

ISSN 2587-5566

Том 87, Номер 4

Июль - Август 2023

ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 87, номер 4, 2023

Специальный выпуск: Роль природных и антропогенных экосистем в реализации стратегии низкоуглеродного развития РФ и декарбонизации экономики страны

Выпускающие редакторы: Е. А. Шварц, А. А. Романовская

От редакторов выпуска 461

ПРИРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДНОМ РАЗВИТИИ РОССИИ

- Подходы к реализации экосистемных климатических проектов в России
А. А. Романовская 463
- Декарбонизация с помощью природных решений: национальная политика и международная практика
А. В. Птичников, Е. А. Шварц 479

ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

- Сравнительный анализ и оценка методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации
Д. Д. Сорокина, А. В. Птичников, А. А. Романовская 497
- Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux
О. А. Куричева, В. К. Авилов, А. В. Варлагин, М. Л. Гитарский, А. А. Дмитриченко, Е. А. Дюкарев, С. В. Загирова, Д. Г. Замолотчиков, В. И. Зырянов, Д. В. Карелин, С. В. Карсанаев, И. Н. Курганова, Е. Д. Лапина, А. П. Максимов, Т. Х. Максимов, В. В. Мамкин, А. С. Марунич, М. Н. Мигловец, О. А. Михайлов, А. В. Панов, А. С. Прокушкин, Н. В. Сиденко, А. В. Шилкин, Ю. А. Курбатова 512
- Роль старовозрастных лесов в аккумуляции и хранении углерода
Н. В. Лукина, С. А. Барталев, А. П. Гераськина, А. С. Плотникова, А. В. Горнов, Д. В. Ершов, Е. А. Гаврилюк, А. И. Кузнецова, Н. Е. Шевченко, Е. В. Тихонова, М. А. Данилова, Д. Н. Тебенькова, В. Э. Смирнов, Е. В. Ручинская 536
- Сценарный подход к адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата
А. В. Константинов 558

ЗЕМЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Оценка содержания углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России для климатических проектов
В. С. Столбовой, П. П. Филь 568
- Прогноз динамики запасов углерода в почвах возделываемых земель Европейской России в контексте стратегии низкоуглеродного развития
В. А. Романенков, Ю. Л. Мешалкина, А. Ю. Горбачева, В. А. Добровольская, А. Н. Кренке 584

ОСУШЕННЫЕ ТОРФЯНИКИ

- Вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников и сокращение выбросов парниковых газов
А. А. Сирин, М. А. Медведева, В. Ю. Иткин 597

ЭКОНОМИКА И РЫНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ

- Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха
Н. К. Куричев, А. В. Птичников, Е. А. Шварц, А. Н. Кренке 619
- Экономические и природные факторы пространственной неоднородности выбросов углерода в лесах России в 2010-х годах
А. И. Пыжжев 637

Contents

Volume 87, No. 4, 2023

Special Issue: Role of natural and anthropogenic ecosystems in the implementation of Russia's low-carbon development strategy and decarbonization of the country's economy

Guest Editors: E. A. Shvarts and A. A. Romanovskaya

Editors' Foreword 461

Nature-Based Solutions in Low-Carbon Development of Russia

Approaches to Implementing Ecosystem Climate Projects in Russia
A. A. Romanovskaya 463

Decarbonization through Nature's Solutions: National Policy and International Practice
A. V. Ptichnikov and E. A. Shvarts 479

Forest Ecosystems

Comparative Analysis and Assessment of Methodologies Applied in the Russian Federation for Calculating Greenhouse Gas Absorption by Forest Ecosystems
D. D. Sorokina, A. V. Ptichnikov, and A. A. Romanovskaya 497

RuFlux: The Network of the Eddy Covariance Sites in Russia
O. A. Kuricheva, V. K. Avilov, A. V. Varlagin, M. L. Gitarskiy, A. A. Dmitrichenko, E. A. Dyukarev, S. V. Zagirova, D. G. Zamolodchikov, V. I. Zyryanov, D. V. Karelin, S. V. Karsanaev, I. N. Kurganova, E. D. Lapshina, A. P. Maksimov, T. Ch. Maximov, V. V. Mamkin, A. S. Marunich, M. N. Miglovets, O. A. Mikhailov, A. V. Panov, A. S. Prokushkin, N. V. Sidenko, A. V. Shilkin, and Yu. A. Kurbatova 512

Role of Old-Growth Forests in Carbon Accumulation and Storage
N. V. Lukina, S. A. Bartalev, A. P. Geraskina, A. S. Plotnikova, A. V. Gornov, D. V. Ershov, E. A. Gavriluk, A. I. Kuznetsova, N. E. Shevchenko, E. V. Tikhonova, M. A. Danilova, D. N. Tebenkova, V. E. Smirnov, and E. V. Ruchinskaya 536

Scenario Approach to Adaptation of Forest Ecosystems in the Russian Federation under Climate Change
A. V. Konstantinov 558

Croplands

Assessment of the Carbon Content in Agricultural Soils of the European Russia for Climate Projects
V. S. Stolbovoy and P. P. Fil 568

Forecasting the Carbon Stock Dynamics in the Soils of Cultivated Croplands in European Russia in the Context of the Low-Carbon Development
V. A. Romanenkov, Yu. L. Meshalkina, A. Yu. Gorbacheva, V. A. Dobrovolskaya, and A. N. Krenke 584

Drained Peatlands

Rewetting of Disused Drained Peatlands and Reduction of Greenhouse Gas Emissions
A. A. Sirin, M. A. Medvedeva, and V. Yu. Itkin 597

Economy and Markets of Natural-Based Solutions

Nature-Based Offsets in Russia: Key Challenges and Conditions for Success
N. K. Kurichev, A. V. Ptichnikov, E. A. Shvarts, and A. N. Krenke 619

Economic and Natural Factors of Spatial Heterogeneity of Forest Carbon Emissions in Russia in the 2010s
A. I. Pyzhev 637

ОТ РЕДАКТОРОВ ВЫПУСКА

DOI: 10.31857/S2587556623040076, EDN: CEIODO

Editors' Foreword

25 ноября 2020 г. Россия заявила о своем первом “Определяемом на национальном уровне вкладе” (ОНУВ) – плане действий по сокращению выбросов и адаптации к изменению климата в рамках реализации Парижского соглашения. Каждая сторона Парижского соглашения должна разработать ОНУВ и обновлять его каждые пять лет. ОНУВ Российской Федерации предусматривает сокращение выбросов парниковых газов к 2030 г. до 70% по сравнению с уровнем 1990 г., с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития страны.

Заявление Президента России В. Путина в ходе пленарного заседания Российской энергетической недели 13 октября 2021 г., что Россия будет добиваться достижения углеродной нейтральности не позднее 2060 года и последовавшее принятие “Стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года”¹ (СНУР) сформировали актуальный запрос к российскому научному и экспертному сообществу по объективной научной оценке выбросов и поглощения природными и антропогенными экосистемами парниковых газов (в первую очередь – углекислого газа и, в меньшей степени, метана) на территории страны.

Подготовленный в феврале 2022 г. и достаточно широко обсуждавшийся проект Операционного плана реализации СНУР (ОП СНУР) делает ключевую ставку на повышение поглощения лесами в процессе декарбонизации страны. Однако, обеспечит ли нетто-поглощение лесами достижение углеродной нейтральности экономики России при современной практике управления лесами, ориентированной только на весьма специфическую и даже частную форму лесопользования – выращивание хвойных монокультур без достаточных уходов и прореживаний – это большой вопрос, особенно если учитывать международные требования к лесоклиматическим проектам как Nature Based Solutions и увеличивавшуюся в последние десятилетия площадь пожаров.

Можно предположить, что большинство проектов по лесовосстановлению в лесной зоне (зоне естественного возобновления), ориентированных на выращивание хвойных монокультур, будет проигрывать естественному восстановлению лесов, происходящему в большинстве случаев путем зарастания лиственными породами, депонирующими в 1.4–2 раза больше углерода, чем хвойные. Таким образом, традиционное лесовосстановление в России не является надежным климатическим проектом, тем более без его переориентации на лиственные породы с большей скоростью накопления углерода по сравнению с хвойными монокультурами и большей устойчивостью к пожарам. Несмотря на это, в первой версии формулировки ст. 22.1 Лесного кодекса, внесенной Минприроды России для общественных слушаний², проекты по воспроизводству лесов были перечислены в качестве климатических проектов в области лесных отношений.

В этой связи, а также в связи с ведущимися до последнего времени дискуссиями о сравнительной оценке методик расчета поглощения парниковых газов лесными экосистемами, применяемых в Российской Федерации, нами был инициирован настоящий спецвыпуск журнала “Известия РАН. Серия географическая” для того, чтобы получить ответы на назревшие вопросы, обсудить имеющиеся предложения или хотя бы сконцентрировать на них внимание исследователей:

- Какова роль лесных экосистем и вклад иных, “нелесных” биомов, в первую очередь – земель сельскохозяйственного назначения, а также болот, в том числе и в лесной зоне, в углеродном балансе Российской Федерации? Как корректно отражать их вклад в российской национальной отчетности в рамках Парижского соглашения?

- Как увеличить поглощение углерода в природных и антропогенных экосистемах страны без ущерба как для их экономически значимых функций, так и для сохранения биоразнообразия? Как вовлечь эти экосистемы в реализацию в них климатических проектов?

¹ Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р.

² <https://regulation.gov.ru/projects#npa=126948> (дата обращения 20.03.2023).

- Какие изменения необходимы в ведении лесного и сельского хозяйства страны и в учете эффективности существующего бюджетного финансирования, чтобы увеличить поглощение углерода?

- Почему при едином числе спутников с камерами MODIS в Канаде и США данные традиционной инвентаризации лесов строго коррелируют с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а в России никак не могут решить проблему рассогласованности ведомственной информации и спутниковых данных?

- Как ожидаемый перевод расчета поглощений парниковых газов лесами с данных государственного лесного реестра (ГЛР) на данные государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), а также более полный учет лесопожарных эмиссий с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) скажутся на соответствующих показателях углеродного баланса?

- Что важнее для углеродного регулирования и баланса углерода — максимальное нетто-поглощение углерода молодыми лесами или баланс поглощения и сохранения ранее накопленного углерода в старовозрастных лесах?

- Как обеспечить внедрение новых (ДЗЗ) и новейших методов инвентаризации парниковых газов (например, FLUXNET) в национальную систему мониторинга парниковых газов для верификации и сопоставления с данными национальных систем отчетности в рамках Парижского соглашения?

- Как учесть стоимость углерода (углеродных единиц) в российской экономике и монетизировать ее в международной торговле? Как грамотно

использовать имеющийся у России потенциал по сокращению выбросов и увеличению поглощения на основе природных экосистем?

- Как избежать негативного влияния административных барьеров и регулирования на ценообразование углеродных единиц, полученных в результате российских проектов в сфере Nature Based Solutions, чтобы у российских компаний был прагматический выбор — покупать углеродные единицы в Венесуэле и странах Пацифики или реализовывать собственные климатические проекты?

Конечно, в рамках одного специализированного выпуска журнала “Известия РАН. Серия географическая” нет возможности предложить развернутые ответы на все эти вопросы, но редакторы спецвыпуска рассчитывают дать толчок и стимулировать совместное обсуждение данных вопросов более широким кругом ученых, причем не только естественно-научного профиля, но и среди специалистов и экспертов экономического и социального знания.

Е.А. Шварц, Центр ответственного природопользования Института географии РАН, Москва, Россия

А.А. Романовская, Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

E.A. Shvarts, Center for responsible use of natural resources, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

A.A. Romanovskaya, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

ПРИРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДНОМ РАЗВИТИИ РОССИИ

УДК 504.062.4

ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОСИСТЕМНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ В РОССИИ

© 2023 г. А. А. Романовская*

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

**e-mail: an_roman@igce.ru*

Поступила в редакцию 05.11.2022 г.

После доработки 18.02.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

В России разрабатывается национальная правовая и нормативная база реализации Парижского соглашения. В российских стратегических документах наблюдается несогласованность мер и количественных показателей по сокращению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов, вопросы вызывает и основная ставка на лесные и иные экосистемы через реализацию климатических проектов. Задачей настоящей работы является определение цели и места климатических проектов в рамках национальной низкоуглеродной политики, а также анализ возможностей и ограничений их выполнения в России. Основными критериями климатических проектов являются принцип дополнительности, консервативность определения базовой линии, минимизация рисков (утечки, непостоянства, прекращения финансирования проекта, реверсии). Экосистемные проекты являются высокорискованными по сравнению с проектами в индустриальных секторах экономики, в то время как климатическая составляющая проектной деятельности возникает только при долговременном сохранении результата. Целью климатических проектов в России должна являться отработка технологий по митигации на основе методов устойчивого управления природными экосистемами: результаты должны характеризоваться множественными выгодами в области экосистемных услуг территории, биоразнообразия и адаптации к изменениям климата, что повышает их привлекательность при реализации политики устойчивого развития компаний и государства. Учитывая дополнительный характер, проекты не смогут обеспечить существенный количественный вклад в сокращение выбросов парниковых газов, но могут предоставить инструмент для достижения этих целей. На начальном этапе формирования российского углеродного рынка необходимо допустить к реализации только надежные и прозрачные проекты (лесовосстановление и лесоразведение смешанными культурами; улучшенное лесопользование управляемых лесов; управление ранее неуправляемыми лесами; восстановление водно-болотных угодий/травянистых экосистем; сохранение почвенного углерода сельскохозяйственных угодий; внесение в почвы биоугля). Такие проекты, как сохранение лесов от рубки и создание плантаций монокультур, требуют разработки отдельной нормативной базы для предупреждения фальсификаций и минимизации угрозы местным природным экосистемам.

Ключевые слова: углеродный рынок, углеродные единицы, Парижское соглашение, митигация, адаптация, изменение климата, устойчивое развитие

DOI: 10.31857/S2587556623040118, **EDN:** VIJJQJ

ВВЕДЕНИЕ

С 1 января 2021 г. началось осуществление Парижского соглашения по климату во всех ратифицировавших его странах мира (186 стран и ЕС). Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2019 г. № 1228 Российская Федерация также является Стороной этого соглашения. Соответственно развивается и нормативно-правовая основа его реализации в нашей стране.

Так, в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 (далее – Указ) принята национальная цель по сокра-

щению выбросов парниковых газов, которая предусматривает “к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70 процентов относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации”.

Значительным шагом в обеспечение исполнения данного Указа стало Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р с утверждением Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых

газов до 2050 г. (далее – Стратегия). При этом следует отметить, что цель на 2030 г., задекларированная в этой Стратегии, существенно отличается от принятых количественных обязательств в Указе и представленных в качестве Определяемого на национальном уровне вклада (ОНУВ) Российской Федерации в рамках Парижского соглашения. Так, к 2030 г. согласно интенсивному сценарию, принятому за базовый, в Стратегии предусматривается более амбициозное сокращение выбросов парниковых газов до 54% от уровня 1990 г. (105% от уровня 2019 г.) – т.е. фактически предлагается стабилизация текущего уровня выбросов парниковых газов: в 2020 г. совокупные антропогенные выбросы парниковых газов в Российской Федерации составили 48% от уровня 1990 г. с учетом вклада поглощения в секторе землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство (ЗИЗЛХ) (Национальный ..., 2022).

В российских нормативных документах отличаются не только общие цели сокращения выбросов парниковых газов, но также встречаются противоречивые целевые показатели по вкладу лесных экосистем или всего сектора ЗИЗЛХ в объем нетто-выбросов¹ парниковых газов на 2030 и 2050 гг. Так, Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2024 г. и на плановый период до 2030 г. предусматривает достижение нетто-поглощения в управляемых лесах России в 1100 млн т CO₂-экв. к 2024 г. и 2500 млн т к 2030 г. при современном уровне в 622 млн т CO₂-экв. (на 2020 г.) (Национальный ..., 2022). Стратегия развития лесного комплекса РФ до 2030 г. на эти годы устанавливает целевые показатели в 610 и 620 млн т CO₂-экв., соответственно.

По сектору ЗИЗЛХ Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. предполагает достижение целевого показателя к 2030 г. в 535 млн т CO₂-экв., сохранение этого уровня до 2050 г. по инерционному сценарию и рост до 539 млн т CO₂-экв. к 2030 и до 1200 млн т в 2050 г. – по интенсивному. Паспорт федерального проекта “Политика низкоуглеродного развития” в качестве количественных показателей для сектора ЗИЗЛХ включает 110% от уровня 2019 г. к 2024 и сохранение этой величины до 2030 г. При этом уровень нетто-поглощения в секторе ЗИЗЛХ в 2020 г. уже составил 569 млн т CO₂-экв. по сравнению с величиной в 559 млн т в 2019 г. (Национальный ..., 2022).

Необходимость учета потенциала сектора ЗИЗЛХ и особенно лесных экосистем в митига-

ции² климата и выполнении целей Парижского соглашения отмечается многими исследователями (Ваганов и др., 2021; Лескинен и др., 2020; Griscom et al., 2019; IPCC, 2018, 2022a, б). Возможности увеличения поглощения и сохранения углерода в российских лесах включены в проект плана реализации Стратегии. Хотя его разработка еще продолжается, в научных и экспертных кругах уже разворачивается дискуссия об обоснованности основной ставки в сокращении нетто-выбросов парниковых газов на сектор ЗИЗЛХ и лесные экосистемы (Шварц, Птичников, 2022). Достижение цели в 1.2 млрд т CO₂-экв. по сектору ЗИЗЛХ на середину века теоретически возможно (Romanovskaya et al., 2020), однако потребует существенной перестройки системы управления лесами, включая системы раннего обнаружения и эффективного тушения пожаров, а также управления пахотными и пастбищными угодьями. Однако до настоящего времени обсуждение требуемых изменений в системах отраслевого управления лесным и сельским хозяйством происходит только на экспертном уровне, вместо этого акцент в проекте плана реализации Стратегии делается на добровольном выполнении бизнес-компаниями климатических проектов на основе лесных и иных природных экосистем, реализация которых установлена в рамках федерального закона от 02.07.2021 г. № 296 “Об ограничении выбросов парниковых газов” и соответствующими подзаконными актами.

Очевидна необходимость выработки согласованных мер и гармонизации направлений по сокращению выбросов и увеличению поглощения парниковых газов в нашей стране, определения единых значений планируемых показателей по поглощающей способности лесов и управляемых экосистем и выработки конкретных мероприятий по их достижению в рамках реализации целей Парижского соглашения, Стратегии и 296-ФЗ.

Задачами настоящей работы являются определение целей и места климатических проектов в рамках реализации национальной политики и мер по сокращению выбросов парниковых газов, а также анализ возможностей и ограничений выполнения отдельных видов климатических проектов на основе экосистем в России.

КРИТЕРИИ И ЦЕЛИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

Наиболее существенным критерием, используемым для подтверждения климатической деятельности в качестве проектной, является принцип дополнительности. В соответствии с приказом Минэкономразвития России от 11 мая 2022 г. № 248

¹ Нетто-выбросы (или нетто-поглощение) представляют собой баланс между выбросами и поглощением парниковых газов на определенной территории.

² Предотвращение изменения климата, смягчение антропогенного воздействия на климат.

в качестве одного из критериев климатических проектов вводится следующий: “сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов и (или) увеличение их поглощения в течение срока реализации проекта не является результатом влияния факторов, не связанных с мероприятиями проекта; мероприятия проекта осуществляются в дополнение к мероприятиям, направленным на выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации обязательных требований, действующих по состоянию на начало реализации проекта”, который и является определением дополнительной в российском правовом поле. Однако в рамках международных углеродных стандартов интерпретация принципа дополнительной значительно шире. Проектная деятельность должна быть дополнительной к существующему законодательству, нормативным и регулирующим актам, предусмотренному финансированию и утвержденным планам развития, принимая во внимание возможные барьеры для осуществления этой деятельности. Говоря простыми словами, сокращение выбросов и/или увеличение поглощения будут являться дополнительными, если бы они не случились без выполнения климатического проекта.

Понятно, что компенсация выбросов парниковых газов углеродными единицами от дополнительной деятельности может привести к росту общих выбросов в глобальном масштабе, а не их сокращению. Поэтому определение дополнительной проектов является одним из самых чувствительных и сложных вопросов при валидации проектов. При этом используются разные методы и подходы – от демонстрации, что вид деятельности не входит в требуемые по законодательству или не относится к общепринятой практике, до использования инвестиционного анализа (анализ финансовой привлекательности) и “барьерного анализа”, при котором изучается вероятность реализации альтернативных проекту действий. К сожалению, любые стандартизированные подходы к определению дополнительной в различных видах проектов могут привести к ошибочным выводам: в российских реалиях (как и во многих других странах) спорным остается вопрос о реализации проектов в случае их соответствия нормативным требованиям, но в условиях, когда эти требования систематически не выполняются ввиду нехватки финансирования. В таком случае, проекты по сокращению выбросов/увеличению поглощения могут быть не признаны дополнительными по формальному признаку. Вместе с тем, допуск таких климатических проектов к реализации может стимулировать повсеместную замену бюджетного финансирования комплекса обязательных мероприятий лесохозяйственных практик на частные инвестиции, но не приводить при этом к дополнительному сокращению выбросов или увеличе-

нию поглощения по сравнению с тем, что должно было бы быть на данной территории без реализации проекта. Учитывая, что второй вариант является наиболее вероятным для широкого распространения в России, правильной стратегией, по мнению автора, особенно на начальном этапе формирования российского углеродного рынка, является валидация только однозначно дополнительных проектов.

Верная интерпретация принципа дополнительной основывается на определении места проектной деятельности в рамках политики и мер по митигации изменения климата: поддержка новых технологий, мероприятий и действий, приводящих к сокращению выбросов или увеличению поглощения парниковых газов, которые пока не являются экономически эффективными и распространенными. На начальном этапе таким действиям необходима финансовая поддержка, обеспечение которой происходит за счет реализации углеродных единиц. Постепенно по мере развития и усовершенствования, в том числе удешевления технологий, такие мероприятия встраиваются в сценарий “бизнес как обычно” и перестают соответствовать принципу дополнительной. Например, так произошло с возобновляемыми источниками энергии на территории европейских стран, развитие которых перестало приниматься в качестве проектной деятельности в рамках некоторых углеродных стандартов.

