

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НЕТТО-БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2024 г. Д. В. Карелин^а, А. Н. Золотухин^б, О. В. Рыжков^с,
В. Н. Лунин^а, Д. Г. Замоладчиков^д, О. Э. Суховеева^{а, *}

^аИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия

^бКурский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70Б, Курск, 305021 Россия

^сЦентрально-Черноземный заповедник им. В.В. Алехина, Курская область, Курский район,
пос. Заповедный, 305528 Россия

^дЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Поступила в редакцию 19.03.2024 г.

После доработки 05.05.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Проанализированы многолетние 2017–2023 гг. наблюдения за эмиссией CO₂ из почвы в Центральном Черноземье, Курская область, которые проводили с помощью инфракрасных газоанализаторов методом закрытых камер. Полученные оценки дыхания почвы за год в антропогенных и природных экосистемах, формирующих современный лесостепной агроландшафт европейской части России, варьируют от 651 ± 88 (неудобряемый огород) и 895 ± 91 (многолетние пашни) до 1040 ± 55 г С(CO₂)/(м² год) в луговых степях и широколиственных лесах, а также 1549 ± 215 г С(CO₂)/(м² год) на 2–8-летней залежи. Доля микробного дыхания в местных почвах за вегетационный сезон составила 55.5% в широколиственных лесах, 72.4% в луговой степи и 77.6% на залежи. Рассчитанные по разнице между чистой первичной продукцией (по модели СВМ–CFS3 и данным таксации) и гетеротрофным дыханием (дыхание почвы и эмиссия CO₂ от крупного древесного дебриса) оценки экосистемного нетто-баланса трех участков широколиственного леса варьируют от +130 г С/(м² год), соответствующего поглощению углерода из атмосферы, до –112 г С/(м² год), соответствующего его источнику. В последнем случае нетто-источник связан с накоплением значительных запасов крупного древесного дебриса в результате гибели деревьев от ксилофагов. На пашнях аналогично рассчитанные по чистой первичной продукции и гетеротрофному дыханию показатели нетто-баланса углерода меняются от +186 до –144 г С/(м² год). При этом подавляющий вклад в межгодовые вариации гетеротрофного дыхания на различных полях вносит вид возделываемой в данное время культуры (87.9%). Сделан вывод о применимости рассматриваемого подхода при оценках нетто-баланса С, как в природных, так и в антропогенных экосистемах, однако наибольшую степень неопределенности вносят оценки доли микробного дыхания.

Ключевые слова: европейская территория России, эмиссия диоксида углерода, чистая первичная продукция, углеродный баланс, Naplic Chernozem

DOI: 10.31857/S0032180X24I00073, **EDN:** JXIGVZ

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг дыхания почвы (эмиссии CO₂ из почвы) является наиболее распространенным направлением изучения углеродного баланса наземных экосистем, что связано с пятью основными причинами [23]: (1) почва – это наиболее важный и

автономный компонент любой наземной экосистемы, где, как правило, сосредоточен основной запас ее биогенных элементов; (2) эмиссия CO₂ из почвы – самая значительная часть общего экосистемного дыхания (почти 80% на суше и 50% глобально), активно включенная в глобальную систему обратных положительных связей между изменениями

климата и биосферой [33]; (3) дыхание почвы (ДП) часто используется для сравнительных наблюдений за функциональным состоянием различных наземных экосистем, в частности, это удобный индикатор нарушений их нормального функционального состояния под действием различных природных и антропогенных факторов; (4) данные по ДП активно используются для проверки блоковых и имитационных моделей углеродного баланса, а также для расчетов нетто-баланса углерода по разности между чистой первичной продукцией и гетеротрофным дыханием [4]; (5) это наиболее просто оцениваемый *in situ* показатель углеродного баланса.

В рамках действующей национальной программы мониторинга потоков парниковых газов и резервуаров углерода в наземных экосистемах России (Важнейший инновационный проект государственного значения, 2022–2024 г., <https://ritm-c.ru/>) проведена инвентаризация многолетних данных по эмиссии CO_2 из почвы, полученных в ходе мониторинга на полигоне “Курская Биосферная станция” Института географии РАН (КБС ИГ РАН). Таких длительных рядов наблюдений за ДП в черноземной зоне ЕТР получено крайне мало.

Цель работы — анализ многолетних полевых наблюдений для сравнения дыхания почв различных по истории землепользования участков, а также для использования полученных величин при расчетах углеродного нетто-баланса изучаемых экосистем.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика района исследований. Исследования проводили на территории КБС ИГ РАН и в ее окрестностях ($51^{\circ}32'16.642''$ N, $36^{\circ}5'27.276''$ E, рис. S1). Географически район относится к биому широколиственных лесов и лесостепей, который длительное время активно используется для выращивания сельхозпродукции. Доминируют пахотные агроландшафты, природные экосистемы сохранились малыми ареалами, преимущественно на территории граничащего с КБС ИГ РАН Центрально-черноземного заповедника им. В.В. Алехина. Среди них преобладают средневозрастные клено-дубняки с примесью ясеней, диких плодовых, вязов, а также перисто-ковыльная степь с участием диких плодовых. Рельеф возвышенный, глубокорасчлененный, на водоразделах — полого-склоновый. Литологический фон очень однороден [12]. Территория полигона ровная, плоская, овражно-балочная сеть выражена слабо. Климат умеренно континентальный. Согласно последней климатической норме (1991–2020), среднегодовая температура составляет $7.2 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, годовая сумма осадков 631 ± 103 мм, из них 190 мм выпадает в летний период. Продолжительность

вегетационного периода 185–190 сут. Среднемесячная температура воздуха в январе $-5.9 \pm 2.9^{\circ}\text{C}$, в июле $+20.3 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$. Снежный покров с конца ноября по март, неоднородный, мощностью до 40–50 см (расчеты на основе данных ВНИИГМИ–МЦД по станции 34009 Курск; <http://meteo.ru/>).

В целом исследовательский полигон КБС ИГ РАН и прилегающая к нему территория (около 45 км²) представляют собой агроландшафт с преобладанием многолетних пашен (58% площади), с участием охраняемых островных участков широколиственных лесов (16%) и луговых степей (14%), с балками, заросшими естественной лесостепной растительностью (2.5%), селитебными территориями (8%) и дорогами (0.3%).

Максимальный возраст лесов — 125 лет (дубовые леса). Среднеожидаемый возраст широколиственных лесов — 50–80 лет; средняя сомкнутость 0.8, полнота 25 м²/га, средний запас 250 м³/га, максимальная высота верхнего яруса 22 м, средняя — 11 м. В древостое преобладают дуб черешчатый (*Quercus robur*) и клен остролистный (*Acer platanoides*), также участвуют ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), вяз шершавый (*Ulmus glabra*); интродуценты — клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и ясень пенсильванский (*Fraxinus pennsylvanica*). В подросте и подлеске преобладают клены, ясень, черемуха, бересклет, жимолость. Травостой редкий (мертвопокровные леса), значителен слой подстилки из листьев дуба и клена (мощностью до 8 см), мохово-лишайниковый покров отсутствует. Леса мало нарушены, встречаются локальные зоогенные нарушения, рубки ухода прошлых лет. Значительная часть средневозрастных лесов в охранной зоне Центрально-черноземного заповедника находится на разных стадиях восстановления после распахивания или рубок. Участки с интродуцированным ясенем пенсильванским находятся на заключительной стадии гибели древостоя в результате инвазии ясеновой изумрудной узкотелой златки (*Agrilus planipennis*).

