
**ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО
И МИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ**

УДК 631.472.51

**ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА И ПОТЕНЦИАЛА ПРОДУЦИРОВАНИЯ
CO₂ ПОЧВАМИ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ****© 2023 г. И. М. Рыжова^а (ORCID: 0000-0002-8325-5222), М. А. Подвезенная^а*, В. М. Телеснина^а,
Л. Г. Богатырев^а, О. В. Семенюк^а**^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: podvezennaya@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 12.05.2023 г.

Проведена оценка запасов углерода в почвах хвойных и лиственных лесных экосистем, агроценозов, залежей и пойменных лугов территории агробиостанции МГУ “Чашниково”. Определены типологическая принадлежность, запасы, содержание детрита и соотношение мощностей (запасов) подгоризонтов лесных подстилок, как индикаторов интенсивности разложения органического вещества. Получены оценки запасов общего органического углерода в слоях 0–30 и 0–100 см минерального профиля и запасов углерода биологически активного органического вещества в слое 0–20 см расчетным путем по данным о содержании общего углерода. Выявлено максимальное накопление органического углерода в лесных подстилках и умеренное — в минеральной части профиля дерново-подзолистых почв хвойных лесов. Запасы углерода лесной подстилки ельников отличаются почти в 10 раз в зависимости от местоположения в тессере. Минимальным накоплением углерода характеризуются подстилки почв луговых биогеоценозов, как суходольных, так и пойменных. Аллювиальные серогумусовые почвы пойменных лугов характеризуются максимальными запасами общего углерода и углерода биологически активного органического вещества. Потенциал продуцирования почвой углекислого газа, определенный по данным о структурных и функциональных характеристиках подстилки и запасах углерода биологически активного органического вещества в верхнем (0–20 см) слое почв, зависит от сочетания нескольких факторов: типа растительности, степени гидроморфизма и характера сельскохозяйственного использования в прошлом или настоящем. В почвах хвойных лесов по сравнению с лиственными ниже скорость разложения подстилки из-за особенностей биохимического состава опада, поэтому они имеют более низкий потенциал продуцирования CO₂. Почвы естественных травяных биогеоценозов, особенно пойменных лугов, являются максимальными потенциальными продуцентами углекислого газа за счет интенсивного разложения растительного опада и повышенных запасов углерода биологически активного органического вещества.

Ключевые слова: углерод почв, запасы почвенного органического вещества, лесные подстилки, климатически активные газы, Retisol, Fluvisols

DOI: 10.31857/S0032180X23600713, **EDN:** EWJNHN**ВВЕДЕНИЕ**

Почвы являются крупнейшим резервуаром углерода в биосфере. Они в среднем содержат 1500–2400 Гт С (1 Гт = 10⁹ т) [31]. На Россию приходится пятая часть мировых запасов почвенного углерода [14]. В зависимости от природных условий и антропогенного воздействия почвы могут быть, как источником, так и стоком углерода. Поэтому в связи с проблемой глобального изменения климата особую актуальность приобрела оценка запасов и потенциала продуцирования CO₂ почвами, так как эти данные необходимы для принятия оптимальных решений по управлению земельными ресурсами и выбора стратегий смягчения последствий климатических изменений.

Уровень накопления углерода в почве характеризуется высокой пространственной изменчивостью, так как он определяется совокупным действием биоклиматических, литологических, геоморфологических и антропогенных факторов. По современным оценкам запасы органического углерода в почвах России составляют 285–364 Гт [26]. Для уточнения этих оценок большое значение имеет совершенствование методологии исследований [1, 9, 14], увеличение количества работ по оценке запасов органического углерода в почвах и выявление основных факторов, определяющих пространственное распределение запасов почвенного углерода в разных биоклиматических регионах России [2, 15, 17, 28].

Большое значение для прогнозирования отклика наземных экосистем на глобальные изменения климата имеет величина потенциала продуцирования CO_2 почвами. Она может быть получена на основании данных о запасах и типологии подстилки, которые характеризуют соотношение интенсивности процессов накопления и разложения растительного опада [23], а также данных о запасах биологически активного органического вещества в почвах [20].

Цель работы — оценка запасов углерода и потенциала продуцирования CO_2 почвами подзоны хвойно-широколиственных лесов европейской части России на примере учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ им. М.В. Ломоносова “Чашниково” (Московская область), на территории которого представлены типичные для этого региона ландшафты, где леса перемежаются с лугами, сельскохозяйственными угодьями и залежами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории учебно-опытного почвенно-экологического центра “Чашниково”, расположенного в Солнечногорском районе Московской области. В течение многих лет в здесь проводятся учебные полевые практики (картография почв, ландшафтоведение, почвоведение) и выполняются магистерские и диссертационные работы студентами и аспирантами факультета почвоведения МГУ. Настоящая статья представляет собой обобщение полученных данных за последние 10 лет.

Территория “Чашниково” расположена в подзоне хвойно-широколиственных лесов и характеризуется довольно разнообразными сочетаниями факторов почвообразования — растительности, почвообразующих пород и форм рельефа, на которые накладываются антропогенные воздействия, главным образом сельскохозяйственное использование. Климат изучаемой территории умеренно-континентальный. Средняя многолетняя температура воздуха составляет $+3.7^\circ\text{C}$, средняя температура января -10.5°C , июля $+17^\circ\text{C}$, безморозный период длится 120–130 дней [22]. Среднегодовое количество осадков около 600–650 мм, большая часть которых приходится на вторую половину лета (конец июля–август). Почвенно-экологический центр “Чашниково” расположен в пределах Клинско-Дмитровской гряды, что обусловило широкое распространение на этой территории плоско-волнистого рельефа. Среди почвообразующих пород преобладают моренные отложения московского оледенения, перекрытые покровными суглинками различной мощности [12]. Пойма р. Клязьмы сложена аллювием, местами встречаются торфяные отложе-

