

УДК 631.4

ДИНАМИКА СВОЙСТВ ПОЧВ И ЭКОСИСТЕМНЫЕ ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ (СРЕДНЯЯ ТАЙГА КАРЕЛИИ)

© 2022 г. И. А. Дубровина^а, *, Е. В. Мошкина^б, А. В. Туонен^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 17.01.2022 г.

После доработки 01.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Исследовано влияние типа землепользования на свойства альфегумусовых почв нормального увлажнения и экосистемные запасы углерода в среднетаежной подзоне Карелии. 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 130-летний сосняк в качестве контроля, пашню, сенокос, а также молодой ольшанник 15 лет и средневозрастной сосняк 65 лет. В почвах пашни, сенокоса и молодого леса зафиксирован повышенный уровень рН и элементов питания при соотношении C/N около 16. Наибольшее содержание $C_{\text{орг}}$ отмечено в почве пашни (2.7%) и средневозрастного леса (3.9%) при $N_{\text{общ}}$ около 0.2%. В почвах пашни, сенокоса и спелого леса содержание $C_{\text{мик}}$ составляет 129–167 мг C/кг, на участках молодого и средневозрастного лесов содержание $C_{\text{мик}}$ находится в диапазоне 312–447 мг C/кг. Максимальные запасы $C_{\text{мик}}$ зафиксированы в почве (121 г C/м²) и подстилке (70 г C/м²) молодого леса. В почвах пашни и средневозрастного леса запасы $C_{\text{мик}}$ находятся в пределах 70–81 г C/м², на сенокосе и в спелом лесу 56 г C/м². Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы в метровом слое максимальны на пашне и составляют 205 т C/га, и уменьшаются в ряду сенокос – молодой – средневозрастной – спелый лес с 89 до 39 т C/га. Общие экосистемные запасы углерода максимальны на пашне – 208 т C/га, что несколько превышает запасы в зрелых лесах – 180–193 т C/га. Запасы $C_{\text{орг}}$ молодого леса – 152 т C/га, на сенокосе запасы углерода минимальны – 96 т C/га.

Ключевые слова: изменение землепользования, почвенные функции, запасы углерода, органический углерод почвы, углерод микробной биомассы, альфегумусовые почвы

DOI: 10.31857/S0032180X22090052

ВВЕДЕНИЕ

Биогеоценозы суши определяют жизнь и благополучие человека и являются важными источниками разнообразных экосистемных услуг, включая продукты питания, материальные и энергетические ресурсы. Наземные экосистемы в глобальном масштабе представляют собой крупнейший пул углерода, включая порядка 508–609 Пг C растительного покрова и 1523–1929 Пг C верхнего метрового слоя почвы. Вследствие этого биогеоценозы являются вторым по величине источником выбросов углекислого газа после энергопотребления и любые сдвиги в эмиссии CO₂ оказывают воздействие на общий углеродный баланс атмосферы [37]. Изменения в землепользовании и земном покрове значительно меняют потоки углерода в биосфере и считаются одной из основ-

ных движущих сил, ответственных за деградацию экосистем [43]. Данные изменения напрямую влияют на емкость накопления углерода в растительной биомассе, а также на содержание органического углерода почвы. Естественные биогеоценозы обычно выступают как чистые поглотители углерода атмосферы. Смена видового состава и скорости фотосинтеза, а также изменение почвенной среды могут вести к выбросам CO₂ и экосистема становится источником углерода. Изменения в землепользовании в значительной степени коррелируют со сменой климата через биофизические и биогеохимические процессы и влияют на наземный цикл углерода [34]. Быстрые трансформации климата, не имеющие исторических прецедентов, являются триггером широкомасштабной модификации и истощения экосистем и предоставляемых ими услуг [41, 47].

В исторической перспективе одним из ведущих процессов изменения землепользования наряду со сведением лесов для нужд сельского хозяйства является периодическое забрасывание сельскохозяйственных угодий. Данный процесс происходит во всем мире, особенно интенсивно в умеренных и высоких широтах. По некоторым оценкам за последние три столетия в мире было выведено в залежь порядка 472 млн га земель, в том числе около 50 млн га в России [21, 33, 36]. В настоящее время более 280 млн га земель подвергается циклической заброшенности, например, в России наблюдается не только сокращение, но стабилизация и увеличение сельскохозяйственных угодий [22]. На залежных землях происходит восстановление экосистем путем естественной сукцессии. Данный процесс сопровождается накоплением углерода в биомассе растений и почве [25, 27, 28, 38]. Заброшенные земли могут восстанавливаться не только естественным путем, но и при активном участии человека. Политика, связанная с менеджментом землепользований, предполагает, что управление природными ресурсами и эффективное решение экологических проблем повышают уровень и качество жизни людей. Примерами контролируемого восстановления растительного покрова могут служить искусственное лесоразведение, возделывание технических культур для биоэнергетики, экстенсивное сельское хозяйство и агротуризм. Сочетание пассивного и активного управления позволяет достичь высоких показателей связывания углерода в почвах заброшенных угодий [32].

Поскольку системы землепользования имеют решающее значение для функционирования социальной сферы и экологического баланса территорий, управление земельными ресурсами имеет серьезные последствия для решения глобальных проблем изменения климата, обеспечения продовольственной безопасности и сохранения биоразнообразия [48]. Для разработки стратегий управления земельными ресурсами необходимы исследования по интегральной оценке различных типов землепользования, их влияния на свойства почв и запасы углерода на региональном уровне.

Ранее авторами были изучены свойства и функции подзолистых почв, а также структура экосистемных запасов углерода вследствие изменения типа землепользования в среднетаежной подзоне Карелии [10]. Следующим этапом работы стало аналогичное исследование различных типов землепользования на альфегумусовых почвах (Podzols). Подзолы занимают в мире порядка 485 млн га и особенно распространены в бореальной зоне России, Скандинавии и Канады [40]. Исследования влияния типа землепользования на свойства подзолов средней тайги единичны [19, 20] и представляют интерес, поскольку данные почвы широко используются в практике земледелия более 1000 лет

и подвергались многочисленным трансформациям в связи со сменой землепользования [21].

Целью работы являлось исследование влияния разных типов землепользования на свойства и функции альфегумусовых почв, а также структуру экосистемных запасов углерода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в пределах Онежско-Ладожского водораздела в окрестностях пос. Эссойла Пряжинского района Карелии. Климат региона умеренно-холодный, переходный от морского к континентальному. В южной части Карелии среднегодовая температура воздуха составляет 2°C при 650 мм осадков в год [2]. Естественная растительность относится к среднетаежной подзоне зеленомошных хвойных лесов. Почвообразование идет на четвертичных отложениях последнего оледенения. Для района исследования характерен аккумулятивный водно-ледниковый тип рельефа, который представлен холмисто-рядовыми формами [3]. Среди минеральных почв нормального увлажнения преобладают подзолы иллювиально-железистые (Albic Podzols), сформированные на водно-ледниковых песках, супесях и завалуненной морене.

В качестве объектов исследовали 5 характерных для данной климатической зоны типов землепользования сельскохозяйственного и лесохозяйственного назначения (табл. 1). Ключевые участки выбирали на возвышенных элементах рельефа с песчаными почвами нормального увлажнения. Пашня и сенокос находятся в длительном сельскохозяйственном использовании. Молодой и средневозрастной леса представляют собой участки естественного лесовозобновления на бывших сельскохозяйственных угодьях. Спелый лес произрастает на территории, не подвергавшейся земледельческому освоению.

