неоднородным составом и пестротой почвообразующих пород. Для шунгитов также характерна разная степень внутрислойной упорядоченности, вследствие чего их устойчивость к выщелачиванию углеродистого вещества варьирует [34]. Данная особенность определяет различную скорость накопления углерода и других химических элементов в шунгитовых почвах.

Содержание органического углерода и общего азота в верхних горизонтах почв пашни, средневозрастного и контрольного лесов соответствует уровню выщелоченных черноземов [10, 27]. На участке сенокоса значения $C_{орг}$ и $N_{общ}$ превышают средние значения для черноземных почв, что можно связать с изначально более высоким содержанием углерода в породе и развитым дерновым процессом, который обуславливает луговая растительность. Исследования в различных климатических зонах показывают, что травяные экосистемы способствуют накоплению $C_{орг}$ в верхней части профиля почв [20, 37, 43]. Шунгитовые породы определяют высокие значения обменных оснований и калия для всех категорий землепользования по сравнению с зональными почвами [8, 9], при этом на лесных участках отмечено невысокое содержание фосфатов. Сельскохозяйственное освоение почв способствует накоплению обменных оснований, подвижного калия, а также фосфора, содержание которого в агроценозах очень высокое. В целом, участок контрольного леса отличается низкими значениями рН и основных агрохимических показателей, за исключением $C_{орг}$ и $N_{общ}$. Для остальных землепользований характерна высокая функция продуктивности и депо элементов питания, за исключением P_2O_5 в лесах. В исследованных почвах отмечены близкие значения соотношения C/N , соответствующие сельскохозяйственным угодьям альфегумусовых почв [9] на всех участках, кроме молодого леса, где показатель C/N еще уже. Данная особенность диагностирует одинаково высокую скорость минерализации органического вещества как в агроценозах, так и в лесных сообществах. В целом, изменение землепользования не так значительно влияет на морфологические, физические и химические свойства почв на шунгитовых породах, как на зональные почвы, что было показано ранее [7, 24].

Содержание углерода микробной биомассы в исследованных почвах находится в пределах, характерных для зональных почв Карелии [8, 9]. Следует отметить, что содержание микробной биомассы прямо коррелирует с содержанием ор-

ганического углерода почв [54]. При этом в почвах с относительно высоким содержанием $C_{\text{орг}}$ показатели $C_{\text{мик}}$ значительно выше, чем в почвах на шунгитах [26, 57]. На фоне высокого содержания в почвах $C_{\text{орг}}$ доля микробного углерода в общем органическом углероде невелика и минимальна на участках сельскохозяйственных землепользований и контроля. Вероятно, низкие значения $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ в шунгитовых почвах отражают малую доступность субстрата вследствие литогенного происхождения углерода. Невысокое содержание $C_{\text{мик}}$ может заключаться и в особенностях состава пород и почв Заонежского полуострова, где такие элементы, как Co, Ni, Cu, Zn и Cr, присутствуют в концентрациях выше ПДК [21, 30]. Известно, что тяжелые металлы (ТМ) влияют на почвенный микробиом и снижают содержание $C_{\text{мик}}$ [6, 52, 57]. При этом в почвах с высоким содержанием органического углерода функциональное разнообразие микроорганизмов при наличии ТМ может не меняться, в отличие от $C_{\text{мик}}$, который является чувствительным показателем [29]. Известно, что токсичность ТМ оказывает большее негативное влияние на популяцию грибов, чем на другие микробные функциональные группы, что приводит к уменьшению соотношения грибы/бактерии [56]. Данная закономерность была отмечена в шунгитовых почвах Загурской и Морозовой [11]. Следует отметить, что в состав шунгитовых пород также входят редкоземельные ультрамикроэлементы лантаноиды, обладающие выраженными антибактериальными свойствами [14, 18, 19]. Несмотря на относительно невысокую микробиологическую активность, в исследованных почвах зафиксированы очень низкие значения микробного метаболического коэффициента QR , особенно на участках пашни и сенокоса, что диагностирует экологическое благополучие и стабильность микробоценозов. По совокупности микробиологических показателей можно отметить, что трансформационная функция шунгитовых почв больше зависит от эндогенных свойств почвообразующих пород, а не от типа землепользования, как в зональных почвах.