ния, перекрытые аллювием. Зональная растительность представлена чистыми ельниками или ельниками с примесью широколиственных пород, занимающими нераспаханные территории водоразделов и надпойменных террас. В нижних частях приводораздельных и притеррасных склонов, а также в приводораздельных депрессиях, обычно развиты мелколиственные заболоченные леса из березы и осины, которые соответствуют полугидроморфным ландшафтам. Так, в окрестностях оврага “Красный воин” (катена “Кирпичное поле”) такие биогеоценозы по мере возрастания гидроморфизма образуют последовательный ряд: 1) в краевой части приводораздельной депрессии расположен березняк волосисто-осоковый (формула древостоя — 10Б), почва — дерново-подзолисто-глеевая; 2) в пределах склона приводораздельной депрессии — березово-осинник волосисто-осоковый (8О2Б) почва — дерново-подзолисто-глеевая; 3) в нижней части склона депрессии — березняк дернисто-щучковый (10Б) почва — торфяно-перегнойно-подзолисто-глеевая [22]. В пойме преобладают разнообразные луговые растительные сообщества. Значительная часть земель распахана, либо находится в состоянии постагрогенной восстановительной сукцессии. Разнообразие почвенного покрова и его мозаичность определяется, главным образом, положением в мезорельефе [6], а также характером растительности, который может быть в разной степени преобразован настоящим или прошлым антропогенным воздействием. В результате на территориях водоразделов и террас на распаханых землях широко развиты агродерново-подзолистые почвы (Albic Retisol (Aric, Loamic)), на зарастающих пашнях — агродерново-подзолистые реградированные (Albic Retisol (Aric, Loamic)) [4]. Под ненарушенными лесами автоморфных ландшафтов развиты дерново-подзолистые почвы (Albic Retisol (Loamic)). Названия почв даны по [13]. Полугидроморфным ландшафтам соответствуют дерново-подзолисто-глеевые (Albic Gleyic Retisol (Loamic)) и торфяно-подзолисто-глеевые (Albic Gleyic Histic Retisol (Loamic)) почвы. В пойме р. Клязьмы наблюдается целый спектр аллювиальных почв — аллювиальные серогумусовые (Umbric Fluvisols) аллювиальные серогумусовые глеевые (Umbric Fluvisols (Oxyaquic)), агрогумусовые аллювиальные (Umbric Fluvisols (Aric)) — в зависимости от уровня залегания грунтовых вод и антропогенного воздействия.

Для оценки запасов углерода в почвах изучаемой территории отбор проб проводился в следующих ландшафтах: ненарушенные или мало нарушенные хвойные леса, заболоченные хвойно-мелколиственные и мелколиственные леса, распаханые территории водоразделов и приводораздельных склонов, суходольные луга и залежи по пахотным

Таблица 1. Объекты исследования на территории “Чашниково”

Ландшафт	Положение в рельефе	Растительность	Почвы
Ненарушенные и малонарушенные хвойно-широколиственные леса	Водоразделы и надпойменные террасы	Ельник кислично-зеленчуковый с участием клена в древостое	Дерново-подзолистые
Мелколиственные и мелколиственные заболоченные леса	Склоны и днища приводораздельных впадин	Березняки и березово-осиновые травяно-осоковые леса	Дерново-подзолисто-глеевые, торфяно-перегноино-подзолисто-глеевые
Распаханные территории	Водоразделы и приводораздельные склоны	Посевы и посадки сельскохозяйственных культур	Агродерново-подзолистые, агродерново-подзолистые глееватые
Залежи по пашне разного возраста	Водоразделы и приводораздельные склоны	Луга с преобладанием в травостое злаков и сорно-рудерального разнотравья	Агродерново-подзолистые реградированные, агродерново-подзолистые реградированные глееватые
Суходольные луга	Водоразделы, приводораздельные склоны и надпойменные террасы	Суходольные луга с преобладанием в травостое злаков и лугового разнотравья	Агродерново-подзолистые реградированные, агродерново-подзолистые реградированные глееватые
Пойменные луга	Центральная пойма р. Клязьма	Разнотравно-злаковые луга	Аллювиальные серогумусовые
	Притеррасная пойма р. Клязьмы	Разнотравно-злаковые луга с участием гигрофитов и мезогигрофитов	Аллювиальные серогумусовые глеевые
Залежные пойменные луга	Центральная пойма р. Клязьмы	Разнотравно-злаковые луга	Агрозумусовые аллювиальные

угодьям, а также пойменные луга разной степени увлажнения (табл. 1).

Определение типологии, фракционного состава и запаса углерода подстилок. На основании многочисленных исследований установлено, что в лесных экосистемах деревья создают мощные длительно действующие биогеоценотические поля, под воздействием которых запасы и характеристики подстилок и некоторые свойства почв закономерно изменяются в направлении от ствола дерева в пределах тессеры [7, 8]. Под тессерой подразумевается область влияния дерева-эдификатора, определяющая пространственное распределение особенностей живого напочвенного покрова, подстилок и отчасти почвенных свойств [10].

Степень проявления этой закономерности может быть разной в зависимости от типа леса, плотности древостоя, влияния вывалов и других факторов [11].

В изучаемых еловых лесах, где тессеры хорошо выражены отбор образцов подстилок проводили в соответствии с пространственной структурой фитоценоза: в приствольных пространствах (около 50 см непосредственно в радиусе ствола); под кронами (проекция кроны); в окнах (межкronовое пространство). Отбор проб в тессерах проводился в 5-кратной повторности. В мелколиственных лесах, где тессеры не выражены или выражены слабо, проводили отбор проб случайным образом в 9-кратной повторности. Подстилки отбирали погоризонтно рамкой 25 × 25 см.

Параллельно с отбором подстилки измеряли мощность каждого ее подгоризонта. Типологию подстилок определяли по классификации Богатырева [3]. Запасы подстилок и их подгоризонтов рассчитывали на абсолютно сухую массу. Верхний подгоризонт L разбирали на следующие фракции: хвоя, листья, ветошь (опад травянистых

растений), шишки, кора, ветки. Фракцию, происхождение которой по причине сильной трансформации не удалось идентифицировать, определяли как детрит. Зольность подгоризонтов (F и H), а также фракций подгоризонта L определяли методом сухого сжигания при 450°C. Пересчет потери при прокаливании на содержание углерода в подстилке и ее фракциях определяли согласно следующей формуле, полученной по результатам экспериментальных данных:

$$y = 0.3704x + 1.2186,$$

где y — $C_{\text{орг}}$, %, x — потери при прокаливании, %.