Вторым важным критерием климатических проектов является корректное определение базовой линии: уровень нетто-выбросов парниковых газов при реализации сценария без дополнительной проектной деятельности. Достигнутые в результате проекта сокращения выбросов и/или увеличения поглощения представляют собой разницу между базовой линией и фактическим уровнем нетто-выбросов парниковых газов (в тоннах CO₂-экв.). После верификации этих величин независимым органом по валидации и верификации парниковых газов и обязательных отчислений единиц сокращений выбросов, в том числе, на компенсацию утечек и риска непостоянства, они равны выписанным углеродным единицам.

Таким образом, установленный уровень базовой линии напрямую связан с финансовой выгодой и вкладом проекта в общее сокращение выбросов парниковых газов. Этот уровень должен быть консервативным: для проектов по сокращению выбросов парниковых газов он не должен быть завышен, а для проектов по увеличению поглощения – занижен. Правила установления базовой линии используются также для повышения амбициозности климатических проектов. Так, в рамках Парижского соглашения (решение 3/СМА.3) предусматриваются жесткие ограничения для базовых линий, которые должны “быть установлен-

ными на более низком уровне, чем при сценарии, не предусматривающем принятия мер” на основе:

1) НДТ – наилучших доступных технологий, которые представляют собой экономически обоснованный и экологически безопасный курс действий, сообразно обстоятельствам;

2) “бенчмарк” – амбициозного эталонного подхода, при котором исходные условия устанавливаются как минимум на среднем уровне выбросов наиболее эффективных сопоставимых видов деятельности, обеспечивающих аналогичные результаты и услуги в определенной сфере при аналогичных социальных, экономических, экологических и технологических условиях;

3) подхода, основанного на существующих нынешних выбросах или выбросах в прошлые периоды, скорректированных в сторону уменьшения для обеспечения согласованности с требованием быть установленными на более низком уровне, чем при сценарии, не предусматривающем принятия мер.

Соответственно, Парижское соглашение не предусматривает оценку прогнозных выбросов при сценарии “бизнес как обычно”, которые часто используются в добровольных углеродных стандартах, а также требует искусственного занижения базового уровня нетто-выбросов и, следовательно, искусственного сокращения объема выпущенных углеродных единиц с целью усиления амбициозности климатических действий. Для формирующегося российского углеродного рынка это условие следует рассматривать как чрезмерно строгое, которое может снизить заинтересованность компаний в реализации добровольных климатических проектов. Поэтому временно, на 3–5 ближайших лет, в России следует позволить также определять базовую линию на основе консервативной оценки прогнозных объемов выбросов и поглощений парниковых газов на территории проекта без учета проектного сценария, хотя такие проекты, по всей видимости, и не будут признаны на платформе Парижского соглашения.

Важным условием (третий критерий) выполнения разных видов климатических проектов является установленный для них кредитный период, в течение которого производится выписка углеродных единиц. Не следует путать с общим периодом выполнения проекта, который может значительно отличаться от кредитного. В рамках Парижского соглашения утвержденный кредитный период для проектов по сокращению выбросов составляет не более 5 лет с возможностью продления дважды или 10 лет однократно. И период в максимум 15 лет с возможностью продления дважды для проектов по поглощению парниковых газов. Конкретные кредитные периоды могут различаться для разных видов проектов по

поглощению, установлен только максимально возможный. Добровольные углеродные стандарты обычно применяют кредитные периоды для лесных проектов от 20 до 30 лет. При каждом продлении кредитного периода базовая линия может быть пересмотрена (в консервативную сторону), что отвечает требованиям Парижского соглашения по стимулированию амбициозности с течением времени: постепенно новые технологии, отработываемые в рамках проектов, должны передвигаться в базовую линию, оставляя место для отработки еще более инновационных и эффективных методов.

В российских нормативных документах кредитный период пока не определен, что будет препятствовать признанию таких проектов на международном уровне.

Наконец четвертый, не менее значимый критерий для климатических проектов, – подход к учету и минимизации рисков и утечек проектной деятельности. При этом экосистемные проекты характеризуются одним из самых высоких уровней рисков. Основные риски климатических проектов на основе экосистем рассмотрены в табл. 1.

Риски характеризуют возможную неустойчивость проектной деятельности, которая может привести к отсутствию заявленных сокращений или даже к росту выбросов парниковых газов в результате проекта. Атрибуция проектов к климатически-значимым действиям требует понимания основ и причин изменения климата с учетом инерционности климатической системы: изъятие углерода из атмосферы на период нескольких десятилетий практически не повлияет на скорость роста среднегодовых приземных температур на период до 2100 г. Для климатического эффекта, учитывая принятые 100-летние потенциалы глобального потепления, необходимо гарантировать сокращение выбросов или накопление изъятых углерода из атмосферы на период 100 и более лет (IPCC, 2018). В рамках экосистемных проектов, в отличие от проектов в индустриальных отраслях, гарантия такого результата затруднена, особенно в российских реалиях. Смена собственника земли или хозяйствующего субъекта на данной территории может повлечь прекращение реализации дополнительных мероприятий проекта или даже потерю ранее достигнутых результатов. Надо отметить, что, в том числе по этой причине, некоторые углеродные рынки не допускают компенсаций выбросов на основе углеродных единиц экосистемных проектов.

Таким образом, целью выполнения добровольных климатических проектов в России должна являться отработка технологий по сокращению выбросов парниковых газов, увеличению поглощения и долговременного сохранения углерода на основе методов управления природными

Таблица 1. Риски климатических проектов на основе экосистем

Риск	Описание, примеры	Возможности управления
Риск утечки	Сокращение выбросов и/или сохранение углерода в одном месте и интенсификация выбросов/потери углерода в другом, вне зоны проекта, которое происходит из-за смещения деятельности за пределы проектной зоны (например, дополнительная вырубка леса вне территории лесоклиматического проекта)	Детальная проработка методик разных видов климатических проектов, которые должны гарантировать полный учет всех возможных утечек во время всего срока выполнения проекта
Риск непостоянства	Потери достигнутого накопления углерода в результате гибели экосистемы, например, от пожарных и иных видов нарушений	Могут применяться такие методы, как страхование от потерь углерода. Некоторые углеродные стандарты формируют резерв углеродных единиц от экосистемных климатических проектов на основе обязательных отчислений определенной доли единиц при их выписке, которые используются в случае непостоянства некоторых проектов
Риск прекращения финансирования до окончания периода выполнения проекта*	Планирование расходов бизнес-предприятий определяется на более короткие периоды, чем сроки выполнения проекта. При снижении стоимости углеродных единиц на рынке возникает риск прекращения выполнения проекта, по которому уже были выписаны углеродные единицы. Соответственно могут быть потеряны те сокращения выбросов/увеличения поглощения, которые были использованы для компенсации	Необходимо вносить соответствующие требования о невозможности прекращения финансирования климатического проекта на основе экосистем в критерии отнесения проектов, реализуемых юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями или физическими лицами, к климатическим проектам (Приказ Минэкономразвития России от 11 мая 2022 г. № 248)
Риск реверсии*	Потеря результатов проекта после окончания срока его выполнения. Например, вырубка, раскорчевка и распашка земельного участка, на котором ранее был выполнен проект по лесоразведению	Доработка нормативных актов с целью установления обременения на земельный участок, зарегистрированный в качестве территории климатического проекта, с ограничением в ином использовании земли

Примечание. * Может рассматриваться в качестве одного из видов риска непостоянства.

экосистемами для их дальнейшего масштабирования в рамках мероприятий федеральных и региональных органов исполнительной власти при реализации низкоуглеродной Стратегии и Указа. При этом проекты должны стимулировать постоянное технологическое совершенствование для поиска и отработки все новых методов по сокращению нетто-выбросов за счет увеличения консервативности базовых линий, ужесточения определения дополнительной, обеспечения климатически значимых результатов и гарантий сохранения достигнутых результатов. Учитывая дополнительный характер проектного механизма, сами по себе проекты не смогут обеспечить существенный количественный вклад в выполнение национальных целей по сокращению выбросов парниковых газов, но могут предоставить инструмент для достижения этих целей.

Цели климатических проектов на основе экосистем также включают устойчивое управление экосистемами и сохранение, а при возможности, увеличение объема и качества предоставляемых экосистемных услуг (Фоменко и др., 2022а, б).

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗНЫХ ВИДОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ЭКОСИСТЕМ В РОССИИ

В рамках различных углеродных стандартов — международных и национальных — в мире уже разработано и введено в действие более 100 методик для выполнения экосистемных климатических проектов, в том числе в Verra VCS, Gold Standard, Clean Development Mechanism, California Compliance Offset Program, American Carbon Registry, Alberta Emission Offset Program (AEOP), Aus-



Рис. 1. Основные виды климатических проектов на основе экосистем.

tralian Emissions Reduction Fund, Korea Offset Program и другие. Соответствующая база данных составлена в Институте глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля. Основные виды климатических проектов на основе экосистем представлены на рис. 1.

Для стимулирования грамотного выполнения экосистемных климатических проектов, с учетом критериев и целей, обсужденных в разделе выше, при формировании российского углеродного рынка целесообразно на начальном этапе ограничить разрешенные виды климатических проектов наиболее надежными и прозрачными:

- 1) лесовосстановление смешанными культурами;
- 2) лесоразведение смешанными культурами, в том числе защитное;
- 3) улучшенное лесопользование управляемых лесов, включая управление возрастом рубки, лесозаготовка с минимальным повреждением почв, наземного покрова и подроста, улучшение охраны и защиты;
- 4) управление ранее неуправляемыми лесными землями, в том числе, организация охраны этих лесов от пожаров;
- 5) восстановление осушенных и/или деградированных водно-болотных угодий;

6) восстановление деградированных травянистых и кустарниковых экосистем;

7) сохранение и увеличение почвенного углерода пахотных или кормовых угодий;

8) генерация и внесение в почвы биоугля (biochar).

В перспективе необходимо будет проработать правила и подходы к таким типам экосистемных проектов, как:

- консервация (сохранение) малонарушенных лесов;
- создание плантаций быстрорастущих деревьев для лесозаготовки и долговременной консервации углерода в продукции, генерации биоугля и биотоплива.

Связанными с экосистемами могут являться такие перспективные в России проекты, как улучшение лесопереработки с целью долговременной консервации углерода и переход на биотопливо. Такие проекты требуют отдельного обсуждения подходов к их реализации и не рассматриваются в этой статье.

Характеристики рекомендуемых для реализации экосистемных проектов приведены в табл. 2 с учетом необходимости сохранения биоразнообразия природных экосистем России и комплекса экосистемных услуг.

Таблица 2. Характеристики рекомендуемых к реализации в России видов климатических проектов на основе экосистем

Вид проекта	Содержание, основные мероприятия	Область применения, ограничения	Дополнительность	Базовая линия
Лесовосстановление смешанными культурами	<p>Метод управления территорией, заключающийся в лучшем воспроизводстве лесов на временно обезлесенных и деградированных лесных территориях, в том числе подвергшихся вырубкам и пожарам.</p> <p>Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> — формирование устойчивых к внешним воздействиям древесных насаждений смешанного видового состава на основе местных видов древесных растений; — содействие естественному и искусственному лесовосстановлению; — контроль за лесовосстановительными мероприятиями; — мероприятия по уходу за насаждениями 	<p>Лесные территории с затрудненным лесовосстановлением, земли сельскохозяйственного назначения с существующими лесозащитными полосами.</p> <p>Запрет на использование генно-модифицированных гибридов и иных селекционных древесных растений, микрклонального размножения посадочного материала, интродуцентных видов</p>	<p>Обеспечивается за счет эффективного накопления углерода дополнительно введенными видами древесных растений и дополнительного ухода за насаждениями, а также за счет сокращения эрозии и дефляции пахотных почв (на сельскохозяйственных землях)</p>	<p>Прогнозный уровень нетто-поглощения парниковых газов при естественном возобновлении древесной растительности на данном участке.</p> <p>Если естественное возобновление невозможно на данном участке — прогнозный уровень нетто-поглощения парниковых газов при искусственном лесовосстановлении согласно нормативным документам</p>
Лесоразведение смешанными культурами, в том числе защитное	<p>Создание устойчивых лесных сообществ на ранее не лесных землях (отсутствие леса более 50 лет):</p> <ul style="list-style-type: none"> — формирование устойчивых к внешним воздействиям древесных насаждений смешанного видового состава; — создание защитных и противоэрозионных лесополос на землях сельскохозяйственного назначения, вдоль автодорог и пр. 	<p>Нелесные деградированные земли, включая неудобья на брошенных пахотных угодьях; земли сельскохозяйственного назначения с отсутствующими лесозащитными полосами.</p> <p>Запрет на использование генно-модифицированных гибридов и иных селекционных древесных растений, микрклонального размножения посадочного материала, интродуцентных видов</p>	<p>Обеспечивается за счет накопления углерода созданными древесными насаждениями и ухода за ним, а также за счет сокращения эрозии и дефляции пахотных почв при создании лесозащитных полос</p>	<p>Базовая линия основывается на существующем уровне нетто-поглощения углерода. В случае деградированных экосистем базовая линия равна нулю</p>

Таблица 2. Продолжение

Вид проекта	Содержание, основные мероприятия	Область применения, ограничения	Дополнительность	Базовая линия
Улучшенное лесопользование управляемых лесов, включая управление возрастом рубки, лесозаготовку с минимальным повреждением почв, наземного покрова и подроста, улучшение охраны и защиты	<p>Метод управления территорией, заключающийся в переходе к интенсивному использованию и воспроизводству лесов. Может включать выборочно или в комплексе меры по управлению возрастом рубки, лесозаготовке с минимальным повреждением почв, наземного покрова и подроста, улучшению охраны и защиты лесов. Реализация интенсификации промышленных рубок способствует сохранению уровня поглощения при уменьшении площади лесозаготовок деловой древесины.</p> <p>Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> – переход от экстенсивной к интенсивной модели управления лесами (точная инвентаризация состояния лесного участка; строительство сети лесных дорог; применение выборочных промышленных рубок с учетом ландшафтных особенностей территории; внедрение эффективных способов восстановления и некоммерческих рубок ухода (агроуходы, прочистки, осветления, прореживания и т.д.); обработка почвы и утилизация части древесных остатков); – обоснование оптимального возраста рубки насаждений с целью максимизации поглощения углерода в течение нескольких циклов на период не менее 100 лет; – организацию процесса лесозаготовки с минимальными повреждениями почвы и подроста, утилизацией в биотопливо/биоуголь порубочных остатков; – организацию улучшенной охраны и защиты лесов от нарушений, в том числе: <ul style="list-style-type: none"> • противопожарные меры сверх указанных в проекте освоения лесов и лесохозяйственных регламентах (закупка техники, строительство лесных дорог, системы оповещения о возгораниях); • очистку лесных участков от накопленного горючего материала; • санитарные рубки; • регулирование породного состава лесных насаждений для снижения класса пожарной опасности; • дополнительные мелиоративные мероприятия; • дополнительный полевой и дистанционный мониторинг возгораний; • охрану окружающей среды от загрязнений и негативного воздействия; • контроль за незаконными действиями третьих лиц (рубки, свалки и др.) 	<p>Управляемые лесные территории, включая арендованные и неарендованные участки леса.</p> <p>Достигнутый эффект сокращения выбросов/увеличения поглощения по сравнению с базовой линией может быть заметен только на длительных периодах реализации дополнительных мероприятий</p>	<p>Обеспечивается за счет введения новых мер лесопользования, охраны и защиты лесов, которые не предусмотрены обычными лесными мероприятиями и планами по охране и защите лесов</p>	<p>Требует установления базовой линии для каждого отдельного мероприятия в составе комплексного проекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> – для выбросов базовая линия оценивается на основе среднесрочных исторических потерь углерода при рубках, площадях нарушений и соответствующих выбросов парниковых газов (пожаров и иных причин гибели насаждений); – для поглощений базовая линия оценивается на основе прогнозного уровня поглощения с учетом ожидаемой смены возрастных состояний существующих древостоев

Таблица 2. Продолжение

Вид проекта	Содержание, основные мероприятия	Область применения, ограничения	Дополнительность	Базовая линия
Управление ранее неуправляемыми лесными землями, в том числе, организация охраны этих лесов от пожаров	<p>Организация комплекса мер по наземной охране и защите неуправляемых лесов.</p> <p>Происходит перевод из неуправляемых земель в управляемые. При этом данный перевод осуществляется однократно и только в одну сторону, что соответствует правилам РКИК ООН и Парижского соглашения, и гарантирует сохранение результатов проекта на период 100 лет и более.</p> <p>Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> — противопожарные меры сверх указанных в проекте освоения лесов и лесохозяйственных регламентах (закупка техники, строительство лесных дорог, системы оповещения о возгораниях); — очистку лесных участков от накопленного горючего материала; — санитарные рубки; — регулирование породного состава лесных насаждений для снижения класса пожарной опасности; — дополнительные мелиоративные мероприятия; — дополнительный полевой и дистанционный мониторинг возгораний; — охрану окружающей среды от загрязнений и негативного воздействия; — контроль за незаконными действиями третьих лиц (рубки, свалки и др.) 	<p>Резервные леса; иные неуправляемые лесные территории.</p> <p>Уникальный вид проектов только для стран с имеющимися неуправляемыми экосистемами.</p> <p>К ограничениям относится невозможность прекращения защиты и охраны этих лесов в будущем: площадь управляемых лесов не должна сокращаться согласно принципам РКИК ООН. Таким образом, постепенно эти участки из климатических проектов с частным финансированием перейдут в управляемые леса, входящие в бюджетное финансирование</p>	<p>Обеспечивается за счет факта организации управления над потоками парниковых газов в экосистеме, которые ранее полностью отсутствовали.</p> <p>Дополнительность легко устанавливается на основе принадлежности к неуправляемым территориям</p>	<p>Согласно подходам РКИК ООН и методических указаний МГЭИК антропогенное нетто-поглощение неуправляемых экосистем равно нулю. Таким образом, базовая линия должна приниматься равной нулю при использовании методики МГЭИК в качестве проектной</p>

Таблица 2. Продолжение

Вид проекта	Содержание, основные мероприятия	Область применения, ограничения	Дополнительность	Базовая линия
Восстановление осушенных и/или деградированных водно-болотных угодий	<p>Восстановление уровня грунтовых вод водно-болотных экосистем с целью восстановления экосистем, снижения риска торфяных пожаров, увеличения биоразнообразия, повышения устойчивости экосистем и адаптации к изменениям климата, сокращения выбросов парниковых газов.</p> <p>Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> — обводнение территорий водно-болотных угодий, прежде находившихся под водой и осушенных в результате воздействия человека; — восстановление деградированных водно-болотных угодий, в том числе прибрежных и морских экосистем, за счет контроля уровня вод, уменьшения амплитуды колебаний уровня вод, восстановления растительности; — в перспективе, можно будет добавить предотвращение осушения и деградации территории водно-болотных угодий при наличии должного обоснования угрозы этой деятельности и тщательной оценки утечек проекта 	<p>Осушенные торфяники на сельскохозяйственных и лесных землях;</p> <p>деградированные торфяники на землях торфоразработки;</p> <p>нарушенные прибрежные экосистемы, в том числе с утраченной растительностью.</p> <p>В добровольных углеродных стандартах имеются разработанные методологии для вторичного обводнения ранее осушенных торфяников.</p> <p>Методологии по восстановлению деградированных водно-болотных экосистем, особенно по предотвращению деградации, требуют дополнительной разработки [например, (Li and Miao, 2022)]</p>	<p>Обеспечивается за счет мероприятий по обводнению и/или восстановлению растительности, дополнительных к имеющемуся законодательству и утвержденных планов, в том числе по предупреждению торфяных пожаров.</p> <p>Проекты по предотвращению деградации требуют разработки усиленных требований к обоснованию дополнительно для предупреждения возможной фальсификации климатического проекта</p>	<p>Определяется на основе исторического среднегодового уровня нетто-выбросов парниковых газов (только в сумме по CO₂, CH₄ и N₂O).</p> <p>Для растительности устанавливается отдельная базовая линия на основе прогнозного уровня нетто-поглощения без учета дополнительных мероприятий проекта.</p> <p>В случае предотвращения деградации экосистем базовая линия основывается на среднем уровне нетто-выбросов парниковых газов сходных деградированных экосистем</p>
Восстановление деградированных травянистых и кустарниковых экосистем	<p>Восстановление резервуаров углерода (растительности и почвы) на деградированных нелесных землях.</p> <p>Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> — рекультивацию земель за счет насыпного гумусного слоя почв; — посадку травосмесей и кустарников местных видов естественных экосистем; — уход за насаждениями; — противопожарную защиту 	<p>Деградированные сельскохозяйственные земли (пахотные и кормовые угодья);</p> <p>земли в зоне опустынивания [см. (Национальный ..., 2019)];</p> <p>деградированные земли в результате химического загрязнения экосистем</p>	<p>Обеспечивается за счет дополнительных к законодательным и нормативным актам мероприятиям, в том числе включенных в утвержденные планы рекультивации земель</p>	<p>Устанавливается на основе исторического среднеголетнего уровня нетто-выбросов парниковых газов. Для экосистем, требующих насыпного плодородного слоя для рекультивации, базовая линия равна нулю</p>

