

УДК 574.4:631.47

ГОДОВОЙ БЮДЖЕТ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ БИОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ СМЕШАННОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ: ЛЬГОВСКИЙ РАЙОН КАК МОДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2023 г. Д. В. Карелин^а, О. Э. Суховеева^а, М. В. Глаголев^б, А. С. Добрянский^а,
А. Ф. Сабреков^с, И. В. Замотаев^а

^аИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

^бМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^сЮгорский государственный университет, ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск, 628012 Россия

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

Поступила в редакцию 13.01.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Проведено комплексное исследование годового баланса биогенных углеродсодержащих парниковых газов в границах Льговского административного района в Черноземной зоне Европейской части России (Курская область). Источниками данных послужили полевые оценки обмена диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄) между почвой и атмосферой, надземных и подземных запасов фитомассы, параметризованные по этим данным имитационные модели, официальная статистическая и метеорологическая информация, а также литературные данные. Обводненные поля фильтрации сахарного комбината отвечают за 26% эмиссии CH₄ с территории Льговского района, хотя они занимают лишь около 0.04% его площади. Максимум эмиссии CO₂ из почвы отмечен при ее объемной влажности около 30%. Эмиссия CH₄, наоборот, минимальна в диапазоне влажности 0–30%, а с повышением этого показателя начинает линейно расти, достигая максимума на открытой поверхности непроточных водоемов, а среди них – на обводненных полях фильтрации. Другим существенным источником CH₄ являются открытые компостные хранилища (22%). Однако наибольшим по территориальному вкладу источником CH₄ служат водохранилища и пруды (43%). Среди главных антропогенных нетто-источников CO₂ на территории района – сжигание всех видов ископаемого топлива транспортом (22.3%). В отличие от CH₄, поток которого в основном определяется мощными точечными источниками, величина вклада отдельных экосистем в нетто-бюджет CO₂ положительно коррелирует с их площадной представленностью. Расчет суммарного бюджета обоих парниковых газов при переводе в CO₂-эквивалент показывает, что наблюдаемый в настоящее время небольшой нетто-сток CO₂ на территории района (–6.4 г С м^{–2} год^{–1}) решительно перекрывается местными источниками метана (+95 г С–CO₂-экв. м^{–2} год^{–1}). Обсуждается влияние видов землепользования и методов расчета на С-баланс рассматриваемой территории, а также оцениваются способы ее трансформации в углеродно-нейтральное состояние.

Ключевые слова: Naplic Chernozem, диоксид углерода, метан, углеродный баланс

DOI: 10.31857/S0032180X23600038, **EDN:** OIHACP

ВВЕДЕНИЕ

В крайне востребованном в современном мире научном фронте изучения и предсказания углеродного баланса и обмена климатически активных газов между наземными экосистемами и атмосферой, огромное число исследований посвящено либо глобальным обобщениям на уровне биосферы, континентов и крупных биомов [15, 27, 31], либо, напротив, исследованиям местных экосистем, таких как отдельно взятый однородный лесной массив, границы которого часто

определяются просто размерами отклика измерительных систем, оценивающих территориальный нетто-баланс CO₂ [22, 26]. При этом промежуточные уровни пространственного масштаба, в частности, участки территории, объединяющие принципиально различные экосистемы и объекты, затрагиваются значительно реже.

Это также касается отдельных оценок углеродного баланса антропогенных и природных экосистем, которые, как правило, не рассматриваются вместе на единой территории. В то же вре-

мя, если расчет С-баланса ведется в пределах условных границ для подобной неоднородной и достаточно обширной территории, где есть как природные, так и антропогенные объекты, то возникает вопрос о том, как и где проводить такие границы? На наш взгляд, здесь возможны два подхода: (1) рассматривать отдельно взятый водный бассейн (границы водораздела), либо (2) использовать существующие административные границы в том случае, если рассматриваемая административная единица имеет давнюю историю.

В первом случае рассматривается крупная и относительно автономная экосистема, включающая автоморфные, аккумулятивные и транзитные участки, которая способствует замыканию на себе потоков биогенных веществ. В этом качестве могут служить как относительно малые водосборы [37], так и крупнейший на планете бассейн Амазонки [12]. Во втором подходе условно проведенные административные границы, позволяют воспользоваться накопленной информацией, включая оцифрованную историю использования этой территории человеком за значительный период времени. Отсюда следует, что надо использовать старые и устойчивые в своих пределах административные единицы, под эти требования могут подходить национальные парки, частные владения и другие крупные выделы. Наличие долговременных исторических данных позволяет применять к таким территориям прогноз на основе моделирования изменений климата и землепользования.

Другим хорошо развитым направлением исследований в обсуждаемой области является расчет углеродного следа (carbon footprint, в исходной терминологии), что связано, главным образом, с антропогенными источниками С-содержащих парниковых газов (ПГ) в произвольных масштабах. Согласно наиболее наукоемкому определению, это “общее количество выбросов диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4), вызванное определенной популяцией или деятельностью, с учетом всех соответствующих источников, поглощения и накопления в пространственных и временных границах этой популяции или деятельности” [36]. Однако, если речь идет об определенной территории, такие расчеты, основанные на антропогенных источниках, обычно не учитывают природную составляющую баланса ПГ. Например, установлено, что дыхание почвы в селитебных зонах может составлять до 16.5% от общей эмиссии CO_2 с их территории [13, 20].

Следуя этим предпосылкам, в представленной работе попытались восстановить современный нетто-баланс основных биогенных С-содержащих парниковых газов CO_2 и CH_4 для отдельно взятого, имеющего давнюю историю административного района РФ (Льговский район Кур-

ской области), где хорошо представлены как природные, так и антропогенные экосистемы и объекты. Основными задачами было максимально учесть не только антропогенные, но и естественные составляющие баланса, выяснить их относительный вклад, оценить общую величину баланса и потенциальные пути его трансформации в состоянии углеродной нейтральности или стока углерода.

ОБЪЕКТ ИЗУЧЕНИЯ

Льговский район (<https://kursk.ru/region/control/page-44081>, рис. 1), имеющий площадь 1030 км², является старой административной единицей на хорошо освоенных землях Курской области, входящей в Центрально-Черноземный регион России. Эта зона важна тем, что с начала XIX в. служит бессменной главной житницей страны. Составляя лишь 1% территории и 5.3% населения России, Черноземье сейчас производит более 15% всей сельхозпродукции РФ (Росстат, <https://rosstat.gov.ru/statistic>). Именно наличие преобладающих здесь черноземов (в основном, *Нарпiс Чернозем*) накладывает на типичный в этом отношении Льговский район консервативные особенности территориальной структуры, которая мало меняется во времени. С небольшими изменениями границ исследуемый район известен начиная с конца XVIII в. (<https://kursk.ru/region/history/>) и уже более 200 лет остается преимущественно аграрным [6]. Основным направлением местного хозяйства является пашенное земледелие, в советский период к нему добавилось и промышленное производство, в частности сахарный завод [3] на основе местного выращивания свеклы. В постсоветский период здесь происходили процессы снижения плотности сельского населения [6] при одновременном сокращении сахарного производства. Отток сельского населения, по-видимому, связан не только с общими демографическими проблемами и урбанизацией, но и с технологическим прогрессом в сельском хозяйстве, что способствует снижению потребности в человеческих ресурсах. Пашни занимают здесь половину площади; среди доступных для распашки земель нераспаханными остаются только некоторые пойменные участки, наиболее выраженные склоны сухих балок и защитные леса. Селитебные площади и промышленные зоны занимают сейчас 10.8%, дороги – 0.1%.