Помимо типологии, мощности и запасов подстилок рассчитаны показатели, напрямую связанные с интенсивностью биологического круговорота и, как следствие, с депонированием углерода в подстилке:

- запасы и доля детрита в подгоризонте L;
- запасы и доля легко разлагаемых компонентов (листья и ветошь) в подгоризонте L;
- отношение мощности подгоризонта L к общей мощности нижележащих подгоризонтов;
- отношение запасов подгоризонта L к общим запасам нижележащих подгоризонтов;
- запасы золы легко разлагаемой фракции и ее отношение к общим запасам золы подгоризонта L;
- запасы органического углерода в подстилке (общие и по подгоризонтам);
- запасы органического углерода в детрите (как наиболее устойчивой к разложению фракции), а также в легко разлагаемых компонентах (как наиболее доступных микроорганизмам и наиболее перспективному источнику атмосферного CO_2).

Определение запасов углерода в почве. В настоящее время содержание органического углерода в почве определяется прямым сухим сжиганием или классическим методом Тюрина. Использование первого метода, несмотря на высокую точность, ограничивается недостаточным распространением CHN анализаторов. Второй метод может быть реализован в любой лаборатории, поэтому 97% данных о содержании углерода в почве получено классическим методом [1]. В большинстве образцов почв, отобранных на территории “Чашниково” определяли содержание гумуса методом Тюрина.

Оценки запасов органического углерода в почвенных горизонтах проводили по данным об их мощности, содержании $C_{\text{орг}}$ и плотности. Данные о мощности горизонтов получены из описаний разрезов. При определении содержания углерода в минеральных горизонтах почв по данным о содержании гумуса использовали коэффициент пересчета 0.58 [16].

В тех случаях, когда отсутствовали данные о плотности почв, для получения недостающих оценок использовались педотрансферные функции, предложенные Честных и Замолотчиковым [29], так как они позволяют получить наиболее точные оценки плотности минеральных горизонтов лесных почв европейской территории России [27].

В настоящей работе запасы углерода представлены для слоев почвы 0–30 и 0–100 см без учета подстилки. Такой выбор мощности слоев обусловлен тем, что в метровой толще сосредоточены основные запасы органического вещества, активно участвующего в современном круговороте углерода [16], а слой 0–30 см предложен в качестве целевого при реализации проекта ФАО ООН “Всемирная карта запасов органического углерода в почве” GSOC-17 [30].

Данные, характеризующие содержание углерода в почве, получены из отчетов полевой практики по картографии почв и диссертации Бондаренко [5]. Для почв естественных экосистем оценки запасов углерода получены по выборкам объема 54 и 14 для слоев мощностью 30 и 100 см соответственно. Объемы выборок для пахотных и залежных почв составляют 137 для слоя 0–30 см и 4 для метровой толщи.

Определение потенциала продуцирования CO_2 почвами. Семенов с соавт. [20] на основе анализа большого фактического материала установили связь между содержанием общего и активного органического углерода почв и получили линейные регрессионные уравнения, позволяющие вычислить содержание активного органического углерода по данным об его общем содержании для широкого спектра почв. В настоящей работе для грубой оценки содержания биологически активного органического вещества в верхнем слое (0–20 см) изучаемых почв мы использовали предложенные уравнения:

$y = 0.039x + 0.025$ для дерново-подзолистых почв;

$y = 0.024x + 0.038$ для аллювиальных дерновых и аллювиальных луговых почв,

где y — содержание углерода активного органического вещества, %, x — общее содержание органического углерода в почве, %.

Полученные в результате этих расчетов величины содержания углерода активного органического вещества использовались для оценки его запасов. Они являются довольно грубыми, однако позволяют установить порядок величин и провести сравнение изучаемых почв. Для более точных оценок нужны результаты прямых измерений.

Результаты обрабатывали в программе Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка запасов углерода подстилок. В лесах, особенно еловых, пространственные закономерности распределения запасов углерода в подстилках создает ель как дерево-эдификатор, структурирующее пространство на тессеры. Опад большинства хвойных деревьев, с одной стороны, снижает скорость разложения, с другой — стабилизирует водный режим подстилки [33], поэтому именно количество поступающего опада, которое зависит от положения относительно ствола и кроны, детерминирует свойства лесной подстилки в ельниках.

Ельник-кисличник на дерново-подзолистой почве, расположенный на приводораздельном склоне, характеризуется довольно значительным накоплением лесной подстилки. Ее запасы изменяются в зависимости от положения в тессере. Максимальные запасы и их наибольшая пространственная вариабельность отмечаются на приствольных участках. Это обусловлено тем, что в приствольном пространстве преобладают гумифицированные подстилки. Наличие в подстилках этого типа ферментативного и гумифицированного подгоризонтов свидетельствует о замедленном разложении органического вещества. В подкроновых и межкроновых тессерах подстилки ферментативные. В окнах могут также встречаться деструктивные подстилки, состоящие преимущественно из опада прошлых лет, формирующих подгоризонт L. Подобные результаты неоднократно описаны нами в более ранних исследованиях [21, 24].

Подстилки приствольных участков накапливают до 20 т С/га (на подгоризонты F и H приходится 80% общего запаса $C_{орг}$), тогда как подстилки подкроновых пространств и окон — почти в 10 раз меньше (рис. 1).

Фракционный состав подстилок ельника. В подгоризонтах L подстилок всех элементов тессеры преобладает углерод трудно разлагаемых фракций (таких как ветки, хвоя, реж — шишки). Запасы углерода детрита как наиболее медленно разлагаемой фракции составляют 8–15% от общего запаса $C_{орг}$ подгоризонта L. Запасы углерода самых легкоразлагаемых компонентов — листьев и ветоши — составляют 0.1–0.6 т С/га. Статистически значимых различий по содержанию углерода легко разлагаемых компонентов и детрита в подгоризонте L подстилки между приствольными пространствами, кронами и окнами не выявлено в силу высокой пространственной вариабельностью этих показателей (рис. 2).