Луговые и лесостепные фитоценозы представлены перисто-ковыльной степью по залежи более 70 лет, проективное покрытие сосудистых 90% (с ветошью 95%), средняя высота травостоя 35 см, общее число видов сосудистых 48, среди доминантов: ковыль перистый (*Stipa pennata* L.; более 50%), земляника зеленая (*Fragaria viridis* (Duchesne) Weston), райграс высокий (*Arrhenatherum elatius* (L.) J. Presl et C. Presl), горошек тонколистный (*Vicia tenuifolia* Roth). Древесно-кустарниковая растительность (высота 1–3 м) представлена отдельными экземплярами груши лесной *Pyrus pyraeaster* Burgsd., шиповником *Rosa subcanina* (Christ) Dalla Torre et Sarnth. и яблоней домашней *Malus domestica* Borkh.

На редко встречающихся молодых залежах (2–8 лет) представлена бурьянистая рудеральная полидоминантная растительность, проективное покрытие 92–94%, высота травостоя 50 см. Среди 47 видов сосудистых здесь преобладают ясенелистный клен, пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Besser), райгас высокий, полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris* L.), чертополох колючий (*Carduus acanthoides* L.), клевер средний (*Trifolium medium* L.) и др.

На полигоне и прилежащих территориях преобладают старовозрастные (более 150 лет) пашни, которые за длительный период использования значительно сократили запас углерода. Основными выращиваемыми культурами являются озимая пшеница, подсолнечник, соя, кукуруза и ячмень.

В природных экосистемах преобладают черноземы типичные, миграционно-мицелярные, зоотурбированные, тяжелосуглинистые (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic); на пашнях – агро-черноземы агропереуплотненные зоотурбированные тяжелосуглинистые (Haplic Chernozem (Aric, Densic, Loamic, Pachic). В днищах балок и ложбинах встречаются стратоземы и агростратоземы переуплотненные (Fluvic Phaeozem (Densic, Humic, Loamic) over Haplic Luvisol (Humic, Loamic)). Покровные лёссовидные суглинки подстилаются на глубине 2.8–3.5 м пылеватым средним суглинком. Материнские породы карбонатные, незасоленные.

Объекты исследования представляют собой 10 биотопов, на которых проводятся постоянные наблюдения за ДП, объединенных в пять основных типов биогеоценозов:

- 1) удобряемые многолетние пашни, общий период распашки которых составляет 150–200 лет (4 участка: КБС-2, КБС-4, КБС-5, КБС-6);
- 2) неудодряемый огород постоянного использования (1 участок: КБС-0);
- 3) лугово-степные сообщества (1 участок: 75-летняя луговая степь);
- 4) 2–8-летняя залежь (1 участок: КБС-1);
- 5) средне- и старовозрастные широколиственные леса (3 участка: 125, 75, 80 лет) с различными преобладающими древесными породами (дуб черешчатый, клен остролистный, ясень обыкновенный и пенсильванский).

Объекты располагаются в Курском и Медвенском районах Курской области на территории КБС ИГ РАН, в пределах Центрально-черноземного заповедника и на прилегающих землях сельхозназначения (рис. S1).

За 7-летний период наблюдений на четырех исследуемых участках пашен сменялись соя (7 случаев), подсолнечник (7), озимая пшеница (6), кукуруза (3), и ячмень (3), которые в этой зоне являются

наиболее характерными культурами для массового выращивания.

Методы. Эмиссию CO_2 из почвы измеряли в полевых условиях портативными инфракрасными газоанализаторами на основе датчиков AZ 77535 (Тайвань, Китай), модифицированных для полевых измерений (патент RU 174321 U1), а также высокоточными анализаторами LiCor-8100A (США) и Picarro G4301 (США) методом закрытых статических камер. Использовали непрозрачные для фотосинтетически активной радиации ПВХ-цилиндры высотой 10–20 см и площадью 90 cm^2 , которые устанавливали на поверхность почвы без наземной растительности, на глубину не более 2–3 см. Во время измерений цилиндры герметично закрывали крышкой со встроенным вентилятором, постоянно соединенной воздуховодами с газоанализатором. Обычная экспозиция при разовых измерениях составляла 3 мин. В зимний период, при небольших скоростях эмиссии экспозиция камер могла быть увеличена до 5–6 мин. Кроме того, в зимний период использовали широкие пластиковые горизонтальные воротники, поддерживающие камеры и позволяющие фиксировать их на поверхности снега. В каждом из биотопов измерения проводили в 10 точках вдоль линейных трансект, где основания камер вкапывали на постоянной основе через каждые 10 м. На пашнях, где закрепление оснований камер на постоянной основе невозможно из-за периодической обработки полей, установку производили за сутки перед каждой серией измерений. Одновременно с измерением концентрации CO_2 в камерах за время экспозиции оценивали температуру воздуха, температуру почвы на глубинах 5 и 10 см (HI 98509, Hanna Instruments, США), объемную влажность почвы в слое 0–7 см (SM 150 Kit, Delta-T, Великобритания). Измерения на полигоне проводятся с 2017 г. круглогодично с периодичностью 10–15 сут в вегетационный сезон (март–ноябрь) и ежемесячно в зимний период (декабрь–февраль). С мая 2017 по декабрь 2023 гг. общий массив составил 7746 единичных измерений.

Среднегодовой уровень дыхания почвы в исследуемых экосистемах оценивали несколькими способами: 1) усреднением всех имеющихся за год экспериментальных данных и умножением полученной средней величины ($\text{г С}/(\text{м}^2 \text{ч})$) на 24 ч и на продолжительность года в сутках, 2) усреднением всех данных по календарным сезонам года с последующим умножением полученных средних на 24 ч и продолжительность сезона в сутках, 3) методом трапеции по всем имеющимся экспериментальным данным. Такие оценки были получены для всех лет наблюдений, по ним рассчитывали среднемноголетние уровни ДП для отдельных экосистем, 4) с помощью ранее параметризованной на тех же экосистемах модели дыхания почвы Райха–Хашимото [15].