Таблица 2. Окончание

Вид проекта	Содержание, основные мероприятия	Область применения, ограничения	Дополнительность	Базовая линия
Сохранение и увеличение почвенного углерода пахотных или кормовых угодий	<p>Метод управления используемыми пахотными и кормовыми угодьями с целью предотвращения потерь гумуса, его накопления и сохранения. Может включать:</p> <ul style="list-style-type: none"> – меры и технологии почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия (Беляев и др., 2022), включая нулевую обработку почв, высадку почвопокровных культур и др.; – оптимизацию норм внесения химических удобрений; – органическое земледелие; – мульчирование; – изменение севооборота; – сокращение эрозии и дефляции почв; – изменение нагрузки на пастбища и др. 	<p>Сельскохозяйственные угодья, прежде всего слабогумусированные и деградированные почвы. Высокий риск реверсии запасов почвенного углерода в случае изменения в будущем практик земледелия. Нулевая обработка может привести к повышенным дозам внесения химикатов (https://notillagriculture.com/no-till-farming/advantages-and-disadvantages-of-no-till-farming/), поэтому в сферу охвата проекта должны входить помимо углерода еще и выбросы N₂O. Желательно также оценивать риски эвтрофикации водоемов</p> <p>Может включать сбор и утилизацию определенных видов растительных остатков, обеспечивая сохранение устойчивости природных экосистем и биоразнообразия. Может включать следующие источники биомассы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – порубочные остатки; – отходы лесопереработки; – побочную продукцию сельскохозяйственных культур; – результаты прореживания и санитарных рубок в лесах; – удаленные из леса ветровалы и других накопленные горючие материалы 	<p>Обеспечивается за счет применения комплекса мероприятий, не входящих в нормативные акты и увеличивающих прямые затраты фермеров</p> <p>Обеспечивается за счет демонстрации, что в отсутствие проекта произошло бы естественное гниение или сжигание органических остатков</p>	<p>Определяется на основе существующего уровня запасов почвенного органического углерода по данным прямых измерений и моделирования прогнозной динамики запасов почвенного гумуса при традиционной схеме управления. Для выбросов N₂O оценивается на основе текущего (или среднегогодового) уровня выбросов по методике МГЭИК</p> <p>Определяется на основе расчетных оценок по методике МГЭИК выбросов парниковых газов (CO₂, CH₄ и N₂O) при гниении и сжигании древесины или сельскохозяйственной биомассы. При оценке эффекта митигации в почвах после внесения биоугля, базовая линия определяется для CH₄ и N₂O отдельно на основе среднесуточных значений эмиссий от почв проекта без добавления биоугля</p>
Генерация и внесение в почву биоугля	<p>Предусматривается возможность генерации биоугля методом пиролиза, в том числе древесных и сельскохозяйственных остатков, с его последующим внесением и заделкой в сельскохозяйственные или лесные почвы. Обеспечивает сокращение выбросов CO₂, CH₄ и N₂O от гниения и сжигания биомассы, долговременное хранение углерода в почве, снижение эмиссии CH₄ от почв в результате регулирования водного режима почвы, снижение эмиссии N₂O в результате уменьшения количества вносимых азотных удобрений (Guo, 2020)</p>			

Создание “углерод-депонирующих насаждений”, под которыми часто подразумеваются лесоклиматические проекты в России, часто приводит к формированию одновидовых плантаций с идентичным геномом, если для получения посадочного материала использовался микроклональный метод (метод вегетативного размножения в лабораторных условиях). При этом могут использоваться быстрорастущие генно-модифицированные деревья и/или интродуценты³. Подобные сообщества характеризуются высокой уязвимостью к внешним воздействиям, снижением комплекса экосистемных услуг территорий (если посадка выполняется на пригодных для лесоразведения землях). Интродуценты, так же, как генно-модифицированные и иные селекционные растения, могут угрожать местным экосистемам: ярким примером интродуцентного растения является борщевик Сосновского, который, кстати, был завезен на европейскую часть России из-за способности ежегодного производства высоких объемов биомассы. Наконец, формирование быстрорастущих моноплантаций часто приводит к изменению водного режима, истощению почв, сокращению биоразнообразия — например, подобный негативный опыт выращивания плантаций эвкалипта получен в Бразилии (da Cunha et al., 2021; de Barros Ferraz et al., 2019) и его следует учитывать при формировании правил климатических проектов в России.

Поэтому в качестве проектов по лесоразведению и лесовосстановлению следует принимать только посадки смешанных лесных насаждений на основе исключительно местных древесных видов (некоторые углеродные стандарты требуют минимум 5 видов местных пород). Присутствие в насаждениях разных видов древесных пород, а также разнообразия генетического набора каждого вида, обеспечивает повышенную устойчивость таких экосистем к внешним воздействиям, включая изменение климата. Таким образом, сохранение биоразнообразия и адаптация экосистем к изменениям климата имеют высокий синергический эффект с действиями по митигации в природных экосистемах (IPCC, 2022a). Современные климатические проекты на основе экосистем должны включать соответствующие множественные выгоды в области устойчивого землепользования.

При планировании проекта по лесовосстановлению следует особенно тщательно оценивать базовую линию и возможный эффект от реализации проекта: учитывая, что естественное возобновление мелколиственными породами на гарях и вырубках в большинстве регионов нашей страны идет достаточно интенсивно, а также тот факт,

что скорость накопления углерода лиственных пород может в несколько раз превышать на начальных этапах прироста хвойных культур, — такие проекты могут иметь отрицательный эффект в течение нескольких первых десятилетий после посадки (Фоменко и др., 2022а, б).

Как указано выше, два типа лесных проектов, методологии для которых существуют во многих углеродных стандартах, прежде чем допустить к реализации в России, требуют дополнительной проработки нормативных документов: сохранение лесов от рубки и создание плантаций монокультур.

В первом случае высок риск фальсификации климатических проектов и углеродных единиц: устанавливаемая ежегодно расчетная лесосека в нашей стране вырубается лишь примерно на треть (Матвеев и др., 2019), при этом остальная часть является легитимной для обоснования дополнительной полноты проекта согласно принятым международным методикам, несмотря на то, что лес, скорее всего, не был бы вырублен. То есть дополнительного сокращения выбросов в данном случае не происходит. В некоторых углеродных программах существуют подходы для учета этого риска, например, дисконтирование на процент освоения расчетной лесосеки. Целесообразность таких подходов можно было бы рассмотреть на более поздних этапах развития углеродного рынка в России. Однако кроме этого риска по окончании кредитного периода и отсутствия в дальнейшем выгоды велика вероятность вырубки проектного участка (риск реверсии). Никаких нормативных актов, предотвращающих такое развитие событий, пока не разработано. Наконец, сохранение вторичных лесов и выведение их из оборота рубки может иметь в долгосрочном отношении отрицательное влияние на количество накопленного углерода: продолжение роста спелых лесов может иметь меньший эффект по “углероду”, чем периодическая рубка с применением лесозаготовки с минимальным повреждением экосистемы, посадка и рост молодых древесных насаждений. Базовая линия таких проектов требует предварительной тщательной прогнозной оценки на, как минимум, 100-летний период ротации.

С точки зрения дополнительнойности действий по предотвращению вырубки леса и воздействию на глобальное сокращение атмосферных концентраций парниковых газов, период кредитования проектов по сохранению лесов должен зависеть от границ конкретного проекта. Так, если границы проекта включают только участок, планируемый к вырубке в одном году, то и период кредитования должен составлять только один год. В противном случае количество выписанных единиц будет в несколько раз превышать реальные запа-

³ <https://nauka.tass.ru/nauka/14669871>; <https://chechnyato-day.com/news/348781>.

сы углерода экосистемы и то количество эмиссий, которые попали бы в атмосферу в расчете за 100 лет (невозможно вырубить один участок леса несколько раз за кредитный период). Если границы проекта распространяются на разные участки, планируемые частями к ежегодной заготовке, то период кредитования должен быть соответственно удлинён.

Обоснованным для сохранения накопленных количеств углерода в экосистеме может являться запрет на вырубку малонарушенных лесов, обладающих невозстановимыми в ближайшей перспективе высокими запасами углерода, однако законодательно отличить малонарушенные леса от вторичных в настоящее время не представляется возможным — такие категории в Лесном кодексе отсутствуют. Кроме того, как указано выше, оформление малонарушенных лесов как проекта по консервации не спасает от вырубки этого леса по окончании кредитного периода. Поэтому проблема сохранения малонарушенных лесов России не должна зависеть от углеродной конъюнктуры, логичнее ее решать через другие виды лесного законодательства.

Второй тип проектов, который требует дополнительного национального нормирования — создание древесных моноплантаций. Как указано выше, посадка монокультур быстрорастущих, генно-модифицированных или интродуцированных видов не может происходить в рамках проектов по созданию и восстановлению лесов. Однако целью таких посадок могут быть коммерческие интересы по производству древесной биомассы. Эти мероприятия экономически обоснованы и без механизма углеродного рынка (дополнительность отсутствует). Климатическая проектная составляющая при этом может возникнуть при дополнительных действиях по уходу за плантацией, заготовке и переработке древесины, расчету времени оборота плантации с учетом накопления углерода, посадке следующего цикла и т.д. Если биомасса используется на биотопливо — климатический эффект возникает при замещении сжигания соответствующего количества ископаемого топлива. Таким образом, начисление углеродных единиц происходит по итогам полного цикла выращивания, заготовки, переработки и утилизации продукции (в случае обоснования дополнительной), а не в течение роста деревьев. Пока в России моноплантации не отличаются законодательно от понятия “леса” и допуск таких проектов к реализации может нанести больше вреда устойчивости природным экосистемам страны, чем климатической пользы.

Особенности установления базовых линий обсуждены в табл. 2. Основными методами для базовых линий, как и для мониторинга в течение выполнения проекта, должны быть непосред-

ственные экспериментальные измерения, а при невозможности получения таких данных — расчетные методы МГЭИК методологии международных, утвержденных стандартов. Дистанционные, в том числе гиперспектральные, оценки запасов углерода и/или выбросов парниковых газов могут применяться при валидации базовых линий и верификации достигнутых результатов проекта для независимого подтверждения измеренных данных, но не должны использоваться в качестве единственного и основного метода оценки количественных показателей в рамках климатических проектов на основе экосистем.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Целью климатических проектов в России должна являться отработка технологий по сокращению выбросов парниковых газов, увеличению поглощения и долговременного сохранения углерода на основе методов устойчивого управления природными экосистемами. Результаты таких экосистемных проектов должны характеризоваться множественными выгодами в области экосистемных услуг территории, биоразнообразия, адаптации к изменениям климата и митигации. Основным требованием допуска к реализации климатических проектов в нашей стране должно стать условие не навредить местным природным экосистемам. Правила должны предусматривать постепенное стимулирование амбициозности проектной деятельности за счет сокращения кредитного периода, увеличения консервативности базовых линий и строгих правил установления дополнительной.

Таким образом, при формировании российского углеродного рынка необходимо создать условия для выполнения надежных, прозрачных климатических проектов, обеспечивающих генерацию качественных углеродных единиц, выгодно сопоставимых с международным уровнем. К основным принципам стандарта ГОСТ-ИСО-14064-2 (актуальность, полнота, согласованность, точность, прозрачность, консервативность) в российских стандартах следует добавить следующие:

— надежность полученных результатов. Учитывая, что экосистемные проекты характеризуются высоким уровнем рисков утечек, непостоянства, прекращения финансирования и реверсии, требования для их выполнения и включения в рыночные механизмы включают необходимость гарантии качества и количества достигнутых сокращений выбросов/увеличения поглощения парниковых газов в течение всего срока использования углеродных единиц с возможностью их замены другими единицами в случае непостоянства;

– климатическая значимость результатов экосистемных проектов. Результаты экосистемных проектов должны иметь гарантии по сохранению не менее 100 лет;

– неснижение экосистемных услуг проектного участка. Экосистемные проекты должны сопровождаться целями по недопущению снижения уровня экосистемных услуг данной территории, в том числе по сохранению и увеличению биоразнообразия, а также по сопутствующим выгодам в области адаптации экосистем. При реализации экосистемных проектов в Российской Федерации должно быть запрещено использовать интродуцентные виды растений, генно-модифицированные растения, микрклональное размножение посадочного материала и менее, чем 5 видов местных культур при посадке леса (исключения могут быть для зон северной и средней тайги), а также заменять естественные леса на плантации монокультур;

– национальная валидация и верификация. В силу уникальности российских экосистем и специфики национальной нормативной базы и условий валидация и верификация экосистемных проектов на территории Российской Федерации должна проводиться только с участием российских аккредитованных экспертов.

При формировании российского углеродного рынка следует придерживаться принципа постепенного движения от простого к сложному, разработки национальных методических документов по каждому виду проекта с возможностью периодического их пересмотра и усовершенствования по мере накопления практического опыта применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляев В.И., Варлагин А.В., Дридигер В.К., Курганова И.Н., Орлова Л.В., Орлов С.В., Попов А.И., Романовская А.А., Тойгильдин А.Л., Троц Н.М., Фомин А.А., Хомяков Д.М. Мировая климатическая повестка. Почвозащитное ресурсосберегающее (углеродное) земледелие как стандарт межнациональных и национальных стратегий по сохранению почв и аграрных карбоновых рынков // *Int. Agricultural J.* 2022. Vol. 65. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.55186/25876740-2022-6-1-26>
- Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колтаков А.Ю., Пыжжев А.И. Оценка вклада российских лесов в снижение климатических изменений // *Экономика региона*. 2021. Т. 21. Вып. 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>
- Лескинен П., Линднер М., Веркерк П.Й., Набуурс Г.Я., Ван Брусселен Й., Куликова Е., Хассегава М., Леринк Б. Леса России и изменение климата. Что нам может сказать наука 11. Joensuu, Финляндия: Европейский институт леса, 2020. 136 с. <https://doi.org/10.36333/wsctu11>
- Матвеев С.М., Водолажский А.Н., Мироненко А.В. Подходы и предложения к определению и выполнению расчетной лесосеки в Российской Федерации // *Лесотехнический журн.* 2019. № 3 (35). С. 68–86. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/7>
- МГЭИК, 2006. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Программа национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК / ред. Х.С. Иглестон, Л. Буендиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе. IGES, Япония, 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- Национальный докл. “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. Т. 2. 476 с. <https://cc.voeikovmgo.ru/images/sobytya/2020/03/docclipoch.pdf>
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 гг. М.: Росгидромет, 2022. Т. 1. 468 с. <https://unfccc.int/documents/461970>
- Фоменко Г.А., Романовская А.А., Фоменко М.А., Лошадикин К.А., Климов Е.В., Липка О.Н., Коротков В.Н., Алдошина А.С. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Ч. 1 // *Проблемы региональной экологии*. 2022а. № 2. С. 91–106. <https://doi.org/1024412/1728-323X-2022-2-91-106>
- Фоменко Г.А., Романовская А.А., Фоменко М.А., Лошадикин К.А., Климов Е.В., Липка О.Н., Коротков В.Н., Алдошина А.С. Лесные климатические проекты: возможности и проблемы реализации ESG-подхода. Ч. 2 // *Проблемы региональной экологии*. 2022б. № 3. С. 65–74. <https://doi.org/1024412/1728-323X-2022-3-65-74>
- Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // *Научные тр. ВЭО России*. 2022. Т. 236. № 4. С. 399–426. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Da Cunha T.Q.G., Santos A.C., Novaes E., Hansted A.L.S., Yamaji F.M., Sette Jr C.R. Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers // *Biomass and Bioenergy*. 2021. Vol. 144. P. 105900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>
- De Barros Ferraz S.F., Rodrigues C.B., Garcia L.G., Alvarres C.A., de Paula Lima W. Effects of Eucalyptus plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 453. P. 117571. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571>
- Griscom B.W., Lomax G., Kroeger T., Ellis P.W. We need both natural and energy solutions to stabilize our climate // *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25. № 6. P. 1889–1890. <https://doi.org/10.1111/gcb.14612>
- Guo M. The 3R principles for applying biochar to improve soil health // *Soil Syst.* 2020. Vol. 4. № 1. P. 9. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4010009>
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C

- above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Eds.). Cambridge, UK, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2018. 562 p.
<https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.). Cambridge, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2002a. 3056 p.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Eds.). Cambridge, UK, NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2022b.
<https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Li X.-W., Miao H.-Z. How to Incorporate Blue Carbon into the China Certified Emission Reductions Scheme: Legal and Policy Perspectives // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 10567.
<https://doi.org/10.3390/su141710567>
- Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2020. № 5. P. 661–687.
<https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>

Approaches to Implementing Ecosystem Climate Projects in Russia

A. A. Romanovskaya*

Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

*e-mail: an_roman@igce.ru

Russia is developing a legal framework for the Paris Agreement implementation. In Russian strategic documents, there is no consistency in measures and quantitative indicators to reduce emissions and increase absorption of greenhouse gases. The main focus on forests and other ecosystems through the implementation of climate change mitigation projects also raises questions. The purpose of this paper is to determine the goal and place of these projects within the framework of a national low-carbon policy, and to analyze the opportunities and limitations of such projects in Russia. The main criteria are the additionality, conservative baselines, and minimization of risks (leakage, non-permanence, cessation of project funding, reversion). Ecosystem projects are high-risk compared to industrial projects, while the climate component of project activities occurs only in the long-term preservation of the result. The project's goal in Russia to refine mitigation technologies based on sustainable management of natural ecosystems: the results lead to the multiple benefits including ecosystem services of the territory, biodiversity and adaptation to climate change. Therefore, their attractiveness in the implementation of sustainable development policies of companies and the state is growing. Given the additional nature, projects will not be able to provide a significant quantitative contribution to mitigation, but can provide a tool to achieve that. At the initial stage of the Russian carbon market it is necessary to allow only reliable and transparent projects (reforestation and afforestation with mixed species; improved forest management of managed forests; management of previously unmanaged forests; restoration of wetlands/grassland ecosystems; conservation of soil carbon of agricultural lands; biochar inputs to soils). Projects such as forest conservation from logging and monoculture plantations require a separate regulatory framework to prevent tampering and minimize threats to local natural ecosystems.

Keywords: carbon market, carbon units, Paris Agreement, mitigation, adaptation, climate change, sustainable development

REFERENCES

- Belyaev V.I., Varlagin A.V., Dridiger V.K., Kurganova I.N., Orlova L.V., Orlov S.V., Popov A.I., Romanovskaya A.A., Toigil'din A.L., Trots N.M., Fomin A.A., Homyakov D.M. The global climate agenda. Soil conservation (carbon) farming as a standard of cross-national and national strategies for soil conservation and agrarian carbon markets. *Int. Agri. J.*, 2022, vol. 65, no. 1. (In Russ.).
<https://doi.org/10.55186/25876740-2022-6-1-26>
- Da Cunha T.Q.G., Santos A.C., Novaes E., Hansted A.L.S., Yamaji F.M., Sette Jr C.R. Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass Bioenergy*, 2021, vol. 144, p. 105900.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>
- De Barros Ferraz S.F., Rodrigues C.B., Garcia L.G., Alvarés C.A., de Paula Lima W. Effects of Eucalyptus plan-

- tations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. *For. Ecol. Manag.*, 2019, vol. 453, p. 117571.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571>
- Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A., Loshadkin K.A., Klimov E.V., Lipka O.N., Korotkov V.N., Aldoshina A.S. Forest climate projects: opportunities and challenges of implementing the ESG approach. Part 1. *Prob. Reg. Ecol.*, 2022a, no. 2, pp. 91–106. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/1728-323H-2022-2-91-106>
- Fomenko G.A., Romanovskaya A.A., Fomenko M.A., Loshadkin K.A., Klimov E.V., Lipka O.N., Korotkov V.N., Aldoshina A.S. Forest climate projects: opportunities and challenges of implementing the ESG approach. Part 2. *Prob. Reg. Ecol.*, 2022b, no. 3, pp. 65–74. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/1728-323H-2022-3-65-74>
- Griscom B.W., Lomax G., Kroeger T., Ellis P.W. We need both natural and energy solutions to stabilize our climate. *Glob. Chang. Biol.*, 2019, vol. 25, no. 6, pp. 1889–1890.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14612>
- Guo M. The 3R principles for applying biochar to improve soil health. *Soil Syst.*, 2020, vol. 4, no. 1, 9 p.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems4010009>
- IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T., Eds. UK; NY, USA: CUP, 2018. 562 p.
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B., Eds. UK; NY, USA: CUP, 2022a. 3056 p.
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Malley J., Eds. UK; NY, USA: CUP, 2022b.
- Lesa Rossii i izmeneniya klimata. *Chto nam mozhet skazat' nauka* [Russia's Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us]. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.Ya., van Brusselen J., Kulikova E., Hassegava M., Lerink B., Eds. Joensuu: European forest institute, 2020. 136 p.
- Li X.-W., Miao H.-Z. How to Incorporate Blue Carbon into the China Certified Emission Reductions Scheme: Legal and Policy Perspectives. *Sustain.*, 2022, vol. 14, p. 10567.
<https://doi.org/10.3390/su141710567>
- Matveev S.M., Vodolazhskii A.N., Mironenko A.V. Approaches and Suggestions for Determining and Implementing the Estimated Timber Cut in the Russian Federation. *Lesotekh. Zh.*, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 68–86. (In Russ.).
<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.3/7>
- MGEIK *Rukovodyashchie printsipy natsional'nykh inventarizatsii parnikovyykh gazov. Programma natsional'nykh inventarizatsii parnikovyykh gazov MGEIK* [IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Program]. Igleston H.S., Buendia L., Miva K., Ngara T., Tanabe K., Eds. Japan: IGES, 2006.
- Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel", institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)". Tom 2* [National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructural, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)". Vol. 2]. Edelgeriev R.S.-H., Ed. Moscow: MBA Publ., 2019. 476 p.
- Natsional'nyi doklad o kadastrе antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom, za 1990–2020 gg. Tom 1* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Vol. 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 468 p.
- Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Yu., Karaban R.T. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 2020, no. 5, pp. 661–687.
<https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>
- Shvarts E.A., Ptichnikov A.V. Russia's low-carbon development strategy and the role of forests in its implementation. *Nauch. Tr. VEO Rossii*, 2022, vol. 236, no. 4, pp. 399–426. (In Russ.).
<https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Vaganov E.A., Porfir'ev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Pyzhev A.I. Assessment of the contribution of Russian forests to climate change mitigation. *Ekonom. Reg.*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 1096–1109. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-4-4>

ПРИРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ В НИЗКОУГЛЕРОДНОМ РАЗВИТИИ РОССИИ

УДК 911.8+911.9+630+399.9

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ: НАЦИОНАЛЬНАЯ ПОЛИТИКА И МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИКА

© 2023 г. А. В. Птичников^а, *, Е. А. Шварц^а

^аЦентр ответственного природопользования Института географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: aptichnikov@igras.ru

Поступила в редакцию 04.01.2023 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

В статье анализируются современные международные подходы к использованию природно-климатических решений (ПКР) при декарбонизации и достижении углеродной нейтральности. Сделан вывод о том, что существующее или планируемое к внедрению государственное регулирование в области ПКР явно недостаточно для раскрытия потенциала ПКР в России, как возможного лидера на перспективном новом рынке ближайших десятилетий. Для реализации данного потенциала требуется значительная целенаправленная работа по настройке регулирования и перестройке приоритетов государственного управления лесов – от извлечения древесины из лесов для целей ее переработки к комплексному управлению лесами, включая количественный учет и монетизацию экосистемных услуг по депонированию углерода лесами. Проанализирован целевой показатель повышения поглощений парниковых газов в секторе землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ), представленный в Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (СНУР) на предмет его достижимости на основе мероприятий и проектов, представленных в разделе 3 операционного плана (ОП) СНУР (первая версия). Сделан вывод о том, что проект операционного плана СНУР в части экосистемных решений вызывает большое количество вопросов вследствие его слабого соответствия современным представлениям об экосистемной адаптации и митигации, использованию ПКР и т.д. Эта часть ОП СНУР требует значительной переработки и адаптации к современным требованиям. Также потребуются существенная доработка реализуемого в настоящее время Федерального проекта “Сохранение лесов” и государственной программы “Развитие лесного хозяйства” для их интеграции в СНУР. Первым шагом на этом пути мог бы стать расчет углеродного следа и углеродной дополнителности проводимых лесохозяйственных мероприятий по отношению к базовому сценарию, коррекция мероприятий по восстановлению лесов.