Таким образом, общий запас углерода в подстилках исследуемых еловых лесов варьирует от 2 до 20 т С/га, достигая максимального значения на приствольных участках. Из общих запасов углерода, сосредоточенного в подстилках, более 90% со-

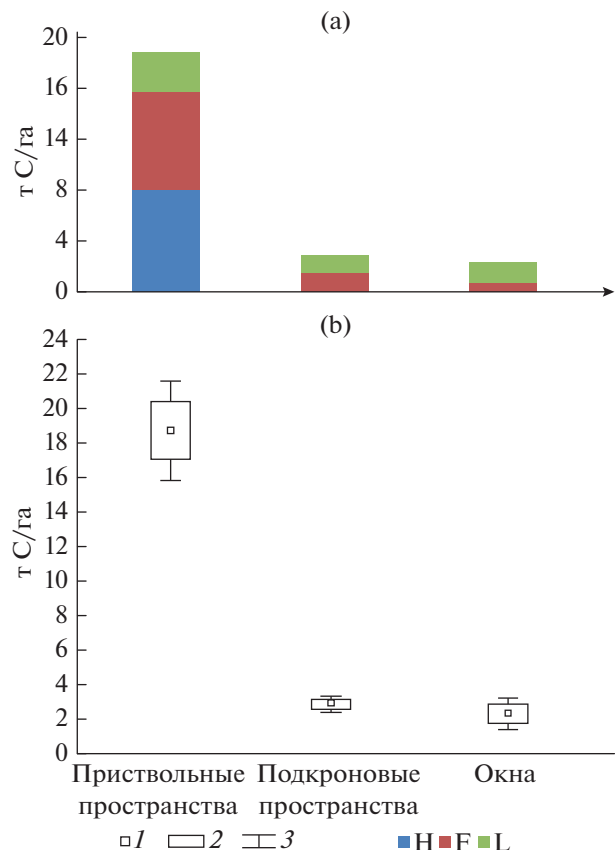


Рис. 1. Запасы углерода в подстилке (a) и их пространственная вариабельность (b) в тессерах ельника кислично-зеленчукового; 1 — среднее, 2 — стандартная ошибка, 3 — стандартное отклонение.

средоточено в подгоризонтах гумификации и ферментации (при их наличии), а также в трудно разлагаемых фракциях (кора, ветви, шишки, хвоя).

В мелколиственных травяных лесах снижение скорости разложения опада по мере усиления гидроморфизма приводит к изменению строения подстилок и увеличению в них запасов органического вещества. Это соответствует полученным ранее сведениям о том, что в полугидроморфных и особенно гидроморфных условиях вклад органических горизонтов в общий запас углерода в метровой толще может достигать 50% [19]. В отличие от хвойных опад мелколиственных пород деревьев характеризуется меньшей устойчивостью к разложению, что не способствует накоплению больших запасов подстилок при прочих равных условиях [18].

В изучаемых мелколиственных лесах встречаются как деструктивные, так и ферментативные подстилки, однако доля ферментативных подстилок составляет соответственно 63, 78 и 100%, увеличиваясь по мере усиления гидроморфизма, что согласуется с общими представлениями о влия-

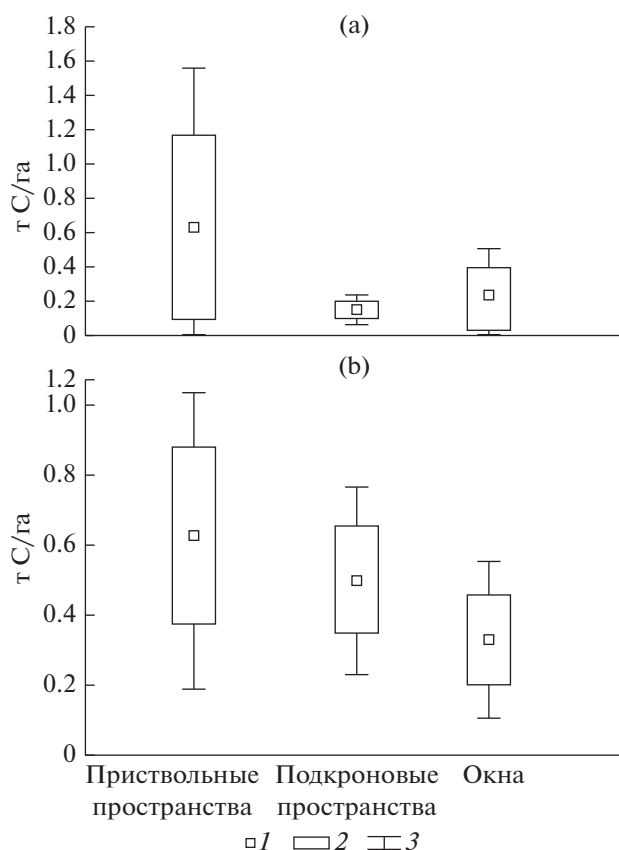


Рис. 2. Зависимость запаса углерода детрита (а) и легкоразлагаемых фракций (б) в подстилках ельника кислично-зеленчукового от местоположения в тессере. 1 – среднее, 2 – стандартная ошибка, 3 – стандартное отклонение.

нии увлажнения на скорость разложения органического вещества [32, 34].

Запасы углерода в подстилках увеличиваются от березняка волосисто-осокового к березняку дернисто-щучковому более чем в 3 раза (рис. 3). Однако даже самые максимальные запасы в наиболее увлажненном березняке дернисто-щучковом уступают запасам подстилки в описанном выше еловом лесу.

Фракционный состав подстилок мелколиственных лесов. Согласно полученным данным, запасы детрита возрастают с увеличением степени увлажнения. Фракция детрита в подгоризонте L изменяется от 0.05–0.1 до 0.3–0.48 т/га (соответственно от березняка волосисто-осокового к березняку дернисто-щучковому), достигая почти 25% от общего запаса подгоризонта L в последнем. В заболоченных мелколиственных лесах тесеры не выражены, поэтому проследить закономерности изменения углерода фракции детрита внутри биогеоценоза в зависимости от местоположения не представляется возможным. Запасы легкоразлагаемых компонентов в подгоризонте L

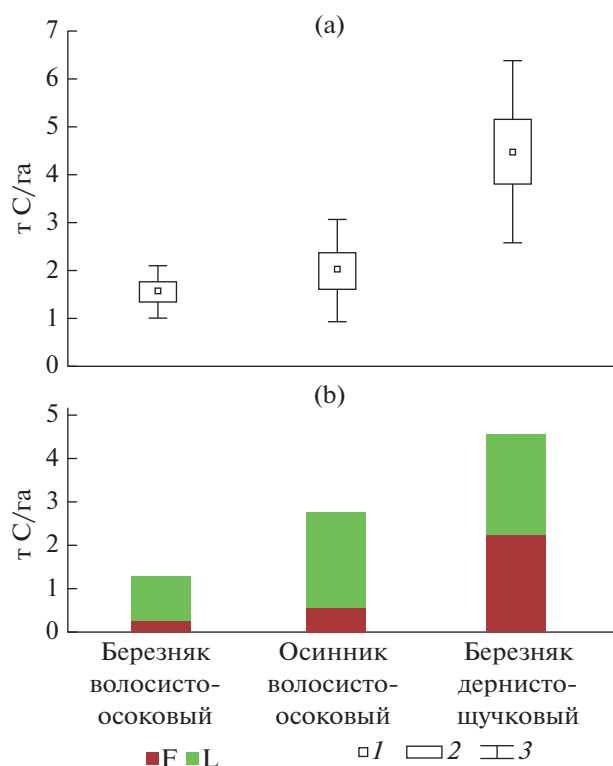


Рис. 3. Запасы углерода подстилок и их пространственная вариабельность (а) и распределение запасов углерода по подгоризонтам подстилок (б) в мелколиственных лесах разной степени гидроморфизма. 1 – среднее, 2 – стандартная ошибка, 3 – стандартное отклонение.