Долю микробного (гетеротрофного) дыхания от общей эмиссии CO_2 из почв оценивали на специальных пробных площадках в пяти биотопах, где проводится мониторинг ДП: кленово-дубовом лесу, старовозрастном дубовом лесу, ясеневом лесу, климаксной луговой степи и на молодой залежи. Использовали метод механического удаления корней. В слое почвы 0–20 см искусственно удаляли корни через послойное (по 5 см) просеивание почвы ситами с ячейкой 1 мм, затем просеянные слои возвращали обратно в том же порядке и уплотняли до исходного сложения почвы. ПВХ-основания полностью вкапывали на глубину 20 см на постоянной основе. В каждом биотопе подготавливали от 3 до 5 точек (повторностей). Экспериментальные точки подбирали по наибольшей схожести уровня общей эмиссии CO_2 друг с другом и со средним уровнем дыхания на соответствующей линии мониторинга. После завершения подготовительной части вкопанные основания оставляли в почве, регулярные измерения начинали через 1 мес. В качестве оценки уровня общего ДП использовали основания, установленные в тех же биотопах, для мониторинга эмиссии CO_2 из почвы, поскольку пробные площадки по оценке микробного дыхания в каждом биотопе располагались в непосредственной близости от линий мониторинга. Долю микробного дыхания оценивали как отношение средней величины эмиссии из оснований, где были удалены корни, к средней величине общего дыхания почвы в данном биотопе. Подготовленные точки предназначены для постоянных измерений в течение года и ряда лет. Сезонные измерения, служившие основой оценок доли микробного ДП, проводили 8–10 июля, 8–10 августа, 5–7 сентября и 5–7 октября 2023 г. К сожалению, применение этого метода на пашнях невозможно из-за периодического воздействия сельскохозяйственной техники.

Чистая первичная продукция агроценозов. Оценивали общие (включая живые и отмершие части) запасы надземной и подземной фитомассы трех культур (ячмень, озимая пшеница, соя) после полного развития генеративных органов, принимая их за оценку чистой первичной продукции (ЧПП). Такой подход обоснован тем, что оцениваемые культуры являются однолетними, прижизненный опад в ходе роста у них почти отсутствует. Отбор зерновых культур (пшеница, ячмень) проводили в фазу восковой–полной спелости; сою отбирали дважды – в фазу цветения, когда листья достигают максимального размера, но бобов еще нет, и в фазу спелости, когда бобы полностью развиты, а листья уже опали. Отбирали смешанную пробу фитомассы на диагональной трансекте в 10 точках через каждые 10 м, совокупное количество отбираемых с одного поля растений составляло 30–70 шт. в зависимости от культуры и густоты посева. Растения выкапывали с корнями из пахотного слоя

почвы (0–20 см). Одновременно в полевых условиях (в каждой из 10 точек) измеряли ширину междурядий и количество растений в рядке на 1 м. В дальнейшем эти значения использовали для расчета густоты стояния – числа растений на гектар. В лаборатории измеряли высоту каждого растения, общую кустистость (общее число побегов) и продуктивную кустистость (число продуктивных побегов) для последующего расчета биологической урожайности. Каждое растение разделяли на шесть фракций: корни, стерня, стебли, листья (дополнительно для сои выделялась фракция черешков), мякина (у сои – створки бобов), зерно. Для озимой пшеницы высота стерни составляла 14 см; для сои и ячменя – 8 см. Каждый образец высушивали в течение 8 ч при 105°C и взвешивали. Для каждого конкретного поля и года рассчитывали ожидаемую урожайность, массу корней и стерни, оставляемых после уборки, в пересчете на гектар. В пробах всех фракций и культур методом сухого сжигания с помощью элементного CHNS-анализатора Vario Isotope Select (Elementar, Германия) определяли содержание углерода. Полученные значения использовали для расчета запасов углерода на единицу площади для данной культуры.

Показатели С-баланса лесных экосистем. Для оценки нетто-баланса С и ЧПП выбрали широко известную в мире имитационную блоковую модель Канадского лесного сектора в ее последней версии CBM–CFS3 (<https://natural-resources.canada.ca/climate-change/climate-change-impacts-forests/carbon-accounting/carbon-budget-model/13107>). С 2005 г. модель находится в свободном доступе и представляет систему моделирования на местном или ландшафтном уровнях, используемую для составления ежегодных международных отчетов о балансе углерода в лесах Канады. Модель является центральным компонентом канадского национального мониторинга углеродного баланса лесов. В России она неоднократно проходила адаптацию и апробирование на данных Государственного учета лесов и получила положительную оценку [5]. Модель успешно применяли для расчета бюджета лесных хозяйств при расчете С-баланса территории Львовского района Курской области [9]. В нашей стране для составления Национального кадастра парниковых газов с 2010 г. применяется модель РОБУЛ [6]. Она использует архивные данные периодических государственных учетов лесного фонда (до 2006 г.) и Государственного лесного реестра (после 2006 г.). CBM–CFS3 в этом отношении более разработана и информативна. Она может использоваться без ограничений по минимальной площади выделов, учитывает почвенную специфику, изменения климата, и деструктивные воздействия на древостой (рубки и пожары); рассчитывает все основные пулы углерода: надземную и подземную биомассу, подстилку, мертвую древесину и

запас почвенного органического углерода, а также наиболее важные экосистемные потоки углерода (чистую первичную продукцию и нетто-баланс).

Модель применяли к трем вариантам широколиственных лесных насаждений, входящих в систему мониторинга: старовозрастному дубовому лесу, кленово-дубовому лесу и ясеневому лесу, где в 2023 г. были заложены пробные площадки размером 50×50 м. В качестве входных переменных использовали данные по таксации древостоя, почвенным характеристикам, а также местные погодные условия, соответствующие 2023 г. (среднегодовая температура воздуха $+7.6^\circ\text{C}$, сумма осадков 692 мм). Модель в качестве входной информации требует оценить площади насаждений по преобладающим породам и возрастным классам. Для этого по каждой возрастной группе, относящейся к данной породе древостоя, рассчитывали суммы площадей сечений стволов, а затем подсчитывали их удельный вес в процентах от общей суммы площадей сечений стволов всех деревьев. По полученным значениям оценивали доли площадного присутствия каждой возрастной группы по породам для каждой пробной площади. Эти расчетные оценки приведены в табл. S1. Таблицы хода роста древесных пород брали из монографии [18].

Скорость эмиссии CO_2 от крупного древесного дебриса (КДО) оценивали по учетам их запасов на тех же пробных площадях, где проводили таксацию, а также по характерным для изучаемых лесообразующих пород константам скорости разложения древесины за год [25]. КДО учитывали методом линейных трансект [31] в модификации Грабовского и Замолотчикова [3] и программной интерпретации В.И. Грабовского. По две трансекты длиной 50 м закладывали перпендикулярно друг другу на каждой из пробных площадей. При учете фиксировали все пересекавшие трансекту фрагменты древесных остатков диаметром 2 см и более. У каждого фрагмента измеряли общую длину, диаметры основания и вершины, определяли породу и стадию разложения согласно пятибальной шкале Тарасова [17]. Запасы сухостоя оценивали в ходе таксации. Для стадий разложения определяли содержание углерода в древесине лесообразующих пород через отбор проб с помощью сквозного сверления.