Особое положение в территориальной структуре района занимает ресурсно- и энергоемкое сахарное производство, поскольку его неотъемлемой частью являются поля фильтрации, представляющие собой сеть прямоугольных углублений в почве (карт), окруженных валами, куда сливается дефекаат (фильтрационный осадок) с неочищенными сточными водами [3]. Площадь

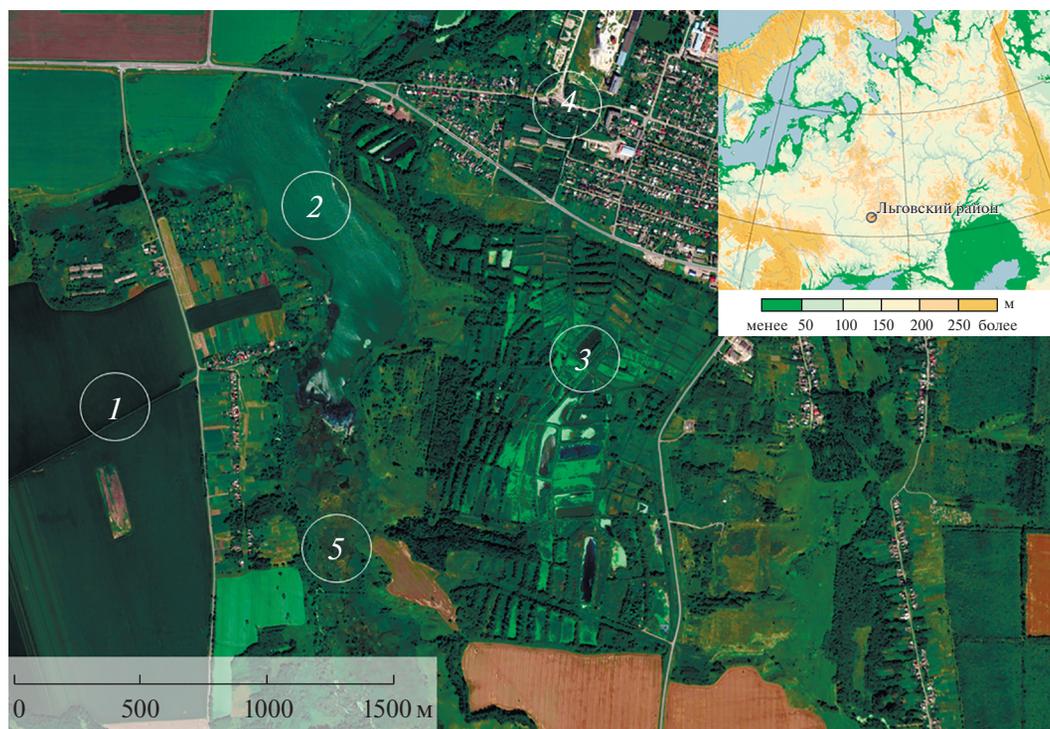


Рис. 1. Географическое положение изучаемого района (на врезке) и ключевые элементы местного ландшафта (Google Earth, снимок Landsat 31.08.2018): 1 – пашни, 2 – водохранилище, 3 – поля фильтрации сахарного завода в окрестностях г. Льгов, 4 – селитебная территория, 5 – широколиственный лес. Обводненные карты полей фильтрации – темно-синие и ярко-зеленые оттенки; дренированные карты, зарастающие растительностью – темно-зеленые оттенки.

этой сети действующего Льговского завода составляла в разные годы от 70 до 120 га, в настоящее время поля фильтрации всех форм использования занимают 175 га. Общее техногенное воздействие в данном случае определяется как токсичностью самих отходов, так и площадью отчуждаемых плодородных земель. Неиспользуемые поля фильтрации могут самовосстанавливаться, их также рекультивируют или вторично используют под огороды. При этом сама закрытая форма полей, периодическое обводнение и физико-химические особенности слагающих их почв формируют особые условия существования почвенной биоты [3]. Все это делает их специфическими объектами особого антропогенного ландшафта, который представляет интерес для изучения баланса парниковых газов.

Несмотря на высокую степень аграрной освоенности, на территории района сохранились природные экосистемы, такие как остаточные массивы широколиственных лесов (10%), пойменные и балочные участки лесостепей (14.7%), а также реки, озера и старицы (2%).

Такое разнообразие биотопов на территории Льговского района и одновременно типичность его территориальной структуры для Черноземья делают его привлекательным объектом моделирования.

МЕТОДЫ И ДОПУЩЕНИЯ

Методы восстановления баланса CO_2 включали полевые измерения его потоков, методы имитационного моделирования, расчеты по официальным данным административной статистики и метеоданным, а также сведения из научной литературы. Измерения потоков закрытым камерным методом были использованы для оценки валового дыхания почвы (сумма корневого и микробного дыхания почвы, включая почвенную подстилку) в лесах, на степных участках и залежах разного возраста, для оценки обмена на поверхности водных объектов и на поверхности льда и снега зимой, на поверхности свалок, компостных хранилищ, на пастбищах и сенокосах, а также на полях фильтрации сахарного завода. Измерения проводили во все сезоны года инфракрасными CO_2 -анализаторами по многолетней отработанной методике [21]. Использовали как затемненные, так и прозрачные камеры цилиндрической или кубической формы, разной площади (от 100 до 1600 cm^2) и объема (от 1 до 64 л), при разной экспозиции (от 1 до 60 мин), в зависимости от характера объектов и величины потоков. Дополнительно использовали автоматическую камеру (LiCor, Небраска, США) для детальных суточных оценок, а для водных объектов – специальные плавающие на поверхности

камеры (площадью 0.16 м²) при экспозициях от 10 до 30 мин. В качестве полевых анализаторов CO₂ применяли приборы на основе датчиков AZ (AZ Instruments, Тайвань, описание см. [21]; а также LiCor-8100A (Небраска, США).

Для полевого определения концентраций и потоков метана применяли лазерный газоанализатор Picarro G4301 (Калифорния, США). Для лабораторного анализа проб воздуха на содержание CO₂ и CH₄ при более длительной экспозиции в камерах использовали газовый хроматограф “Кристалл 5000.2” (ЗАО “Хроматэк”, г. Йошкар-Ола, Россия) с пламенно-ионизационным детектором. Нетто-баланс метана между почвой и атмосферой оценивали во всех упомянутых биотопах в тех же камерах, в которых оценивали почвенную эмиссию CO₂. Измерения метана также проводились во все сезоны года. Оценку почвенной эмиссии CO₂ и нетто-баланса CH₄ в исследуемых биотопах проводили на основе полевых измерений с интегрированием за год по методу трапеции.

Общий массив единичных полевых измерений, проводившихся в 2020–2022 гг., с учетом повторностей составил 5675 замеров потоков CO₂ и 338 замеров потоков CH₄. На хроматографе проанализированы 154 пробы воздуха на содержание обоих газов. При полевых измерениях газовых потоков дополнительно фиксировали атмосферное давление, температуру воздуха в камерах, объемную влажность и температуру почвы в слое 0–10 см. Расчет потоков проводили с помощью классического уравнения Клапейрона–Менделеева по разности концентраций газов, площади и объему измерительной системы, температуре воздуха и атмосферному давлению.