Ключевые слова: декарбонизация, природно-климатические решения, увеличение поглощений парниковых газов, экосистемные проекты

DOI: 10.31857/S2587556623040088, **EDN:** CDGAXS

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является анализ возможностей использования природно-климатических решений для достижения целей Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (СНУР)¹ по повышению поглощения парниковых лесами в секторе ЗИЗЛХ (землепользование, изменения в землепользовании, лесное хозяйство), а также в достижении целей корпоративных стратегий по декарбонизации и углеродной нейтральности в Российской Федерации.

С этой целью мы изучили основные трактовки понятия “природно-климатические решения” (ПКР), проанализировали Российский определяемый на национальном уровне вклад (ОНУВ)², СНУР и Операционный план СНУР, другие законодательные и нормативные акты на предмет возможности реализации ПКР в их полном объеме. Также целью исследования был анализ возможности достижения целевого показателя СНУР по повышению поглощений в секторе ЗИЗЛХ до 1200 млн т CO₂-экв. к 2060 г. (на 665 млн т по сравнению с уровнем 2021 г.), с учетом прогноза изменения баланса лесов, внедрения новых методов оценки поглощений и эмиссий лесами, потенци-

¹ <http://government.ru/news/43708/> (дата обращения 20.11.2022).

² https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/NDC_RF_ru.pdf (дата обращения 16.10.2022).

ала лесоклиматических проектов (с себестоимостью углеродных единиц до 30 долл.).

Ввиду высокой амбициозности целевого показателя СНУР по поглощениям в секторе ЗИЗЛХ были проанализированы потенциальные направления реформирования управления лесами, а также основные барьеры на пути развития лесоклиматических проектов как одного из основных инструментов достижения целевого показателя по поглощениям. Была изучена и готовность бизнеса участвовать в реализации ПКР в новой геополитической ситуации.

Основным методом исследования был метод Gap-анализа при оценке законодательства и расчетно-аналитический метод при прогнозировании потребностей в декарбонизации. Мы исходили из предположения, что для достижения сверхамбициозных целевых показателей СНУР по повышению поглощения в ЗИЗЛХ до 2050 г.¹ требуется максимально задействовать потенциал наземных экосистем по повышению поглощений, аналогично тому, как это планируется, в частности, в Китае (Huang et al., 2022). Очевидно также, что достижение целевых показателей СНУР требует внедрения широкого спектра ПКР, реализуемых в мире (Chen et al., 2022; Green and Keenan, 2022; Lemprière et al., 2013; Moreau et al., 2022; Robertson et al., 2022).

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ

Парижское соглашение 2015 г.³ прямо говорит о возможности использования природных решений для предотвращения роста глобальной температуры. В нем признается важность сохранения и улучшения природных поглотителей и резервуаров парниковых газов. Эти поглотители и резервуары включают леса и океаны, а также другие наземные, прибрежные и морские экосистемы⁴.

Определяемые на национальном уровне вклады (ОНУВ) являются для сторон Парижского соглашения ключевым средством информирования о своих климатических целях и планах². Статистика ОНУВ убедительно свидетельствует о широкой поддержке странами-участниками Парижского соглашения применения природных решений для предотвращения роста глобальной температуры в виде мер по адаптации и смягчения изменения климата (WWF-UK, 2021). К концу 2021 г. стороны Парижского соглашения представили 114 обновленных или пересмотренных ОНУВ, 105 из которых включили в состав мероприятий природные решения. Большинство из них касаются мер по *смягчению последствий*

(*митигации*), однако ряд стран включили их и в планы по *адаптации* (Порфирьев, 2022).

Из 96 ОНУВ, которые включают природные решения для смягчения последствий, 69 определили их количественно в виде целевых показателей, в основном для лесного сектора. Отмечено значительное увеличение подходов, связанных с использованием водно-болотных угодий, мангровых зарослей и океанов. В 51 обновленном ОНУВ упоминались водно-болотные угодья, в 43 – мангровые заросли и в 60 – морские экосистемы. 87 обновленных ОНУВ представляют национальные планы и политику в отношении внедрения природных решений, также в основном для лесного сектора. Очень многие природные решения имеют ссылки на Цели устойчивого развития (ЦУР), Конвенцию о биологическом разнообразии (КБР) или другие глобальные процессы. Число ОНУВ, включающих упоминания о коренных народах и местных общинах, выросло на 88%⁴. Таким образом, природные решения становятся все более важной частью глобальной декарбонизации и повышения устойчивости к изменению климата.

На данный момент отсутствует единое общепринятое толкование термина природные решения (nature based solutions). Пожалуй, наиболее распространенным толкованием является определение МСОП: “Природные решения – это действия по решению социальных проблем посредством защиты, устойчивого управления и восстановления экосистем, приносящие пользу как биоразнообразию, так и благополучию людей”⁵. В данном определении явным образом не упомянута экономическая составляющая, но поскольку природно-климатические проекты позволяют привлечь климатическое финансирование, то следует учитывать и данный аспект (Пыжев, 2022). МСОП также разработал стандарт природных решений – nature based solutions.

С климатической точки зрения особенно важны *природно-климатические решения (nature climate solutions)*, которые позволяют снизить эмиссии и увеличить поглощения парниковых газов природными экосистемами. В 2017 г. группа авторов из одной из крупнейших природоохранных организаций – The Nature Conservancy (TNC) и 15 других организаций опубликовали в Трудах Национальной академии наук США важную статью о ПКР (Griscom et al., 2017). Авторы данной работы рассмотрели и выделили 20 наиболее эффективных ПКР по смягчению последствий изменения климата. Эти меры позволяют защитить, восстановить и улучшить управление лесным хозяйством, сельхозугодьями, лугами и водно-болотными угодьями. В документе дан прогноз о том, что к 2030 г. эти меры могут обеспечить до 37% смягчения последствий изменения климата, необходимого для ограничения потепления до 2°C (рис. 1). Существуют и более консервативные точки зрения на

³ https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 23.11.2022).

⁴ <https://iucn.org/resources/issues-brief/ensuring-effective-nature-based-solutions> (дата обращения 15.11.2022).

⁵ <https://portals.iucn.org/library/node/49070> (дата обращения 04.10.2022).

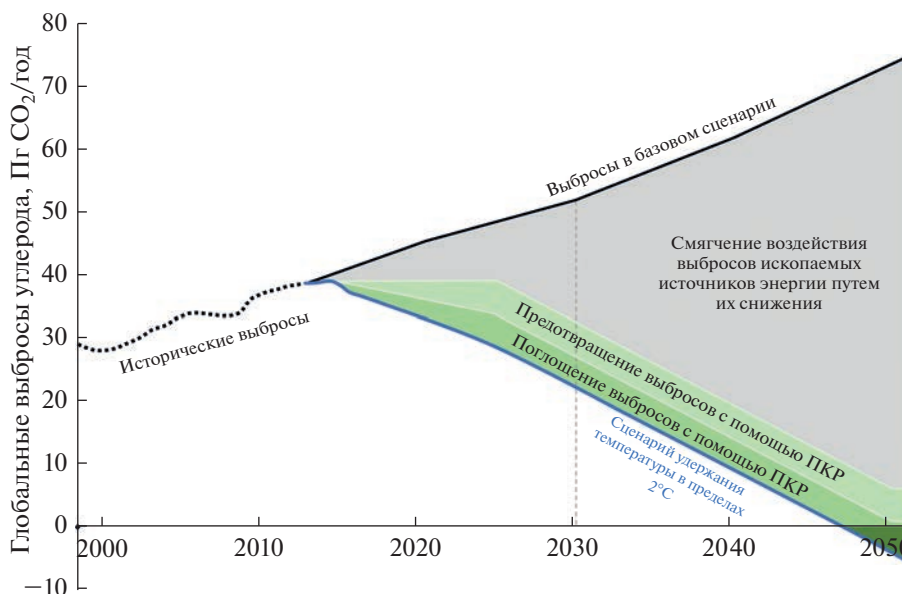


Рис. 1. Потенциальный вклад природно-климатических решений в ограничение глобальной температуры.
Источник: по (Griscom et al., 2017).

возможность использования ПКР, например параметры стандарта Science Based Target Initiative Net Zero corporate⁶ (до 10%), позиция WWF России⁷ — до 20%. Вместе с тем, в СНУР рост поглощений в секторе ЗИЗЛХ должен составить примерно 42% от общего объема декарбонизации в РФ. Таким образом, оценки показателей возможностей декарбонизации с помощью ПКР варьируют в диапазоне 10–42%.

Более того, исследователи пришли к выводу (Griscom et al., 2017), что многие из предложенных ПКР вполне доступны и практичны: примерно одна шестая часть этого смягчения будет стоить не более 10 долл. США, а половина из них будет стоить менее 100 долл. США за т CO₂-экв. Исходя из результатов исследования (Griscom et al., 2017), наибольшим потенциалом обладают ПКР по защитному лесоразведению (afforestation), предупреждение обезлесения (конверсии лесов в другие типы земельных угодий), улучшенное/природное лесопользование (natural forest management), широкое применение биоугля (активированного угля), оптимизация использования удобрений в сельском хозяйстве, обводнение осушенных торфяников (рис. 2). Отметим, что данные ПКР (исключая защитное лесоразведение) включают в себя широкие возможности получения УЕ по низкой стоимости (до 10 долл. за УЕ). Такой подход позволяет выделить наиболее перспективные для внедрения природно-

климатические решения, оценить их потенциал, приступить к их внедрению по принципу — от простых к более сложным решениям и от более дешевых к более дорогим решениям. Это естественная и понятная схема внедрения инноваций, она понятна инвесторам, заинтересованным в декарбонизации и снижении углеродного следа своей продукции с использованием природных решений.

РОЛЬ ПОВЫШЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЙ ЭКОСИСТЕМАМИ В РОССИЙСКОМ ОПРЕДЕЛЯЕМОМ НА НАЦИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ ВКЛАДЕ И СТРАТЕГИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ

Обновленный Российский ОНУВ был представлен в Секретариат РКИК в ноябре 2020 г. и предусматривает сокращение выбросов парниковых газов к 2030 г. до 70% относительно уровня 1990 г. с учетом *максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем* и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации (ОНУВ, 2021).

Согласно Парижскому соглашению об изменении климата, все его стороны должны сформулировать и представить в Рамочную конвенцию ООН по изменению климата (РКИК ООН) к 2020 г. долгосрочные стратегии развития с низким уровнем выбросов парниковых газов. К настоящему времени это условие выполнила 51 страна⁸.

⁶ <https://sciencebasedtargets.org/net-zero> (дата обращения 08.11.2022).

⁷ <https://wwf.ru/about/positions/lesoklimaticheskie-proekty> (дата обращения 11.10.2022).

⁸ <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies> (дата обращения 16.10.2022).

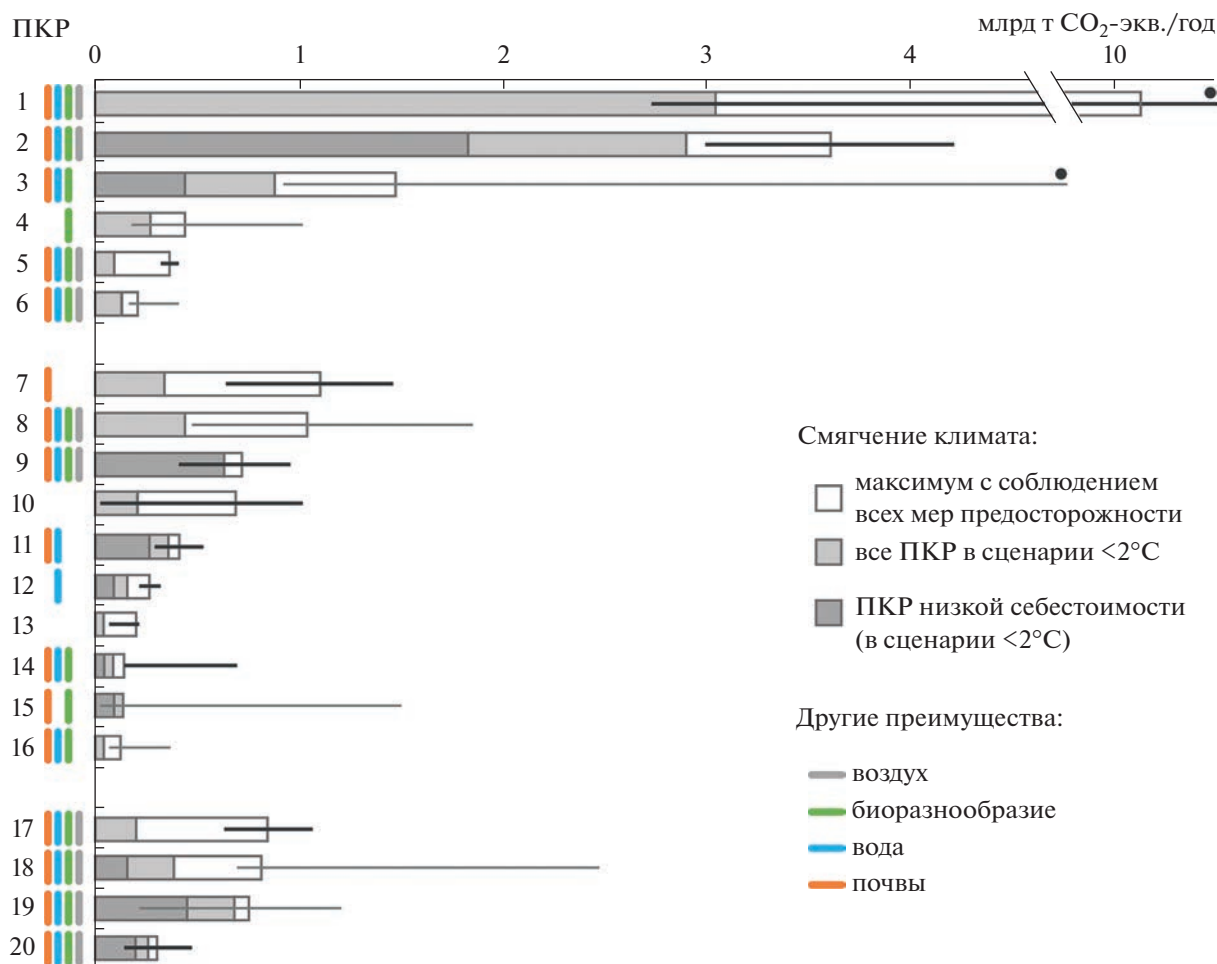


Рис. 2. Глобальный потенциал двадцати ведущих природных решений по смягчению изменения климата: 1 – лесовосстановление, 2 – предотвращение преобразования лесов, 3 – естественное управление лесами, 4 – улучшенные плантации, 5 – предотвращение использования древесного топлива, 6 – управление пожарами, 7 – биоуголь, 8 – деревья на пашнях, 9 – управление питательными веществами, 10 – выпас с улучшенной кормовой базой, 11 – ресурсосберегающее сельское хозяйство, 12 – улучшенный рис, 13 – выпас с управлением животными, 14 – выпас с оптимальной интенсивностью, 15 – выпас с бобовыми культурами, 16 – предотвращение преобразования лугов, 17 – восстановление берегов, 18 – восстановление торфяников, 19 – предотвращение воздействия торфяников, 20 – предотвращение воздействия на берега.

Источник: по (Griskom et al., 2017).

29 октября 2021 г. Правительство РФ одобрило Стратегию социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. В СНУР заложены инерционный и целевой сценарии развития. Инерционный сценарий не приводит к углеродной нейтральности на горизонте планирования, поэтому за основу был взят целевой сценарий, который гарантирует достижение углеродной нейтральности к 2060 г. В нем в качестве ключевой задачи обозначено обеспечение конкурентоспособности и устойчивого экономического роста России в условиях глобального энергоперехода. Исполнение целевого сценария потребует инвестиций в снижение выбросов парниковых газов в объеме около 1% ВВП в 2022–2030 гг. и до 1.5–2% ВВП в 2031–2050 гг. Процесс декарбонизации включает меры под-

держки внедрения, тиражирования и масштабирования низко- и безуглеродных технологий, стимулирование использования вторичных энергоресурсов, изменения налоговой, таможенной и бюджетной политики, развитие зеленого финансирования, сохранение и *увеличение поглощающей способности лесов и иных экосистем*, поддержку технологий улавливания, использования и утилизации парниковых газов (Bashmakov et al., 2022). В рамках целевого сценария станет возможным рост экономики при уменьшении выбросов парниковых газов: к 2050 г. их чистая эмиссия снизится на 60% от уровня 2019 г. и на 80% от уровня 1990 г. Вместе с тем, поглощение экосистемами должно вырасти с 535 млн т CO₂-экв. до 1200 млн т CO₂-экв. в 2050 г. Следование этому

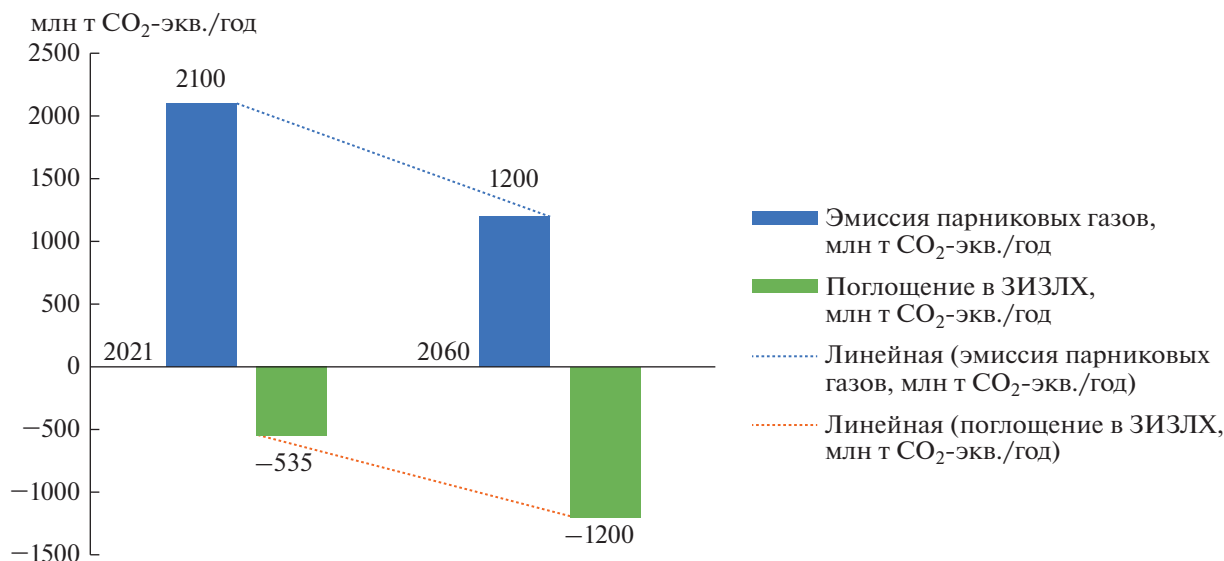


Рис. 3. Баланс парниковых газов в РФ в 2021 г. (слева) и в 2060 г. (справа, в целевом сценарии СНУР).
 Источник: (Шварц, Птичников, 2022).

сценарию позволит России достичь углеродной нейтральности к 2060 г.

Углеродная нейтральность означает, что к 2060 г. выбросы парниковых газов (ПГ) в размере примерно 1200 млн т будут уравновешены поглощением экосистемами в этом же объеме (рис. 3). При этом объем эмиссий в 2060 г. может быть и выше 1200 млн т CO₂ в том случае, если будут широко использоваться технологии закачки и хранения ПГ в подземных пластах (CCUS технологии).