определяются особенностями опада – максимальная доля и запасы этой фракции соответствуют березово-осиновому лесу. Такие показатели, как средневзвешенная зольность подгоризонта L, запасы золы легкоразлагаемых компонентов и их доля в общих запасах золы подгоризонта L также максимальны в березово-осиновом лесу, что не может не влиять на биологический круговорот и скорость разложения органического вещества.

В луговых фитоценозах, суходольных и пойменных, также образуются подстилки, которые состоят исключительно из травяного опада прошлых лет (деструктивные травяные подстилки). Их запасы в данном случае определяются как количеством поступающего травяного опада, который зависит от запасов и состава надземной фитомассы, так и от скорости его разложения. С одной стороны, запасы фитомассы, как правило, выше на пойменных лугах, с другой – наличие грунтовых вод, обогащенных элементами питания, может при разных условиях как тормозить, так и ускорять биологический круговорот. В результате рассчитанные запасы углерода подстилки суходольных лугов (агродерново-подзолистые регрированные почвы) практически не различа-

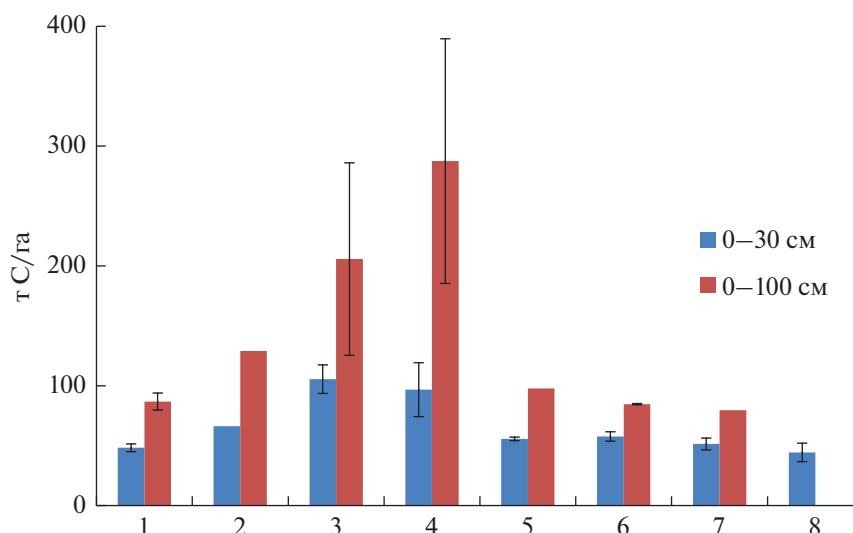


Рис. 4. Запасы углерода в почвах “Чашниково” без учета подстилки: 1 – дерново-подзолистые (Albic Retisol), 2 – дерново-подзолистые глееватые (Albic Retisol (Stagnic)), 3 – аллювиальные серогумусовые (Umbric Fluvisols), 4 – аллювиальные серогумусовые глеевые (Umbric Fluvisols (Oxyaquic)), 5 – агродерново-подзолистые (Anthric Albic Retisol (Loamic)), 6 – агродерново-подзолистые реградированные (Albic Retisol (Anthric, Loamic)), 7 – агродерново-подзолистые глееватые (Albic Retisol (Anthric, Stagnic, Loamic)), 8 – агрогумусовые аллювиальные (Anthric Umbric Fluvisols). Планки погрешности отображают ошибку среднего.

ются от пойменных (аллювиальные серогумусовые глеевые почвы) и варьируют от 0.8 до 1.0 т С/га.

По сравнению с лесными подстилками, полученные значения уступают даже наименьшим оценкам запасов углерода в подстилках мелколиственных лесов на наиболее дренированных участках. Таким образом, луговые экосистемы вносят наименьший вклад в аккумуляцию углерода в составе подстилок. В агроэкосистемах (распаханные участки) наземные растительные остатки не накапливаются в результате ежегодной уборки урожая.

На основании проведенных исследований, исходя из типологии подстилок, выделено шесть групп биогеоценозов по возможной аккумуляции углерода в подстилках. Полным отсутствием аккумуляции углерода в составе подстилки характеризуются пашни, незначительным (в составе травяных деструктивных подстилок – 0.3–1.6 т С/га) – луга, как суходольные, так и пойменные. Низкое накопление углерода в травяно-лиственных и лиственно-травяных деструктивных подстилках (1.1–2.0 т С/га) характерно для мелколиственных лесов с напочвенным покровом из мезофильных трав, развитых на дренированных почвах. Умеренное накопление (2.8–5.3 т С/га) при сочетании деструктивных травяных и ферментативных хвойно-лиственных или лиственных подстилок характерно для сложных ельников с участием широколиственных и мелколиственных пород в древостое и высокотравья в живом напочвенном покрове. Интенсивное накопление (1.7–6.1 т С/га)

выявлено для ельников, расположенных на самых дренированных элементах рельефа, что исключает наличие гумифицированных подстилок, поэтому в них встречаются комплексы деструктивных лиственных и ферментативных хвойных подстилок. Наконец, весьма интенсивное накопление (2.0–20.0 т С/га) в составе комплекса гумифицированных, ферментативных подстилок характерно для типичных еловых лесов, развитых на слабо- и умеренно дренированных склонах. Именно к этой категории относится изученный ельник кислично-зеленчуковый.

Оценка запасов органического углерода в почве.