Статистическую обработку данных и расчеты проводили с помощью пакетов Microsoft Excel, PAST V. 3.17 (Oyvind Hammer, <https://past.en.lo4d.com/windows>) и PRIMER V. 7 (PRIMER—E Ltd). Для оценки вклада пространственных и временных факторов применяли метод непараметрического множественного дисперсионного анализа на матрицах сходства—различия (distance-based non-parametric multivariate analysis of variance, PERMANOVA [19]). Сравнение средних проводили по непараметрическому критерию Манна—Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная и многолетняя динамика эмиссии CO_2 из почвы. На рис. S2 приведена многолетняя динамика скорости эмиссии CO_2 из почв исследуемых экосистем (биотопов). По сравнению с вегетационным сезоном (апрель—октябрь: 83.7% всех данных), данных по холодному (снежному) периоду получено существенно меньше (ноябрь—март: 16.3%), что связано с труднодоступностью участков измерений в этот сезон и другими логистическими ограничениями. Однако в этот период уровень дыхания в среднем в 4.3 раза меньше ($0.147 \pm 0.0037 > 0.034 \pm 0.0037$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$, различие значимо $P < 0.001$), что делает вклад зимнего периода в ДП наименьшим в году. Заметим, что в отдельных случаях возможно временное превышение уровня зимнего ДП над среднелетним (кленово-дубовый лес, 24 декабря 2023 г.), что было связано с кратковременным зимним потеплением.

Среднемноголетнее значение ДП по всем измерениям за 7 лет по 10 биотопам составило 0.135 ± 0.0017 г $\text{C} (\text{CO}_2)/(\text{м}^2 \text{ ч})$ ($n = 7746$), что соответствует потоку 3.24 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$. Однако пересчет по среднесезонным (календарные: зима, весна, лето, осень) величинам ДП для отдельных биотопов дает величину 2.39 ± 0.19 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$ (873 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ год})$), что является более реалистичной оценкой. Общий диапазон изменчивости значений скорости эмиссии составил от -0.017 до $+2.309$ г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$, при высокой вариабельности ($\text{CV} = 112.8\%$). Как показывает попарное сравнение средних, наибольшие отклонения от других биотопов демонстрируют неудобряемый огород и молодая залежь (2–8 лет). В первом случае эмиссия из почвы минимальна (0.094 ± 0.007 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$) среди исследуемых биотопов, во втором — максимальна (0.223 ± 0.016 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$). На многолетних пашнях (0.103 – 0.153 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$) и в квазиклиматических сообществах, таких как степи (0.142) и широколиственные леса (0.116 – 0.145 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ ч})$), средние величины ДП являются промежуточными между этими значениями, при этом среднегодовая скорость эмиссии в природных экосистемах значимо не отличается от эмиссии на пашнях, несмотря на то, что, согласно проведенным оценкам, в слое почвы 0–100 см на пашнях, в среднем, содержится 237.9 т $\text{C}/\text{га}$, тогда как в луговой степи и лесах 307.5 т $\text{C}/\text{га}$.

Как следует из результатов, представленных в табл. 1, оценки годового ДП, выполненные разными способами, существенно отличаются. В данном случае наиболее адекватной следует считать оценку по среднесезонным величинам потоков CO_2 . В табл. 1 также включена независимая расчетная оценка по модели Райха—Хашимото, которая ранее была параметризована для ряда исследуемых экосистем [15]. В этой модели для оценки

Таблица 1. Среднемноголетние и годовые значения эмиссии CO₂ из почв исследуемых биотопов Курской биосферной станции ИГ РАН (2017–2023 гг.)

Способы оценки эмиссии		Биотоп (опытный участок)									
		огород (КБС-0)	залежь, 2–8 лет (КБС-1)	пашня (КБС-2)	пашня (КБС-4)	пашня (КБС-5)	пашня (КБС-6)	луговая степь, 75 лет	ясеневый лес, 75 лет	кленово-дубовый лес, 80 лет	дубовый лес, 125 лет
(1) Эмиссия CO ₂ , г C/(м ² ч), в среднем по экспериментальным точкам (n = 60–95)		0.094 ± 0.007	0.223 ± 0.016	0.104 ± 0.008	0.142 ± 0.013	0.153 ± 0.015	0.103 ± 0.014	0.142 ± 0.01	0.116 ± 0.009	0.145 ± 0.013	0.119 ± 0.009
(2) Эмиссия CO ₂ , г C/(м ² ч), по среднесезонным значениям (зима, весна, лето, осень) (n = 28)		0.068 ± 0.02	0.168 ± 0.054	0.082 ± 0.031	0.109 ± 0.034	0.110 ± 0.043	0.093 ± 0.028	0.100 ± 0.04	0.097 ± 0.024	0.137 ± 0.03	0.108 ± 0.024
(3) Эмиссия CO ₂ , г C/(м ² ч), метод трапеции за 2022–2023 гг. (n = 60–95)		0.065 ± 0.004	0.154 ± 0.007	0.099 ± 0.013	0.094 ± 0.003	0.103 ± 0.0005	0.087 ± 0.007	0.098 ± 0.003	0.098 ± 0.013	0.138 ± 0.004	0.141 ± 0.006
Оценка годовой эмиссии, г C/(м ² год), по (1)		823	1954	911	1244	1340	902	1244	1016	1270	1042
Оценка годовой эмиссии, г C/(м ² год), по (2)		594	1475	716	959	969	816	875	848	1197	948
Оценка годовой эмиссии, г C/(м ² год), по (3)		534 ± 72	1221 ± 256	812 ± 174	728 ± 147	914 ± 22	722 ± 82	838 ± 73	793 ± 162	1138 ± 7	996 ± 144
(4) Оценка годовой эмиссии, г C/(м ² год), по модели Райха–Хашимото за 2019–2023 гг. (n = 5) *		–	–	597.5 ± 1.8	895.2 ± 12.4	–	710.6 ± 12.4	962.5 ± 7.3	804.8 ± 6.8	1067.4 ± 7.8	901.8 ± 7.1
Среднее арифметическое оценок годового дыхания почвы по (1)–(4)		651 ± 88	1550 ± 215	759 ± 77	956 ± 107	1075 ± 134	788 ± 45	980 ± 92	865 ± 52	1168 ± 43	972 ± 30

* Прочерк в ячейках означает, что по данным экосистемам накоплено недостаточно полевых наблюдений для параметризации модели. Общее количество использованных в расчетах полевых измерений в отдельных биотопах варьирует от 700 до 960. Приведены средние и их стандартные ошибки, а также размеры выборок (n). Обозначения опытных участков и биотопов соответствуют рис. S2.

ДП используются среднемесячные температуры и суммы осадков за месяц, и она способна адекватно оценивать именно суммарную эмиссию за год.

Если использовать усредненные оценки ДП, полученные разными способами и взвесить их по занимаемым экосистемами площадям на территории полигона, получим итоговую оценку 898 г С/(м² год), которую можно рекомендовать для более широкого применения в ландшафтных исследованиях черноземной зоны ЕТР.

Существует возможность сравнить уровни ДП на исследованных участках с информацией из мировой базы данных (A Global Database of Soil Respiration Data, Version 5.0; https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/SRDB_V5.html). По результатам ее анализа из общего объема более 12 тыс. записей, релевантными (поиск по ключевым словам: “chernozem”, “black soil”, “Mollisol”, с исключением горных локаций, районов с отрицательной среднегодовой температурой воздуха, гидроморфных биотопов и данных за неполный год) оказались лишь 110. Средняя оценка годового ДП по отфильтрованным таким образом данным составила 924 ± 108 г С/(м² год), что значимо не отличается от средней оценки по исследованным участкам ($P > 0.05$).