Отбор проб и анализ почв. На участках закладывали почвенные разрезы, проводили морфологическое описание и определяли классификационную принадлежность почв [31, 51]. В генетических горизонтах определяли плотность сложения (ρ), образцы отбирали в трехкратной повторности и исследовали обменную кислотность, содержание и запасы органического углерода и углерода микробной биомассы. Для расчета запасов углерода в подстилке на лесных участках были собраны образцы подстилки в шестикратной повторности. Для анализа вариабельности общих агрохимических свойств и микробиологической активности в верхних минеральных горизонтах почв на каждом участке из прикопок отбирали образцы с приблизительно одинаковой глубины. В почвенных образцах определяли обменную кислотность (pH_{KCl}) потенциметрически; содержание органического

Таблица 1. Характеристика участков

Рельеф, координаты	Землепользование	Растительность	Почва
Верхняя часть склона 61°51'01.3" N, 33°08'01.8" E	Пашня частный надел, вспашка с отвалом пласта, внесение органических удобрений	Картофель	Агростратозем гумусовый артистратифицированный на погребенном подзоле Plaggic Anthrosol over Albic Podzol
Верхняя часть пологого склона 61°49'47.2" N, 33°08'36.6" E	Сенокос сенокошение регулярное, 1–2 раза в год	Луг злаково-разнотравный с преобладанием тимофеевки луговой (<i>Phleum pratense</i> L.) и ежи сборной (<i>Dactylis glomerata</i> L.)	Агрозем альфегумусовый иллювиально-железистый Umbric Podzol
Средняя часть пологого склона 61°49'45.4" N, 33°08'37.0" E	15-летний лес молодой древостой, I класс бонитета	Ольшанник злаково-разнотравный, в напочвенном покрове доминирует ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i> L.) и вейник лесной (<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth.)	Агрозем альфегумусовый иллювиально-железистый Umbric Podzol
Пологий участок в верхней части гряды 61°51'03.2" N, 33°08'00.0" E	65-летний лес средневозрастный древостой, I класс бонитета	Сосняк орляково-разнотравный, в напочвенном покрове преобладают черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) и орляк обыкновенный (<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn)	Дерново-подбур оподзоленный Entic Podzol
Верхняя часть пологого склона 60°49'32.9" N, 33°16'03.9" E	130-летний лес спелый древостой, IV класс бонитета	Сосняк брусничный, в напочвенном покрове преобладают брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.) и черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	Подзол иллювиально-железистый Skeletic Albic Podzol

углерода ($C_{орг}$) методом высокотемпературного каталитического сжигания; содержание общего азота ($N_{общ}$) по Кьельдалю; соотношение C/N ; содержание подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) по Кирсанову; сумму обменных оснований (S) по Каппену-Гильковицу, а также гранулометрический состав почв (разделение на фракции по Качинскому) методом лазерной дифракции на анализаторе частиц LS 13320 "Beckman Coulter".

Содержание углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) исследовали методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), которое оценивали по скорости начального максимального дыхания микроорганизмов после обогатения почвы глюкозой и инкубации в течение 1.5–2 ч при температуре 22°C. Для верхних горизонтов почв определяли параметры экофизиологического статуса микробного сообщества – соотношение $C_{мик}/C_{орг}$ и микробный метаболический коэффициент QR ,

представляющий собой отношение БД/СИД. Запасы углерода в почве рассчитывали для каждого генетического горизонта, затем суммировали.

Анализ растительности. На участках проводили геоботаническое описание растительности и определение возраста древостоя. Для расчета запасов напочвенной фитомассы использовали данные Федеральной службы государственной статистики и собственные измерения. Запас фитомассы древостоя рассчитывали на основании таксационных измерений по ОСТ 56-69-83 и показателей плотности древесины, затем данные распределяли по отдельным фракциям и запас углерода пересчитывали согласно общепринятым коэффициентам. 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.

Таблица 2. Гранулометрический состав почв (содержание фракций мелкозема, %)

Горизонт, глубина, см	Размер фракций, мм						
	1.0–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01
Агростратозем гумусовый артистратифицированный на погребенном подзоле, пашня							
P1, 0–24	22.81	53.39	18.23	2.37	1.94	1.26	5.57
P2, 24–44	24.05	54.92	15.79	2.20	1.85	1.19	5.24
RY _{гг} , 44–75	21.28	47.61	23.07	3.77	2.81	1.46	8.04
E, 75–85	15.77	47.16	25.22	5.61	4.52	1.72	11.85
BF, 85–96	17.44	55.32	20.89	2.69	2.26	1.40	6.35
C, 96–100	11.07	52.76	23.65	5.67	5.08	1.77	12.52
Агроем альфегумусовый иллювиально-железистый, сенокос							
P1, 3–20	62.11	26.20	8.94	1.17	0.92	0.66	2.75
P2, 20–38	63.53	23.26	9.54	1.65	1.30	0.72	3.67
BF, 38–49	89.44	9.41	0.45	0.20	0.30	0.20	0.70
C, 49–100	88.90	9.96	0.54	0.17	0.27	0.16	0.60
Агроем альфегумусовый иллювиально-железистый, 15-летний лес							
P1, 3–20	11.96	55.30	24.58	3.72	2.86	1.58	8.16
P2, 20–30	10.35	55.13	25.55	4.03	3.16	1.78	8.97
BF, 30–49	12.57	47.59	29.14	4.96	3.84	1.90	10.70
BC, 49–65	10.14	43.10	32.57	6.48	5.55	2.16	14.19
C, 65–100	9.83	39.54	32.93	7.69	7.60	2.41	17.70
Дерново-подбур оподзоленный, 65-летний лес							
AУе, 7–17	30.98	56.10	10.20	0.99	0.94	0.79	2.72
BF, 17–29	28.27	50.01	16.71	2.04	1.76	1.21	5.01
BC, 29–55	47.21	45.76	4.75	0.70	0.84	0.74	2.28
C, 55–100	76.54	19.43	2.13	0.77	0.87	0.26	1.90
Подзол иллювиально-железистый, 130-летний лес							
E, 7–15	36.24	44.38	12.93	3.03	2.24	1.18	6.45
BF, 15–29	46.15	37.14	11.06	2.37	2.19	1.09	5.65
BC, 29–62	35.39	44.50	11.52	4.07	3.20	1.32	8.59
C, 62–100	37.90	38.71	14.33	3.82	3.98	1.26	9.06

Статистическая обработка. Для анализа различий средних значений в исследованных показателях применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным анализом по критерию Тьюки при уровне значимости $p \leq 0.05$. В таблицах и диаграммах приведены средние значения \pm ошибка среднего, значимые различия обозначены разными буквами. Подробное описание методов, используемых приборов и алгоритмов расчета показателей изложено ранее [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфология профиля. Исследованные почвы сформированы на отложениях легкого гранулометрического состава и представлены крупно- и мелкозернистыми песками (табл. 2). На участке 15-летнего леса почвообразующей породой явля-

ются водно-ледниковые супеси, на всех остальных участках – песчаная завалуненная морена. Почва пашни отнесена к отделу стратоземов в стволе синлитогенных почв (рис. 1). Верхняя часть профиля представлена мощным агрогумусовым горизонтом 44 см с мелкокомковатой структурой, подразделяющимся на два подгоризонта по плотности. Далее идет стратифицированный серогумусовый горизонт RY_{гг} с включением мелких угольков по всей толще. Горизонт имеет комковато-глыбистую структуру и карманную границу. На глубине 75 см вскрывается подзол с нарушенным подзолистым горизонтом E мощностью от 2 до 10 см. Интенсивно окрашенный горизонт BF мощностью около 10 см переходит в породу на глубине 96 см. Почва диагностирована как агростратозем гумусовый артистратифицированный на погребенном подзоле (Plaggic Anthrosol over

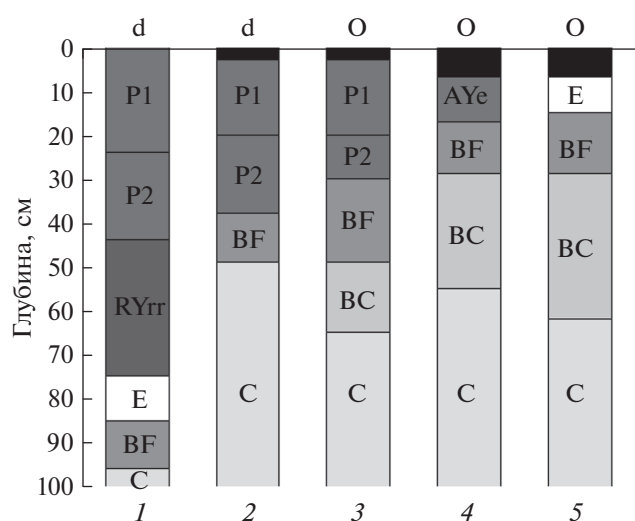


Рис. 1. Схематическое строение почвенных профилей. Здесь и далее: 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 15 лет; 4 – лес, 65 лет; 5 – лес, 130 лет.