Запасы почвенного углерода определяются взаимодействием комплекса факторов. В естественных экосистемах на изучаемой территории ведущая роль принадлежит геоморфологическому и литологическому факторам, так как от них зависят особенности растительных сообществ (продуктивность, количество, качественный состав, характер поступления опада) и водный режим почв, влияющий на скорость минерализации органического вещества. На запасы углерода в почвах агроэкосистем дополнительно влияют история землепользования и характер агротехнических мероприятий. Запасы $C_{орг}$ в почвах “Чашниково” характеризуют оценки, представленные на рис. 4.

Полученные оценки демонстрируют широкий диапазон значений, что обусловлено разнообразием сочетаний факторов почвообразования на изучаемой территории, которые определяют уровень накопления органического углерода в почве.

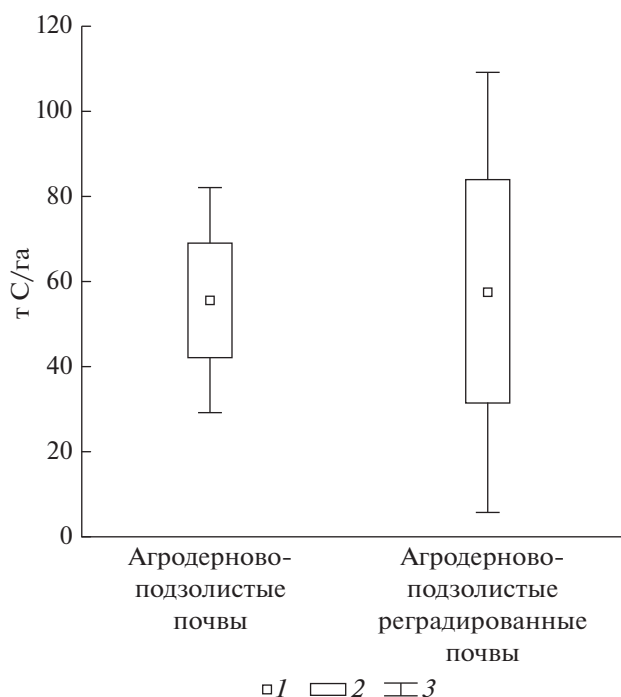


Рис. 5. Запасы углерода и показатели их вариабельности в агродерново-подзолистых и агродерново-подзолистых реградированных почвах. 1 – среднее, 2 – стандартная ошибка, 3 – стандартное отклонение.

Наибольших величин достигают запасы $C_{\text{орг}}$ в почвах под луговой растительностью в пойме р. Клязьмы. Средний запас углерода в метровом слое аллювиальных серогумусовых почв составляет 206 т С/га, при увеличении увлажнения в аллювиальных глеевых почвах он возрастет до 288 т С/га, хотя запасы углерода в слое 0–30 см этих почв характеризуются близкими величинами. Разнообразием условий увлажнения в пойме объясняется разброс значений запасов углерода в метровом слое аллювиальных глеевых почв от 80 до 567 т С/га. В результате сельскохозяйственного использования аллювиальных почв запас органического углерода в них снижается. Его среднее значение в слое 0–30 см пахотных агрогумусовых аллювиальных почв составляет 44 т С/га, что в 2.4 раза ниже по сравнению с аллювиальными серогумусовыми почвами под луговой растительностью.

Среди почв лесных экосистем более подробно изучены дерново-подзолистые почвы ельников кислично-зеленчуковых. Типичные значения запасов углерода в этих почвах, соответствующие нижнему и верхнему квартилям изменяются от 40 до 54 и от 76 до 100 т С/га в слоях 0–30 и 0–100 см соответственно. Разница между минимальным и максимальным значениями для верхнего слоя составляет 67 т С/га и снижается для метровой толщи до 45 т С/га. Уменьшение диапазона значений с увеличением мощности рассматриваемого слоя,

вероятно связана, как с уменьшением варьирования содержания углерода в почве с глубиной, так и уменьшением объема выборки (с 22 до 6). Запасы углерода в дерново-подзолистых глееватых почвах под березняками выше, чем в почвах ельников, что согласуется с данными об увеличении запасов углерода в лесных почвах при возрастании степени гидроморфизма [27].

Для средних запасов углерода в слое 0–30 см пахотных агродерново-подзолистых почв (56 т С/га) и агродерново-подзолистых реградированных почв под залежами (58 т С/га) получены очень близкие оценки (рис. 5). Однако диапазон значений запасов углерода в залежных почвах составляет 143 т С/га, что в два раза больше, чем в пахотных почвах. Такой большой разброс в запасах углерода в почвах залежей во многом определяется их разным возрастом, от которого зависит стадия сукцессии и уровень гумусонакопления.

Таким образом, согласно полученным данным, в лесных ландшафтах “Чашниково” запасы углерода в метровом слое почв без учета подстилки варьируют от 28 до 129 т С/га. Половина этих запасов сосредоточена в верхнем слое 0–30 см. На распаханых водоразделах и приводораздельных склонах запасы углерода в верхнем слое 0–30 см агродерново-подзолистых почв изменяются от 17 до 89 т С/га, типичные значения приходятся на область от 47 до 63 т С/га. В пойменных ландшафтах под лугами разной степени увлажнения диапазон значений для запасов углерода в верхнем (0–30 см) и (0–100 см) слоях составляет соответственно 25–228 и 123–567 т С/га.

Оценка потенциала продуцирования CO_2 . Прямым источником парниковых газов является биологически активное органическое вещество почвы. Оно включает в себя потенциально-минерализуемые, быстро утилизируемые микроорганизмами, способные к химическим и биохимическим взаимодействиям, химически и физически незащищенные компоненты с продолжительностью существования менее 3–10 лет [20]. Запасы активного органического вещества в почве могут служить одним из показателей их потенциала продуцирования климатически активных газов. Они соизмеримы с размерами почвенной эмиссии диоксида углерода за вегетационный период [20, 25].