Леса являются основным источником поглощений парниковых газов в российском секторе ЗИЗЛХ, обеспечивая поглощение в размере 621 млн т CO₂-экв. в год⁹. Согласно Национальному кадастру парниковых газов, основными источниками эмиссий парниковых газов в лесах России являются рубки и лесные пожары¹⁰. В последние 10–15 лет горимость российских лесов растет [рис. 4 и (Лупян и др., 2017)], несмотря на увеличение государственного финансирования и все предпринимаемые меры по улучшению профилактики, выявления и тушения пожаров [рис. 5, (Шварц, Птичников, 2022)]. Уменьшение площади лесных пожаров в России зафиксировано только в 2022 г. — однако для расчета горимости обычно используют 10-летний период, поэтому

⁹ <http://meteo.ru/events/102-raznoe/908-natsionalnyj-doklad-o-kadastre-antropogennykh-vybrosov-iz-istochnikov-i-absorbtsii-poglotitelyami-parnikovyykh-gazov> (дата обращения 15.11.2022).

¹⁰ https://rosleshoz.gov.ru/+data/DOCS/%D0%98%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%B8_%D1%81%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0_2022_%D0%BF%D0%BE_%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D1%8E_%D0%BD%D0%B0_15_11.pdf (дата обращения 20.12.2022).

оценивать эффективность предпринимаемых мер следует в более длинном временном интервале, чем один год.

В то же время серьезную управленческую проблему, в том числе в плане отчетности Российской Федерации в UNFCCC, представляет собой оценка пожарных эмиссий, поскольку данные Рослесхоза по доле погибших от пожаров древостоев в европейской и азиатской частях России в 2017–2021 гг., а также по соотношению площадей верховых пожаров и гибели древостоев в Европейской и азиатской частях России по данным за 2021 г. позволяют предполагать существенное занижение пожарных эмиссий углерода, по крайней мере — в лесах азиатской части страны¹¹, также как до 2014 г. различались данные отраслевой отчетности по форме 7-ОИП и спутникового мониторинга ведомственной системы спутникового мониторинга ИСДМ-Рослесхоз (Шварц, Птичников, 2022). При оценке возможности увеличения нетто-поглощения за счет перехода от информации, базирующейся на данных государственного лесного реестра (ГЛР), как правило, упускается из виду тот факт, что ГЛР существенно занижает оценку площадей лесов, пройденных пожарами, а значит, и лесопожарных эмиссий. ГЛР оперирует понятием “гари”, а не “площади, пройденные пожарами”, в то время как лесопожарные эмиссии формируются в результате всех площадных пожаров (Барталев, Стыценко, 2021; Замолотчиков и др., 2014). ГЛР учитывает только площади гарей (возникают в результате верховых

¹¹ Презентация А.А. Романовской, В.Н. Короткова и Д.Д. Сорокиной, ИГКЭ, на заседании Научного совета РАН по лесу (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, апрель 2022 г.).

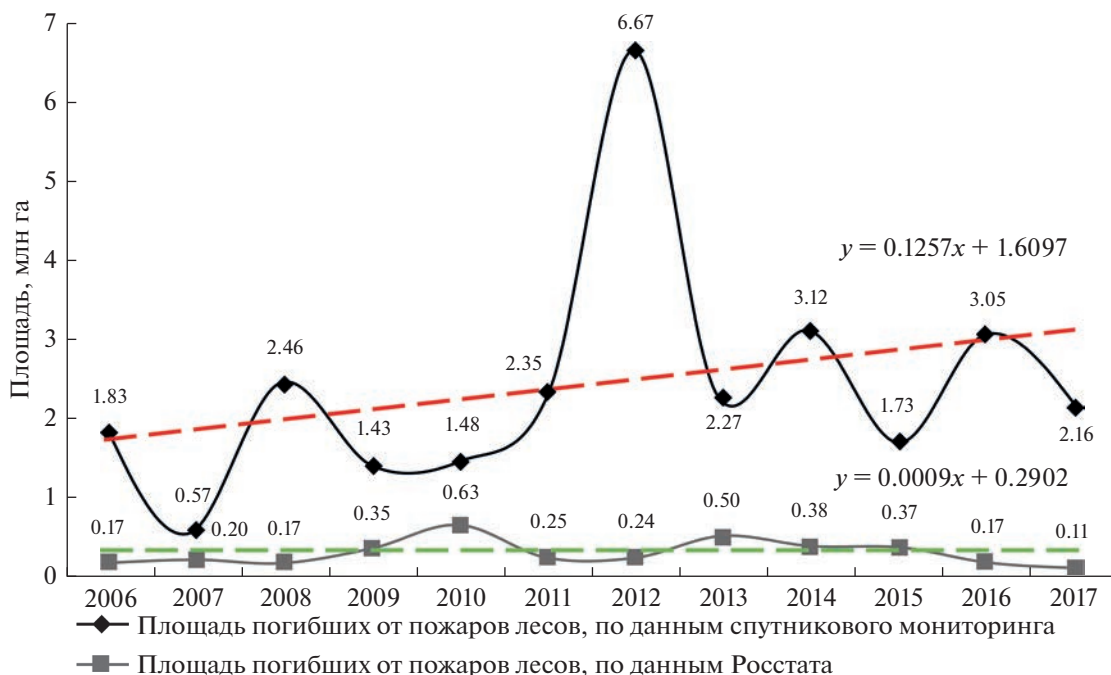


Рис. 4. Площадь лесов, погибших от пожаров в России в 2006–2017 гг., по информации Росстата и данным ДЗЗ. *Источник:* (Лупян и др., 2017).

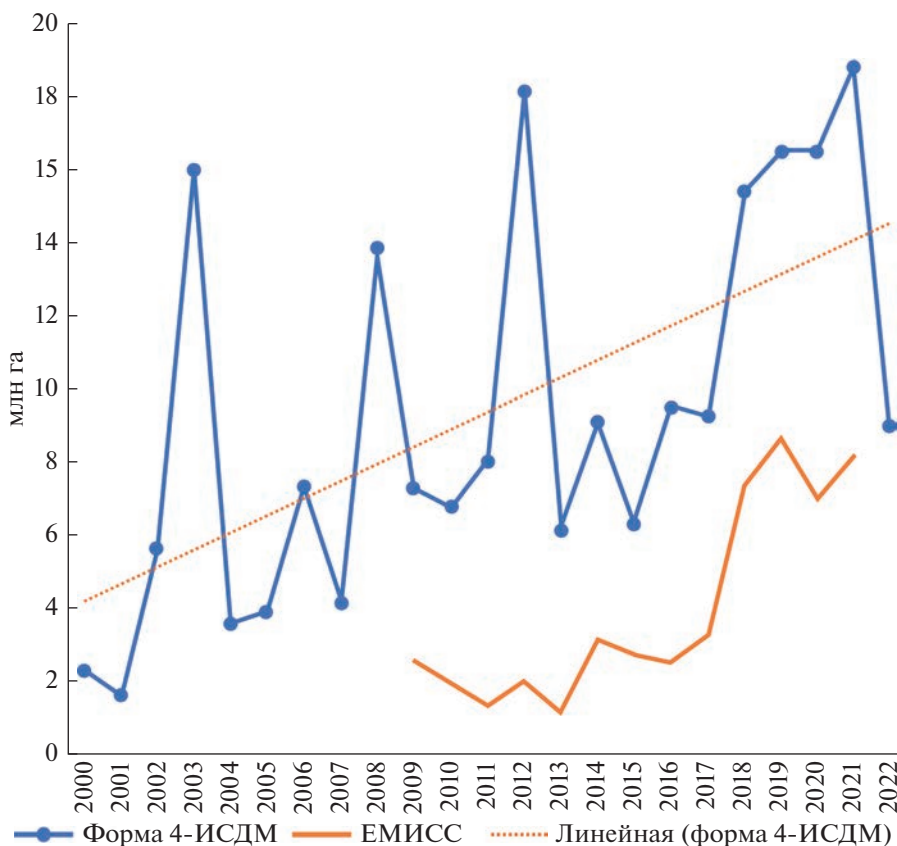


Рис. 5. Динамика площади лесных пожаров в России по данным ИСДМ-Рослесхоз и Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС). *Источник:* (Шварц, Птичников, 2022; с дополнением по данным формы 4-ИСДМ за 2022 г.).

пожаров и низовых пожаров высокой интенсивности), в реальной же практике до 70–90% площадей, пройденных пожарами, являются результатами низовых пожаров слабой и средней интенсивности — без образования гарей. В то же время группой исследователей из Института космических исследований РАН недавно было показано, что вероятность гибели лесов (5-й класс СКС) имеется даже для пожаров с достаточно низкой интенсивностью горения ($FRPS \approx 10$), поэтому при оценках гибели лесов от пожаров с учетом их интенсивности нельзя пользоваться пороговыми методами, в которых утверждается, что до какого-то значения интенсивности практически не происходит гибели лесов (Лупян и др., 2022).

За 2010–2020 гг. в результате реализации лесоклиматических проектов в РФ удалось добиться повышения поглощений не более, чем на 350–400 тыс. т CO_2 -экв. в год¹². В этой связи планируемое СНУР повышение поглощения экосистемами на 665 млн т CO_2 -экв. к 2050 г. является совершенно беспрецедентным для Российской Федерации, так как потребует реализации масштабных мероприятий по адаптации лесов к изменениям климата и собственно климатических проектов в сравнительно сжатые, по меркам управления лесами, сроки. Это потребует от органов управления лесами огромных усилий, включая достижение устойчивого перелома тренда последних 10–15 лет на увеличение горимости лесов. В работе (Порфирьев и др., 2022) отмечается, что: (1) без роста поглощающей способности российских экосистем достижение российской экономикой углеродной нейтральности даже в отдаленной перспективе вряд ли будет возможным; (2) нужно уделить особое внимание оценке указанного потенциала в секторе ЗИЗЛХ. Фактически речь идет о формировании долгосрочного междисциплинарного масштабного научного проекта (мегапроекта), активными участниками которого должны стать специалисты разных областей науки и техники.

МОЖНО ЛИ ДОСТИЧЬ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ПРИ СОХРАНЕНИИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СТАТУС-КВО В УПРАВЛЕНИИ ЛЕСАМИ (ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО, ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ И Т.П.)?

В целевом сценарии СНУР¹³ предусмотрены следующие меры по повышению поглощения лесами (адаптировано авторами):

1) совершенствование практик управления лесами;

¹²<https://wwf.ru/resources/news/lesa/oao-terneyles-i-wwf-ros-sii-sokhranyaya-tsennyye-lesa-sokhranyaem-klimat-planety/> (дата обращения 15.11.2022); <http://www.carbonunitsregistry.ru/eng-reports-pso.htm> (дата обращения 11.10.2022).

¹³<http://government.ru/news/43708/> (дата обращения 20.11.2022).

2) проведение исследований для получения новых научных знаний о лесах;

3) мероприятия по оценке и изучению потенциала увеличения поглощения парниковых газов лесами в РФ;

4) увеличение площади управляемых лесов;

5) создание новых технологий, направленных на сокращение выбросов и увеличение поглощения парниковых газов в лесах и иных экосистемах;

6) дополнительные меры по лесовосстановлению и лесоразведению, охране лесов от пожаров, защите лесов от вредных организмов;

7) комплексные проекты по уходу за лесом;

8) сокращение потерь углерода при заготовке древесины и при изменении практик лесопользования, воспроизводства, охраны и защиты лесов¹.

В СНУР отмечено, что в технологиях лесовосстановления монокультуры постепенно заменяются смешанными лесами с более высокими характеристиками поглощений, растут затраты на охрану лесов в целях повышения эффективности борьбы с лесными пожарами, а также наращивается потенциал авиационных сил по борьбе с лесными пожарами и другими стихийными бедствиями.

Обращает на себя отсутствие в СНУР полного перечня применимых природных решений в лесных экосистемах, наподобие списка ПКР на рис. 1. Отсутствует отнесение природных решений к мероприятиям по смягчению и адаптации (Порфирьев, 2022). Известно, что мероприятия по смягчению могут быть реализованы через “монетизируемые” климатические проекты, с привлечением дополнительного климатического финансирования из частных источников. Мероприятия по адаптации в основном реализуются с помощью бюджетного, в том числе “зеленого”, финансирования, не подлежат “монетизации” и приводят к увеличению нагрузки на бюджет. Также отсутствует количественная оценка потенциала различных допустимых видов природных решений, в том числе — их привязка к стоимости углеродных единиц. По мнению авторов, предложенная в СНУР величина повышения поглощений в 665 млн т CO_2 -экв. не имеет привязки к количественным мерам по адаптации или по смягчению, к конкретным природным решениям, к оценке себестоимости сокращений выбросов, поэтому представляет собой скорее желаемый, чем научно-обоснованный показатель. Об этом свидетельствует, в частности, приведенный ниже анализ операционного плана СНУР.

ПРОЕКТ ОПЕРАЦИОННОГО ПЛАНА СНУР

Проект Операционного плана реализации Стратегии низкоуглеродного развития (СНУР) — это относительно конкретный план достижения

целей Стратегии в привязке к основным секторам народного хозяйства и климатическим мероприятиям. Первая версия операционного плана СНУР (ОП СНУР) обсуждалась в начале 2022 г. на совещаниях в РСПП, ТПП, Ассоциации “Деловая Россия” и является публично доступной¹⁴. По информации авторов, последующие версии ОП СНУР не были публично доступными, при этом и сроки подготовки операционного плана были сдвинуты с 2022 на 2023 г. Применительно к цели СНУР по увеличению поглощений парниковых газов в секторе ЗИЗЛХ первая версия ОП СНУР, с одной стороны, конкретизирует некоторые меры СНУР, но с другой стороны, ставит еще больше вопросов, чем текст СНУР в части поглощения ПГ лесами. Приведем несколько примеров.

В разделе 3 ОП СНУР “Увеличение поглощающей способности ЗИЗЛХ и климатические проекты” упомянуты климатические проекты (п. 3.1.2) и мероприятия (п. 3.2). Можно предположить, что разработчики операционного плана хотели таким образом обозначить в документе меры по адаптации (мероприятие) и смягчению (климатический проект), однако такое разделение не основано на использовании терминологии РКИК или Парижского соглашения, его будет трудно обосновать при подаче документа в РКИК.

В ОП СНУР в разделе 3.2.1 приведены некоторые количественные ориентиры по повышению поглощений/снижению эмиссий. В табл. 1 представлены ожидаемые результаты по материалам ОП СНУР и данным независимых научных исследований и оценок.

Сравнение ожидаемых результатов и показателей проекта ОП СНУР и данных независимых исследований приводит нас к следующим выводам:

1) перечень мероприятий ОП СНУР в разделе 3 имеет только частичное совпадение с перечнем природно-климатических мер в международном понимании (см. рис. 1);

2) ключевым параметром для повышения поглощения парниковых газов является углеродная дополнительность, т.е. разница в поглощении ПГ между базовым и улучшенными сценариями управления экосистемами. Величина достигнутой углеродной дополнительности во многом, но не полностью, определяет прогресс в повышении поглощений ПГ в секторе ЗИЗЛХ. Многие из перечисленных в табл. 2 мероприятий ОП СНУР имеют выраженную традиционную лесохозяйственную направленность на выращивание деловой древесины хвойных пород, однако не позволяют обеспечить углеродную дополнительность при их реализации и не имеют сколько-нибудь

существенного значения для повышения поглощения лесными и иными экосистемами;

3) вместе с тем, многие известные в мировой практике природные решения с доказанной углеродной дополнительностью, например климатические проекты по добровольному сохранению лесов, обводнению обсохших торфяников не включены в качестве мероприятий ОП СНУР, вероятно потому, что не позволяют использовать такие проекты для замещения бюджетного финансирования традиционного лесного хозяйства. Данные ПКР не вписываются в сложившуюся систему лесного хозяйства, ориентированную на получение древесины хвойных пород, однако отлично вписываются в климатическую парадигму декарбонизации с помощью ПКР, так как позволяют максимизировать экосистемные услуги лесов по депонированию углерода¹⁵. К сожалению, сопротивление новой парадигме ведения лесного хозяйства и соответствующим климатическим инновациям вместо их интеграции в систему управления лесами является типичным для органов управления лесами (Королева, Якушева, 2020). Однако Парижское соглашение, СНУР однозначно определяют важность задействования в декарбонизации всего потенциала ПКР, включая нетрадиционные для лесного хозяйства проекты по добровольному сохранению и восстановлению экосистем, на которые приходится до 60% всего потенциала митигации (Girardin et al., 2021). В этой связи включение таких ПКР в ОП СНУР является принципиально важным. По нашему мнению, без этих эффективных и сравнительно недорогих ПКР будет невозможно достигнуть целевого показателя СНУР по повышению поглощения в секторе ЗИЗЛХ на 665 млн т;

4) мы считаем, что в ОП СНУР нельзя приравнять площади лесовосстановления (на лесопокрываемых землях) и площадь новых лесов. С климатической точки зрения новые леса — это леса, формирующиеся на ранее безлесных или малолесных землях, где раньше лесов не было, или было мало. Для новых лесов возможно рассчитать углеродную дополнительность, в то время как для площади лесовосстановления в общем случае (без замены хвойных на лиственные породы) она, как правило, отсутствует;

5) уточнение объема накопления углерода в подстилке и почвах имеет косвенное отношение к достижению целевого показателя СНУР по повышению поглощения ПГ в экосистемах, так как накопление углерода в подстилке, а особенно в почве, слабо изменяется от ведения хозяйственной деятельности, а именно улучшенный сцена-

¹⁴<https://deloros.ru/proekt-plana-realizacii-strategii-socialno-ekonomicheskogo-razvitiya-rf-s-nizkim-urovнем-vybrosov-parnikovyh-gazov-do-2050-goda.html> (дата обращения 27.07.2022).

¹⁵Осушенные торфяники могут располагаться как на землях лесного фонда, так и на сельскохозяйственных землях и землях водного фонда.

Таблица 1. Предлагаемые основные мероприятия по увеличению поглощающей способности (экосистем), согласно п. 3.2.1 проекта ОП СНУР “Меры по увеличению поглощений в секторе ЗИЗЛХ”

Предлагаемые мероприятия ОП СНУР	Ожидаемый результат и показатель в ОП СНУР	Данные независимых научных исследований и оценок
П. 3.2.1.1.2 Актуализация пересчетных коэффициентов изменения запасов углерода, в пулах живой и мертвой биомассы, подстилки	Уточнение объема накопления углерода в пулах подстилки и почвы (<i>возможно увеличение поглощения углерода лесами на 35–250 млн т CO₂/год</i>)	Уточнение объема накопления углерода в подстилке и почвах имеет косвенное отношение к процессу повышения поглощения ПГ в экосистемах, т.к. эти показатели слабо изменяются от ведения хозяйственной деятельности (не ведет к углеродной дополнительнойности)
П. 3.2.1.1.4 Разработка и совершенствование методов и технологических решений, направленных на сокращение выбросов парниковых газов в результате гибели лесов от пожаров и других неблагоприятных факторов и увеличению накопления углерода в лесах	Потенциал поглощения углерода лесами увеличен <i>на 100–150 млн т CO₂-экв.</i>	Ожидаемый уровень увеличения поглощения лесами в результате использования улучшенных данных по поглощению лесами и лесопожарным эмиссиям – в районе 70 млн т (Птичников и др., 2022; Loupian et al., 2022)
П. 3.2.1.2 Проведение агролесомелиоративных и фитомелиоративных мероприятий на (сельскохозяйственных) землях, подверженных эрозии и опустыниванию	Агролесомелиоративные и фитомелиоративные мероприятия проведены. Целевая площадь реконструкции и создания новых лесных полос на землях с/х назначения – 100 тыс. га. <i>Увеличен объем поглощения парниковых газов на 120 млн т CO₂-экв.</i>	50–60 млн т, включая реализацию мероприятий по защитному лесоразведению на безлесных/малолесных землях лесного фонда (Птичников и др., 2022)
П. 3.2.1.2 Защита лесов от вредителей (ликвидация очагов вредных насекомых)	Сокращение площади очагов вредных насекомых на 1 млн га/год	Отсутствуют расчеты сценариев углеродной дополнительнойности для данной категории мероприятий
П. 3.2.1.2 Охрана лесов от пожаров	Сокращение площадей лесных пожаров на 0.5 млн га/год. Средняя площадь лесных пожаров в России за 5 лет – 8.6 млн га	90–100 млн т CO ₂ -экв. (для всех арендованных лесов при условии снижения горимости на 60% в пределах себестоимости 30 долл. за УЕ). При учете площадей лесных пожаров следует использовать данные ИСДМ Рослесхоз, в которой даются иные площади лесных пожаров
П. 3.2.1.2 Увеличена площадь лесов России	К 31.12.2024 г. на 5 млн га (нарастающим итогом). <i>Увеличен объем поглощения на 62.5 млн т CO₂ к 2025 г.</i>	Проекты по лесовосстановлению в пределах лесопокрытой площади не могут считаться увеличением площади лесов с точки зрения климатических требований, соответственно углеродной дополнительнойности не возникает. Согласно Национальному кадастру ПГ (Национальный доклад, 2021) ежегодно в РФ проводится защитное лесоразведение на площади не более 10 тыс. га/год, что не может привести к такому увеличению площади лесов России

Таблица 1. Окончание

Предлагаемые мероприятия ОП СНУР	Ожидаемый результат и показатель в ОП СНУР	Данные независимых научных исследований и оценок
П. 3.2.1.2 Увеличена площадь лесовосстановления	Увеличена площадь лесовосстановления и лесоразведения на землях лесного фонда на 6929 тыс. га нарастающим итогом начиная с 01.01.2019 г. (с начала реализации программы “Сохранение лесов”)	Проекты по лесовосстановлению в основном не дают углеродной дополнительной, за исключением случая использования широколиственных культур в лесовосстановлении вместо хвойных и ряда специфических ситуаций. Однако ОП СНУР не дает никаких ориентиров в этом направлении
П. 3.2.1.2 Проведение мероприятий по интенсификации использования и воспроизводства лесов	Изменение технологии рубки и переход к новым моделям заготовки древесины	Переход к интенсификации может дать сравнительно небольшой эффект с точки зрения дополнительной из-за большого объема выноса биомассы и увеличения эмиссий ПГ при проведении активных хозяйственных мероприятий в лесу

Таблица 2. Сравнение версий законопроекта «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и ст. 9 Федерального закона “Об ограничении выбросов парниковых газов”»

Формулировка ст. 22.1 Лесного кодекса при внесении на рассмотрение от Минприроды РФ	Доработанная формулировка ст. 22.1 Лесного кодекса после проведения публичного обсуждения
К климатическим проектам в области лесных отношений принадлежат климатические проекты, предусматривающие осуществление работ по охране, защите, воспроизводству лесов, лесоразведению, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов	В защитных, эксплуатационных и резервных лесах с учетом ограничений, предусмотренных настоящим кодексом, могут осуществляться мероприятия, обеспечивающие сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов, в том числе мероприятия по сохранению лесов, реализуемые в рамках климатических проектов в области лесных отношений

Примечание. Текст законопроекта приводится по <https://regulation.gov.ru/projects#npa=126948> (дата обращения 19.12.2022).