Структура запасов $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{мик}}$ почв в значительной мере определяется особенностями их генезиса и наличием коренной мелиорации (рис. 3). В целом для почв на шунгитах высок вклад слоя 0–50 см в запасы органического и микробного углерода, он составляет от 70–83 до 100% в зависимости от наличия плотной подстилающей породы. Отсутствие окультуривания, сильная каменистость, близкое залегание плотной породы и незначительное содержание $C_{\text{орг}}$ почвы объясняют низкие запасы углерода (16.5 т С/га) в литоземе на участке молодого леса. Напротив, на окультуренных участках сельскохозяйственных угодий запасы $C_{\text{орг}}$ максимальны и составляют 159.4–

250.7 т С/га, что сопоставимо с запасами $C_{\text{орг}}$ почв черноземной зоны [22, 36]. Значительные запасы углерода на участке сенокоса, несмотря на небольшую мощность почвы, обусловлены относительно высоким содержанием $C_{\text{орг}}$ в породе и развитым дерновым процессом. Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы в средневозрастном и контрольном лесах близки и составляют 89.8–103.2 т С/га, что на 20–30% выше, чем в подзолистых и на 42–56% выше, чем в альфегумусовых почвах. При этом в шунгитовых почвах отмечены маленькие запасы $C_{\text{мик}}$, в среднем они в 2–4 раза ниже, чем запасы $C_{\text{мик}}$ в зональных почвах [8, 9], благодаря невысокому содержанию углерода микробной биомассы и сильной каменистости.

В лесных подстилках, напротив, зафиксировано сочетание небольших запасов $C_{\text{орг}}$ с высокой микробиологической активностью. Запасы $C_{\text{орг}}$ лесной подстилки в среднем в 1.5–2 раза меньше, чем на участках, приуроченных к зональным почвам, вследствие высокой скорости минерализации органического вещества в лесных почвах на шунгитах. Запасы углерода микробной биомассы подстилок сопоставимы с запасами в лесах на подзолистых и альфегумусовых почвах [8, 9]. Запасы $C_{\text{мик}}$ в подстилках на участках молодого и контрольного лесов превышают запасы $C_{\text{мик}}$ в почвах и вносят существенный вклад в запасы углерода микробной биомассы лесных землепользований.

Общие экосистемные запасы углерода имеют нетипичную для таежной зоны структуру и определяются высокими запасами $C_{\text{орг}}$ почвы. Запас углерода максимален на сенокосе (259 т С/га), что выше на 50–70 т С/га, чем в средневозрастном и контрольном лесах. Участки данных лесов и пашни имеют сопоставимые значения общих запасов углерода. Минимальные запасы углерода отмечены в 17-летнем лесу (74.1 т С/га), что близко к значениям запасов на участках сенокосов с подзолистыми и альфегумусовыми почвами. Для сельскохозяйственных угодий доля запасов углерода почвы традиционно высока и составляет 94–97%. В средневозрастном и контрольном лесах до 48–49% общих запасов углерода приходится на $C_{\text{орг}}$ почвы. Данное соотношение значительно больше, чем на аналогичных землепользованиях с зональными почвами и характерно для экосистем широколиственных лесов [35]. В лесах на шунгитовых почвах отмечена линейная зависимость запасов фитомассы от возраста древостоя. Запасы углерода в растительности, дебрисе и подстилке несколько ниже, чем на зональных почвах [8, 9], поскольку плотность лесных массивов невысока и местное население активно использует их в хозяйственных нуждах. Это снижает интенсивность конкуренции и отпада в растущей части древостоя и обуславливает небольшие запасы дебриса, осо-