Оценка потенциала продуцирования CO_2 подстилками. Важную роль в продуцировании углекислого газа играет разложение органического вещества, сосредоточенного в подстилках. В этом отношении структурные и функциональные показатели подстилок могут служить индикаторами интенсивности биологического круговорота и, как следствие, соотношения процессов накопления и деструкции органического вещества подстилок. Эти закономерности отражаются через

Таблица 2. Рассчитанные запасы активного органического углерода в почвах “Чашниково” (т С/га в слое 0–20 см)

Почва	<i>n</i>	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
Дерново подзолистые	22	2.0	0.5	1.4	3.4
Агродерново-подзолистые	78	2.2	0.4	1.1	3.3
Аллювиальные серогумусовые	24	2.6	1.0	1.2	4.5
Агрогумусовые аллювиальные	6	1.6	0.3	1.2	2.0

типологию подстилок. Наибольшим потенциалом продуцирования углекислого газа характеризуются интенсивно разлагающиеся подстилки луговых ценозов и мелколиственных лесов хорошо дренированных территорий. Изучаемые заболоченные мелколиственные леса характеризуются умеренным, а ельник кислично-зеленчуковый — весьма интенсивным накоплением подстилок, что предполагает довольно низкий потенциал продуцирования ими углекислого газа.

Другим информативным показателем интенсивности разложения подстилок является отношение мощности или запаса подгоризонта L к сумме мощностей (запасов) других подгоризонтов подстилки. Так, в ельнике кислично-зеленчуковом отношение мощности L к мощности нижележащих подгоризонтов составляет соответственно 0.43, 1.14 и 1.33 для подстилок приствольных пространств, проекции крон и окон, для запасов аналогичные соотношения составляют 0.16, 0.69 и 2.12. На основании этих данных можно заключить, что скорость разложения органического вещества и продуцирования CO₂ возрастает от приствольных к межкрановым участкам.

В мелколиственных лесах с увеличением степени гидроморфизма показатель, характеризующий отношение запасов подгоризонта L к F составляет соответственно 4.5, 2.5 и 0.9. Таким образом, при умеренной заболоченности в мелколиственных травяных лесах интенсивность разложения органического вещества наиболее высока в краевых частях приводораздельной депрессии в березняке волосисто-осоковом.

Еще одним критерием потенциала продуцирования CO₂ может служить содержание фракции детрита в подгоризонте L подстилок. Чем больше накапливается детрита, тем меньше скорость разложения органического вещества и ниже эмиссия CO₂.

Запасы биологически активного органического вещества в слое почв 0–20 см (без учета подстилки). Оценки запасов активного органического вещества, полученные для аллювиальных и дерново-подзолистых почв на основе регрессионных уравнений из работы [20] представлены в табл. 2.

Согласно литературным данным в почвах разных биоклиматических зон в слое 0–20 см сосредоточено от 0.4 до 5.4 т С/га потенциально-минерализуемого органического вещества. В пахотных почвах его запасы в 1.2–2.4 раза ниже, чем в почвах под естественной растительностью. Запасы углерода биологически активного органического вещества в аллювиальных луговых почвах выше, чем в дерново-подзолистых. Диапазон изменений запасов углерода биологически активного органического вещества в аллювиальных дерновых и аллювиальных луговых почвах 1.2–4.2 при среднем значении 2.1. В дерново-подзолистых почвах диапазон изменений несколько уже и составляет 0.6–2.8, а средняя величина оценивается в 1.1 т С/га [20]. Полученные оценки для аллювиальных серогумусовых почв на территории “Чашниково” хорошо согласуются с литературными данными. В дерново-подзолистых почвах изучаемой территории “Чашниково” средний запас биологически активного органического вещества в 2 раза превышает средние показатели из работы [20] для аналогичных почв, но находится в границах приведенного в ней диапазона значений.

Полученные величины запасов углерода биологически активного органического вещества в почвах естественных и агроэкосистем “Чашниково” являются лишь косвенными приближенными оценками потенциала продуцирования CO₂ почвами этой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили оценить уровень накопления углерода в подстилках и минеральном профиле почв наиболее распространенных на территории “Чашниково” ландшафтов. Лесные подстилки в еловых биогеоценозах, расположенных на водоразделах и приводораздельных склонах, характеризуются значительным накоплением органического углерода, запасы которого детерминированы положением в тессере. На приствольных участках запасы органического углерода достигают 20 т С/га и уменьшаются почти в

10 раз к межкроновым пространствам. Запасы углерода, накапливаемые подстилками мелколиственных заболоченных лесов в полугидроморфных ландшафтах, определяются степенью гидроморфности. По мере усиления увлажнения почв запасы углерода также увеличиваются, но не достигают значений, выявленных для подстилок приствольных пространств в ельниках. Важными показателями скорости разложения органического вещества подстилок являются их типология (наличие и соотношение выраженных подгоризонтов), содержание детрита в подгоризонте L, а также соотношение мощностей (или запасов) подгоризонта L и нижележащих подгоризонтов. Минимальным накоплением углерода в составе подстилок характеризуются травяные экосистемы.

Наибольшие оценки запасов углерода в минеральной части профиля получены для почв под луговой растительностью в пойме р. Клязьмы. Усиление грунтового увлажнения этих почв способствует увеличению запасов углерода, тогда как сельскохозяйственное использование ведет к снижению. Запасы углерода в метровом слое почв лесных ландшафтов более чем в два раза ниже, чем запасы в аналогичной толще аллювиальных почв лугов.

Наибольшим потенциалом продуцирования углекислого газа характеризуются интенсивно разлагающиеся подстилки, формирующиеся на лугах и в мелколиственных лесах хорошо дренированных территорий. Заболоченные мелколиственные леса характеризуются умеренным, а еловые леса — весьма интенсивным накоплением углерода в составе подстилок, что позволяет предположить их довольно низкий потенциал продуцирования углекислого газа.

Максимальным запасом активного органического углерода в верхней (0–20 см) части профиля характеризуются аллювиальные почвы под луговой растительностью. В почвах лесных экосистем они ниже. По этим данным можно получить косвенную приближенную оценку потенциала продуцирования CO₂ почвами. На основании структурных и функциональных показателей подстилок и данных о запасах биологически активного органического вещества почв можно заключить, что среди изучаемых почв максимальных значений потенциал продуцирования CO₂ почвами достигает в почвах луговых экосистем.