Доля микробного (гетеротрофного) дыхания от общего потока эмиссии CO₂ из почвы. Микробное дыхание почвы (МД) наряду с дыханием корней растений является главной составляющей почвенной эмиссии CO₂ [26]. Одной из важных областей применения показателя МД служит его использование для оценки нетто-баланса CO₂ (чистого экосистемного потока, ЧП) в наземных экосистемах согласно балансовому уравнению:

$$\text{ЧП} = \text{ЧПП} - \text{МД}.$$

Хотя существуют рекомендуемые наиболее достоверительные коэффициенты участия микробного дыхания, составляющие 0.5 (нижняя оценка) или 0.67 (верхняя) от дыхания почвы [10], МД зависит от климата, сезона, типа почвы, характера растительного покрова, варианта землепользования и может меняться в широких пределах. Так, для умеренной климатической зоны оно варьирует от 2 до 90%, в среднем — 55% [22], или глобально от 29 до 96%, в среднем — 62% [32]. В отдельных экосистемах временные вариации этого показателя существенно меньше [8], но для мониторинга основных показателей С-баланса важно иметь постоянные точки наблюдений за сезонной и многолетней динамикой доли МД в каждом значимом варианте местных экосистем. Полученные результаты показывают, что вклад микробного дыхания за вегетационный сезон существенно варьирует между отдельными биотопами и даже вариантами широколиственных лесов (средние приведены в порядке

убывания): молодая залежь (77.6%), ясеневый лес (75%), луговая степь ($72.4 \pm 3.7\%$), старовозрастный дубовый лес ($58 \pm 9.2\%$), кленово-дубовый лес ($33.5 \pm 2.8\%$).

Средняя величина по всем биотопам равна $57 \pm 5\%$, что близко к глобальной оценке — 60% [20, 32]. Однако сезонная изменчивость этого показателя для отдельно взятых экосистем невелика: коэффициент вариации менялся в пределах 11.4–31.8%. Поэтому, например, различия между луговой степью и дубовым лесом, несмотря на небольшое количество проведенных внутрисезонных измерений, оказались значимы ($P < 0.01$).

Поскольку подобные данные для рассматриваемого района исследований ранее были получены другими исследователями, это позволяет сравнить оценку рассматриваемой величины с литературными источниками. В частности, такие данные [16] были получены в результате редкого полевого применения хорошо известного метода субстрат-индуцированного дыхания (СИД). Автор метода Н.С. Паников, описание см. [2, 8]. По данным [16] в среднем за вегетационный сезон вклад МД черноземной почвы степи, луга и широколиственного леса составил 52, 63 и 79% соответственно. Другие исследователи указывают, что доля МД при механическом удалении корней составляет 72% в луговых [21] и 69% в степных [14] сообществах. Вклад МД в эмиссию CO₂ из разных типов почв (Cambisol, Phaeozems, Albic Luvisols), определяемый методом СИД в полевых условиях, составляет в среднем 64 [21] и 60% [2]. В большинстве случаев доля МД в эмиссии CO₂ из почв травяных экосистем в среднем больше, чем его доля в эмиссии из почв древесных экосистем [14, 22, 32], что соответствует настоящим данным.

На пашнях, где отсутствуют собственные данные по вкладу МД, для расчетов анализировали имеющиеся литературные оценки. Однако релевантных данных оказалось крайне мало. Под различными культурами (кукуруза, яровой ячмень, озимая пшеница) на серых почвах вклад МД варьировал от 52 до 86% [13]. Однако в этих оценках не учитывался вклад междурядий, где при обычной системе посадки отсутствуют растения, а данные были получены в экспериментах, а не в полевых условиях. По пахотным черноземам таких данных в литературе найти не удалось. Для лесостепной подзоны усредненный показатель вклада МД за год составляет 67% [13], для степей России 55% [11]. Для почвенных аналогов — “black soils”, “Mollisols” — в северо-восточном Китае [29] на пашнях с различными системами обработки почвы и ротацией кукуруза—соя этот показатель варьировал от 54 до 65%. Анализ мировой базы данных по ДП не предоставил сведений по вкладу микробного дыхания в рассматриваемых экосистемах. Из-за отсутствия релевантных данных при оценках

нетто-баланса углерода на исследуемых пахотных экосистемах в дальнейших расчетах использовали два экспертных коэффициента вклада МД (50% и 67% — по нижней и верхней оценке, соответственно).

Расчет нетто-баланса углерода избранных экосистем полигона КБС. Наличие полевых оценок общего ДП и доли в нем МД позволяет использовать эти данные для расчета нетто-баланса углерода в тех экосистемах, для которых имеется возможность оценить скорость чистой первичной продукции. В настоящем случае это удалось выполнить для пашен и лесных экосистем.

Нетто-баланс С на пашнях. Несмотря на то, что модельные оценки ДП на всех исследуемых участках пашен имеются за каждый год наблюдений, полевые оценки ЧПП выполняли только для отдельных культур севооборота, поэтому рассчитать нетто-баланс по этим показателям удалось для восьми случаев (табл. 2).

Наибольшую степень неопределенности при таком способе расчета вносит показатель доли МД. Как показывают результаты, согласно его нижней оценке (0.5), ЧПП во всех случаях, кроме одного (ячмень, КБС-6, 2021) наблюдается выраженный сток углерода. По верхней оценке, напротив, все участки кроме двух оказались его источниками. Средние по двум оценкам свидетельствуют, что посевы озимой пшеницы и сои в основном служат экосистемными стоками, тогда как ячмень с большей вероятностью является источником углерода за год.

Для проверки влияния на годовое дыхание почвы *высеваемой культуры и особенностей самого пахотного участка* по всем имеющимся оценкам годового дыхания почвы был проведен двухфакторный непараметрический дисперсионный анализ (PERMANOVA). Обычный двухфакторный

дисперсионный анализ в данном случае не подходит, так как в общем массиве наблюдений (сочетания 5 видов культур и 4 полей за 2017–2023 гг.) не хватает нужного количества комбинаций рассматриваемых факторов. Дисперсионный анализ PERMANOVA, проводимый на основе дистанций/сходства, это допускает, кроме того, этот вид анализа работает не с 21 вариантом, а с $21 \times 20/2 = 210$ значениями различий ДП и позволяет оценить вклады факторов в общую дисперсию количественно. Как показывают результаты (табл. S2), вид высеваемой в конкретный год культуры является существенно более важным фактором (его вклад в дисперсию ДП составляет 87.9%), чем особенности самого участка пашни или их взаимодействие, вклад которых в общую дисперсию оказался незначительным. Это говорит о том, что на фоне высокого сходства почв на рассматриваемых участках пашен (агрочернозем миграционно-мицелярный), а также общих для всех участков погодных условий, предшествующая история их использования не имеет значения по сравнению с видом культуры, выращиваемой на данном участке в конкретный год.