Albic Podzol). Для почв под сенокосом и 15-летним лесом характерно сходное строение. В них были выделены агрогумусовые горизонты с ровными границами и альфегумусовые, подзолистые горизонты отсутствуют. В почве сенокоса диагностирован мощный агрогумусовый горизонт 38 см, в верхней части которого сформирована дернина. Ниже расположен альфегумусовый горизонт BF небольшой мощности, резко переходящий в породу. Под 15-летним лесом в верхней части агрогумусового горизонта сформирована рыхлая листовая подстилка мощностью в среднем 3 см. Горизонт BF более мощный, чем под сенокосом и

плавно переходит в породу. Почвы диагностированы как агроземы альфегумусовые иллювиально-железистые (Umbric Podzol). Под 65-летним лесом на почве сформирована хорошо развитая подстилка мощностью в среднем 7 см. В почве выделен рыхлый серогумусовый горизонт мощностью 10 см, в нижней части которого присутствуют минеральные отбеленные зерна. Ниже расположен альфегумусовый горизонт, плавно переходящий в породу. Почва диагностирована как дерново-подбур оподзоленный (Entic Podzol). Под спелым 130-летним лесом представлена зональная почва – подзол иллювиально-железистый (Skeletal Albic Podzol). Для территории характерна сильная завалуненность, до 50% площади разреза занимают крупные валуны. Подзолистый горизонт неоднородный, мощностью до 8 см, в верхней части прокрашен гумусом. Выше сформирована лесная подстилка мощностью в среднем 7 см, в нижней части хорошо разложившаяся. Альфегумусовый горизонт яркоокрашенный, плотный, с постепенным переходом в породу.

Агрофизические и агрохимические показатели почв. Плотность сложения почв значительно различается в верхних горизонтах (рис. 2, табл. 3). На глубине 5–20 см максимальная плотность отмечена на сенокосе – 1.39 г/см³, минимальная в 65-летнем лесу (0.99 г/см³) а на остальных участках показатели плотности имеют близкие значения около 1.1–1.2 г/см³. Глубже 30 см показатели плотности выравниваются и составляют порядка 1.4–1.5 г/см³ во всех почвах.

Значения обменной кислотности сильно колеблются в зависимости от глубины и типа почвы.

Таблица 3. Показатели почвенного плодородия и микробиологической активности в верхних минеральных горизонтах почв ($n = 6$)

Показатель	Пашня	Сенокос	Лес		
			15 лет	65 лет	130 лет
Горизонт	P1	P1	P1	AY	E
Глубина, см	5–15	5–15	5–15	7–17	7–12
ρ , г/см ³	1.13 ± 0.01 <i>abd</i>	1.39 ± 0.03 <i>c</i>	1.13 ± 0.03 <i>abd</i>	0.99 ± 0.05 <i>b</i>	1.17 ± 0.06 <i>d</i>
pH _{KCl}	4.71 ± 0.15 <i>a</i>	4.88 ± 0.21 <i>a</i>	4.90 ± 0.11 <i>a</i>	3.89 ± 0.06 <i>b</i>	3.43 ± 0.03 <i>b</i>
P ₂ O ₅ , мг/кг	541.3 ± 19.3 <i>a</i>	405.0 ± 15.9 <i>b</i>	1478.8 ± 33.9 <i>c</i>	144.5 ± 8.4 <i>d</i>	14.5 ± 3.2 <i>e</i>
K ₂ O, мг/кг	32.9 ± 1.8 <i>a</i>	60.0 ± 2.7 <i>b</i>	216.3 ± 6.2 <i>c</i>	17.3 ± 1.2 <i>d</i>	10.8 ± 0.9 <i>e</i>
S, смоль(экв)/кг	6.13 ± 0.39 <i>a</i>	4.41 ± 0.21 <i>b</i>	4.25 ± 0.14 <i>b</i>	0.29 ± 0.03 <i>c</i>	0.14 ± 0.01 <i>d</i>
C _{орг} , %	2.65 ± 0.14 <i>a</i>	1.85 ± 0.16 <i>b</i>	1.78 ± 0.17 <i>b</i>	3.88 ± 0.38 <i>c</i>	0.79 ± 0.06 <i>d</i>
N _{общ} , %	0.20 ± 0.01 <i>ac</i>	0.14 ± 0.01 <i>bd</i>	0.13 ± 0.01 <i>b</i>	0.17 ± 0.01 <i>cd</i>	0.03 ± 0.01 <i>e</i>
C/N	15.7 ± 0.10 <i>a</i>	15.6 ± 0.34 <i>a</i>	16.6 ± 0.14 <i>a</i>	27.2 ± 1.41 <i>b</i>	28.3 ± 0.99 <i>b</i>
C _{мик} , мг C/кг	129.4 ± 9.2 <i>a</i>	166.7 ± 5.3 <i>a</i>	312.0 ± 106.5 <i>b</i>	447.1 ± 55.3 <i>b</i>	144.3 ± 15.6 <i>a</i>
C _{мик} /C _{орг} , %	0.52 ± 0.06 <i>ac</i>	0.82 ± 0.04 <i>ac</i>	1.70 ± 0.18 <i>bc</i>	1.14 ± 0.09 <i>c</i>	2.17 ± 0.31 <i>bd</i>
QR	0.49 ± 0.09 <i>a</i>	0.42 ± 0.03 <i>a</i>	0.16 ± 0.03 <i>b</i>	0.13 ± 0.02 <i>b</i>	0.20 ± 0.02 <i>b</i>