рий хозяйственной деятельности и приводит к повышению поглощений ПГ;

б) исходя из вышеперечисленного, остаются существенные вопросы к достаточности предложенных в первой версии ОП СНУР мероприятий в части достижения целевого показателя увеличения поглощения экосистемами в размере 665 млн т CO₂-экв. в год к 2060 г.

Отдельным вопросом является нахождение оптимальных площадок для реализации природно-климатических решений. По мнению авторов, оптимальными площадками для реализации многих видов ПКР являются леса, переданные в аренду для заготовки древесины, ввиду наличия у арендаторов квалифицированного персонала, коммуникаций, необходимой техники. По какой-то причине ОП СНУР в значительной степе-

ни ориентирует реализацию климатических проектов на резервные леса. Об этом свидетельствует один из ключевых показателей раздела 3.1.2 “Климатические проекты”: “Созданы правовые условия для обеспечения охвата резервных лесов на территории Российской Федерации климатическими проектами в области лесных отношений (в % от площади всех резервных лесов), который к 2030 г. должен составить 100%”. Возможно, этот показатель исходит из определенного понимания базовой линии в неуправляемых (резервных) лесах, которая присутствует в методологиях МГЭИК¹⁶. Согласно этому пониманию, базовая линия в неуправляемых лесах равна нулю. Однако в методологиях климатических проектов, например про-

¹⁶<https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (дата обращения 11.11.2022).

ектов по снижению горимости лесов, базовая линия считается как среднесезонная горимость лесов с учетом преобладающих классов погод в конкретный год. В этой связи при реализации лесопожарных климатических проектов в резервных лесах нельзя рассчитывать на признание базовой горимости равной нулю, следовательно, ставка на широкое развитие в них климатических проектов является необоснованной. Кроме того, себестоимость углеродных единиц любых климатических проектов в резервных лесах будет существенно выше, чем в арендованных. На это указывает, в частности, исследование А.А. Романовской и В.Н. Короткова¹⁷ по затратам на реализацию климатического проекта по лесовосстановлению в резервных лесах на гарях.

По нашему мнению, реализация климатических проектов должна начинаться с относительно простых проектов в *арендованных*, а не резервных лесах. Приоритетом могут стать проекты с наименьшей себестоимостью углеродных единиц. Управление климатическим проектом может происходить на основе партнерства компаний-инвесторов с арендаторами с использованием технических возможностей последних. Только после отработки различных методик в арендованных лесах имеет смысл переносить их в резервные леса – на основе предварительной оценки себестоимости углеродных единиц.

По нашему мнению, перечисленные несоответствия ожидаемых показателей СНУР с данными независимых исследований говорят о необходимости дальнейшей масштабной доработки раздела 3 ОП СНУР в части экосистемных/природных климатических решений. В противном случае нельзя ожидать достижения целевого показателя СНУР по повышению поглощений в ЗИЗЛХ на 665 млн т CO₂-экв.

ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ В ОБЛАСТИ ЛЕСНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Весной 2022 г. Минприроды России инициировало внесение изменений в Лесной кодекс РФ и ст. 9 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов” для поддержки реализации климатических проектов в области лесных отношений (лесоклиматических проектов). Основным барьером для их осуществления стали затруднения с переходом лесных углеродных единиц из собственности государства в собственность инициатора/инвестора проекта. Текст документа изменений в Лесной кодекс РФ представлен на сайте

¹⁷http://rbf-ras.ru/wp-content/uploads/2021/03/AD_20210304_Romanovskaya.pdf (дата обращения 10.09.2022).

обсуждений нормативно-правовых актов regulation.gov.ru.

Основные критические замечания при обсуждении законопроекта со стороны бизнеса были связаны с тем, что Минприроды России изначально предложило отнести к климатическим проектам в области лесных отношений только те, которые предусматривают осуществление работ по охране, защите, воспроизводству лесов, лесоразведению, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения (см. табл. 2).

Это противоречит международной практике, согласно которой до 60% углеродных единиц могут дать проекты по сохранению и восстановлению экосистем и не больше 40% – проекты по улучшению управления экосистемами (Girardin et al., 2021). Однако перед представлением законопроекта в Правительстве РФ и в Федеральном собрании (осень 2022 г.) в него были внесены важные дополнения, в частности включено прямое упоминание о реализации мероприятий по сохранению лесов, что соответствует тексту Парижского соглашения. Это позволяет намного полнее раскрыть потенциал лесных экосистем. Тем не менее в действующей версии изменений в Лесной кодекс остаются вопросы с признанием мероприятий по восстановлению экосистем, например обсохших торфяников, которые не являются источниками пожарной опасности и не могут быть оформлены как противопожарные мероприятия.

КАКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕОБХОДИМЫ В ВЕДЕНИИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА СТРАНЫ?

Для того чтобы реализовать потенциал снижения эмиссий и повышения поглощения в лесах России в соответствии с целевым показателем СНУР, требуется масштабная работа по трансформации и модернизации ведения лесного хозяйства. Выше мы показали, что основой для достижения целевого показателя СНУР по поглощениям не может быть изменение методики расчета баланса ПГ в лесах. Требуется реализация широко-масштабных природно-климатических проектов в соответствии с требованиями МГЭИК/Парижского соглашения к таким проектам, финансируемых частными инвесторами, и реализация программы адаптации лесов к изменениям климата, финансируемой из средств государственного бюджета в рамках Федерального проекта “Сохранение лесов” Национального проекта “Экология” (до 31.12.2024 г.) и Госпрограммы “Развитие лесного хозяйства” (до 2030 г.)”. В настоящее время имеются определенные барьеры на пути задействования всего потенциала ПКР для декарбонизации. К их числу отно-

сится (в части покрытых лесом земель различных категорий):

1) все еще суженная номенклатура ПКР в последних дополнениях к Лесному кодексу по сравнению с международной номенклатурой проектов;

2) суженная номенклатура зеленых лесоклиматических проектов в Постановлении Правительства РФ от 21 сентября 2021 г. № 1587 “Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации” (раздел 7.2 “Реализация лесоклиматических проектов”);

3) отсутствие важных стимулов к реализации ПКР на арендованных землях лесного фонда, например в виде скидок к арендной плате, льготного налогообложения и т.д.;

4) отсутствие достаточных стимулов к реализации ПКР в резервных лесах, неарендованных лесах, лесах на землях сельскохозяйственного назначения, городских лесах и т.д.

Органам исполнительной власти необходимо уменьшить существующие барьеры и открыть зеленый свет природно-климатическим проектам путем создания стимулов их реализации. Это особенно важно в ситуации, когда лесная промышленность находится в глубоком кризисе в связи с введенными Европейским Союзом санкциями.

Вместе с тем, требуется привязка реализуемых сейчас государственных лесохозяйственных программ и проектов к целям СНУР. Считаем, что в климатическом смысле они фактически представляют собой проекты по адаптации лесов к изменениям климата (за некоторым исключением). Экономисты отмечают необходимость существенного повышения роли адаптации к климатическим изменениям в системе стратегического планирования (Порфирьев, 2022), и в случае лесного хозяйства это является наиболее очевидным и заметным просчетом и упущением. В этой связи крайне важно оценить климатический эффект таких программ и проектов для их введения в рамки ОП СНУР. Мы предлагаем провести квалифицированный расчет по балансу углерода по всем лесохозяйственным мероприятиям Федерального проекта “Сохранение лесов” Национального проекта “Экология” (до 31.12.2024 г.) и Госпрограммы “Развитие лесного хозяйства” (до 2030 г.) и включить в Федеральный проект “Сохранение лесов” и Госпрограмму “Развитие лесного хозяйства” соответствующие показатели. Это позволит оценить, как углеродный след лесохозяйственных мероприятий, так и кратко- и среднесрочный эффект этих мероприятий с точки зрения повышения поглощения в лесах, понять реальный вклад лесного хозяйства в декарбонизацию страны.

В настоящее время в паспорте Федерального проекта “Сохранение лесов” в качестве показателя “базовой линии” (2020 г.) указаны 600 млн т поглощений, показатель на 2024 г. — 610 млн т, на 2030 г. — 620 млн т, т.е. увеличение поглощений на 20 млн т за 10 лет, или примерно 0.33% в год. Если расчеты в паспорте проекта верны, то вклад финансируемых государством программ в повышении поглощений составит к 2050 г. немалым более 60 млн т CO₂-экв., что представляется явно недостаточным (менее 10%) по сравнению с целевым показателем СНУР по повышению поглощения экосистемами на 665 млн т CO₂.

В отчете по выполнению Национального проекта “Экология” за 2 квартал 2022 г. исполнение за 2021 г. немного более значительное — 629.6 млн т, но уже даже на 2022 г. никакие показатели не были запланированы (факт — прочерк, прогноз — 0). Складывается впечатление, что ключевые национальные лесохозяйственные проекты и программы, реализуемые в основном на бюджетные средства, не привязаны к целевым показателям декарбонизации страны или эта привязка имеет чисто формальный характер.

Другим примером является существующая практика лесовосстановления гарей на неарендованных землях лесного фонда. Обычной практикой является проведение лесовосстановления на гарях с использованием хвойных саженцев. По мнению представителей лесного хозяйства, такая подготовка повышает привлекательность лесного фонда при потенциально возможной передаче в аренду в будущем. Однако хвойные культуры поглощают меньше углерода, чем лиственные, и являются более пожароопасными. В климатических целях более эффективно проведение лесовосстановления лиственными породами, например путем содействия лесовосстановлению. Это обеспечит снижение пожароопасности и повысит поглощение углерода, даст необходимую углеродную дополнительную, особенно в случае, если посадка хвойных культур является общераспространенной практикой в регионе (Шварц, Птичников, 2022).

В целом крайне актуальной является задача отказа от унифицированного управления как арендованными в лесопромышленных целях лесами (менее 25% лесов), так и неарендованными лесами (более 75% лесов), выполняющими экологические, природоохранные, рекреационные и резервные функции. Это потребует глубокого реформирования современного лесного хозяйства, ориентированного на устаревшие представления и экономические приоритеты выращивания сосновых и еловых монокультур для нужд лесной промышленности, главным образом — для лесопиления.

ПОЗИЦИЯ РОССИЙСКОГО БИЗНЕСА ОТНОСИТЕЛЬНО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПКР И ТРЕБОВАНИЯ СТАНДАРТОВ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ

Дискуссия о роли лесов в достижении углеродной нейтральности России развернулась после принятия СНУР в октябре 2021 г. в процессе обсуждения первого варианта ОП СНУР, а также поправок к Лесному кодексу РФ для реализации климатических проектов. Обсуждения прошли, в частности, на площадках Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) и Российского климатического партнерства (РКП) в конце 2021 и в 2022 г. (Птичников и др., 2023). В ходе обсуждения, в том числе после 24 февраля 2022 г., ведущие компании из различных секторов российской экономики подтвердили, что природно-климатические проекты могут стать одним из инструментов декарбонизации бизнеса в России. Международные стандарты декарбонизации, например SBTi Corporate Net Zero, BSI PAS 2060, прямо предусматривают возможность декарбонизации компаний, снижения углеродного следа производимой ими продукции за счет ПКР. Снижение углеродного следа продукции является предметом конкуренции на рынках сбыта, в том числе и в странах Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Наличие реализуемых стратегий декарбонизации, в том числе с использованием офсетных ПКР, является значимым плюсом при расчете ESG рейтингов, которые также востребованы в АТР. Кроме того, ПКР в целом в 1.5–3 раза дешевле технологических опций декарбонизации. Именно эти обстоятельства побуждают бизнес продолжать курс на зеленое развитие с использованием ПКР.

Часть бизнес-сообщества считает, что для запуска рынка углеродных единиц в России необходимо создать подходящие условия, стимулирующие компании инвестировать в климатические проекты, а также решить ряд существующих проблем в отношении их регулирования. Более двадцати ведущих российских компаний проявляют заинтересованность в продолжении этой работы в текущей ситуации, главным образом в рамках реализации собственных стратегий декарбонизации. Однако также они говорят о необходимости уточнения нормативно-методологической базы реализации климатических проектов и получения поддержки от государства¹⁸.

Стратегии декарбонизации крупного экспортно-ориентированного бизнеса в РФ, как правило, строятся на основе требований международных ассоциаций бизнеса в области устойчивого развития (World Business Council for Sustainable Devel-

opment – WBCSD и др.) и глобальных отраслевых объединений (например, International Council on Mining and Metals – ICMM) в области раскрытия климатической информации, ESG критериев и рейтингов, принятых международных стандартов и требований (например, CDP).

Рассмотрим требования популярного стандарта декарбонизации организации Science Based Target initiative (SBTi), партнерами которой являются такие известные организации, как CDP, UN Global compact, World Resource Institute (WRI) и WWF. Стандартами SBTi пользуются свыше 3950 компаний SBTi, а стандартом Corporate Net Zero standard (ver. 1.0)¹⁹ 1480 компаний в различных странах мира (SBTi v 1.0, 2021). Стандарт предусматривает следующий типовой график декарбонизации (рис. 6).

Как видно из типового графика реализации требований стандарта SBTi, компаниям предлагается активно использовать ПКР не только в конце периода декарбонизации для нейтрализации остаточных эмиссий, но и в рамках ближайших целей, в том числе *за пределами цепочек добавленной стоимости* компаний, иными словами, даже за пределами традиционной зоны ответственности компании (от месторождения до готовой продукции). Таким образом ведущие стандарты декарбонизации стимулируют бизнес активно развивать природно-климатические решения как в пределах традиционных географических регионов ответственности компаний, так и за их пределами.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИНИЦИАТИВ В ОБЛАСТИ ПКР

В 2021 г. большое количество компаний проявляло интерес к теме декарбонизации с помощью ПКР. Основным драйвером этого процесса служило, с одной стороны, трансграничное углеродное регулирование, запланированное Европейским Союзом (Шварц и др., 2022; Overland and Sabyrbekov, 2022; Zhong and Pei, 2022), с другой стороны – зарождающаяся конкуренция на рынках зеленой и низкоуглеродной продукции. В 2022 г. ситуация с поставками товаров на рынок ЕС кардинально изменилась. Компании были вынуждены переориентировать свой экспорт на рынки стран АТР, стран Африки и Латинской Америки, СНГ. Однако и в странах АТР требования к углеродному следу поставляемой продукции являются достаточно серьезными, о чем свидетельствуют специально проведенные исследования КЕРТ (бывший КПМГ-Россия)²⁰ и Сбера,

¹⁹<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard.pdf> (дата обращения 14.11.2022).

²⁰<https://drive.google.com/file/d/187xmaVRTf6uObLEHCX-00VryECeFByZj/view> (дата обращения 04.10.2022).

¹⁸<https://delret.ru/research/klimaticheskie-proekty-riski-i-vozmozhnosti-dlya-biznesa> (дата обращения 18.11.2022).

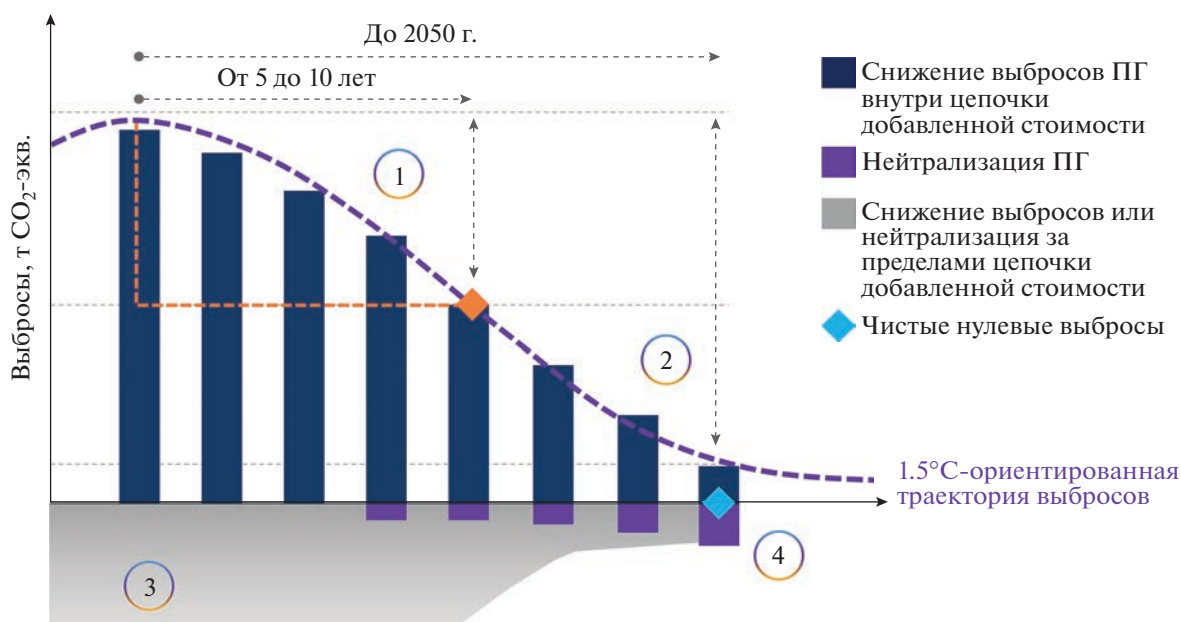


Рис. 6. Типовой график декарбонизации для компаний, планирующих достичь углеродной нейтральности, согласно SBTi Corporate Net Zero standard (ver. 1.0). *Примечание:* 1 — Ближайшие цели определяют, как организации будут сокращать свои выбросы в течение следующих 5–10 лет (конец этапа обозначен оранжевым ромбом). Ближайшие цели также являются необходимым условием для компаний, желающих установить цели нулевого уровня выбросов. 2 — Долгосрочные цели указывают на степень сокращения выбросов, которую организациям необходимо достичь, чтобы достичь нулевого нетто-показателя в соответствии с критериями стандарта. Эти цели должны быть достигнуты не позднее 2050 г. (или 2040 г. для энергетики). Долгосрочные цели разрабатываются компаниями, желающими установить нулевые цели в соответствии с Корпоративным стандартом Net-Zero. 3 — Цели за пределами цепочки создания стоимости. SBTi рекомендует компаниям делать инвестиции, выходящие за рамки их научно обоснованных целей, чтобы помочь смягчить последствия изменения климата в других местах. Существует настоятельная необходимость в расширении краткосрочного финансирования борьбы с изменением климата; однако эти инвестиции должны осуществляться в дополнение к глубокому сокращению выбросов, а не вместо них. 4 — Нейтрализация остаточных эмиссий. Остаточные эмиссии, снизить которые невозможно или очень дорого организациям необходимо достичь, чтобы достичь нулевого нетто-показателя в соответствии с критериями стандарта. Эти цели должны быть достигнуты не позднее 2050 г. (или 2040 г. для энергетики). Долгосрочные цели разрабатываются компаниями, желающими установить нулевые цели в соответствии с Корпоративным стандартом Net-Zero. 3 — Цели за пределами цепочки создания стоимости. SBTi рекомендует компаниям делать инвестиции, выходящие за рамки их научно обоснованных целей, чтобы помочь смягчить последствия изменения климата в других местах. Существует настоятельная необходимость в расширении краткосрочного финансирования борьбы с изменением климата; однако эти инвестиции должны осуществляться в дополнение к глубокому сокращению выбросов, а не вместо них. 4 — Нейтрализация остаточных эмиссий. Остаточные эмиссии, снизить которые невозможно или очень дорого организациям необходимо достичь, чтобы достичь нулевого нетто-показателя в соответствии с критериями стандарта. Эти цели должны быть достигнуты не позднее 2050 г. (или 2040 г. для энергетики). Долгосрочные цели разрабатываются компаниями, желающими установить нулевые цели в соответствии с Корпоративным стандартом Net-Zero.

Источник: по (<https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard.pdf>).

выполненные по заказу Национального ESG-Альянса²¹, что стимулирует российские компании-экспортеры продолжать инициативы по реализации ПКР.

Среди компаний, начавших пилотные проекты, следует отметить СИБУР, En+/РУСАЛ, Фосагро и ряд других. Ряд компаний заявил о своем интересе к реализации таких проектов, включая Газпромнефть, Уралхим и ряд других. Сдерживающим фактором при реализации таких проектов является отставание в развитии нормативно-правовой базы природно-климатических проектов. В условиях приостановки своей деятельности в РФ международных систем сертификации, таких как Verra и Gold Standard, усиливается значение проблемы с отсутствием аналогичных методологий ПКР в национальном реестре климатических проектов. Имеются и иные проблемы, связанные с отсутствием опыта в разработке проектной документации и климатических моделей проектов,

²¹<https://sber.pro/special/esg-vostochniy-express> (дата обращения 14.10.2022).

информирования, обучения специалистов по вопросам ПКР.

Огромный потенциал природных экосистем России, наличие существенных проблем в области регулирования и явный дефицит специалистов в области ПКР, вызывают необходимость разработки специальной стратегии развития отрасли природно-климатических решений в РФ на основе лучшей независимой экспертизы, в тесном взаимодействии с отраслевыми специалистами и бизнесом.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Россия обладает возможно самым большим в глобальном масштабе потенциалом природно-климатических решений, способным при условии целенаправленной реализации удовлетворить не только потребности страны в рамках

СНУР, но и, возможно, обеспечить экспорт углеродных единиц ПКР для других стран.