Измерения эмиссии CO₂ из почвы с помощью закрытых камер использовали при восстановлении годового нетто-баланса на залежах разного возраста, степных участках и полях фильтрации при наличии в последнем случае растительности. Для таких экосистем применяли балансовый метод оценки годового обмена углерода по разнице между чистой первичной продукцией и микробным дыханием, обычно применяемый при широких площадных оценках [24]. Чистую первичную продукцию разделяли для наземной и подземной частей оценивали по рекомендованным для степных экосистем регрессионным уравнениям для максимальных сезонных запасов живой и мертвой фитомассы [11]. Данные по запасам наземной и подземной фитомассы были получены ранее для всех стадий самовосстановления степных сообществ [21]. Дополнительно в 2020–2021 гг. провели аналогичные оценки на зарастающих участках полей фильтрации. Для расчета доли микробного дыхания в общем дыхании почвы применяли известный лабораторный метод субстрат-индуцированного дыхания, часто использу-

емый для травяных сообществ на черноземах [34]. При недостатке собственных данных использовали усредненное для луговых и травяных сообществ значение доли микробного дыхания в почве, равное 55% [24].

Имитационное моделирование использовали при восстановлении нетто-баланса CO₂ для различных видов сельскохозяйственных культур на пашнях района в 2020 г. Площади посевов по видам культур оценивали на основе данных статистики, полученных в администрации Льговского района. Для расчетов применяли широко известную модель DNDC [17, 25], ранее хорошо зарекомендовавшую себя при оценке нетто-баланса углерода основных культур, выращиваемых в черноземной зоне [32]. Для верификации модели использовали оригинальные данные по дыханию почвы под разными культурами. Заметим, что в модели DNDC затраты топлива при обработке полей не учитываются, и поэтому в настоящей обобщающей модели они входят в категорию общей эмиссии от техники и транспорта, работающего на ископаемом топливе.

Для оценки нетто-баланса CO₂ в лесах, защитных лесополосах и лесопарках применяли имитационную модель CBM-CFS3 [23], параметризованную в настоящем случае для лесостепной подзоны европейской территории России по данным лесоустройства Льговского района и местным климатическим условиям (рассчитано В.И. Грабовским). Эмиссию CO₂ в селитебных зонах оценивали по наиболее релевантным литературным данным, полученным для аналогичных урбанизированных территорий г. Курска [29], а также на основе собственных измерений в избранных поселениях.

Для площадных оценок использовали как космические снимки из открытых источников (Landsat, Google Earth), так и съемку с помощью БПЛА. Наличие компостных хранилищ, а также свалок определяли с помощью прямых учетов в населенных пунктах, а также с помощью космических снимков.

Помимо территориальных экосистем и выделов, обладающих определенной площадью (табл. 1), оценивали эмиссию CH₄ и CO₂ от животноводства, а также эмиссию CO₂ от сжигания топлива ТЭЦ, транспортом, сельхозтехникой и от дыхания людей.

Эмиссии CO₂ от местной промышленности, ТЭЦ, коммунальных служб, автомобильного и железнодорожного транспорта рассчитывали на основе данных Росстата (<https://rosstat.gov.ru/statistic>), статистических данных, полученных в районной администрации Льговского района, а также на основе рекомендованных пересчетных коэффициентов [7, 8]. Эмиссию CO₂ от сжигания топлива сельскохозяйственной техникой на по-

Таблица 1. Природные и антропогенные экосистемы, объекты и их площади, участвующие в расчетах общего углеродного бюджета Льговского района Курской области

Категория	Площадь, га	Доля от площади района, %
Селитебная территория и промышленные объекты	11179.2	10.8
Дороги	100.2	0.1
Реки	279.4	0.3
Озера, водохранилища, пруды, обводненные старицы	4620	4.5
Компостные ямы и отвалы, свалки	25	0.024
Пашни и огороды	51985	50.5
Сады, сенокосы, пастбища и многолетние культуры	8000	7.8
Многолетние залежи и лесостепи	2800	2.7
Заросшие балки и овраги	7000	6.8
Леса, лесозащитные полосы, парки	11400.1	11.1
Поймы водных объектов	5390	5.2
Поля фильтрации осушенные	135.1	0.13
Поля фильтрации обводненные	40	0.039
Район в целом	102954	100

лях рассчитывали на основе рекомендованных норм расхода топлива при различных операциях подготовки, ухода и сбора урожая для различных культур и рекомендованных коэффициентов для перевода расхода топлива в эмиссию [4, 8–10]. Оценку валового дыхания населения проводили на основе административных данных о численности жителей, исходя из усредненной оценки 1 кг CO₂ чел.⁻¹ сут⁻¹ [5].

Для оценки эмиссий CH₄ и CO₂ от животноводства применяли углеродный калькулятор Cool Farm Tool (<https://app.coolfarmtool.org/>).

Эмиссии с запечатанных территорий (здания, дороги с твердым покрытием) принимали равными нулю.

Для пересчета выбросов метана в CO₂-эквивалент применяли коэффициент 25, соответствующий 100-летнему потенциалу глобального потепления, на основе рекомендаций [36], хотя в последнее время этот показатель считается недооцененным и по обновленным оценкам составляет 28 [19]. Этот коэффициент отражает существенно большую поглощающую способность молекул метана в отношении инфракрасного излучения и большее время их жизни в атмосфере по сравнению с CO₂.

Необходимые для восстановления годового баланса CO₂ метеоданные получали по метеостанции г. Курска (ВНИИГМИ-МЦД <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8>). Базовым для комплексного моделирования послужил

2020 г., поскольку по нему было получено наибольшее количество данных по всем источникам.

Статистическую обработку данных проводили в пакете IBM SPSS Statistics v.27.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нетто-баланс CO₂ и его составляющие. Все выделенные в ходе расчетов экосистемы и компоненты общего бюджета CO₂ Льговского района, а также их площади (в случаях, когда это понятие применимо) приведены в табл. 1. На рис. 2 представлена рассчитанная по комплексной модели структура бюджета CO₂ рассматриваемого района. В его энергосистеме значительную часть потребностей в электроэнергии покрывает Курская атомная станция, что существенно сокращает углеродный след как отдельного жителя, так и промышленных производств. Еще одной причиной незначительного вклада промышленности является ликвидация и закрытие многих нерентабельных заводов и предприятий района за последний период. Поэтому среди нетто-источников CO₂ наибольшим по вкладу ожидаемо оказался транспорт на ископаемом топливе, включая работу сельхозтехники на полях, что определяет 22.3% общего бюджета этого газа. Селитебные территории оказались на втором месте среди источников (9.9%). Вклад наименее значительных по площади нетто-источников CO₂, к которым относятся открытые компостные хранилища (4.1% общего бюд-