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

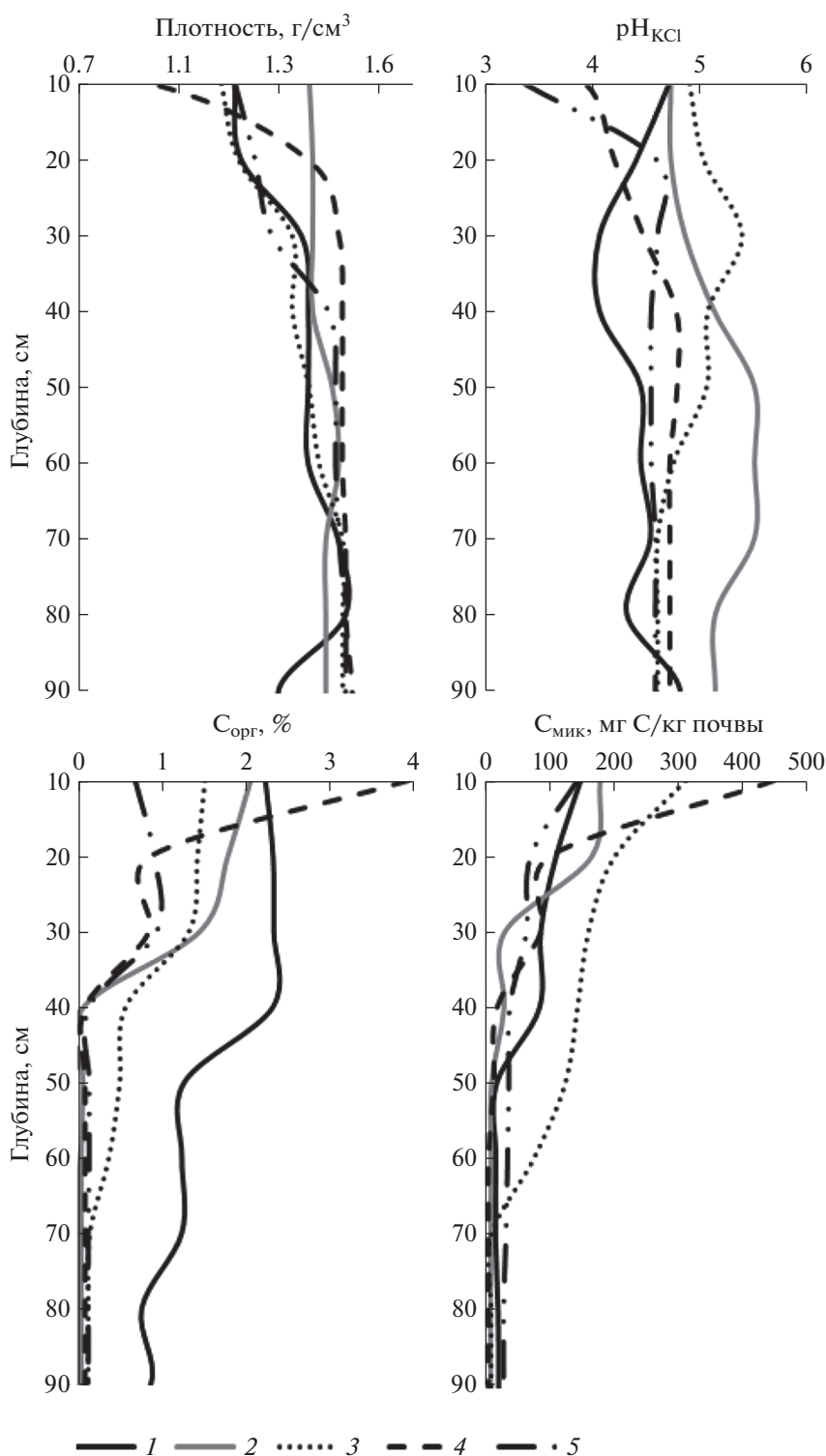


Рис. 2. Изменение почвенных свойств по профилю (среднее, $n = 3$): 1 – пашня; 2 – сенокос; 3 – лес, 15 лет; 4 – лес, 65 лет; 5 – лес, 130 лет.

В верхних горизонтах пашни, сенокоса и молодого леса рН составляет 4.7–4.9. В 65- и 130-летних лесах значения рН верхних горизонтов больше, около 3.4–3.9. Глубже 50 см во всех почвах, кроме сенокоса величина рН близка к значению 4.5. В

почве сенокоса рН почвы растет с глубиной и составляет 4.6–5.3.

Максимальное содержание органического углерода в верхнем горизонте отмечено в почве 65-лет-

него леса (3.9%) и пашни (2.7%). В почвах сенокоса и 15-летнего леса содержание углерода составляет около 1.8–1.9%. В горизонте Е старовозрастного леса содержание $C_{\text{орг}}$ минимально – 0.8%. Для почв сенокоса, 65- и 130-летних лесов характерен регрессивно-аккумулятивный тип распределения углерода в профиле. В 15-летнем лесу имеет место постепенное уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$ и равномерно-аккумулятивный тип. На пашне кривая распределения углерода более выпуклая, что характеризует прогрессивно-аккумулятивный тип накопления $C_{\text{орг}}$ (рис. 2). Содержание общего азота минимально в почве спелого леса (0.03%) и максимально на участках пашни и средневозрастного лесов (0.20–0.17%). Для почв сенокоса и молодого леса характерны средние значения показателя – 0.13–0.14%. На участках пашни, сенокоса и 15-летнего леса зафиксированы близкие значения соотношения C/N в верхних горизонтах почв – 16–17. В 65- и 130-летних лесах соотношение C/N шире и составляет 27–28.

В почве 15-летнего леса зафиксировано очень высокое содержание доступного фосфора (1478.8 мг/кг). Средние значения показателя отмечены в почвах пашни (541.3 мг/кг) и сенокоса (405 мг/кг). Значительно ниже содержание фосфора на участке 65-летнего леса (144.5 мг/кг), а в спелом лесу его количество минимально (14.5 мг/кг). Содержание доступного калия почвы убывает в ряду 15-летний лес (216.3 мг/кг), сенокос (60 мг/кг), пашня (32.9 мг/кг), 65-летний лес (17.3 мг/кг) и 130-летний лес (10.8 мг/кг). Показатели суммы обменных оснований максимальны на пашне (6.13 смоль(экв)/кг), несколько уменьшаются на участках сенокоса (4.41 смоль(экв)/кг) и молодого леса (4.25 смоль(экв)/кг), и минимальны в 65-летнем (0.29 смоль(экв)/кг) и 130-летнем (0.14 смоль(экв)/кг) лесах.

Микробиологические показатели почв. Углерод микробной биомассы имеет тип распределения аналогичный изменению содержания общего углерода во всех изученных почвах кроме пашни. Для пашни характерно невысокое содержание $C_{\text{мик}}$ и его резкое уменьшение с глубиной. В почве под молодым лесом, напротив, наблюдается повышенное содержание $C_{\text{мик}}$ до глубины 70 см. В верхних горизонтах почв содержание $C_{\text{мик}}$ максимально под 65-летним (447.1 мг С/кг) и 15-летним (312 мг С/кг) лесами. Под пашней, сенокосом и спелым лесом показатели $C_{\text{мик}}$ близки и составляют от 129.4 до 166.7 мг С/кг. Доля $C_{\text{мик}}$ в общем $C_{\text{орг}}$ минимальна в почве пашни (0.52%) и сенокоса (0.82%), возрастает в почвах 15-летнего (1.7%) и 65-летнего (1.14%) лесов, и максимальна на участке 130-летнего леса (2.17%). Микробный метаболический коэффициент QR максимален на участках пашни (0.49) и сенокоса (0.42). На лес-

ных участках значения показателя значительно снижаются и составляют от 0.13 до 0.2 (табл. 3).

Анализ структуры запасов углерода землепользований. Запасы органического углерода почвы на пашне превосходят другие землепользования на порядок и составляют 205.6 т С/га (рис. 3а). Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы в слое 0–100 см уменьшаются в ряду сенокос – молодой – средневозрастной – спелый лес с 89.2 до 38.9 т С/га. Вклад верхних 50 см в запасы углерода почвы максимален на участке сенокоса (97%) и 65-летнего леса (91%). В молодом и зрелом лесах в слое почвы 0–50 см сосредоточено несколько меньше углерода, 83 и 76% соответственно, а на пашне – 67%. Запасы $C_{\text{орг}}$ в подстилке возрастают в ряду 15-летний (9.8 т С/га), 130-летний (22.8 т С/га) и 65-летний (25.4 т С/га) лес. Вклад слоя 50–100 см в запасы углерода почвы зависит от содержания $C_{\text{орг}}$ в породе (рис. 2). На участках сенокоса и 65-летнего леса вклад слоя 50–100 см минимален (3–9%), так же как содержание $C_{\text{орг}}$ в нижней части профиля – 0.04–0.08%. На участках 15- и 130-летних лесов вклад нижних 50 см почвы в запасы $C_{\text{орг}}$ составляет 17–24%, а содержание углерода в породе – 0.12%. На пашне вклад слоя 50–100 см максимален (33%) при среднем содержании $C_{\text{орг}}$ 0.8%. Запасы $C_{\text{орг}}$ в подстилке в процентном соотношении к запасам $C_{\text{орг}}$ почвы составляют в молодом лесу 13%, в средневозрастном – 43%, а в спелом – 59%. На лесных участках суммарный запас углерода почвы и подстилки максимален в молодом лесу (85.4 т С/га) и несколько снижается в средневозрастном (64.3 т С/га) и спелом (61.7 т С/га) лесах.