Таким образом, уровень накопления органического углерода и потенциал продуцирования почвами углекислого газа применительно к ландшафтам территории “Чашниково” детерминирован характером растительности, степенью гидроморфизма (воздействие верховодки либо грунтовых вод, а также особенностями сельскохозяйственного использования почв в настоящем или прошлом.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность руководителю практики по картографии почв, доценту кафедры общего почвоведения факультета Почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова к.б.н. Сергею Юрьевичу Розову за предоставленные материалы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070024>
2. Бахмет О.Н. Особенности органического вещества почв в лесных ландшафтах Карелии // Лесоведение. 2012. № 2. С. 19–27.
3. Богатырев Л.Г. О классификации лесных подстилок // Почвоведение. 1990. № 3. С. 118–127.
4. Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Карпунин М.М. и др. Водорастворимые компоненты почв гетеролитных сопряженных ландшафтов южнотаежной подзоны // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2021. № 1. С. 3–13.
5. Бондаренко Е.В. Опыт учета экосистемных сервисов почв при оценке деградации земель (на примере УОПЭЦ МГУ). Дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 121 с.
6. Васильевская В.Д., Зборищук Ю.Н., Ульянова Т.Ю. Почвы и почвенный покров УОПЭЦ Чашниково // Развитие почвенно-экологических исследований. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. С. 25–35.
7. Дмитриев Е.А., Карпачевский Л.О., Соколова Т.А. и др. Организация дерново-подзолистых почв и структура лесного биогеоценоза // Структурно-функциональная организация биогеоценозов. М.: Наука, 1980. С. 184–219.
8. Дмитриев Е.А., Рекубратский И.В., Горелова Ю.В. и др. К организации почвенного покрова под елями // Структурно-функциональная роль почвы в биосфере. М.: Геос, 1999. С. 59–69.
9. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С. и др. Глобальный климат и почвенный покров — послед-

- ствия для землепользования России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 107. С. 5–32. <https://doi.org/0.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
10. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе М. Изд-во Моск. ун-та, 1977. 312 с.
 11. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Ильина Л.С. Экологические функции лесных почв // Структурно-функциональная роль почвы в биосфере. М.: Геос, 1999. С. 156–162.
 12. Кириллова Н.П., Силёва Т.М., Ульянова Т.Ю. и др. Цифровая крупномасштабная карта почвообразующих пород и принципы ее составления // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2017. № 3. С. 3–10.
 13. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 14. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Инн С.Л. и др. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. Р. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
 15. Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е. и др. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
 16. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 253 с.
 17. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070083>
 18. Решетникова Т.В., Зырянова А.А., Ведрова Э.Ф. Трансформация органического вещества лесной подстилки (экспериментальное исследование) // Вестник КРАСГАУ 2014. № 6. С. 80–93.
 19. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Кириллова Н.П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем европейской территории России: сравнительный статистический анализ // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2022. № 2. С. 20–27.
 20. Семенов В.М., Когут Б.М., Зинякова Н.Б. и др. Биологически активное органическое вещество в почвах европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1804007X>
 21. Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г. и др. Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
 22. Стома Г.В., Богатырев Л.Г., Макаров М.И., Мананхов Д.В. Летняя практика по почвоведению: Учебно-методическое пособие для студентов 1 курса факультета почвоведения МГУ. М.: МАКС Пресс, 2017. 156 с.
 23. Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И. и др. Динамика поступления растительного опада и некоторых свойств лесных подстилок при постагроенном лесовосстановлении в условиях южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 4. С. 3–10.
 24. Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г. Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с напочвенным покровом в лесных экосистемах Подмосковья (на примере УОПЭЦ “Чашниково”) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2017. № 4. С. 11–20.
 25. Ходжаева А.К., Семенов В.М. Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15120102>
 26. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>
 27. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030028>
 28. Честных О.В., Грабовский В.И., Замолотчиков Д.Г. Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с использованием баз данных почвенных характеристик // Лесоведение. 2022. № 3. С. 227–238.
 29. Честных О.В., Замолотчиков Д.Г. Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.
 30. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Soil organic carbon: the hidden potential. Rome, 2017.
 31. Friedlingstein P., O’Sullivan M.J., Matthew W.A. et al. Global Carbon Budget 2020 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
 32. Jie D., Jianzhi N., Zhaoliang G. et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer // Catena. 2019. V. 172. P. 711–718. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.036>
 33. Wenya X., Han Y.H. Chen, Praveen K. et al. Multiple interactions between tree composition and diversity and microbial diversity underly litter decomposition // Geoderma. 2019. V. 341. P. 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.045>
 34. Yajun X., Yonghong X., Huayun X. et al. The effects of simulated inundation duration and frequency on litter decomposition: A one-year experiment // Limnologia. 2019. V. 74. P. 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2018.06.005>

Assessment of Carbon Stock and CO₂ Production Potential for Soils of Coniferous-Broad-Leaved Forests

I. M. Ryzhova¹, M. A. Podvezennaya^{1, *}, V. M. Telesnina¹, L. G. Bogatyrev¹, and O. V. Semenyuk¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: podvezennaya@yandex.ru*

Within the territory of MSU Agrobiostation “Chashnikovo”, assessment of carbon stock for soil, typical for coniferous-broad-leaved forests subzone – coniferous forests, small-leaved forests, agrocenoses, fallow lands and floodplain meadows – was given. The next indexes were studied for litters: typology, stock, detritus content and ratio of sub-horizons thickness (deposit) – these indexes are indicators of organic matter decomposition intensity. For mineral soil profile, the assessment of general organic carbon stock in 0–30 and 0–100 cm layers, as well as stock of biologically active carbon in 0–20 cm layer (by calculation according to the content of total carbon), are given. Maximum organic matter accumulation in litters and moderate accumulation – in mineral profile, was obtained for coniferous forests soddy-podzolic soils. The litter carbon stock value in spruce forests differ by almost 10 times, depending on location in tessera. Minimal carbon accumulation by litters is obtained for meadow ecosystem soils – upland meadows as well as flood-plain meadows. Alluvial soils of flood-plain meadows are characterized by highest stock of general carbon, as well as carbon of biologically active soil organic matter. Potential of CO₂ production by soil, determined by data, including structural and functional litter indexes and organic matter biologically active carbon stock (0–20 cm layer), depends on combination of row of factors: vegetation type, hydromorphism degree, and agricultural use character in present or past. Coniferous forest soils comparing with small-leaved forest soils are characterized by less rate of litter decomposing due to plant remains biochemical features, thereby these soils are assumed to less CO₂ production potential. Soils of natural grass ecosystems, especially flood-plain meadows, are characterized by maximal potential production of carbon dioxide, resulting from intensive plant residues decomposition and high stock of biologically active organic matter carbon.

Keywords: soil carbon, soil organic matter stock, litters, climatically active gases, Retisol, Fluvisol