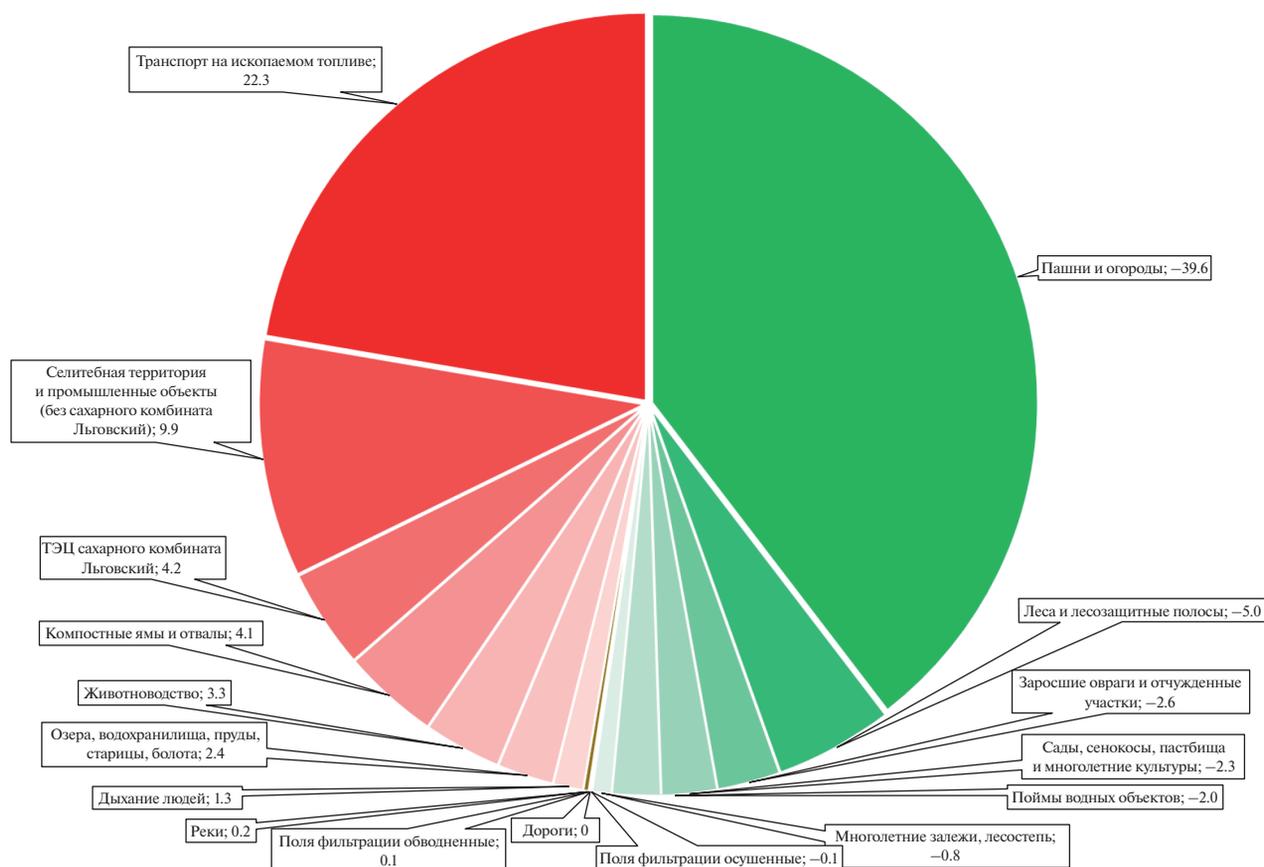


Рис. 2. Структура годового бюджета CO₂ на территории Льговского района в 2020 г. Общий баланс составляет -6.4 г С (CO₂) м⁻² год⁻¹. Зелеными оттенками обозначены стоки CO₂ из атмосферы, красным – источники. Плотность цвета и размер сектора отражают степень вклада данной категории (экосистемы или объекта) в общий бюджет. Отрицательные величины обозначают сток углерода из атмосферы, положительные – источник в атмосферу.

жета), тем не менее разделил третью позицию с общими выбросами ТЭЦ сахарного комбината (4.2%), что связано с обнаруженными здесь наиболее высокими удельными потоками CO₂ среди всех рассмотренных объектов и биотопов.

Среди нетто-стоков CO₂ на территории района решающий вклад в общий бюджет углерода вносят пашни (39.6%, без учета отчуждения урожая). Естественные лесные и травяные экосистемы, хотя и являются нетто-стоками углерода, благодаря своим сравнительно небольшим площадям, демонстрируют незначительное участие (5 и 2% соответственно). В целом, нетто-баланс CO₂ на территории моделируемого района с учетом всех антропогенных и природных источников представляет собой слабый сток из атмосферы: -6.4 г С м⁻² год⁻¹, что следует рассматривать, как состояние баланса, близкое к нейтральному.

Если сравнить суммарные вклады антропогенных и природных составляющих баланса CO₂ на территории Льговского района, то преобладаю-

щими оказываются антропогенные (89.4%), среди которых доминируют пашни. Причем, если в большинстве случаев антропогенные слагаемые являются нетто-источниками CO₂, а природные – нетто-стоками, то пашни представляют исключение из этого правила. Это соответствует территориальной представленности антропогенных экосистем (85%), по сравнению с природными. В целом для различных слагаемых баланса CO₂ характерна высокая положительная корреляция между их площадью и степенью участия в общем балансе (рис. 3а). Такой результат говорит о том, что различие в их вкладах больше определяется занимаемой площадью, чем мощностью удельных потоков.

Нетто-баланс CH₄ и его составляющие. В отличие от результатов, полученных при расчетах бюджета CO₂, все оценки потоков метана основывались на данных собственных полевых измерений в течение года или выполнялись с помощью С-калькуляторов, применяемых для животноводства. Как видно на рис. 3б, при сравнении