Запасы углерода микробной биомассы в слое почвы 0–100 см максимальны на участке 15-летнего леса и составляют 121.4 г С/м² (рис. 3б). Значительно меньше запасы $C_{\text{мик}}$ в почве пашни (80.7 г С/м²) и 65-летнего леса (70.4 г С/м²). На участках сенокоса и 130-летнего леса отмечены минимальные значения запасов $C_{\text{мик}}$, около 56 г С/м². От 84 до 95% запасов углерода микробной биомассы сосредоточена в слое почвы 0–50 см. Лишь на участке спелого леса вклад верхних 50 см почвы в запасы $C_{\text{мик}}$ меньше и составляет 60%. Запасы $C_{\text{мик}}$ в лесных подстилках максимальны в молодом лесу (69.5 г С/м²) и более чем в 2 раза ниже в средневозрастном (29.5 г С/м²) и спелом (25.9 г С/м²) лесах. Следовательно, суммарные запасы углерода микробной биомассы почвы и подстилки максимальны на участке молодого леса (190.9 г С/м²), и значительно меньше в средневозрастном (99.9 г С/м²) и спелом (81.5 г С/м²) лесах. На всех лесных участках запасы $C_{\text{мик}}$ в подстилке в процентном соотношении к запасам $C_{\text{мик}}$ почвы велики и составляют 57% в 15-летнем, 42% в 65-летнем и 47% в 130-летнем лесах.

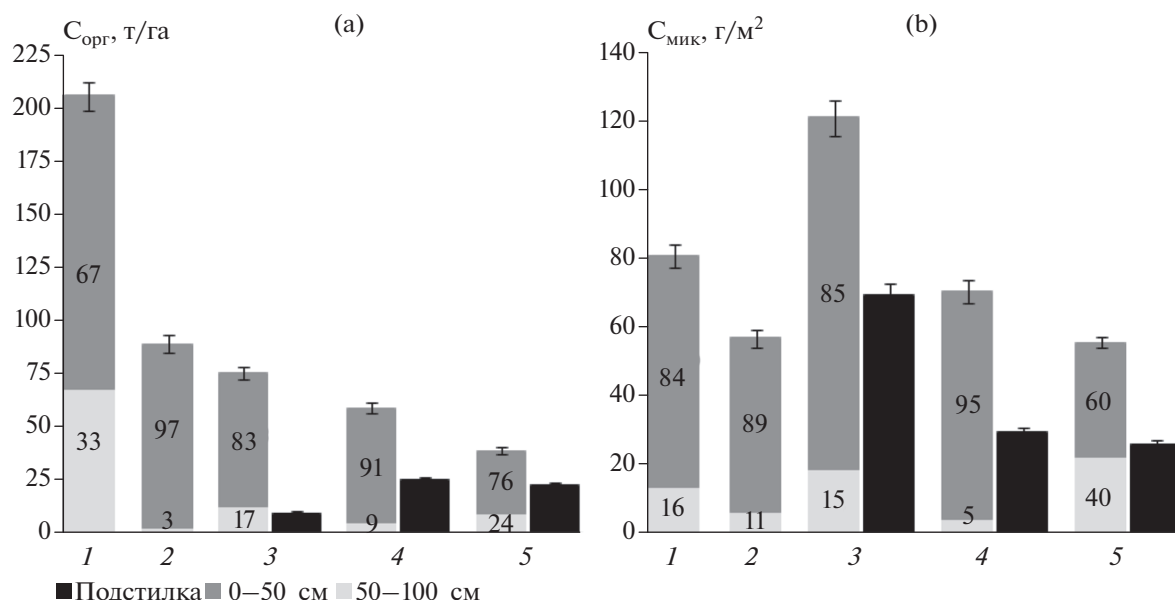


Рис. 3. Вклад разных слоев (%) и общие запасы органического углерода (а) и углерода микробной биомассы (б) в почве ($n = 3$) и подстилке ($n = 6$).

Запасы углерода в фитомассе напочвенной растительности максимальны на участке сенокоса и составляют 6.4 т С/га (рис. 4а). Для остальных землепользований данный показатель невелик и составляет 2.5 т С/га на пашне, 1.9 т С/га в 130-летнем лесу, 0.9 т С/га в 15-летнем лесу и 0.6 т С/га в 65-летнем лесу. Вклад подземной фитомассы в запасы углерода напочвенной растительности составляет 91% в молодом лесу, 64% на сенокосе и 56% на пашне. В зрелых лесах в напочвенной растительности превалирует надземная фитомасса, она составляет 67% в средневозрастном и 58% в спелом лесу. На лесных участках отмечена линейная зависимость запасов углерода древесной растительности от возраста древостоя (рис. 4б). Запасы углерода в древесной фитомассе возрастают в ряду 15-летний (62.8 т С/га) – 65-летний (88.3 т С/га) – 130-летний (120.2 т С/га) лес. У древесной растительности доля надземной фитомассы превалирует и составляет 85–88%. Запасы углерода в дробине возрастают пропорционально древесной фитомассе и составляют 3.3 т С/га в молодом, 6.8 т С/га в средневозрастном и 9.4 т С/га в спелом лесах. Доля углерода мертвых органических остатков от углерода фитомассы древостоя составляет 5–8%.

Общие экосистемные запасы углерода (табл. 4) максимальны на пашне (208.1 т С/га), что несколько превышает запасы в зрелых лесах – 180–193 т С/га. Наименьшие запасы углерода зафиксированы на сенокосе (95.6 т С/га), в молодом лесу – 152.4 т С/га. В исследованном ряду землепользований доля углерода почвы последовательно уменьшается от пашни к спелому лесу. На

пашне запасы углерода почвы составляют 98, на сенокосе – 93, в молодом лесу – 50, в средневозрастном лесу – 33, и в спелом лесу – 20%. В зрелых лесных экосистемах превалирующим пулом углерода является растительная фитомасса – от 49 до 63%. В молодом лесу запасы углерода фитомассы меньше и составляют 42%. Доля подземной фитомассы для всех землепользований в целом невелика и растет в ряду пашня – спелый лес с 1 до 8%. Доля мертвого органического вещества

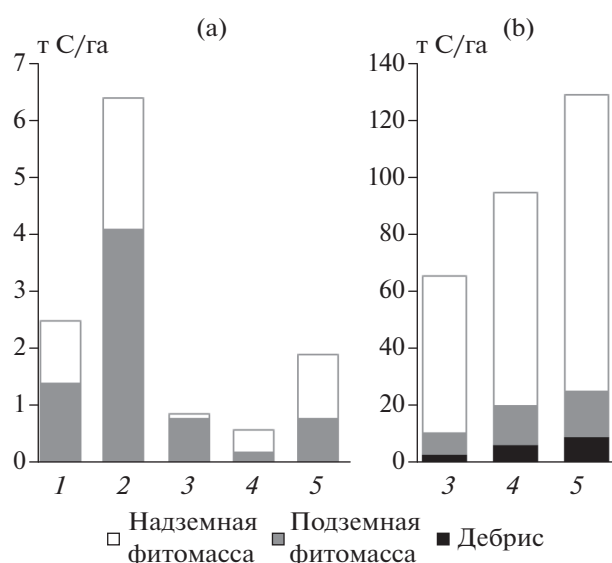


Рис. 4. Структура запасов углерода фитомассы напочвенной (а) и древесной (б) растительности.