Интересно сравнить полученные оценки нетто-баланса пашен с литературными данными. Наиболее корректными для сравнения в данном случае служат прямые инструментальные оценки нетто-баланса углерода с помощью метода микровихревых пульсаций для тех же культур. В частности, в работе [28] представлены такие оценки для озимой пшеницы $+273 \pm 22$ г С/(м² год). Для агроландшафта с преобладанием ярового ячменя [30] моделирование на основе ДЗЗ и метода микровихревых пульсаций дало оценку стока 31 г С/(м² год). В работе [27] приведены сравнительные данные собственных и опубликованных наблюдений других авторов с помощью этого метода по нетто-балансу углерода наиболее распространенных в Европе посевных культур. Данные по озимой

Таблица 2. Оценки углеродного обмена на участках пашен под различными культурами в отдельные годы наблюдений, г С/(м² год)

Показатель	Озимая пшеница			Ячмень		Соя		
Обозначение участка, оцениваемый год	КБС-6, 2019	КБС-4, 2022	КБС-2, 2023	КБС-5, 2020	КБС-6, 2021	КБС-2, 2019	КБС-2, 2021	КБС-4, 2023
ЧПП	665.6	618.1	646.8	440.7	401.8	560.4	325.5	548.8
ДП	1063.5	935.6	943.8	860.5	932.4	882.1	626	620.2
ЧП (по доле МД 0.5)	133.8	150.3	174.9	10.5	–64.4	119.4	12.5	238.7
ЧП (по доле МД 0.67)	–47	–8.8	14.5	–135.8	–223	–30.6	–94	133.3
Средний ЧП	43.4	70.8	94.7	–62.7	–143.7	44.4	–40.8	186

Примечание. В столбцах приведены показатели углеродного обмена только для тех лет и участков пашен, по которым имелись необходимые полевые данные. Обозначения приведены в тексте. Положительные значения ЧП обозначают нетто-сток углерода из атмосферы (выделено зеленым), отрицательные — его источник в атмосферу (выделено красным).

пшенице находятся в диапазоне устойчивого стока 183–369 г С/(м² год), но по сое наблюдается вариация от стока 85 до источника — 48 г С/(м² год). Подчеркнем, что поля различных монокультур могут принципиально отличаться по характеру нетто-баланса. Причем они не обязательно являются стоком углерода. В частности, поля подсолнечника, как правило, являются устойчивыми, хотя и небольшими источниками углерода; в отдельные годы это происходит и на полях кукурузы или картофеля [27].

Особенности С-баланса различных культур связаны с соотношением характерных скоростей их продукции и дыхания, а также с особенностями технологии выращивания. Если баланс данной культуры, согласно этим показателям, близок к нулевому, то любые изменения погодных условий могут перевести поля, на которых они выращиваются, в сток или источник углерода для атмосферы, в том числе за год в целом. Яровой ячмень является самой короткостебельной и скороспелой культурой среди всех возделываемых в России и характеризуется наиболее низкой биологической продуктивностью. Поэтому нетто-баланс посевов ячменя может принимать значения С-источника. Из сравнения данных мировой литературы и результатов, приведенных в табл. 2, следует, что использованная нижняя граница вклада микробного дыхания (0.5) на пашнях, по-видимому, лучше соответствует прямым оценкам С-баланса агроэкосистем.

Нетто-баланс С в широколиственных лесах КБС ИГ РАН оценивали по той же расчетной схеме, что для пашен, т.е. по разнице между ЧПП и гетеротрофным дыханием, кроме того, в этом случае имела возможность получить оценку нетто-баланса с помощью модели CBM-CFS3. В результате для трех типов широколиственного леса по модели CBM-CFS3 был рассчитан нетто-поток углерода для текущих погодных условий. Все экосистемы оказались стоками углерода близкой величины. Наибольшей скоростью секвестрации характеризовался лес с доминированием ясеня (это и наиболее продуктивная среди моделируемых экосистема), где С-сток составил 140 г С/(м² год), на втором месте кленово-дубовый лес (119), и на последнем месте оказался старовозрастный дубовый лес (106 г С/(м² год)). В последнем случае наиболее низкий сток выглядит непротиворечиво, поскольку для старовозрастных лесов характерно общее снижение нетто-продуктивности [1]. Тем не менее, полученные значения следует считать достаточно близкими.

Однако при моделировании нетто-баланса С точнее и надежнее использовать не интегральную, а раздельную, независимую оценку его основных компонентов [7], в частности, это можно сделать по разнице ЧПП и гетеротрофного дыхания. Согласно модели CBM-CFS3, оценки ЧПП в трех лесных

экосистемах близки: выше всего ЧПП в ясеневом лесу (633 г С/(м² год)), несколько меньше — в кленово-дубовом (607) и наименьшая — в старовозрастном дубовом лесу (573 г С/(м² год)). Эти величины можно сравнить с независимыми оценками ЧПП по натурным данным других исследователей. Согласно сводке Базилевич [1], аналогичные варианты лесов в подзоне лесостепи европейской части России в 1970-х характеризовались ЧПП около 500 г С/(м² год); там же отмечалось, что перестойные дубовые леса значительно менее продуктивны, по сравнению с 80-летними дубняками, а ясеневые леса более продуктивны, чем дубовые или дубово-кленовые. В целом это отвечает полученным результатам.

Теперь для расчета ЧП из полученной величины ЧПП следует вычесть затраты на гетеротрофное дыхание, которые могут быть независимо рассчитаны по имеющимся данным. В случае лесных экосистем это два основных расходных потока: микробное дыхание в почве и эмиссия от древесного валежа и сухостоя за год (рис. 1).

Для старовозрастного дубняка независимая балансовая оценка ЧП по ЧПП и гетеротрофному дыханию оказалась равной стоку 95 г С/(м² год), что близко к оценке этого показателя по модели CBM-CFS3 (106 г С/(м² год)). При этом вклад эмиссии от валежа и сухостоя здесь оказался очень мал (4.5% от дыхания почвы), что связано с низкой скоростью разложения дуба и относительно небольшими здесь запасами КДО. В кленово-дубовом лесу аналогичная оценка ЧП оказалась стоком углерода величиной 130 г С/(м² год), что несколько превышает оценку ЧП по модели CBM-CFS3 (119 г С/(м² год), но в целом ей соответствует. В этом случае вклад эмиссии от древесного дебриса оказался таким же, как в дубовом лесу (4.5% от дыхания почвы). При этом больший СО₂-сток в этом типе леса по сравнению со старовозрастным дубняком обязан сочетанию здесь большей первичной продукции и меньшего вклада МД. В ясеневом лесу различие ЧП, рассчитанное двумя способами, оказалось принципиальным — участок леса оказался заметным источником С для атмосферы, равным —112 г С/(м² год), тогда как оценка ЧП по CBM-CFS3 составляет выраженный сток +140 г С/(м² год). В основном этот источник определяется существенным вкладом от разложения дебриса, составляющим здесь 16.5% от потока из почвы, что почти в 3 раза превосходит вклад этого показателя по сравнению с двумя другими лесными экосистемами. Несмотря на большую продукцию в этом типе леса, здесь отмечается и наибольший поток СО₂ из почвы с микробным дыханием.