2. Существующее и планируемое к внедрению государственное регулирование в области ПКР явно недостаточно для раскрытия потенциала ПКР в России как одного из потенциальных лидеров на перспективном новом мировом рынке ближайших десятилетий.

3. Предстоит огромная работа по настройке регулирования и перестройке приоритетов и инструментария государственного управления лесами – требуется переход от “извлечения древесины” из экстенсивно эксплуатируемых лесов для целей ее переработки к действительно комплексному управлению лесами, включая монетизацию экосистемных услуг по депонированию углерода лесами.

4. Запланированный целевой показатель СНУР по увеличению поглощения экосистемами на 665 млн т CO₂-экв. к 2050 г., по нашему мнению, не основан на точном и научно-обоснованном расчете, а скорее выражает желание государства отдать приоритет в декарбонизации экономики России так называемому экосистемному направлению (42% декарбонизации). Следует отметить, что это намерение не увязано с ограничениями, имеющимися в ведущих стандартах декарбонизации, например в стандарте SBTi Net Zero (до 10% декарбонизации), что, соответственно, может снижать мотивацию бизнеса инвестировать в природно-климатические проекты.

5. Проект Операционного плана СНУР в части экосистемных решений вызывает большое количество вопросов вследствие его слабого соответствия современным представлениям об экосистемной адаптации и митигации (сокращениям) рисков, использованию ПКР и т.д. Эта часть проекта ОП СНУР требует значительной переработки и адаптации к современным требованиям.

6. Предложенное в СНУР масштабное повышение поглощений экосистемами (+665 млн т CO₂ к 2050 г.) требует не косметической настройки существующего управления лесами, а скорее пересмотра приоритетов и практики использования лесов в целом. В настоящее время абсолютным приоритетом является использование лесов для заготовки древесины и выработки из нее лесобумажной продукции. Для достижения, указанного в целевом сценарии СНУР уровня поглощения ПГ природными экосистемами требуется не только кардинально снизить горимость лесов, но и существенно снизить уровень сплошных рубок лесов, широко запустить реализацию программы адаптации лесов к изменению климата и собственными климатическими проектами, включая проекты по предотвращению вырубок лесов (в первую очередь – первичных малонарушенных лесов),

обводнению обсохших торфяников и другие проекты.

7. Достижение целей СНУР по повышению поглощения невозможно без задействования полного спектра природных решений. Существующие в настоящее время стимулы явно недостаточны для реализации этого потенциала.

8. Требуется существенная доработка реализуемого в настоящее время Федерального проекта “Сохранение лесов” и государственной программы “Развитие лесного хозяйства до 2030 г.” для их интеграции с ОП СНУР. Первым шагом на этом пути может стать расчет углеродного следа и углеродной дополнительной проводимых лесохозяйственных мероприятий по отношению к базовому сценарию и соответствующая коррекция мероприятий по восстановлению лесов.

9. Переориентация российского экспорта на рынки стран АТР не сильно влияет на фундаментальные факторы спроса на развитие природно-климатических решений в РФ. В этой связи необходимо развитие стратегии природно-климатических решений и соответствующих проектов на базе независимой профессиональной экспертизы при одновременном тесном взаимодействии с отраслевыми специалистами и бизнесом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН ААААА19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS ААААА19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Стыценок Ф.В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденных огнем площадей // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122.
- Замолодчиков Д., Грабовский В., Куриц В.* Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. № 2 (29). С. 23–31.
- Королева Т.С., Якушева Т.В.* Исследование практики внедрения инноваций в лесном хозяйстве Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. № 3. С. 73–86.
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.73>
- Лурия Е.А. и др.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.

2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
- Луян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени поврежденной лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232>
- Порфирьев Б.Н. Декарбонизация vs. адаптация экономики к климатическим изменениям в стратегии устойчивого развития // Проблемы прогнозирования. 2022. № 4 (193). С. 45–54.
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-193-45-54>
- Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А. Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопросы экономики. 2022. № 1. С. 72–89.
<https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-72-89>
- Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Вестн. РАН. 2023. Т. 93 № 1. С. 48–61.
- Пыжжев А.И. Лесная промышленность регионов Сибири и Дальнего Востока: перспективы развития лесоклиматического сектора // Проблемы прогнозирования. 2022. № 4 (193). С. 68–77.
<https://doi.org/10.47711/0868-6351-193-68-77>
- Шварц Е.А., Кокорин А.О., Птичников А.В., Кренке А.Н. Трансграничное углеродное регулирование и леса России: от ожиданий и мифов к реализации интересов // Экономическая политика. 2022. Т. 17. № 5. С. 54–77.
<https://doi.org/10.18288/1994-5124-2022-5-54-77>
- Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. № 4. С. 399–426.
<https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Bashmakov I., Bashmakov V., Borisov K., Dzedzichek M., Lunin A., Govor I. Russia's carbon neutrality: pathways to 2060. М.: Center for energy efficiency, 2022. 152 p.
- Chen Z., Dayananda B., Fu B., Li Z., Jia Z., Hu Y., Cao J., Liu Y., Xie L., Chen Y. et al. Research on the Potential of Forestry's Carbon-Neutral Contribution in China from 2021 to 2060 // Sustainability. 2022. Vol. 14. № 9. 5444.
<https://doi.org/10.3390/su14095444>
- Girardin C.A.J., Jenkins S., Seddon N. et al. Nature-based solutions can help cool the planet – if we act now // Nature. 2021. Vol. 593. P. 191–194.
<https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>
- Green J.K., Keenan T.F. The limits of forest carbon sequestration // Science. 2022. Vol. 376. № 6594.
<https://doi.org/10.1126/science.abo6547>
- Griscom B.W., Adams J., Ellis P.W. et al. Natural climate solutions // Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). 2017. Vol. 114. № 44. P. 11645–11650.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Yao H., Sun W., Qin Z., Zhang W., Yu Y., Li T., Zhang Q., Wang G., Yu L., Wang Y., Ding F., Zhang P. The role of China's terrestrial carbon sequestration 2010–2060 in offsetting energy-related CO2 emissions // National Sci. Review. 2022. Vol. 9. № 8. nwac057.
<https://doi.org/10.1093/nsr/nwac057>
- Lemprière T.C., Kurz W.A., Hogg E.H., Schmolle C., Rampley G.J., Yemshanov D., McKenney D.W., Gilson R., Beatch A., Blain D., Bhatti J.S., Krčmar E. Canadian boreal forests and climate change mitigation // Environ. 2013. Vol. 21. № 4. P. 293–321.
<https://doi.org/10.1139/er-2013-0039>
- Moreau L., Thiffault E., Cyr D., Boulanger Y., Beaugregard R. How can the forest sector mitigate climate change in a changing climate? Case studies of boreal and northern temperate forests in eastern Canada // Forest Ecosystems. 2022. Vol. 9. № 100026.
<https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100026>
- NDCs – A Force for Nature? Nature in Enhanced NDCs. WWF-UK. 4th Edition. 2021. 66 p.
- Overland I., Sabyrbekov R. Know your opponent: Which countries might fight the European carbon border adjustment mechanism? // Energy Policy. 2022. Vol. 169. № 113175.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113175>
- Robertson G.P., Hamilton S.K., Paustian K., Smith P. Land-based climate solutions for the United States // Global Change Biology. 2022. № 28. P. 4912–4919.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16267>
- Zhong J., Pei J. Beggar thy neighbor? On the competitiveness and welfare impacts of the EU's proposed carbon border adjustment mechanism // Energy Policy. 2022. Vol. 162. № 112802.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112802>

Decarbonization through Nature's Solutions: National Policy and International Practice

A. V. Ptichnikov¹, * and E. A. Shvarts¹

¹Center for Responsible Use of Natural Resources, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: aptichnikov@igras.ru

The article gives an idea of the modern international approach to use of natural and climatic solutions (NCS) for decarbonization and achieving carbon neutrality. It is concluded that the existing or planned implementation of state regulation in the field of NCS is clearly not enough to unlock the potential of NCS in Russia as a possible leader in the promising new market for the next decades. To realize this potential, significant focused work required to fine-tune the regulation and re-prioritization of public forest management, from extracting wood from forests for processing purposes to monetizing ecosystem services for forest carbon seques-

tration. The target for increasing greenhouse gas removals in land use, land use change and forestry presented in the Strategy for Low Greenhouse Gas Emissions Socioeconomic Development until 2050 was analyzed for its achievability based on the activities and projects presented in section 3 of the Strategy operational plan (first version). It is concluded that the Strategy operational plan in terms of ecosystem solutions raises a lot of questions due to its poor compliance with modern ideas about ecosystem adaptation and mitigation, the use of NCS, etc. This part of the Strategy operational plan requires significant revision and adaptation to modern requirements. It will also require a significant refinement of the currently implemented Federal Project *Forest Conservation* and the state program *Forestry Development* for their integration into the Strategy. The first step along this path could be the calculation of the carbon footprint and carbon additionality of forestry activities carried out in relation to the baseline scenario, and the correction of forest restoration activities.

Keywords: decarbonization, natural and climate solutions, increase in greenhouse gas absorption, ecosystem projects

REFERENCES

- Bartalev S.A., Stytsenko F.V. An Assessment of the Forest Stands Destruction by Fires Based on the Remote Sensing Data on a Seasonal Distribution of Burnt Areas. *Lesoved.*, 2021, no. 2, pp. 115–122. (In Russ.).
- Bashmakov I., Bashmakov V., Borisov K., Dzedzichuk M., Lunin A., Govor I. *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*. Moscow: Center for energy efficiency, 2022.
- Chen Z., Dayananda B., Fu B., Li Z., Jia Z., Hu Y., Cao J., Liu Y., Xie L., Chen Y., Wu Sh. Research on the Potential of Forestry's Carbon-Neutral Contribution in China from 2021 to 2060. *Sustain.*, 2022, vol. 14, iss. 9, no. 5444. <https://doi.org/10.3390/su14095444>
- Girardin C.A.J., Jenkins S., Seddon N., Allen M., Lewis S.L., Wheeler Ch.E., Griscom B.W., Malhi Y. Nature-based solutions can help cool the planet – if we act now. *Nature*, 2021, vol. 593, pp. 191–194. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>
- Green J.K., Keenan T.F. The limits of forest carbon sequestration. *Science*, 2022, vol. 376, no. 6594. <https://doi.org/10.1126/science.abo6547>
- Griscom B.W., Adams J., Ellis P.W., Houghton R.A., Lomax G., Miteva D.A., Schlesinger W.H., Shoch D., Siikamäki J.V., Smith P., Woodbury P., Zganjar Ch., Blackman A., Campari J., Conant R.T., Delgado Ch., Elias P., Gopalakrishna T., Hamsik M.R., Herrero M., Kiesecker J., Landis E., Laestadius L., Leavitt S.M., Minnemeyer S., Polasky S., Potapov P., Putz F.E., Sanderman J., Silvius M., Wollenberg E., Fargione J. Natural climate solutions. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2017, vol. 114, no. 44, pp. 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Koroleva T.S., Yakusheva T.V. Study of introducing practice innovations in the forestry of the Russian Federation. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2020, no. 3, pp. 73–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.3.73>
- Lemprière T.C., Kurz W.A., Hogg E.H., Schmoll C., Rampley G.J., Yemshanov D., McKenney D.W., Gilenan R., Beatch A., Blain D., Bhatti J.S., Krcmar E. Canadian boreal forests and climate change mitigation. *Environ. Rev.*, 2013, vol. 21, no. 4, pp. 293–321. <http://doi.org/10.1139/er-2013-0039>
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Sen'ko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G. Satellite monitoring of forest fires in the 21st century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on the detection of active combustion). *Sovr. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosm.*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 158–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
- Lupyan E.A., Lozin D.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data. *Sovr. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosm.*, 2022, vol. 19, no. 3, pp. 217–232. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232>
- Moreau L., Thiffault E., Cyr D., Boulanger Y., Beaugregard R. How can the forest sector mitigate climate change in a changing climate? Case studies of boreal and northern temperate forests in eastern Canada. *For. Ecosyst.*, 2022, vol. 9, no. 100026. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100026>
- NDCs – A Force for Nature? *Nature in Enhanced NDCs*. UK: WWF, 2021.
- Overland I., Sabyrbekov R. Know your opponent: Which countries might fight the European carbon border adjustment mechanism? *Energy Policy*, 2022, vol. 169, no. 113175. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113175>
- Porfiriev B.N. Decarbonization vs. Adaptation of the Economy to Climate Change within the Sustainable Development Strategy. *Stud. Russ. Econ.*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 385–391. <https://doi.org/10.1134/S1075700722040074>
- Porfiriev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Edinak E.A. Opportunities and risks of climate regulation policy in Russia. *Vopr. Ekonom.*, 2022, no. 1, pp. 72–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-72-89>
- Pyzhev A.I. The Forest Industry of the Regions of Siberia and the Far East: Prospects for the Development of the Forest-Climate Sector. *Stud. Russ. Econ.*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 402–408. <https://doi.org/10.1134/S1075700722040086>
- Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A., Baibar A.S. Strategy of low-carbon development of Russia and the role of forests in its implementation. *Vestn. Ross. Akad. Nauk*, 2023, vol. 93, no. 1, pp. 36–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587323010073>
- Robertson G.P., Hamilton S.K., Paustian K., Smith P. Land-based climate solutions for the United States. *Glob. Change Biol.*, 2022, vol. 28, pp. 4912–4919. <https://doi.org/10.1111/gcb.16267>

- Shvarts E.A., Kokorin A.O., Ptichnikov A.V., Krenke A.N. Cross-Border Carbon Regulation and Forests in Russia: From Expectations and Myth to Realization of Interests. *Econ. Politika*, 2022, vol. 17, no. 5, pp. 54–77. (In Russ.).
- Shvarts E.A., Ptichnikov A.V. Strategy for low-carbon development of Russia and the role of forests in its implementation. *Nauch. Tr. Vol'n. Ekonom. Obshch. Rossii*, 2022, vol. 236, no. 4, pp. 399–426. <https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Yao H., Sun W., Qin Z., Zhang W., Yu Y., Li T., Zhang Q., Wang G., Yu L., Wang Y., Ding F., Zhang P. The role of China's terrestrial carbon sequestration 2010–2060 in offsetting energy-related CO₂ emissions. *Natl. Sci. Rev.*, 2022, vol. 9, iss. 8, nwac057. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac057>
- Zamolodchikov D., Grabovskii V., Kurts V. Forest carbon management in Russia: past, present and future. *Us-toich. Lesopol.*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 23–31. (In Russ.).
- Zhong J., Pei J. Beggar thy neighbor? On the competitiveness and welfare impacts of the EU's proposed carbon border adjustment mechanism. *Energy Policy*, 2022, vol. 162, no. 112802. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.11>

УДК 504.062.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА МЕТОДИК РАСЧЕТА ПОГЛОЩЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. Д. Д. Сорокина^а, *, А. В. Птичников^б, А. А. Романовская^а

^аИнститут глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

^бИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: sorokina.di.dm@gmail.com

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 07.02.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Оценка лесного углеродного баланса имеет большое значение для выстраивания климатической политики Российской Федерации на национальном и международном уровнях. Однако результаты оценок, проводимых различными научными группами, различаются в зависимости от применяемых подходов и методик. Рассматриваются ключевые для Российской Федерации системы оценки углеродного баланса лесных экосистем: интегральная земельная информационная система, ИЗИС (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия), The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, СВМ-CFS (Канада), региональная оценка бюджета углерода лесов, РОБУЛ (Россия), методика Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (Россия). Методики сравнивались относительно их соответствия требованиям МГЭИК. Выявлены индивидуальные особенности методик и их применения, предложены рекомендации по улучшению точности оценок углеродного баланса. Основные ключевые различия, обуславливающие расхождение оценок разных научных групп, следующие: следование рекомендациям МГЭИК, выбор между методами “поступлений–потерь” и “по разности запасов”, подход к вопросу управляемости лесов, способ расчета лесопожарных эмиссий, источники исходных данных и их достоверность. Отмечена важность научной дискуссии и необходимость соответствия методик международным стандартам, подчеркнута проблема неактуальности исходных данных и занижения лесопожарных эмиссий независимо от выбранной методики. В целом, применяемая на настоящий момент методика удовлетворительно оценивает баланс углерода в лесах. Рекомендуется усовершенствование оценок на основе данных дистанционного зондирования Земли и второго цикла государственной инвентаризации лесов (ГИЛ). Осуществление Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. должно обеспечиваться не столько изменениями в способе расчета углеродного баланса, сколько реальными мерами по защите лесов. При этом любая значительная корректировка методологии должна сопровождаться корректировкой национальных климатических целей.

Ключевые слова: бюджет углерода лесов, поглотительная способность экосистем России, Парижское соглашение, изменение климата, парниковые газы

DOI: 10.31857/S2587556623040131, EDN: ZNHULU

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Согласно Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов (ПГ) до 2050 г.¹ леса являются важнейшим элементом декарбонизации и достижения углеродной нейтральности страны. В рамках Стратегии предполагается уве-

личить поглощающую способность управляемых экосистем на 665 млн т – с 535 до 1200 млн т CO₂-экв. С учетом того, что объем выбросов ПГ в РФ составляет 2.1 млрд т, сектор землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) должен нейтрализовать более половины выбросов ПГ к 2050 г. Основной вклад в поглощение углекислого газа приходится на лесные экосистемы.

На данный момент существуют несколько оценок нетто-поглощения ПГ лесами РФ, включая оценки Национального кадастра парниковых газов

¹ Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р “О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года” (дата обращения 24.07.2022).

(Национальный ..., 2022), Международного института прикладного системного анализа (Швиденко, Шепашенко, 2014), Института космических исследований РАН (Барталев и др., 2020), Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, ВНИИЛМ (Малышева и др., 2017) и ряда других. Эти оценки базируются на различных методиках расчета углеродного баланса лесных экосистем и различаются в четыре и более раз.

Знание точного баланса ПГ в лесах имеет большое практическое значение для:

- планирования и реализации стратегии низкоуглеродного развития страны;
- расчета определенного на национальном уровне вклада РФ в выполнение целей Парижского соглашения РККК ООН;
- выстраивания эффективной политики управления лесами с учетом климатических приоритетов;
- составления национального кадастра парниковых газов и формирования национальной системы мониторинга углеродного бюджета лесов.

Таким образом, понимание особенностей применяемых методик расчета углеродного баланса лесных экосистем имеет первостепенное значение. В этой связи объектом нашего исследования являются различия ключевых методик оценки углеродного баланса лесных экосистем, включая интегральную земельную информационную систему, ИЗИС (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия), The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM-CFS (Канада), региональную оценку бюджета углерода лесов, РОБУЛ (Россия), методику Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства (Россия).

На данный момент эксперты РККК ООН одобрили методический подход к оценке поглощающей способности российских лесов на основе методики РОБУЛ/РОБУЛ-М в рамках Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (далее – национальный кадастр). Эта же методика также легла в основу Методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов в РФ², одобренных Минприродой РФ (Кокорин, Луговая, 2018). Тем не менее, на протяжении ряда лет среди специалистов и представителей государствен-

ных органов идет дискуссия о том, какая методика оценки поглощающей способности лесов дает наиболее достоверный результат (Замолотчиков и др., 2014б; Кокорин, Луговая, 2018; Филипчук и др., 2017б), а также о возможности использования той или иной методики в качестве официальной, т.е. отвечающей требованиям Минприроды РФ и руководящим принципам (Руководящие принципы ..., 2006) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Цель исследования – анализ соответствия указанных выше методик руководящим указаниям МГЭИК, выявление индивидуальных особенностей методик. Результаты сравнения могут быть использованы для формирования позиций заинтересованных организаций в части применения методик для проведения оценки поглощающей способности лесных экосистем, формирования национальных и региональных систем мониторинга бюджета углерода в лесах. Понимание различий между методиками может облегчить выбор того или иного методического подхода к реализации природно-климатических проектов.

При проведении сравнительной оценки мы ставили, в первую очередь, следующие задачи:

1. сравнить данные методики с точки зрения их соответствия руководящим указаниям МГЭИК;
2. показать возможность использования оценок поглощения лесами, полученных на основе различных методик, для формирования климатической политики страны, регионов;
3. дать информацию по возможности применения указанных методик при оценке нетто-поглощения в природно-климатических проектах.

В рамках исследования мы постарались показать различия между методиками в части:

- используемых углеродных пулов и фракций в лесных экосистемах;
- выбора между двумя основными подходами МГЭИК к оценке изменения запасов углерода в пулах: методы “поступлений-потерь” или “по разности запасов”;
- используемых источников данных (материалы наземных инвентаризаций, данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) и т.д.), с учетом оценки их достоверности;
- учета управляемых лесов и критериев отнесения лесов к управляемым. Хотя учитываемые площади управляемых лесов не являются характеристикой непосредственно самой методики, этот вопрос определяет, по какой территории будут проводиться расчеты углеродного баланса, что в свою очередь напрямую влияет на итоговые оценки.

² Распоряжение Минприроды России “Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов”: приказ, от 30.06.2017 № 20-р // Справочно-правовая система “Консультант Плюс”. Дата обновления 15.06.2022 (дата обращения 24.07.2022).

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ МГЭИК К ОЦЕНКЕ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА НАЦИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

В соответствии со ст. 4 и 12 РКИК ООН Российская Федерация имеет обязательство отчитываться об углеродном балансе лесных экосистем в рамках ежегодного национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. Национальный кадастр РФ охватывает 5 секторов, отчетность по лесам входит в сектор ЗИЗЛХ. Методология подсчета абсорбции и выбросов CO₂ для составления национальных кадастров определяется руководящими указаниями МГЭИК. На данный момент наиболее важными для отчетности по сектору ЗИЗЛХ являются следующие документы:

- Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (РУЭП-ЗИЗЛХ), 2003 г. (Руководящие указания ..., 2003);
- Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (Руководящие принципы ..., 2006);
- Приложение к руководящим указаниям МГЭИК 2006 г. по водно-болотным угодьям (Supplement ..., 2014);
- Дополнение 2019 г. к Руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. (Refinement ..., 2019).