Таблица 4. Общие экосистемные запасы углерода (т С/га) и доля каждого пула (%)

Пул	Пашня	Сенокос	Лес		
			15 лет	65 лет	130 лет
Надземная фитомасса	1.1/1	2.3/3	55.4/36	75.1/42	105.5/55
Подземная фитомасса	1.4/1	4.1/4	8.3/6	13.8/7	16.6/8
Дебрис	0	0	3.3/2	6.8/4	9.4/5
Подстилка	0	0	9.8/6	25.4/14	22.8/12
Почва, 0–100 см	205.6/98	89.2/93	75.6/50	58.9/33	38.9/20
Сумма	208.1/100	95.6/100	152.4/100	180.0/100	193.2/100

дебриса и подстилки увеличивается с 8% в 15-летнем лесу до 17–18% в зрелых лесах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование подзолов Карелии происходит на легких породах в условиях пересеченного рельефа. Процесс подзолообразования здесь не столь интенсивен, как в условиях южной тайги, и для почв характерен укороченный профиль. На контрольном участке под 130-летним сосняком диагностирован маломощный подзол иллювиально-железистый – типичная автоморфная почва района исследований. При сельскохозяйственном освоении и вспашке маломощных альфегумусовых почв формируются агрозоемы альфегумусовые иллювиально-железистые, имеющие агрогумусовый горизонт Р и частично припаханный ВF. Данные почвы диагностированы на участках сенокоса и молодого леса. Обычно пахотные почвы, сформированные из отдела альфегумусовых, также представлены агрозомами альфегумусовыми с мощным горизонтом Р. Однако на участке пашни была обнаружена уникальная почва – агростратозем, залегающий на погребенном подзоле. Генезис профиля такого типа обычно связан с регулярным внесением органических удобрений, плодородных субстратов, известкования и приурочен к питомникам, сортоучасткам и частным наделам [7, 24]. Начальной стадией формирования данной почвы, по-видимому, была культура подсечно-огневого земледелия, о чем свидетельствует слой RY_г на глубине 44–75 см с включением угольков по всей толще. Считается, что при ручном освоении земель предпочтение отдавали легким песчаным и супесчаным подзолам, поскольку их было проще обрабатывать. Легкие почвы характеризуются благоприятным водно-воздушным режимом благодаря хорошему дренажу, а недостаток элементов питания компенсируется высоким уровнем удобрений [21]. Исследованный участок находится около дер. Корза, основанной в XVII в. [14], которая является одним из старейших поселений Юго-Западной Карелии. Можно предположить,

что данная почва находится в сельскохозяйственном обороте несколько сотен лет.

Несмотря на зональный тип растительности, под 65-летним лесом диагностирован дерново-подбур оподзоленный, хотя данные почвы обычно приурочены к южной тайге и лесостепи [29]. При нарастании альфегумусовой агропочвы лесной растительностью на месте бывшего пахотного горизонта формируется горизонт АУе с признаками оподзоливания в нижней его части, но без образования полноценного подзолистого горизонта. Считается, что восстановление естественного почвенного профиля на зарастающих залежах происходит быстрее на почвах легкого гранулометрического состава [27]. В исследованном средневозрастном лесу признаки агрогенного воздействия сохраняются достаточно долго, а процесс подзолообразования замедлен, благодаря преобладанию листовенного опада, способствующего образованию более стабильных органических соединений и их аккумуляции [18, 46, 49].

В исследованных почвах изменение свойств по профилю в значительной степени определяется их гранулометрическим составом и степенью агрогенной трансформации. Так, наибольшая плотность характерна для почв сенокоса и 65-летнего леса – крупнозернистых рыхлых песков (табл. 2). В почве сенокоса плотность не меняется с глубиной, на других участках в верхних органогенных горизонтах плотность почв заметно меньше, что сопряжено с повышенным содержанием углерода. Типичным признаком альфегумусовых почв является высокая кислотность [20], значения рН в исследованных профилях колеблются от сильно- до слабокислых.

Вследствие агрогенной трансформации в почвах формируются гумусовые горизонты, мощность которых изменяется с 44–35 см на сельскохозяйственных землях до 27–10 см в постантропогенных лесных экосистемах. С гумусовыми горизонтами сопряжено содержание и тип распределения органического углерода почв [9]. На пашне отмечено максимальное накопление С_{орг} в профиле вследствие особенностей генезиса и времени использования данной почвы в

сельском хозяйстве. Равномерно-аккумулятивный тип накопления углерода в молодом лесу, по сравнению с другими землепользованиями можно объяснить особенностями почвообразующей породы – водно-ледниковой супеси, имеющей более высокое содержание биогенных элементов, чем песчаная морена. На участках сенокоса, средневозрастного и спелого лесов содержание $C_{орг}$ глубже 40 см значительно уменьшается. Распределение углерода микробной биомассы в верхней части профиля исследованных землепользований в целом идентично распределению $C_{орг}$, кроме почвы пашни, где содержание $C_{мик}$ незначительно.

Подзолы – одни из самых бедных в агрохимическом отношении почв [15]. В горизонте Е 130-летнего леса отмечены очень низкие показатели рН, суммы обменных оснований, содержания подвижных фосфора, калия, а также общего азота и углерода (табл. 3). В агрогумусовых горизонтах участков пашни, сенокоса и молодого леса основные агрохимические показатели соответствуют средней и сильной степени окультуренности. В горизонте АУ 65-летнего леса значительно возрастает кислотность и содержание $C_{орг}$, а количество доступного фосфора, калия и сумма обменных оснований падает по сравнению с агрогумусовыми горизонтами. Уровень рН и сумма обменных оснований значительно снижаются на участках с зональной растительностью, отражая увеличение поступления труднорастворимого опада; подобные закономерности отмечены другими исследователями [8, 13, 25, 35]. Для почвы пашни характерны высокие показатели содержания общего углерода и азота, а также суммы обменных оснований на фоне незначительного содержания доступного калия. Легкие почвы отличаются низким содержанием калия [23], который на пашне дополнительно выносятся с урожаем. В целом содержание K_2O растет на участках сенокоса и молодого леса, с увеличением поступления в почву растительных остатков, а затем вновь уменьшается под зональной растительностью, отражая особенности выноса элементов питания древесной растительностью, как показано в работе [27]. На всех участках, за исключением спелого леса, отмечено повышенное содержание P_2O_5 . Для фосфат-иона характерна значительная пространственная вариабельность вследствие малой растворимости [19] и накопление в сельскохозяйственных почвах при использовании удобрений [26]. В почве 15-летнего леса отмечено самое высокое содержание P_2O_5 и K_2O , что можно объяснить не только качеством опада, но и отличием минералогического состава почвообразующей породы от других участков. Для горизонтов Р характерно близкое соотношение $C/N = 16$, тогда как под зональной растительностью C/N составляет 27–28, отражая уменьшение скорости минерализации органического веще-

ства в зрелых лесах. В целом в почвах под зональной растительностью отмечается ухудшение агрохимических свойств, функций продуктивности и депо элементов питания по сравнению с почвами сельскохозяйственных угодий и молодого леса [38].

Содержание углерода микробной биомассы в почвах исследованных участков сравнимо со значениями $C_{мик}$ в сходных климатических условиях на подзолах [4]. Для сосновых лесов на песчаных почвах характерно достаточно низкое содержание $C_{мик}$ [6]. Несмотря на высокое содержание $C_{орг}$ в верхнем горизонте почвы пашни и минимальное в спелом лесу, показатели $C_{мик}$ для данных участков и сенокоса близки и достоверно не различаются. Максимальные показатели $C_{мик}$ в верхних горизонтах зафиксированы в молодом и средневозрастном лесах. Данный тренд отражает изменения в составе растительного сообщества и увеличение количества поступающего на почву легкогидролизуемого опада [16]. Микробный метаболический коэффициент QR имеет довольно низкие значения на всех исследованных участках, что диагностирует экологическое благополучие микробиоценозов [1]. Соотношение $C_{мик}/C_{орг}$ возрастает в ряду пашня – спелый лес, и особенно высоко в 130-летнем лесу, где отмечено повышенное содержание $C_{мик}$ почвы на фоне очень низкого содержания $C_{орг}$. В целом для почв лесных участков зафиксированы высокие значения $C_{мик}$ и увеличение доли $C_{мик}$ в почвенном углероде наряду с минимальным значением QR . Это свидетельствует о большей микробиологической активности и устойчивом функционировании микробиоценозов естественных экосистем по сравнению с нарушенными, что согласуется с рядом исследований [6, 11, 12]. Следовательно, в лесных почвах альфегумусового ряда отмечена повышенная трансформационная функция, по сравнению с сельскохозяйственными угодьями, как и в аналогичном исследовании на подзолистых почвах [10].