Проведенная раздельная оценка ЧП по трем его составляющим выглядит более реалистичной по сравнению с его прямой оценкой по CBM-CFS3. В ясеневом лесу, который продемонстрировал

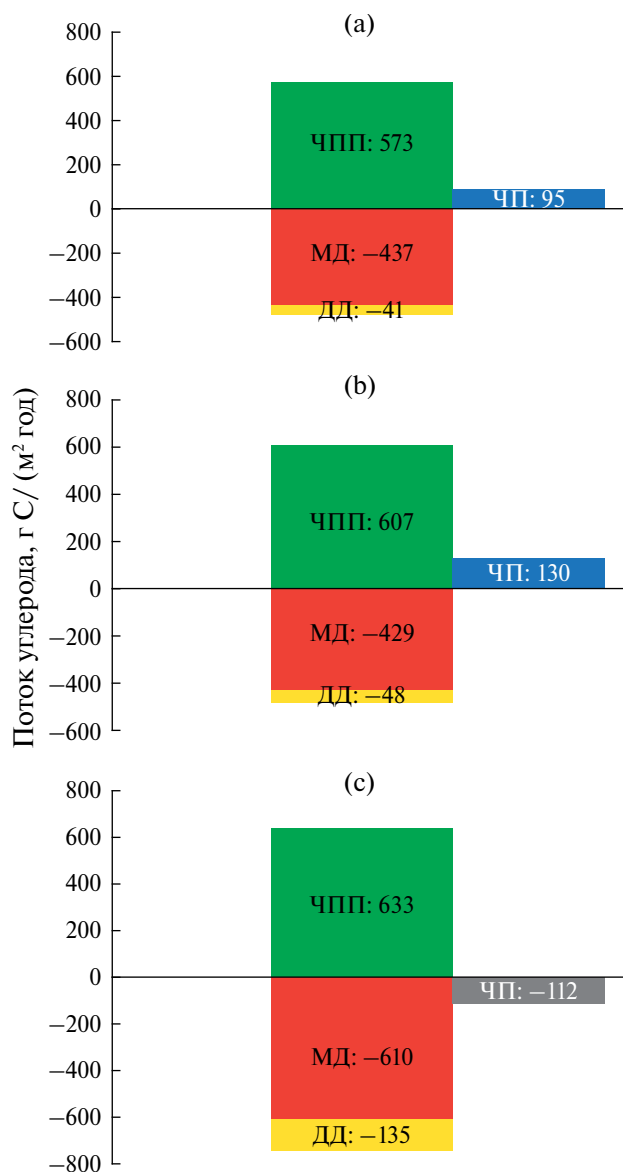


Рис. 1. Расчет экосистемного нетто-потока (ЧП) в трех типах леса по чистой первичной продукции (ЧПП), микробному дыханию в почве (МД) и дыханию валежа и сухостоя (ДД). Положительные значения обозначают поглощение С экосистемой из атмосферы, отрицательные — источник С в атмосферу. (а) — старовозрастный дубовый лес, (б) — кленово-дубовый лес, (с) — ясеновый лес.

наибольшие различия по сравниваемым способам расчета, были зафиксированы вдвое большие запасы валежа и сухостоя (25.14–26.46 т С/га) по сравнению с другими типами леса (кленово-дубовый 12.5–14.2, старовозрастный дубняк 12.1–12.7 т С/га). Кроме того, скорость разложения древесины ясеня заметно больше, чем дуба [25].

Как показала таксация, на участке леса с доминированием интродуцента — ясеня пенсильванско-

го произошла массовая гибель древостоя, вызванная инвазией ясеновой изумрудной узкотелой златки, что является главной причиной отмечаемых высоких запасов валежа и сухостоя. Кроме того, последнее объясняет и больший для этого насаждения уровень эмиссии CO_2 из почвы, что выявлено в таежных лесах при гибели древостоя в результате воздействия короеда-типографа [24].

Сравнение полученных величин ЧП участков леса с другими лесными экосистемами нецелесообразно, так как этот показатель сильно варьирует, как на многолетнем интервале, так и в пределах небольших лесных насаждений. Однако сравнить полученные оценки с общей оценкой С-баланса для лесных насаждений Курской области в целом допустимо. Такую оценку удалось выполнить с помощью модели РОБУЛ по данным Государственного лесного реестра за 2020 г. Нетто-сток в широколиственные леса Курской области составил для возраста древостоя 61–80 лет 132 г С/(м² год), а для возраста 81–120 лет — 147 г С/(м² год). В этом случае не проявилась тенденция к уменьшению стока углерода в более старых лесах, что связано со случайными процессами, однако сами величины вполне соответствуют рассмотренным выше оценкам.

Важное заключение, которое следует из анализа оценок ЧП лесных экосистем — лесной покров обладает присущей ему выраженной пространственной мозаичностью бюджета С. К аналогичным выводам для тундровых экосистем пришли авторы [7]. Это связано со структурой С-бюджета любой экосистемы без серьезных нарушений, где приходная часть близка по абсолютной величине к расходной. Поэтому нетто-баланс легко (хотя и обратимо) может менять знак со стока на источник углерода, например, при изменении температуры или гибели древостоя от различных причин [24].

ВЫВОДЫ

1. Многолетние оценки ДП за год могут быть успешно использованы для прогноза нетто-баланса углерода, как в природных, так и антропогенных экосистемах, для которых существуют надежные данные по скорости ЧПП и вкладу гетеротрофной составляющей ДП.

2. При расчетах ЧП в лесных экосистемах важен учет эмиссионной составляющей от разложения КДО, который может выступать самостоятельным фактором, определяющим нетто-баланс углерода при гибели древостоя от различных причин.

3. На пашнях с однолетними сельскохозяйственными культурами, общим типом почвы и длительным использованием, годовое ДП почти ультимативно определяется видом возделываемой в данный год культуры, что подразумевает как ее

биологические особенности, так и характерную технологию возделывания и не зависит от предшествующей истории смены культур на данном участке.

4. Наибольшую степень неопределенности в полученные значения ЧП в случае пашен вносят оценки микробного дыхания почвы за год. Для оценок ЧП в широколиственных сообществах при применяемом подходе существует недоучет эмиссии со стороны наиболее мелкого дебриса (диаметр менее 1 см), а также вклада в ЧП со стороны кустарникового яруса.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают глубокую признательность к.б.н. В.И. Грабовскому за помощь в расчетах углеродного баланса по модели CBM-CFS3 и предоставление программы для расчета запасов углерода в составе КДО, а также д.б.н. А.И. Азовскому за помощь в статистической обработке данных. Часть аналитической работы была выполнена в рамках государственного задания FMWS-2024-0010 Института географии РАН.