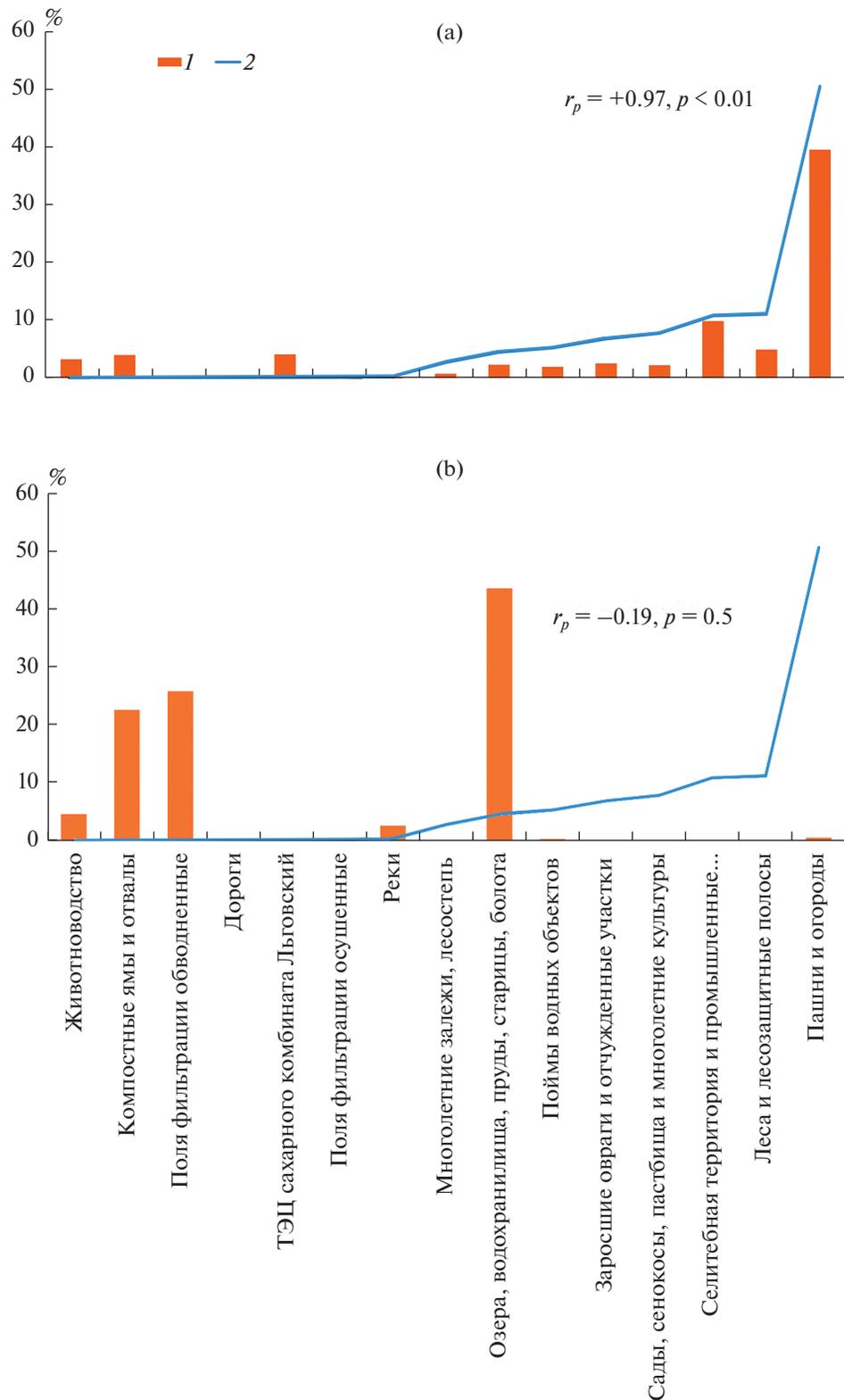


Рис. 3. Связь между долевым участием различных категорий территориальных выделов и объектов в нетто-балансе (1) CO₂ (a) и нетто-балансе CH₄ (b) по сравнению с их площадной представленностью (2) в Львовском районе. Выделы ранжированы по возрастанию площади. r_p – коэффициент корреляции Пирсона.

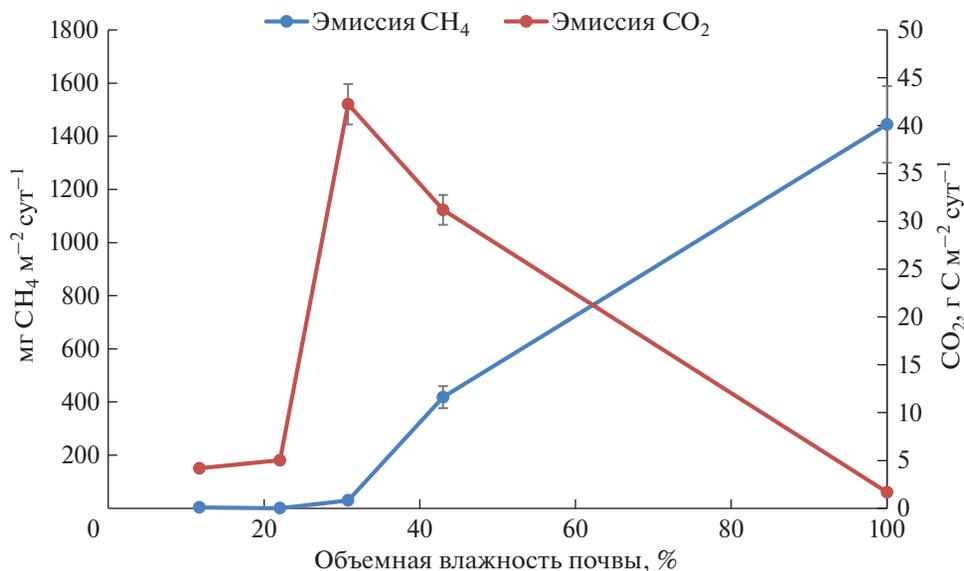


Рис. 4. Зависимость эмиссии CO₂ и CH₄ от объемной влажности почвы в слое 0–8 см (поля фильтрации сахарного завода г. Льгов, Курская область, 2019–2020 гг.). Приведены средние величины эмиссии газов за бесснежный сезон и их стандартные ошибки.

вкладов различных слагаемых бюджета CH₄ существенным отличием от бюджета CO₂ является отсутствие корреляционной связи между относительными площадями выделенных источников и степенью их участия в балансе CH₄ ($r_p = -0.19, p = 0.5$). Из этого следует, что для общего бюджета этого газа важнее удельная мощность конкретных источников, а не их площадь. Например, самые значительные по площади биотопы, такие как пашни, не являются сколько-нибудь значимыми составляющими общего баланса CH₄ за год, поскольку удельные величины потоков этого газа здесь крайне малы. Кроме того, на преимущественно автоморфных почвах пашен летние и зимние потоки метана обычно направлены противоположно. Так, по нашим данным, за вегетационный сезон пашни в среднем поглощают -0.0008 г CH₄ м⁻² сут⁻¹, а в зимний период они служат нетто-источниками $+0.0012$ г CH₄ м⁻² сут⁻¹, что делает их годовой баланс близким к нулевому.

И наоборот, наиболее мощными среди выделенных источников метана являются точечные, т.е. небольшие по площади объекты. Например, это обводненные поля фильтрации и открытые компостные хранилища. Максимальные зафиксированные величины эмиссии CH₄ составляют в этих биотопах $+44.9$ и $+62.8$ г CH₄ м⁻² сут⁻¹ соответственно, что на несколько порядков превышает ландшафтный фон. На полях фильтрации главным фактором баланса ПГ является не стадия их самозаращения или температура почвы, а ее влажность. Максимум эмиссии CO₂ отмечается при объемной влажности около 30%, что связано

с общей реакцией аэробных бактерий, тогда как с превышением этого же уровня влажности эмиссия CH₄, производимого анаэробными археями, начинает линейно расти, достигая максимума на открытой поверхности непроточных водоемов, а среди них — на обводненных картах полей фильтрации (рис. 4). Тем не менее лидером по относительному вкладу среди различных категорий источников метана являются водохранилища и пруды, что связано с их существенно большей площадью при высоких показателях удельной эмиссии (максимум в летний период: $+0.5$ г CH₄ м⁻² сут⁻¹).

Среди составляющих территориального баланса CH₄ по вкладу в его бюджет резко преобладают антропогенные биотопы и объекты по сравнению с природными ($97 > 3\%$), что существенно превосходит аналогичное соотношение для CO₂, полученное выше.