бенно в контрольном лесу. В целом, все участки, кроме молодого леса на литоземе, обладают сопоставимо высокой функцией секвестрации углерода, которая обеспечивается на сельскохозяйственных землях в основном почвой, а в лесных экосистемах в равной степени почвой и надземной фитомассой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Шунгитовые породы Южной Карелии способствуют развитию азональных органо-аккумулятивных почв, для которых характерна высокая скелетность и слабодифференцированный мало-мощный профиль. При смене землепользования трансформация свойств шунгитовых почв не столь значительна, как в зональных почвах. Существенный вклад в изменение морфологии профиля вносит процесс окультуривания и расчистки от камней, ведущий к образованию пахотных горизонтов и развитию дернового процесса. Для почв характерны низкие значения плотности и близкая к нейтральной реакция среды верхних горизонтов, данные показатели незначительно меняются с глубиной. Неоднородный состав почвообразующих пород и разная степень устойчивости шунгитов к выщелачиванию обуславливает большой разброс значений $C_{орг}$ почв: от незначительного содержания в литоземе под молодым лесом, до уровня выщелоченных черноземов на других участках. Шунгитовые породы определяют относительно высокое содержание обменных оснований и калия в почвах, при этом сельскохозяйственное освоение способствует накоплению данных элементов и фосфора. Независимо от типа землепользования в исследованных почвах отмечены близкие и довольно узкие значения соотношения C/N , что диагностирует высокую скорость минерализации органического вещества. Для исследованных почв характерна высокая функция продуктивности и депо элементов питания, за исключением некоторых показателей (pH и P_2O_5 в зрелых лесах). На фоне большого содержания органического углерода и низких значений микробного метаболического коэффициента QR доля микробного углерода почв и запасы $C_{мик}$ незначительны. Данная особенность может заключаться как в малой доступности субстрата, вследствие литогенного происхождения $C_{орг}$, так и в содержании повышенных концентраций тяжелых металлов и лантаноидов в почвах. Следовательно, трансформационная функция почв больше зависит от эндогенных свойств шунгитовых пород, а не от типа землепользования. Структура запасов $C_{орг}$ и $C_{мик}$ почв в значительной мере определяется особенностями их генезиса и наличием коренной мелиорации. На участках сельскохозяйственных угодий запасы углерода максимальны и сопоставимы с запасами почв черно-

земной зоны. Сильная каменистость, близкое залегание плотной породы и незначительное содержание углерода являются факторами, снижающими его запасы. Общие экосистемные запасы углерода имеют нетипичную для таежной зоны структуру и широкий диапазон значений от 74.1 т С/га в молодом лесу до 259 т С/га на сенокосе. Запас углерода участков пашни, средневозрастного и контрольного лесов находится в пределах 168.9–211 т С/га. Доля $C_{орг}$ почвы в общих запасах углерода в средневозрастном и контрольном лесах составляет 48–49%, что характерно для экосистем широколиственных лесов. На участках пашни и сенокоса доля запасов углерода почвы традиционно высока и составляет 94–97%. Функция секвестрации углерода обеспечивается на сельскохозяйственных землях в основном почвой, а в лесных экосистемах в равной степени пулами почвы и надземной фитомассы.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Т.В. Богдановой, 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 и при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05153 на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ «Карельский научный центр РАН».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананко Т.В., Герасимова М.И., Конюшков Д.Е. Почвы горных территорий в классификации почв России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 122–146. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-92-122-146>
2. Атлас Карельской АССР / Под ред. Дурова А.Г. М.: ГУГК СССР, 1989. 40 с.
3. Богданова М.С. Ландшафты Заонежского полуострова (Республика Карелия) // Известия Русского географического общества. 2021. № 1. С. 32–58. <https://doi.org/10.31857/S086960712101002X>
4. Бондарь Е.Б., Клеммент И.Р., Кузник М.Г. Исследование структуры и генезиса шунгита // Горючие сланцы. 1987. 4/4. С. 377–393.
5. Борисов П.А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: КФАН СССР, 1956. 92 с.
6. Васенёв В.И., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В. Влияние поллютантов (тяжелые металлы, дизельное топливо) на дыхательную активность конструкто-