Существенный вклад в запасы $C_{орг}$ почвы вносит слой 0–50 см, где прослеживается влияние растительных остатков на запасы углерода почвы [42]. На запасы $C_{орг}$ в слое 50–100 см влияет как тип накопления углерода в землепользовании (с максимумом на пашне), так и фоновое содержание в почвообразующей породе (с минимумом на крупнозернистых песках участков сенокоса и 65-летнего леса) [44]. Запасы органического углерода почвы пашни в слое 0–100 см превосходят запасы $C_{орг}$ почвы спелого леса в 5 раз (рис. 3а). Столь значительные запасы определяются особенностями генезиса пахотной почвы, длительным периодом культивирования и внесением органических материалов, что отмечено рядом исследователей [5, 28, 39]. Общие запасы углерода почвы последовательно уменьшаются в ряду сенокос – спелый

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

лес, и достигают минимума в 130-летнем лесу. Запасы $C_{\text{орг}}$ в слое почвы 0–100 см зрелых лесов составляют 39–59 т С/га, что сопоставимо с запасами углерода песчаных почв в подзоне южной тайги [17]. Однако суммарный запас углерода в подстилке и почве лесных землепользований (62–85 т С/га) не превосходит запасы $C_{\text{орг}}$ в почве сенокоса (89 т С/га). Данные показатели свидетельствуют о том, что альфегумусовые почвы сельскохозяйственных угодий с развитой культурой земледелия имеют высокие недооцененные запасы органического углерода [39, 45].

Почва пашни характеризуется высокими запасами $C_{\text{мик}}$, соответствующими запасам $C_{\text{орг}}$. Максимальные запасы углерода микробной биомассы зафиксированы в почве и подстилке на участке молодого леса (рис. 3b). В целом, в лесных экосистемах наибольший вклад в запасы $C_{\text{мик}}$ вносит лесная подстилка, особенно с преобладанием листовенного опада [1, 25, 28]. Для всех участков, за исключением спелого леса вклад верхних 50 см в запасы $C_{\text{мик}}$ почвы высок и составляет 84–95%. В почве 130-летнего леса слой 50–100 см обеспечивает до 40% запасов $C_{\text{мик}}$, что характеризует особенности микробиома лесной почвы, с преобладанием грибов над бактериями [50].

Доля почвенного $C_{\text{орг}}$ в общих экосистемных запасах углерода традиционно высока на сельскохозяйственных землепользованиях (98–93%), она уменьшается до 50% в молодом лесу и минимальна под зональной растительностью, составляя 33–20% (табл. 4), данный тренд характерен для таежной зоны [25, 30]. Общие экосистемные запасы углерода, напротив, имеют необычную структуру, поскольку запасы $C_{\text{орг}}$ на пашне сопоставимы с запасами в зрелых лесах и даже превышают их за счет высоких запасов углерода почвы. Таким образом, запасы $C_{\text{орг}}$ почв на участках, находящихся в длительном сельскохозяйственном использовании, могут значительно превышать фоновые значения, характерные для естественных почв [45]. Общие запасы $C_{\text{орг}}$ в молодом лесу имеют средние значения и минимальны на сенокосе. В лесных экосистемах отмечена линейная зависимость накопленной фитомассы от возраста древостоя, как и в исследовании на подзолистых почвах [10], хотя молодой и средневозрастной леса имеют более высокую продуктивность и класс бонитета, чем спелый лес (табл. 1, рис. 4b). Основной пул углерода зрелых лесов составляет растительная фитомасса (49–63%). Значительный вклад на лесных участках вносят связанные с растительностью пулы мертвого органического вещества дробиса и подстилки [42], возрастая с 8% в молодом до 17–18% в средне- и старовозрастных лесах. В целом максимальная функция секвестрации углерода отмечена на пашне за счет $C_{\text{орг}}$ почвы и в зрелых лесных экосистемах за счет растительной фитомассы.

Смена землепользования на альфегумусовых почвах нормального увлажнения в среднетаежной подзоне Карелии приводит к значительным изменениям в морфологическом строении профиля почв, их агрохимических и микробиологических свойств, запасах углерода почв и экосистемы в целом. Агрогенная трансформация типичных подзолов иллювиально-железистых приводит к образованию агроземов альфегумусовых иллювиально-железистых, представленных на участках сенокоса и молодого леса. На пашне почва сформирована на погребенном подзоле путем длительного внесения органических субстратов и отнесена к отделу стратоземов. Постагрогенная трансформация профиля проявляется под зональной растительностью 65-летнего леса в виде преобразования агрогумусового горизонта в серогумусовый с признаками оподзоливания. Динамика свойств почв обусловлена особенностями гранулометрического и минералогического состава почвообразующей породы, а также мощностью гумусовых горизонтов. В агрогумусовых горизонтах участков пашни, сенокоса и молодого леса основные агрохимические показатели соответствуют средней и сильной степеням окультуренности. В серогумусовом горизонте 65-летнего леса значительно возрастает кислотность и содержание $C_{\text{орг}}$, а количество доступного фосфора, калия и сумма обменных оснований уменьшается по сравнению с агрогумусовыми горизонтами. В подзолистом горизонте 130-летнего леса отмечены самые низкие агрохимические показатели. В целом в почвах под зональной растительностью отмечается ухудшение функций продуктивности и депо элементов питания по сравнению с почвами сельскохозяйственных угодий и молодого леса. Максимальные показатели $C_{\text{мик}}$ в верхних горизонтах почв отмечены в молодом и средневозрастном лесах. Заметный вклад в запасы $C_{\text{мик}}$ вносит лесная подстилка, особенно с преобладанием листовенного опада. Повышенное соотношение $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ наряду с минимальным QR в верхних горизонтах лесных почв свидетельствует о высокой микробиологической активности и трансформационной функции почв лесных сообществ. Суммарный запас углерода в подстилке и почве лесных землепользований составляет 62–85 т С/га. Запасы $C_{\text{орг}}$ почвы сенокоса – 89 т С/га, а пашни – 205.6 т С/га, что свидетельствуют о высоких недооцененных запасах органического углерода почв сельскохозяйственных угодий с развитой культурой земледелия. Доля почвенного $C_{\text{орг}}$ в общих экосистемных запасах углерода высока на сельскохозяйственных землепользованиях (98–93%), уменьшается до 50% в молодом лесу и минимальна под зональной растительностью, составляя 33–20%. Общие экосистемные запасы углерода на пашне сопоставимы с запасами в зрелых лесах и даже превышают их за

счет высоких запасов углерода почвы. Общие запасы $C_{\text{орг}}$ в молодом лесу имеют средние значения и минимальны на сенокосе. Основной пул углерода зрелых лесов составляет растительная фитомасса (49–63%), доля связанных с ней пулов мертвого органического вещества дегрифа и подстилки возрастает с 8 до 17–18%. 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, Г.И. Деминой, А.Г. Каштановой и Л.И. Скороходовой за помощь в проведении полевых и аналитических работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05153 и в рамках госзадания КарНЦ РАН № FMEN-2022-0012 на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ “Карельский научный центр РАН”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьева Н.Д., Сусьян Е.А., Рыжова И.М., Бочарникова Е.О., Стольников Е.В.* Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биогеоценозов и коренных ельников Южной тайги (Костромская область) // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1108–1116.
2. Атлас Карельской АССР / Под ред. А.Г. Дурова. М.: ГУГК СССР, 1989. 40 с.
3. *Бискэ Г.С.* Четвертичные отложения и геоморфология Карелии. Петрозаводск: Госиздат КАССР, 1959. 307 с.
4. *Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И., Тимофеева М.В.* Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1328–1340. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20110052>
5. *Володина Т.И., Романов Г.А., Левченкова А.Н.* Влияние различных систем удобрения на физико-химические и агрофизические показатели дерново-подзолистой почвы в условиях Северо-Запада России // Агрехимия. 2014. № 3. С. 12–21.
6. *Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв Южного Подмосквья // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1231–1245.
7. *Герасимова М.И., Ананко Т.В., Савицкая Н.В.* Разработка подходов к введению антропогенно-измененных почв в содержание почвенной карты Российской федерации (на примере Московской области) // Почвоведение. 2020. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20010086>
8. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Буре В.М.* Скорости изменения кислотно-основных параметров, содержания общего углерода и состава гумуса в дерново-подзолистой песчаной почве при переходе от пашни к лесу при сукцессии залежных земель // Агрехимия. 2015. № 11. С. 19–29.
9. *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>
10. *Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Тюнен 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. *Завьялова Н.Е., Васбиева М.Т., Фомин Д.С.* Микробная биомасса, дыхательная активность и азотфиксация в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 2020. № 3. С. 372–378. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030120>
12. *Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васнев В.И., Кудяров В.Н., Валентины Р.* Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090056>
13. *Казлаускайте-Ядзявиче А., Трипольская Л., Волунгевичус Й., Бакишен Е.* Изменение свойств песчаной почвы после конверсии пахотных угодий в другие виды землепользования // Агрехимия. 2020. № 1. С. 25–32. <https://doi.org/10.31857/S0002188120010044>
14. Карелия. энциклопедия / Под ред. А.Ф. Титова. Петрозаводск: ПетроПресс, 2009. Т. 2. 464 с.
15. *Когут Б.М.* Оценка содержания гумуса в пахотных почвах России // Почвоведение. 2012. № 9. С. 944–952.
16. *Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В., Смирнов В.Э., Данилова М.А., Тебенькова Д.Н., Браславская Т.Ю., Кузнецов В.А., Ткаченко Ю.Н., Геникова Н.В.* Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20080109>
17. *Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераскина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И.* Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых

- почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803–816. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19070086>
18. Литвинович А.В. Постагрогенная эволюция хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны // Агрохимия. 2009. № 7. С. 85–93.
 19. Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
 20. Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Шабанов М.В. Изменение кислотности-основных свойств окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в процессе постагрогенной трансформации // Почвоведение. 2009. № 6. С. 680–686.
 21. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Щенисенко Е.А., Нефедова Т.Т. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
 22. Люри Д.И., Некрич А.С., Карелин Д.В. Изменение пахотных площадей в России в 1990–2015 гг. и почвенная эмиссия диоксида углерода // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 3. С. 70–76.
 23. Никитина Л.В., Володарская И.В. Динамика обменного калия и его минимальные уровни в агроценозах на дерново-подзолистых почвах // Агрохимия. 2007. № 2. С. 14–18.
 24. Почвы Московской области и их использование. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2002. Т. 1. 500 с.
 25. 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>
 26. Самсонова Н.Е., Родченков С.Н. Использование удобрений с пониженной растворимостью фосфатного компонента и фосфатное состояние дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 9. С. 24–31.
 27. 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>
 28. Телеснина В.М., Жуков М.А. Влияние способа сельскохозяйственного освоения на динамику биологического круговорота и ряда почвенных свойств в ходе постагрогенной сукцессии (Костромская область) // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1114–1129. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1907013X>
 29. Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И., Хохлов С.Ф. Экологические ниши основных типов почв России: географический аспект новой классификации // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1043–1051.
 30. 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>
 31. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 32. Bell S.M., Barriocanal C., Terrer C., Rosell-Melé A. Management opportunities for soil carbon sequestration following agricultural land abandonment // Environmental Science and Policy. 2020. V. 108. P. 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.03.018>
 33. Campbell J.E., Lobell D.B., Genova R.C., Field C.B. The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands // Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. P. 5791–5794. <https://doi.org/10.1021/es800052w>
 34. Feddema J.J., Oleson K.W., Bonan G.B., Mearns L.O., Buja L.E., Meehl G.A., Washington W.M. The importance of land-cover change in simulating future climates // Science. 2005. V. 310. P. 1674–1678.
 35. Girona-García A., Badía-Villas D., Jiménez-Morillo N.T., de la Rosa J.V., González-Pérez J.A. Soil C and N isotope composition after a centennial Scots pine afforestation in podzols of native European beech forests in NE-Spain // Catena. 2018. V. 165 P. 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.023>
 36. Heinimann A., Mertz O., Frohling S., Christensen A.E., Hurni K., Sedano F., Chini L.P., Sahajpal R., Hansen M., Hurr G. A global view of shifting cultivation: recent, current, and future extent // PLoS One. 2017. V. 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184479>
 37. IPCC Special Report. Climate Change and Land. Summary for Policymakers. 2019. Geneva, Switzerland. 874 p.
 38. Kalinina O., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Giani L. Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // Catena. 2015. V. 129. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.016>
 39. Kern J., Giani L., Teixeira W., Lanza G., Glaser B. What can we learn from ancient fertile anthropic soil (Amazonian Dark Earths, shell mounds, Plaggen soil) for soil carbon sequestration? // Catena. 2019. V. 172. P. 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.008>
 40. Kögel-Knabner I., Amelung W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups // Geoderma. 2021. V. 384. 114785. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114785>
 41. Millennium Ecosystem Assessment (MEA). Ecosystems and Human Well-Being. 2005. Island Press: Washington, DC. 636 p.
 42. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia // Geoderma Regional. 2021. V. 27. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00427>
 43. Pereira P. Ecosystem services in a changing environment // Sci. Total Environ. 2020. V. 702. 135008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135008>

44. Poeplau C., Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe // *Geoderma*. 2013. V. 192. P. 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>
45. Schulp C.J.E., Verburg P.H. Effect of land use history and site factors on spatial variation of soil organic carbon across a physiographic region // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2009. V. 133. P. 86–97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.005>
46. Thiffault E., Hannam K.D., Quideau S.A., Pare D., Belanger N., Oh S.-W., Munson A.D. Chemical composition of forest floor and consequences for nutrient availability after wildfire and harvesting in the boreal forest // *Plant Soil*. 2008. V. 308. P. 37–53.
47. Thuiller W. Climate change and the ecologist // *Nature*. 2007. V. 448. P. 550–552. <https://doi.org/10.1038/448550a>
48. Verburg P.H., Erb K.-H., Mertz O., Espindola G. Land System Science: between global challenges and local realities // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2013. V. 5, 433–437. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.08.001>
49. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B.D., Gundersen P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? // *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 309. P. 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
50. Wang B., An S., Liang C., Liu Y., Kuzyakov Y. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems // *Soil Biol. Biochem.* 2021. V. 162. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>
51. 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.

Dynamics of Soil Properties and Ecosystem Carbon Stocks for Different Types of Land Use (Middle Taiga of 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, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, 185910 Russia

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

*e-mail: vorgo@mail.ru

The effect of land use changes on soil properties and ecosystem carbon stocks in the middle taiga zone of Karelia on Podzols of normal humidity was investigated. Changes in soil profile structure, basic agrochemical and microbiological indicators of upper horizons, C_{org} and C_{mik} stocks in a meter layer of soils and site carbon pool structure were analyzed. 130-age mature pine forest as a control, arable land, hayfield, as well as 15-age young alder forest and 65-age middle-aged pine forest were studied. In the soils of arable land, hayfield and young forest was recorded an increased level of pH and nutrients with C/N ratio of about 16. The highest content of C_{org} was noted in the soil of arable land (2.7%) and middle-aged forest (3.9%) with N_{tot} of about 0.2%. In the soils of arable land, hayfield and mature forest C_{mik} content is 129–167 mg C/kg, in plots of young and middle-aged forests C_{mik} content is in the range of 312–447 mg C/kg. The maximum stocks of C_{mik} were recorded in the soil (121 g C/m²) and litter (70 g C/m²) of young forest. C_{mik} stocks in the soils of arable land and middle-aged forest are in the range of 70–81 g C/m², in hayfield and mature forest – 56 g C/m². C_{org} stocks of soil in the meter layer are maximum on arable land and amount to 205 t C/ha, and decrease in the order of hayfield – young – middle-aged – mature forest from 89 to 39 t C/ha. The total ecosystem carbon stocks are maximal on arable land – 208 t C/ha, which is slightly higher than the stocks in ripe forests – 180–193 t C/ha. C_{org} stocks of young forest are 152 t C/ha and minimal carbon stocks are in hayfield – 96 t C/ha.

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