Общий нетто-баланс С-содержащих парниковых газов. Согласно проведенным расчетам по обобщенной территориальной модели, вся площадь района в настоящее время представляет собой слабый сток CO₂, равный -6.4 г С–CO₂ м⁻² год⁻¹ (рис. 2). Однако в этом случае не учитывается влияние CH₄ — второго по значимости газа для современных изменений климата. Для оценки общего влияния двух рассматриваемых газов величины потоков метана должны быть переведены в CO₂-эквивалент. После пересчета можно оценить общий нетто-баланс двух основных биогенных С-содержащих ПГ для рассматриваемой территории. CO₂-составляющая общего бюджета района оказалась пренебрежимо малой (-6.4 г С–CO₂ м⁻² год⁻¹) по срав-

нению с годовой эмиссией CH_4 , выраженной в CO_2 -эквиваленте ($+95 \text{ г С} - \text{CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$). В результате общий бюджет ПГ на территории района в 2020 г. был источником для атмосферы величиной $+88.6 \text{ г С} - \text{CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего следует рассмотреть концептуальный вопрос, крайне важный при оценках CO_2 -баланса однолетних культур. Он касается вклада в рассчитываемый баланс изъятия продукции. Если рассматривать участок агроландшафта с культурой с точки зрения газообмена на верхней границе растительности, то данные, полученные с помощью наблюдений методом турбулентных пульсаций, в норме демонстрируют значительный сток углерода за год. Например, для озимой пшеницы он составляет $-270 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [30], что существенно больше, чем в климаксных широколиственных лесах на рассматриваемой территории ($-70 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, по оценке с помощью модели CBM-CFS3). Ежегодное изъятие надземной фитомассы с урожаем является почти невозполнимой потерей для такой агроэкосистемы, поскольку углерод может возвращаться только при самовосстановлении на залежах или с органическими удобрениями. Но на это требуется гораздо больше времени, чем год, кроме того, залежи в настоящей территориальной модели учитываются отдельно, а органические удобрения на черноземах, как правило, не вносятся. Помимо этого, почти весь урожай идет на экспорт за пределы рассматриваемого района.

Если следовать руководящим принципам Межправительственной группы экспертов по изменению климата [18], итоговый баланс на данной территории, т.е. поток углерода в атмосферу или из нее, должен быть равен изменениям в основных резервуарах углерода. В нашем случае можно ориентироваться на запасы углерода в почвах пашен: если они снижаются, то следует говорить об С-источнике, и наоборот. Расчеты с помощью имитационных моделей RothC и DNDC, примененные для пахотных земель Курской области, подтверждают, что за период 1990–2018 гг. они теряли углерод [33], что говорит о наличии здесь С-источника. Поэтому с концептуальной точки зрения правильнее вычитать из общего баланса массу углерода, накопленного в изымаемой части продукции сельскохозяйственных культур. Учет этого изъятия в приведенной в качестве примера работе по озимой пшенице дает в итоге нетто-источник $201\text{--}246 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ [30], т.е. это меняет знак углеродного баланса на противоположный по отношению к атмосфере, при близкой абсолютной величине потоков углерода.

То, что вся площадь района в настоящее время представляет собой слабый сток CO_2 , равный $-6.4 \text{ г С} - \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, с динамической точки зрения следует расценивать как нейтральный углеродный баланс, поскольку, как показывают расчеты по настоящей территориальной модели, даже небольшие наблюдаемые межгодовые изменения погодных условий могут приводить к колебаниям С-баланса около равновесного положения. Для сравнения, по нашим оценкам, лесные и степные экосистемы на той же территории функционируют как нетто-стоки в пределах $70\text{--}150 \text{ г С} - \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Однако, если учесть отчуждение урожая, то благодаря преобладающей площади пашен в итоге получим, что район представляет собой заметный источник CO_2 для атмосферы ($+99.7 \text{ г С} - \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$).

Таким образом, именно способ учета CO_2 -баланса активных пашен в изучаемом ландшафте определяет баланс CO_2 в масштабе рассматриваемого административного района. Сама по себе замена естественных местных сообществ на агроэкосистемы приводит в Черноземной зоне к усилению нетто-стока углерода, что обязано более высокой первичной продуктивности сельскохозяйственных культур, однако ежегодное изъятие их урожая меняет эту картину на противоположную.

Важным результатом, полученным в работе, следует считать определяющую роль локальных источников метана, в частности, обводненных карт полей фильтрации сахарного завода. Можно утверждать, что это новый местный источник ПГ, значение которого для С-баланса ранее не было отмечено в литературе. Максимальные зафиксированные величины эмиссии CH_4 составляют здесь в летний период $+44.9 \text{ г С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, что по абсолютной величине даже превышает любые известные в этом ландшафте стационарные источники CO_2 , и на пять порядков превышают фоновые ландшафтные величины потоков на черноземах [16]. Такие мощные потоки, вероятно связаны с благоприятным условиям развития архей-метаногенов: водной среде, непроточной аккумуляции биогенных веществ, поступающих со сточными водами и дефекатом, а также более высоким температурам почвы в осенне-зимний период (на 2°C), по сравнению с зональными почвами. Содержание органического вещества и отдельных биогенов здесь также высокое ($\text{C} = 2.42\text{--}3.57\%$; $\text{C/N} = 10$).

Эти объекты при незначительной в масштабах района площади (40 га, или 0.04%) хотя и не являются наибольшими источниками CH_4 в пересчете на единицу площади, тем не менее оказываются достаточно мощными, чтобы изменить баланс С-содержащих ПГ в масштабах административ-

ного района. Этот результат указывает на простой и быстрый практический способ приближения хозяйства района к состоянию углеродной нейтральности, для чего достаточно осушить обводненные карты, поскольку главным фактором эмиссии CH_4 на полях фильтрации является ее влажность (рис. 4).

Среди наиболее существенных по территориальному вкладу местных источников CH_4 также выделяются открытые компостные хранилища (22.5% от общей эмиссии), широко распространенные в аграрных хозяйствах. Несмотря на то, что по сравнению с обводненными полями фильтрации эти объекты на территории района занимают еще меньшую площадь (0.024%), их высокий относительный вклад обеспечивается наибольшей среди всех исследованных местных объектов и экосистем удельной эмиссией метана ($+62.8 \text{ г } \text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$). В качестве меры, снижающей эту эмиссию при хранении, можно рекомендовать уменьшение мощности насыпного слоя и сокращение сроков самого хранения. Как показывают прямые измерения газообмена на поверхности таких хранилищ, уменьшение слоя с 2 до 0.3 м сокращает эмиссию в 2–3 раза. При этом зимнее хранение компоста существенно увеличивает величину годовой эмиссии, поскольку в его мощном слое под снегом продолжают сохраняться оптимальные для метаногенов температура и влажность.

Однако наиболее значимым среди источников CH_4 на территории района является поверхность лентических (нетекучих) водных объектов (43.5% от всей эмиссии), среди которых преобладают водохранилища, а также старицы и пожарные пруды. Очевидно, что этот источник не может столь же просто регулироваться человеком. Хотя эмиссия метана с поверхности водохранилищ в Черноземной зоне оценивалась и ранее [2], территориальный вклад в С-баланс в масштабе района ранее не рассчитывался, и такой результат следует отнести к неожиданным. Для сравнения, по данным, полученным на черноземах Ростовской области [1], поток метана для рек и озер в летний период в среднем составляет от 11.4 до 127.5 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Наши аналогичные данные позволяют говорить о максимальных (летних) значениях, равных 400–500 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, что соответствует результатам, как для южно-таежных озер и прудов в Западной Сибири, где медианное значение для лета составляло 570 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ [28], так и максимальным значениям эмиссии для рек этого региона (230–560 мг $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) при затоплении ими пойм [35]. Кроме того, использовали полевые данные за все сезоны года, включая зимние и весенние измерения, что позволило уточнить годовые оценки, которые оказались су-

щественно выше, чем можно было предполагать: около 60 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, тогда как усредненные для Курской области аналитические оценки не превышают 25 г $\text{CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ (расчет выполнен по данным [2]). Сами авторы этого обобщения для водохранилищ России отмечают острую нехватку полевых измерений, что снижает доверие к подобным результатам. Кроме того, полученное различие может быть связано с прогрессирующим потеплением климата в этой зоне [33], а также с особенностями местных объектов.