- земов // Экология. 2013. № 6. С. 436–445.
<https://doi.org/10.7868/S0367059713060115>
7. Дубровина И.А. Изменение содержания общего углерода, азота и фосфора в почвах таежной зоны Республики Карелия при сельскохозяйственном использовании // Вестник Томского гос. ун-та. Биология. 2018. № 41. С. 27–41.
<https://doi.org/10.17223/19988591/41>
 8. 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>
 9. 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>
 10. Ерёмин Д.И. Изменение содержания и качества гумуса при сельскохозяйственном использовании чернозема выщелоченного лесостепной зоны Зауралья // Почвоведение. 2016. № 5. С. 584–592.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X1605004X>
 11. Загуральская Л.М., Морозова Р.М. Биологическая активность почв на шунгитовых породах // Почвоведение. 2003. № 1. С. 90–96.
 12. Исаченко Т.Е. Историко-географическое районирование побережья Онежского озера для рубежа XVIII–XIX вв. и его современная интерпретация // Известия русского географического общества. 2018. Т. 150. № 2. С. 48–72.
 13. История Карелии с древнейших времен до наших дней / Под ред. Кораблевой Н.А. и др. Петрозаводск: Периодика, 2001. 944 с.
 14. Кикеева А.В., Чаженгина С.Ю., Чаженгина Е.А. Редкоземельные элементы в шунгитовых почвах: содержание, распределение и особенности микоризообразования // Принципы экологии. 2019. Т. 8. № 1. С. 32–46.
 15. Красильников П.В. Устойчивые соединения углерода в почвах: происхождение и функции // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1131–1144.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15090075>
 16. Крупеник В.А., Свешникова К.Ю. Корреляция разреза ОПС с опорными разрезами Онежской структуры // Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерализация) Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 190–195.
 17. Морозова Р.М., Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.
 18. Пономарев А.П. Шунгитовые породы как источник редкоземельных ультрамикроразноэлементов — лантаноидов // Микроэлементы в медицине. 2019. № 20(2). С. 55–65.
<https://doi.org/10.19112/2413-6174-2019-20-2-55-65>
 19. Пономарев А.П., Тютиков С.Ф., Подколзин И.В., Большаков Д.Б. Оценка химического состава шунгита Зажогинского месторождения для его использования в биотехнологии // Геохимия. 2022. Т. 67. № 2. С. 171–181.
<https://doi.org/10.31857/S0016752522020078>
 20. Приходько В.Е., Манахов Д.В. Изменение органического вещества почв степного Зауралья при переводе в заповедный режим // Почвоведение. 2014. № 4. С. 401–409.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14020099>
 21. Рыбаков Д.С. Влияние палеопротерозойских образований онежской структуры на геохимические особенности почв Заонежья // Тр. Карельского научного центра РАН № 10. 2020. С. 72–83.
<https://doi.org/10.17076/geo1283>
 22. Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Пространственная вариабельность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.
 23. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>
 24. Сидорова В.А., Юркевич М.Г. Запасы и профильное распределение биофильных элементов в естественных и антропогенно трансформированных почвах Заонежья // Агрофизика. 2018. № 4. С. 50–58.
<https://doi.org/10.25695/AGRP.2018.04.08>
 25. Степанова А.В., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. Заключительный эпизод магматизма среднего палеопротерозоя в Онежской структуре: данные по долеритам Заонежья // Тр. Карельского научного центра РАН. № 1. 2014. С. 3–16.
 26. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19090090>
 27. Сычёв В.Г., Шевцова Л.К., Мёрзлая Г.Е. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // Агрохимия. 2018. № 2. С. 3–21.
<https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
 28. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мишин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
 29. Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кулачкова С.А., Горленко М.В., Учанов П.В., Сушко С.В., Ананьева Н.Д. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // Почвоведение. 2021. № 3. С. 372–384.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21030151>
 30. Федорец Н.Г., Морозова Р.М., Бахмет О.Н., Ткаченко Ю.Н. Почвы и почвенный покров Заонежья // Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С. 20–34.
 31. Филиппов М.М., Голубев А.И., Медведев П.В. Органическое вещество шунгитонесных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения) / Отв.