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 бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24100073>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Евдокимов И.В., Ларионова А.А., Шмит М., Лопес де Гереню В.О., Бан М.* Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO₂ из почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. 2010. № 3. С. 349–355.
3. *Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г.* Методы оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.
4. *Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н.* Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.
5. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н.* Управление бюджетом углерода лесов Дальнего Востока России: прогнозный анализ по модели CBM-CFS // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. Т. 1. № 41. С. 98–103.
6. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Куриц В.А.* Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 73–92.
7. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
8. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Почикалов А.В., Гитарский М.Л.* Микробная и корневая составляющие дыхания дерново-подзолистых почв южной тайги // Лесоведение. 2017. № 3. С. 183–195.
<https://doi.org/10.1134/S199542551707006X>
9. *Карелин Д.В., Суховеева О.Э., Глаголев М.В., Добрянский А.С., Сабреков А.Ф., Замотаев И.В.* Годовой бюджет углеродсодержащих биогенных парниковых газов при смешанном землепользовании: Львовский район как модельный объект центрального Черноземья // Почвоведение. 2023. № 8. С. 911–924.
10. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Савин И.Ю., Шорохова Е.В.* Баланс углерода в лесных экосистемах южного Подмосковья в условиях усиления засухливости климата // Лесоведение. 2016. № 5. С. 332–345.
11. *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Жиенгалиев А.Т., Кудеяров В.Н.* Углеродный бюджет степных экосистем России // Доклады академии наук, 2019. Т. 485. № 6. С. 732–735.
12. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
13. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
14. *Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р.* Краткосрочная

- динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO₂ почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478.
15. Суховеева О.Э., Карелин Д.В. Оценка дыхания почв с помощью модели Райха–Хашимото: параметризация и прогноз // Известия РАН. Сер. Географическая. 2022. Т. 86. № 4. С. 519–527.
16. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудряков В.Н. Эмиссия CO₂, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1081–1091.
17. Тарасов М.Е. Роль крупного древесного детрита в балансе углерода лесных экосистем Ленинградской области. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2000. 21 с.
18. Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С., Булуй Ю. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
19. Anderson M.J., Gorley R.N., Clarke K.R. PERMANOVA+ for PRIMER: guide to software and statistical methods. Plymouth: PRIMER-E Ltd, 2008. 214 pp.
20. Bond-Lamberty B., Chuankuan Wang, Stith T. Gower. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? // Global Change Biology. V. 10. 2004. P. 1756–1766. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00816.x>
21. Gavrichkova O. Drivers of soil respiration of root and microbial origin in grasslands. Università degli studi della Tuscia–Viterbo, 2009. 166 p.
22. Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews J.A. Separating root and soil microbial to soil respiration: A review of methods and observations // Biogeochemistry. 2000. V. 48. P. 115–146.
23. Karelin D., Goryachkin S., Zazovskaya E., Shishkov V., Pochikalov A., Dolgikh A., Sirin A. et al. Greenhouse gas emission from the cold soils of Eurasia in natural settings and under human impact: Controls on spatial variability // Geoderma Regional. 2020. V. 22. P. e00290. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00290>
24. Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyayev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitarskiy M.L. The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest // Eur. J. Forest Res. 2021. V. 140. P. 287–305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
25. Khanina L., Bobrovsky M., Smirnov V., Romanov M. Wood decomposition, carbon, nitrogen, and pH values in logs of 8 tree species 14 and 15 years after a catastrophic windthrow in a mesic broad-leaved forest in the East European plain // Forest Ecology and Management. 2023. V. 545. P. 121275.
26. Luo Y., Zhou X. Soil respiration and the environment. Burlington: Academic Press, 2006. 316 p.
27. Pierre B., Ceschia E., Dedieu G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France // Agricultural and Forest Meteorology 149 (2009) 1628–1645.
28. Schmidt M., Reichenau T.G., Fiener P., Schneider K. The carbon budget of a winter wheat field: An eddy covariance analysis of seasonal and inter-annual variability // Agricultural and Forest Meteorology. 2012. V. 165. P. 114–126.
29. Shuxia J., Zhang X., Chen X., McLaughlin N.B., Zhang S., Wei S., Sun B., Lian A. Long-term conservation tillage influences the soil microbial community and its contribution to soil CO₂ emissions in a Molisol in Northeast China // J. Soils Sediments. 2016. V. 16(1). P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1158-7>
30. Soegaard H., Jensen N., Boegh E., Hasager C., Schelde K., Thomsen A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling // Agricultural and Forest Meteorology. 2003. V. 114. P. 153–173.
31. Ståhl G., Ringvall A., Fridman J. Assessment of coarse woody debris – a methodological overview // Ecol. Bul. 2001. V. 49. P. 57–71.
32. Subke J.A., Inglima I., Cotrufo M.F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A meta-analytical review // Global Change Biology. 2006. V. 12. P. 921–943. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01117.x>
33. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Glob. Biogeochem. Cycles. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>

The use of Long-Term Observations of Soil Respiration for Calculations of Net Carbon Balance in Chernozem Zone

D. V. Karelin¹, A. N. Zolotukhin², O. V. Ryzhkov³,
V. N. Lunin¹, D. G. Zamolodchikov⁴, and O. E. Sukhoveeva^{1, *}

¹*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

²*Kursk Federal Agrarian Scientific Center, Kursk, 305021 Russia*

³*Central Black Earth Biosphere Reserve, Zapovedny, Kursk region, 305528 Russia*

⁴*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

*e-mail: olgasukhoveeva@gmail.com

Long-term (2017–2023) year-round observations of soil CO₂ efflux (soil respiration, SR) in the area of typical Chernozems distribution (Kursk region, Medvensky district, Kursk Biosphere Station of the Institute of Geography RAS) were carried out using a unified technique based on field measurements with IRGA. Annual estimates of SR were calculated in the most representative local anthropogenic and natural ecosystems that form the forest–steppe agro–landscape in Chernozem zone of European Russia (permanently used arable land, non–fertilized vegetable garden, 2–8 yr fallow, meadow steppe, and broadleaved forests). According to estimates averaged by various models and calculation schemes, SR in the study area varies from 650.6 ± 88.2 (non–fertilized vegetable garden) to 1550 ± 215 (2–8 yr abandoned land) g C–CO₂ m^{–2} yr^{–1}, amounting to 895 ± 91 on permanently used arable land and 1040 ± 55 g C–CO₂ m^{–2} yr^{–1} in natural ecosystems. The share of microbial (heterotrophic) respiration (MR) in local soils averaged 55.5% (broadleaf forests), 77.6% (abandoned land), and 72.4% (meadow steppe) during the growing season. The ecosystem net carbon balance of the three broadleaf forest sites, calculated by the difference between net primary production (NPP estimated by CBM–CFS3 model and taxation data) and heterotrophic respiration (SR and CO₂ losses from decomposition of coarse woody debris, CWD) vary from atmospheric carbon uptake $+130$ g C–CO₂ m^{–2} yr^{–1} to its source -112 g C–CO₂ m^{–2} yr^{–1}. In the latter case, the net carbon source is due to the accumulation of significant stocks of CWD as a result of tree mortality from xylophages. On arable lands, similarly, calculated by NPP and MR net carbon balance, according to the expert assessment of MR share, vary from $+186$ to -143.7 g C–CO₂ m^{–2} yr^{–1}, with almost ultimate contribution of the crop type grown in a given year to inter–annual variations of SR (87.9%). It is concluded that the above approach is applicable to estimates of the net C balance in rather different ecosystems, however, the greatest uncertainty is introduced by estimates of the soil MR share.

Keywords: European territory of Russia, carbon dioxide emission, net primary production, carbon balance, Haplic Chernozem