Общий баланс двух С-содержащих парниковых газов исследуемого района говорит о том, что он является нетто-источником величиной $+88.6 \text{ г } \text{C}-\text{CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что более чем наполовину определяется антропогенными составляющими. В частности, основной нетто-сток зависит от широко распространенных здесь пашен, а главными нетто-источниками являются обводненные поля фильтрации, компостные отвалы, водохранилища, а также сельскохозяйственная техника и транспорт на ископаемом топливе. В действительности даже экосистемы, которые условно считаются природными, по сути являются природно-антропогенными, поскольку находятся под непосредственным и сильным местным влиянием человека. Это касается, например, остаточных лесостепных участков, исторически представляющих собой залежи разного возраста на малопригодных для распашки участках, которые активно используются для выпаса скота и сенокосения, а пруды, озера и леса получают регулярную вещество-энергетическую дотацию в результате водно-воздушной эрозии с пашен, расположенных на положительных элементах рельефа.

Несмотря на большое количество публикаций на эту тему, провести адекватное сравнение с аналогичными территориальными оценками С-бюджета очень сложно, поскольку все объекты, даже в аграрно-освоенной зоне, существенно отличаются друг от друга как по территориальной структуре, так и по методам расчета. В настоящем случае рассматривается стабильный территориальный объект, мало меняющий свою структуру во времени, что определяется его географическим положением на плодородных черноземах и связанной с этим долговременной аграрной специализацией. Среди потенциальных независимых факторов, способных изменить сложившийся местный углеродный баланс, можно выделить только изменения климата, ежегодно меняющийся состав культур, долю парующих и залежных земель, развитие животноводства и другие источники CH_4 . Все эти факторы имеют разные характерные времена воздействия, но только регулирование через источники CH_4 способно быстро изменить ситуацию.

Тем не менее можно оценить, насколько существенной является полученная величина итогового источника в CO_2 -экв. ($+88.6 \text{ г С-CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$): во-первых, по сравнению с местными природно-антропогенными ландшафтами, способными к поглощению CO_2 , а во-вторых, с оценками нетто-баланса обоих газов для России в целом. Местные экосистемы, обладающие широким распространением в Курской области и выступающие нетто-стоком CO_2 (по усредненным оценкам, широколиственные леса -70 , степи -150 , пашни $-300 \text{ г С-CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$), сравнимы с полученным источником по удельному показателю. Во-втором случае, среди немногочисленных обобщающих оценок общего С-баланса по двум газам на территории России, наиболее достоверными являются расчеты работы [14], которые включают все основные природные и антропогенные компоненты. Так, по оценке авторов, максимальное значение национального стока углерода равно $-166.4 \text{ Тг С-CO}_2 \text{ экв. год}^{-1}$ или $-9.7 \text{ г С-CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Таким образом, полученная нами величина баланса ПГ значительна, и Льговский район может быть охарактеризован как сильный источник климатически активных газов для атмосферы.

Как уже отмечалось в методической части работы, большая часть информации, послужившей основой расчетов годового бюджета двух ПГ, была получена для 2020 г., поэтому и метеоданные, использованные в расчетных моделях, относятся к этому году. Возникает закономерный вопрос – каковы погодные особенности этого года по сравнению с многолетними данными? Иными словами, насколько типичным может считаться полученный результат для текущей климатической ситуации. Как показал анализ, 2020 г. оказался теплее и суше текущей средней многолетней нормы (1990–2019 гг.) для Курской области. Среднегодовая температура воздуха значимо превышала средние значения: 9.0°C по сравнению с нормой $7.1 \pm 0.9^\circ\text{C}$, а наибольший ее рост отмечался в январе–марте и сентябре–октябре. Сумма осадков была ниже: 531 мм по сравнению с нормой $637 \pm 104 \text{ мм}$, прежде всего, за счет недостаточного количества осадков в весенний (март–апрель) и осенний (август–октябрь) периоды. Таким образом, полученную оценку территориального бюджета углерода можно считать соответствующей условиям общего регионального тренда на потепление климата за последние 30 лет [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный комплексный мультимодельный подход к решению задачи восстановления современного баланса С-содержащих парниковых газов для отдельного административного района Черноземной зоны продемонстрировал свою эффектив-

ность. Полученные расчетные матрицы позволяют использовать исследованный район в качестве объекта долговременного мониторинга, для апробирования различных вариантов землепользования и оценки влияния изменений окружающей среды в рассматриваемом масштабе, что облегчает принятие административных решений в рамках адаптации к изменениям климата и поиску способов усиления стоков и сокращению источников климатически активных газов.

При расчетах нетто-баланса CO_2 для аграрно-освоенного района с преобладанием пахотных земель, наиболее важным оказывается решение об учете отчужденной фитомассы. Вычитание отчужденной основной и побочной продукции из общего баланса с высокой вероятностью ведет к переводу всей территории в источник CO_2 для атмосферы, тогда как ее оставление в составе валовой первичной продукции способствует оценке территории как нейтральной по балансу CO_2 или как его слабого стока.

Несмотря на слабую территориальную представленность источников CH_4 , нетто-баланс этого газа на территории исследуемого административного района оказался существенно более важным для формирования углеродного бюджета, чем баланс CO_2 . Согласно расчетам в настоящее время, Льговский район является нетто-источником ПГ, объединенный углеродный бюджет которого составляет $+88.6 \text{ г С-CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Более трети совокупной эмиссии ПГ ($+24.4 \text{ г С-CO}_2 \text{ экв. м}^{-2} \text{ год}^{-1}$) приходится на обводненные поля фильтрации сахарного завода, хотя их площадная представленность не превышает 0.04% . С одной стороны, это подтверждает необходимость учета точечных, но мощных источников метана, а с другой – подталкивает оптимальный подход к снижению интенсивности эмиссии ПГ путем осушения полей фильтрации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы крайне признательны всем, кто внес свой вклад в эту работу. Особую благодарность выражаем сотруднику ЦЭПЛ РАН, к. б. н. В.И. Грабовскому за помощь в расчетах с помощью модели CBM-CFS3.