- ред. Филиппов М.М. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. 208 с.
32. Филиппов М.М., Дейнес Ю.Е. Субпластовый тип месторождений шунгитов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 261 с.
 33. Филиппов М.М., Лохов К.И. Синхронность развития палеопротерозойского феномена “Шуньга” в бассейнах-аналогах // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2018. Т. 63, вып. 3. С. 363–392.
 34. Чаженгина С.Ю., Рожкова В.С., Кочнева И.В. Моделирование процессов абиогенного выветривания углеродистого вещества палеопротерозойских шунгитовых пород онежской структуры (Карелия) // Тр. Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 67–79.
<https://doi.org/10.17076/geo827>
 35. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Влияние исторических и региональных особенностей землепользования на величину и структуру запасов углерода в южной тайге и лесостепи Европейской России // Почвоведение. 2018. № 6. С. 747–758.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18060114>
 36. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Опыт региональной оценки изменений запасов углерода в почвах южной тайги и лесостепи за исторический период // Почвоведение. 2016. № 8. С. 1013–1028.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16080037>
 37. Чэнь С.Х., Хоу С., Убугунов Л.Л., Вишнякова О.В., Ус, Рен В., Дин Ю. Запасы углерода в типичной степи при различном управлении выпасом // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1365–1374.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14110100>
 38. Bakhmet O.N., Fedorets N.G. Soils and their characteristics on Zaonezhye Peninsula // Biogeography, landscapes, ecosystems and species of Zaonezhye Peninsula, in Onega Lake, Russian Karelia. Reports of the Finnish Environment Institute. 2014. V. 40. P. 53–55.
 39. Bastin J.F., Finegold Y., Garcia C., Mollicone D., Rezende D., Routh C.M., Zohner T.W. The global tree restoration potential // Science. 2019. V. 365. P. 76–79.
<https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
 40. Bispo A., Andersen L., Angers D.A., Bernoux M., Brosard M., Cécillon L., Comans R.N.J., Harmsen J., Jonassen K., Lamé F., Lhuillery C., Maly S., Martin E., McInnea A.E., Sakai H., Watabe Y., Eglin T.K. Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: do we have the necessary standards? // Frontiers Environ. Sci. 2017. V. 41.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00041>
 41. Brown I. Challenges in delivering climate change policy through land use targets for afforestation and peatland restoration // Environ. Sci. Policy. 2020. V. 107. P. 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.013>
 42. Buseck P.R., Galdobina L.P., Kovalevski V.V., Rozhkova N.N. Shungites: The C-rich rocks of Karelia, Russia // Canadian Mineralogist. 1997. V. 35. P. 1363–1378.
 43. Hurisso T.T., Norton J.B., Norton U. Soil profile carbon and nitrogen in prairie, perennial grass – legume mixture and wheat-fallow production in the central High Plains, USA // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2013. V. 181. P. 179–187.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.008>
 44. Kovalevski V.V., Buseck P.R., Cowley J.M. Comparison of carbon in shungite rocks to other natural carbons: An X-ray and TEM study // Carbon. 2001. V. 39. P. 243–256.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00120-2)
 45. Lambin E.F., Gibbs H.K., Ferreira L., Grau R., Mayaux P., Meyfroidt P., Morton D.C., Rudel T.K., Gasparri I., Munger J. Estimating the world’s potentially available cropland using a bottom-up approach // Global Environmental Change. 2013. V. 23(5). P. 892–901.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.005>
 46. Mathe I., Shimelis H., Mutema M., Minasny B., Chaplot V. Crops for increasing soil organic carbon stocks – a global meta analysis // Geoderma. 2020. V. 367. P. 114230.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114230>
 47. Melezhik V.A., Črne A.E., Prave A.R. The Onega Basin // Reading the Archive of Earth’s Oxygenation. V. 2: The Core Archive of the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project Series: Frontiers in Earth Sciences. Springer: Heidelberg. 2013. P. 769–1046.
 48. Melezhik V.A., Fallick A.E., Filippov M.M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry // Earth Sci. Rev. 1999. V. 47. P. 1–40.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00027-6)
 49. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: genesis and practical application // Ore Geology Rev. 2004. V. 24. P. 135–154.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2003.08.003>
 50. Munsell A. Munsell Soil Color Charts. Revised Washable Edition. Munsell Color. New Windsor. N.Y. 2000.
 51. Nayak N., Mehrotra R., Mehrotra S. Carbon biosequestration strategies: a review // Carbon Capture Sci. Technol. 2022. V. 4. 100065.
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100065>
 52. Papa S., Bartoli G., Pelligrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element content in an urban soil // Environ. Monitor. Assessment. 2010. V. 165. P. 193–203.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0938-1>
 53. Verchovsky A.V., Watson J.S., Wright I.P., Lokhov K.I., Prasolov E.M., Prilepski E.B., Polekhovski Yu.S., Goltsin N.A. Nitrogen isotopes in shungite // Geophysical Research Abstracts. 2006. V. 8. P. 10920.
 54. Wang Z., Zhao M., Yan Z., Yang Y., Niklas K.J., Huang H., Mipam T.D., He X., Hu H., Wright S.J. Global patterns and predictors of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in terrestrial ecosystems // Catena. 2022. V. 211. P. 106037.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106037>
 55. 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.
 56. Xua Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Dong Z. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // Environ. Int. 2019. V. 125. P. 478–488.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>
 57. Yuangen Y., Campbell C.D., Clark L. Microbial indicators of heavy metal contamination in urban and rural soils // Chemosphere. 2006. V. 63. P. 1942–1952.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.009>