Хроматографический анализ выполняли по госзаданию FMGE-2019-0006 (Институт географии РАН).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ, в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2022 г. № 25-15р.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Круткиер М.Л., Калманович И.В.* Оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. 2015. № 3. С. 83–89.
2. *Гречушников М.Г., Школьный Д.И.* Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России. 2019. № 2. С. 58–71.
3. *Замотаев И.В., Грачева Р.Г., Михеев П.В., Конопляникова Ю.В.* Формирование и трансформация почв в районах размещения отходов сахарной индустрии (обзор) // Почвоведение. 2022. № 8. С. 949–961. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22080159>
4. *Колета К.В., Дудук А.А., Брукиш Д.А., Бояр Д.М., Витковский Г.В., Емельянова В.Н., Золотарь А.К.* Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации. Гродно: ГГАУ, 2010. 340 с.
5. *Копьев С.Ф., Качанов Н.Ф.* Основы теплогазоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1964. 228 с.
6. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева 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.
7. Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации, утвержденные приказом Минприроды России от 30.06.2015. № 300. <https://docs.cntd.ru/document/420287801> (дата обращения 11.01.2023 г.).
8. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) “О введении в действие методических рекомендаций “Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте”. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_76009/(дата обращения 11.01.2023 г.).
9. Типовые нормы выработки и расхода топлива на сельскохозяйственные механизированные работы. Ч. I. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103596/ (дата обращения 11.01.2023 г.).
10. Типовые нормы выработки и расхода топлива на сельскохозяйственные механизированные работы. Ч. II. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_136074/ (дата обращения 11.01.2023 г.).
11. *Тутлянова А.А., Шибарева С.В.* Продуктивность травяных экосистем: справочник. М.: Изд-во МБА, 2020. 100 с.
12. *Aragão L., Poulter B., Barlow J.B., Anderson L.O., Malhi Y., Saatchi S., Phillips O.L., Gloor E.* Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests // Biological Reviews. 2014. V. 89. P. 913–931. <https://doi.org/10.1111/brv.12088>
13. *Bezyk Y., Sówka I., Górka M.* Assessment of urban CO₂ budget: anthropogenic and biogenic inputs // Urban Climate. 2021. V. 39. P. 100949. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100949>
14. *Dolman J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchepakova N., Chen T., van der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D.* An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 5323–5340. <https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>
15. *Friedlingstein P., Jones M.W., O’Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quéré C. et al.* Global Carbon Budget 2021 // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 1917–2005. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
16. *Gar’kusha D.N., Fedorov Y.A., Tambieva N.S.* Emission of methane from the soils of Rostov oblast // Arid Ecosystems. 2011. V. 1. P. 223–229. <https://doi.org/10.1134/S2079096111040056>
17. *Gilhespy S.L., Anthony S., Cardenas L., Chadwick D., del Prado A., Li C., Misselbrook T., Rees R.M. et al.* First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution // Ecological modelling. 2014. V. 292. P. 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004>
18. IPCC 2006: Annex 2. Summary of equations. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme / Eds. Eggleston H.S. et al. Japan: IGES, 2006. 34 p.
19. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Pachauri R.K., Meyer L.A. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
20. *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. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2020.e00290>
21. *Karelin D.V., Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Lunin V.N., Kudikov A.V.* Changes in the carbon dioxide emission from soils in the course of postagrogenic succession in the chernozems forest-steppe // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. P. 1229–1241. <https://doi.org/10.1134/S1064229315110095>
22. *Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Yu., Kumanyaev A.S., Lopes de Gerenyu V.O., Tel’nova N.O., Ginarskiy M.L.* The effect of tree mortality on CO₂ flux-

- es 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>
23. Kull S., Kurz W.A., Rampley G., Banfield G.E., Schivatcheva R.K., Apps M.J. Operational-scale Carbon Budget Model of The Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) Version 1.0: User's Guide. Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2007. 319 p.
 24. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Kudryarov V.N., Zhiengaliyev A.T. Carbon budgets in the steppe ecosystems of Russia // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 485. P. 450–452.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19040238>
 25. Li C., Frohking S., Frohking T.A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. D9. P. 9759–9776.
 26. Lloyd J., Kolle O., Fritsch H., de Freitas S.R., Silva Dias M.A.F., Artaxo P., Nobre A.D. et al. An airborne regional carbon balance for Central Amazonia // *Bio-geosciences*. 2007. V. 4. P. 759–768.
<https://doi.org/10.5194/bg-4-759-2007>
 27. Luyssaert S., Inglima I., Jung M., Richardson A.D., Reichstein M., Papale D., Piao S.L. et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 2509–2537.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x>
 28. Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. Methane emission from bog complexes of the west Siberian taiga // *Eurasian Soil Science*. 2013. V. 46. P. 1182–1193.
<https://doi.org/10.1134/S1064229314010098>
 29. Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Vasenev I.I., Somikov Y.L., Ryzhkov O.V., Morin T. Carbon stocks and CO₂ emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia // *Catena*. 2017. V. 158. P. 131–140.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.021>
 30. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.012>
 31. Schulze E.D., Ciais P., Luyssaert S., Schrumpf M., Janssens I.A., Thiruchittampalam B., Theloke J., Saurat M. et al. The European carbon balance. Part 4: Integration of carbon and other trace-gas fluxes // *Global Change Biology*. 2010. V. 16(5). P. 1451–1469.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02215.x>
 32. Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Application of the Denitrification-Decomposition (DNDC) model to retrospective analysis of the carbon cycle components in agrolandscapes of the central forest zone of European Russia // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. V. 12. P. 213–226.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-85>
 33. Sukhoveeva O.E., Zolotukhin A.N., Karelin D.V. Climate-determined changes of organic carbon stocks in the arable chernozem of Kursk region // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. P. 148–155.
<https://doi.org/10.1134/S2079096120020122>
 34. Sushko S.V., Ananyeva N.D., Ivashchenko K.V., Kudryarov V.N. Soil CO₂ emission, microbial biomass, and basal respiration of chernozems under different land uses // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. P. 1091–1100.
<https://doi.org/10.1134/S1064229319090096>
 35. Terentjeva I.E., Sabrekov A.F., Ilyasov D., Ebrahimi A., Glagolev M.V., Maksyutov S. Highly dynamic methane emission from the west Siberian boreal floodplains // *Wetlands*. 2019. V. 39. P. 217–226.
<https://doi.org/10.1007/s13157-018-1088-4>
 36. Wright L.A., Kemp S., Williams I. 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition // *Carbon Management*. 2011. V. 2. P. 61–72.
<https://doi.org/10.4155/cmt.10.39>
 37. Zhang H., Wang L. Species diversity and carbon sequestration oxygen release capacity of dominant communities in the Hancang river basin, China // *Sustainability*. 2022. V. 14. P. 5405.
<https://doi.org/10.3390/su14095405>

Annual Carbon Budget of Biogenic Greenhouse Gases under Mixed Land Use: Lgov District as a Model Object of the Central Chernozem Zone, Russia

D. V. Karelin^{1, *}, O. E. Sukhoveeva¹, M. V. Glagolev², A. S. Dobryanskiy¹,
 A. F. Sabrekov³, and I. V. Zamotaev¹

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

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*Ugra State University, Khanty-Mansiysk, 628012 Russia*

*e-mail: dkarelin7@gmail.com

A comprehensive study of the net carbon balance of Lgov administrative district (Kursk oblast) in the Chernozem zone of the European part of Russia is carried out. The data sources included field estimates of carbon dioxide and methane exchange between soil and atmosphere, above- and below-ground phytomass stocks, simulation models parameterized on these data, official statistical and meteorological information, and published scientific data. Watered filtration fields of waste disposal sites of sugar industry are responsible for 26% of CH₄ emissions from the territory of the district, although they occupy only 0.04% of its area. The maxi-

mum of CO₂ emission is found at volumetric soil moisture of 30%, whereas, with exceeding this value, methane emission begins to rise linearly, reaching a maximum on the open surface of water reservoirs, and among them – on watered filtration fields. Another significant local source of methane is compost storages (22%). However, water reservoirs and ponds are the largest source of CH₄ (43%). Amongst the net sources of CO₂ the combustion of fossil fuels by transport and agriculture machinery predominates (22.3%). In contrast to methane, which emission is mainly determined by powerful point sources, the input of net fluxes of CO₂ positively correlates with their area. Currently observed low rate net CO₂ flux in the district area (–6.4 g C m^{–2} per year), is decisively overlapped by local methane sources (+95 g C (CO₂-eq.) m^{–2} per year). The influence of the types of land use and methods of calculation on the C-balance of the territory in study, and a way of its transformation into a carbon-neutral state are discussed.

Keywords: Haplic Chernozem, methane, carbon dioxide, GHGs balance