Soils and Carbon Pools on Shungite Rocks of South Karelia under Different Types of Land Use

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, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, 185910 Russia*

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

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

Azonal organo-accumulative soils (Umbrisols) on shungite rocks and the influence of type of land use on their properties and ecosystem carbon stocks were investigated. Changes in soil profile structure, basic agro-chemical and microbiological indicators of upper horizons, C_{org} and C_{mic} stocks in a meter layer of soils and sites carbon pool structure were analyzed. Pine forest as a control, arable land, hayfield, as well as young alder and middle-aged mixed forest were studied. Land use change does not lead to a significant transformation of the properties of shungite soils in contrast to zonal soils. The removal of stones has the greatest influence, leading to the formation of developed arable horizons. The soils are characterized by a high stony, a weak-divided thin profile, low density values, and a pH close to neutral. The wide range of C_{org} content values from 1.6% to 11.7% is due to the heterogeneous composition of parent rocks. Agricultural development contributes to the accumulation of exchangeable bases, available potassium and phosphorus, the content of which are initially increased in shungite soils. All sites are characterized by a high rate of organic matter mineralization (C/N ratio not higher than 17). A small content of C_{mic} (84–245 mg C/kg) was noted in the soils, which may be due to the low availability of substrate because of lithogenic origin of carbon and the increased concentrations of heavy metals and lanthanides in shungite rocks. The structure of C_{org} and C_{mic} stocks depends on carbon content, keep of stones and presence of dense bedrock. Soil organic carbon stocks range from 17–251 t C/ha, while C_{mic} stocks range from 6–43 g C/m². The total ecosystem carbon stocks are maximum in hayfield (259 t C/ha) and minimum in young forest (74 t C/ha). The stocks of carbon in the sites of arable land, middle-aged and control forests are within 169–211 t C/ha.

Keywords: land use change, soil functions, carbon stocks, soil organic carbon, microbial biomass carbon, Umbrisols