Вышеупомянутые документы взаимосвязаны между собой и составляют общую систему требований и рекомендаций для оценки выбросов и поглощений, поэтому далее в данной работе они рассматриваются в совокупности как единая методология МГЭИК, без разделения на отдельные доклады.

Подход МГЭИК к оценке углеродного баланса в секторе ЗИЗЛХ основан на нескольких принципах и допущениях:

- Национальные кадастры должны соответствовать эффективной практике — не содержать ни переоценки поглощений, ни недооценки выбросов, а также включать оценку неопределенностей, уменьшенных настолько, насколько это практически возможно.
- Так как прямое измерение потоков углерода в экосистеме трудноосуществимо, предполагается, что итоговый баланс, то есть поток углерода в атмосферу или из нее, равен изменениям в запасах углерода.
- Изменения в запасах зависят от скорости изменений практик землепользования (в лесах это — увеличение или сокращение числа и площади по-

жаров, изменение систем лесопользования, например, темпов и характера рубок и т.д.).

- Непосредственное количество запасенного углерода в пулах не имеет принципиального значения и служит в первую очередь для промежуточных расчетов при оценке баланса. Таким образом, учету и управлению подлежат только потоки (поглощение и выбросы) парниковых газов в экосистемах, в том числе в лесах, то есть важны лишь годовые изменения запасов углерода лесов в сторону увеличения или уменьшения.

- Выбросы парниковых газов в лесных экосистемах могут иметь как антропогенное, так и естественное происхождение. Ввиду того, что целью РКИК ООН и всех связанных с ней документов является ограничение именно антропогенного воздействия на климатическую систему, в национальном кадастре делается фокус только на те потоки, которые могут контролироваться деятельностью человека: можно сокращать выбросы или увеличить поглощение парниковых газов. Естественное поглощение и природные нарушения, происходящие на неуправляемых территориях, не учитываются. Под управляемыми лесами подразумеваются те леса, на которых постоянно или периодически происходит систематическое вмешательство человека, в том числе через осуществление мер, направленных на обеспечение выполнения лесной экосистемой экологических, экономических и социальных функций. При этом термин “управляемость” включает все виды деятельности, включая коммерческую (заготовка древесины) и защитную (противопожарные действия, санитарные рубки), и может трактоваться странами по-разному.

- По умолчанию предполагается, что весь углерод, удаленный из экосистемы вследствие хозяйственной деятельности, полностью выделяется в атмосферу в год удаления. В ином случае выбросы и поглощения CO₂ от изменения запасов углерода в пуле заготавливаемых лесоматериалов оцениваются в отдельной категории.

- МГЭИК требует, чтобы при составлении национальных кадастров для всех расчетов проводился контроль качества и оценка неопределенности. Это позволяет обеспечить максимально возможную добросовестность и точность, учитывая национальные условия и имеющиеся научные знания.

Национальные кадастры всех развитых стран и стран с переходной экономикой (включенных в Приложение 1 к РКИК ООН) ежегодно проходят независимое углубленное рецензирование группой аккредитованных экспертов РКИК ООН. По результатам данного рецензирования публикуются отчеты с замечаниями экспертов, в том числе, по поводу выбора методологий.

Методология МГЭИК подразумевает выбор одного из трех методологических уровней при составлении национального кадастра. От первого к третьему уровню увеличивается точность оценки выбросов и поглощений и сложность расчетов: от простых уравнений и использования коэффициентов по умолчанию до применения современных научных методов, моделей и коэффициентов, определенных на национальном и региональном уровне. Кроме того, третий уровень сложности может потребовать предоставления дополнительной информации, обосновывающей решение о применении отдельных параметров или методик. Такой дифференцированный подход позволяет разным странам осуществлять инвентаризацию парниковых газов в соответствии с уровнем их развития и постепенно совершенствовать точность оценки. Так, Российская Федерация применяет третий, наивысший методологический уровень, обладая подробным лесным реестром и собственными национальными методиками, основанными на региональных экспериментальных исследованиях (Романовская и др., 2018).

МЕТОДИКА СВМ-CFS3 ОЦЕНКИ БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Модель бюджета углерода канадского лесного сектора (The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, СВМ-CFS) является основной методикой для оценки углеродного баланса лесов в Канаде в рамках Национальной системы мониторинга и отчетности углерода в лесах (National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System, NFCMARS)³.

Разработка СВМ-CFS началась как научный проект в 1989 г. В 2002 г. на его основе было решено создать удобный пользовательский инструмент с понятным интерфейсом для расчета поглощений и выбросов в лесном секторе⁴. С 2006 СВМ-CFS используется для предоставления отчетности по парниковым газам в РКИК ООН (Kurz et al., 2016).

В настоящее время опубликована последняя, третья версия модели (СВМ-CFS3). Она представляет собой открытое программное обеспечение со встроенными коэффициентами для разных типов лесов и экологических зон Канады, а также подробное руководство на английском, французском, русском, испанском и польском языках (Kull et al., 2010). СВМ-CFS3 позволяет проводить оценку запасов и баланса углерода на

основе данных пользователя о характеристиках леса и управлении лесным хозяйством, а также моделировать и сравнивать различные сценарии лесопользования.

СВМ-CFS3 соответствует рекомендациям, изложенным в Руководящих указаниях по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства 2003 г. и Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. Полученные с помощью нее данные используются для предоставления Канадой национального кадастра парниковых газов, что подтверждает прохождение экспертизы РКИК ООН (Kurz et al., 2009).

Следует также отметить, что методика СВМ-CFS3 используется не только для отчетности в рамках РКИК ООН Канады, но и для верификации оценок, представленных другими странами. Такие работы были выполнены для российской отчетности – и показали сопоставимые результаты с расчетами по РОБУЛ (Замолодчиков и др., 2014а), и по другим европейским странам (Grassi et al., 2018).

Недостатком методики СВМ-CFS3 для использования в российских условиях является малая сопоставимость собираемых данных по характеристикам лесов в Государственном лесном реестре (ГЛР) с набором требуемых исходных данных для расчета по канадской модели – которые соответствуют особенностям статистики Канады. Именно эта особенность и вынуждает страны разрабатывать собственные методические подходы, чтобы использовать собираемую национальную статистику по лесам максимально точно в национальных кадастрах.

МЕТОДИКА МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА (IIASA)

Одни из первых комплексных оценок баланса углерода российских лесных экосистем были проведены на основе методики, разработанной в Международном институте прикладного системного анализа под руководством А.З. Швиденко и Д.Г. Щепашенко (Лаксенбург, Австрия).

Первые работы оценивали ежегодную поглощающую способность российских лесов за 1961–1998 гг. на уровне 210 ± 30 (Shvidenko and Nilsson, 2002), 268 ± 94 и 272 ± 68 млн т С в год (Shvidenko and Nilsson, 2003). Затем методика была усовершенствована путем применения ландшафтно-экосистемного подхода и современных технологий ДЗЗ. Последние оценки чистого экосистемного углеродного баланса (ЧЭУБ) покрытых лесной растительностью земель России за период 2007–2009 гг. составили 546 ± 120 млн т С в год

³ <https://natural-resources.canada.ca/climate-change/climate-change-impacts-forests/carbon-accounting/13087> (дата обращения 24.07.2022).

⁴ <https://natural-resources.canada.ca/climate-change/climate-change-impacts-forests/carbon-accounting/carbon-budget-model/13107> (дата обращения 24.07.2022).

(Швиденко, Щепашенко, 2014). На основе исследования была составлена карта распределения ЧУЭБ, которая показывает значительное количество земель, являющихся чистыми источниками или поглотителями выбросов.

Оценки, выполненные в ПАСА, не ориентируются на принципы МГЭИК. Так, например, в расчет включаются не только управляемые леса, а все лесные территории России, в том числе возобновившиеся леса на заброшенных сельскохозяйственных землях, и леса, не входящие в лесной фонд: расположенные на землях обороны и леса городских и сельских поселений (Швиденко, Щепашенко, 2014).

Таким образом, методика ПАСА не предназначена для оценок баланса углерода в целях предоставления отчетности. Она является в первую очередь исследовательским инструментом, позволяющим комплексно оценить потоки углерода в наземных экосистемах, в том числе и в лесах.

Ландшафтно-экосистемный подход (ЛЭП), применяемый в последних работах ПАСА, использует метод оценки потоков углерода с некоторыми элементами метода учета изменений запаса. Информационная основа ЛЭП представлена в виде интегральной земельной информационной системы (ИЗИС). ИЗИС включает данные государственной лесной инвентаризации, экспериментальные измерения *in situ*, модели оценки запасов и потоков, тематические карты (почвы, растительности, административных границ, лесохозяйственных предприятий и т.д.), а также разнообразные спутниковые данные (TERRA MODIS, LANDSAT, ENVISAT ASAR и др., всего 12 инструментов с восемью спутников).

Запас углерода определяется по стандартным пулам: 1) живая фитомасса, разделенная на 6 фракций, в том числе подлесок и подрост, 2) мертвая древесина и 3) почва, включая подстилку, которую обычно выносят в отдельный пул, близкий по свойствам к пулу валежной древесины. Расчет происходит с использованием конверсионных коэффициентов из встроенных в ИЗИС баз данных.

При этом к данной методике есть ряд вопросов, которые возникают, прежде всего, из-за ограниченности доступной информации:

- по всей видимости, отсутствует полный учет потерь углерода от разложения подстилки, мелкого опада и мертвых корней, т.к. SHR – гетеротрофное дыхание почв, в которое в российских исследованиях (Mukhortova et al., 2020) включено только дыхание почвы (очищенной от подстилки) за вычетом автотрофного дыхания корней, а фракция DEC согласно описанию включает только “крупные отпавшие древесные остатки”;

- по нашим оценкам, представляется, что скорости разложения крупных древесных остатков занижены: по оценкам ПАСА в среднем разложе-

ние в Европейской части проходит за 40 лет, а в Азиатской – за 69 лет;

- вероятно, потери углерода от гибели лесов от пожаров могут быть несколько занижены: не ясно, почему для воздействия вредителей отдельно учитывали отпад древесины, а для пожаров приняли допущение, что отпад уже включен в оценки крупных древесных остатков на основе “базы данных” по биологической продуктивности лесных насаждений и обобщенных результатов учета сухостоя и валежной древесины по лесным мероприятиям и публикациям в специальной литературе. Эта база данных может учесть только средние запасы валежной древесины от усредненных пожарных нарушений. В таком случае, эффект от крупных пожаров может быть недоучтен.

Все эти факторы могут привести к завышению годового баланса углерода на территории лесов по методике ПАСА и требуют дополнительного рассмотрения.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ОЦЕНКА БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА ЛЕСОВ (РОБУЛ)

В настоящее время для расчета углеродного баланса на российских лесных территориях в рамках национального кадастра применяется методика региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ), разработанная в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)⁵.

Данная система оценки соответствует руководящим принципам и указаниям МГЭИК и с 2011 г. используется для предоставления в секретариат РКИК ООН отчетности по лесному сектору в виде Национальных докладов о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (Национальный ..., 2021). Кроме того, на ней основаны Методические указания Минприроды России 2017 г. по количественному определению объема поглощения парниковых газов⁶. Результаты РОБУЛ также сопоставимы с оценками канадской модели CBM-CFS3 (Замолотчиков и др., 2014а).

Согласно результатам последней инвентаризации, в 2020 г. нетто-поглощение в управляемых лесах Российской Федерации (691.2 млн га) составило 648.9 Мт CO₂ (Национальный ..., 2022).

Источником данных для РОБУЛ являются данные государственного учета лесного фонда

⁵ <http://old.cepl.rssi.ru/regional.htm> (дата обращения 05.10.2022).

⁶ Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 июня 2017 г. № 20-р “О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов” (дата обращения 24.07.2022).

(ГУЛФ) и, с 2007 г., данные государственного лесного реестра (ГЛР), содержащего исходную информацию о лесных площадях и запасах древесины, дифференцированных по породам деревьев, возрастным группам и регионам. Ведение и хранение ГУЛФ и ГЛР в настоящее время осуществляется ФГУП “Рослесинфорг”. Подробное описание методики, в том числе основные уравнения, табличные параметры для региональной оценки и программное обеспечение, представленное в формате Microsoft Excel, размещены в открытом доступе на сайте ЦЭПЛ РАН⁷, а также представлены в главе 6 Национального доклада о кадастре (Национальный ..., 2022).

В первых работах по оценке углеродного баланса разработки методики применяли подход МГЭИК “по разности запасов”. Однако после реформ национальной системы лесопользования, связанных с переходом на ежегодные данные в рамках ГЛР, этот метод перестал давать корректные результаты ввиду межгодовых изменений в общей площади управляемых лесов (Замолотчиков и др., 2011). В таких условиях корректным является применение метода по потокам парниковых газов, который в настоящее время заложен в основу РОБУЛ. Тем не менее, в некоторых работах РОБУЛ все еще характеризуется как методика, использующая подход “по разности запасов” (Филипчук и др., 2017б).

Таким образом, методика РОБУЛ использует метод “баланса потоков”, возможно, в сочетании с некоторыми элементами метода “по разности запасов”. Как отмечалось выше, такой подход может быть эффективным для стран, использующих третий методологический уровень (Newell and Vos, 2012).

В 2018 методика РОБУЛ была усовершенствована. В частности, программное обеспечение было переписано с Excel на Delphi. Самое существенное изменение подхода коснулось подхода к учету поглощения в перестойных насаждениях: в этом классе были выделены дополнительные группы и учтено поглощение. Кроме того, решена проблема с ошибками в агрегировании данных по породам и возрастам: раньше одна порода была представлена несколькими записями с разными интервалами возраста. Также были приняты модернизированные конверсионные коэффициенты. Новая версия методики получила название РОБУЛ-М (Корзухин, Коротков, 2018).

В качестве безусловного достоинства этого методического подхода следует отметить его взаимосвязь с ежегодными данными по характеристикам и состоянию древостоев в рамках ГЛР. По сути, РОБУЛ – это расчетная оболочка для перевода

данных ГЛР в оценки изменений запасов углерода в пулах лесных экосистем.

Недостатки методики РОБУЛ также связаны с особенностями российской статистики и ограничением в детальности данных: вместо классов возраста используются группы возраста, что снижает достоверность оценок. Кроме того, отсутствие в ГЛР данных по бонитету тех или иных насаждений не позволяют учесть этот важный для оценки годового прироста показатель экосистем.

Следует также отметить ограничения в оценках изменений запасов углерода в пулах лесной подстилки и почвы в методике РОБУЛ, которая оперирует средними коэффициентами одновременных потерь углерода в результате нарушений (в том числе рубки, пожары) и его постепенного накопления в течение времени восстановления лесной экосистемы. При отсутствии нарушений запасы углерода подстилки и почвы в лесах приняты равными нулю, что не всегда точно отражает динамику углерода в этих пулах и требует уточнения по эмпирическим данным.

Для оценки расходной части углеродного баланса лесов в национальном кадастре используют подходы по суммарным площадям гарей, которые при делении на время их зарастания (количество лет) позволяют оценить усредненную площадь деструктивных пожаров в данном году. Учитывая, что таким образом потери углерода, по сути, представляют собой усредненные величины за 20–25 лет (в зависимости от скорости зарастания гарей по регионам страны), результаты оценки баланса углерода не демонстрируют синхронизации с крупными пожарными нарушениями, например, 2008 или 2012 гг. (Коротков, Романовская, 2022). Эти оценки требуют детального рассмотрения и усовершенствования на основе данных ДЗЗ.

МЕТОДИКА ВСЕРОССИЙСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЛЕСОВОДСТВА И МЕХАНИЗАЦИИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Методика, разработанная во Всероссийском научно-исследовательском институте лесоводства и механизации лесного хозяйства (ВНИИЛМ), дает значительно большие оценки баланса углерода, чем РОБУЛ (Кокорин, Луговая, 2018; Филипчук и др., 2017б). Первые расчеты были проведены еще в начале 2007–2011 гг. (Моисеев, 2007), но основное обсуждение и сравнение с официальными расчетами поглощения произошло на 2016–2017 гг.⁸ Согласно последним данным, полученным с применением методики ВНИИЛМ ежегодное нетто-поглощение в россий-

⁷ <http://old.cepl.rssi.ru/regional.htm> (дата обращения 24.07.2022).

⁸ Роль лесов в Парижском соглашении ЦЭПЛ РАН (rssi.ru) (дата обращения 24.07.2022).

ских управляемых лесах составляет 615–619 млн т С, или 2 млрд т CO₂ в год (Федоров, 2017). Это в 3–3.5 раза больше, чем оценка по РОБУЛ.

Методика ВНИИЛМ до 2020 г. применялась для составления отчетности РФ для Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) (Мальшева и др., 2017). Разработчики также утверждают, что она разработана в соответствии с международными правовыми документами и соответствует требованиям и рекомендациям МГЭИК, хотя и не проходила соответствующую экспертизу (Филипчук и др., 2017а). Тем не менее, некоторые исследования отмечают, что в методике ВНИИЛМ не соблюдается принцип сохранения массы вещества и что она не может быть верифицирована экспертами МГЭИК для использования в национальной отчетности по парниковым газам (Романовская и др., 2018). Так, по данным авторов допускается одновременно снижение запасов древесины в лесах и увеличение объема ежегодного прироста (Федоров и др., 2011).

Основу методики ВНИИЛМ составляет схожий с РОБУЛ алгоритм: расчет запаса углерода по стандартным пулам (надземная фитомасса, подземная фитомасса, мертвая древесина, лесная подстилка и органическое вещество почвы), годового изменения запасов углерода (Net Ecosystem Production, NEP), потерь углерода и оценки общего баланса (Net Biome Production, NBP). Пересчет запасов стволовой древесины в фитомассу производится с использованием конверсионных коэффициентов для основных древесных пород и групп возраста в зависимости от лесорастительного районирования⁹.

Подробное руководство по методике ВНИИЛМ, включающее используемые коэффициенты и полный список уравнений, в открытом доступе не опубликовано, однако в статьях по ней приводятся ссылки на применяемые уравнения Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК для сектора ЗИЗЛХ (Мальшева и др., 2017).

Таким образом, методика ВНИИЛМ в отношении оценки изменения запасов использует первый метод, рекомендованный МГЭИК по умолчанию, т.е. метод поступлений-потерь (gain-loss method). Кроме того, эта методика ориентируется на большее время осреднения поглощения, рассчитывая среднее поглощение за время жизни древостоя (Кокорин, Луговая, 2018), что, в свою очередь, противоречит принципам МГЭИК, которые требуют определения ежегодной оценки, а не средней. Как и РОБУЛ, методика

ВНИИЛМ использует статистику ГЛР и ГУЛФ в качестве исходных данных (Филипчук и др., 2017а).

Как уже отмечалось выше, существуют различные точки зрения относительно секвестрационной способности старовозрастных лесов. Разработчики методики ВНИИЛМ придерживаются мнения, что такие леса продолжают накапливать углерод (Филипчук и др., 2017б). Так, по некоторым оценкам, они связывают около 10% от общего количества, поглощаемого лесами CO₂ (Luysaert et al., 2008). Кроме того, в методике ВНИИЛМ предлагается не учитывать выбросы CO₂ от катастрофических пожаров в управляемых лесах, так как такие пожары можно отнести к природным, а в указаниях МГЭИК учитываются лишь эмиссии антропогенного происхождения (Кокорин, Луговая, 2018). Стоит отметить, что на практике до 90% пожаров в лесах РФ происходит по антропогенным причинам, поэтому трудно согласиться с предложенной дефиницией лесных пожаров, как природных. Кроме того, согласно рекомендациям МГЭИК на территории управляемых земель учитываются все потоки парниковых газов (как природного, так и антропогенного характера), а на неуправляемых – ни те, ни другие.

Важнейшим аспектом для сопоставления результатов оценки по разным методикам является площадь территорий, подлежащих оценке. Согласно Руководящим указаниям МГЭИК оценка баланса углерода проводится только для управляемых лесов, однако страны сами определяют, какие территории можно отнести к управляемым. В состав управляемых лесов России согласно Докладу об установленном количестве выбросов (2007) входят лесные земли лесного фонда (за исключением резервных лесов). В состав управляемых лесных земель также включены особо охраняемые природные территории (ООПТ), земли обороны и безопасности, а также городские леса (Национальный ..., 2020). Однако разработчики методики ВНИИЛМ предлагают включить в категорию управляемых также резервные леса, так как на них тоже осуществляется антропогенная деятельность, а также сельскохозяйственные земли, заросшие лесом, лесные земли промышленности и иного назначения, на которых было проведено лесоустройство (Филипчук и др., 2017б). При этом остается неясным, какая именно антропогенная деятельность осуществляется в регулируемом режиме на территории резервных лесов, которая приводила бы к управлению поглощением и выбросами парниковых газов. Ясно, что лесоустройство таким видом деятельности являться не может, а авиационный мониторинг не предполагает немедленного и обязательного тушения очагов лесных пожаров.

⁹ Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и перечня лесных районов Российской Федерации. Приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367 с изменениями от 23.12.2015 № 569 и 21.03.2016 № 83 (дата обращения 24.07.2022).

Таблица 1. Сравнение методик оценки углеродного баланса в лесных экосистемах

Критерий сравнения	ИЗИС ПАСА	СВМ-CFS3	РОБУЛ/РОБУЛ М	ВНИИЛМ
Применение результатов на международном уровне	Научная оценка	РКИК ООН для Канады и других стран	Отчетность РФ в РКИК ООН (Национальный кадастр ПГ)	Отчетность РФ в FAO до 2020 г.
Применение результатов на национальном уровне	Научная оценка, перспективная система мониторинга углерода в лесах	Научные исследования, лесо-климатические проекты	Стратегия низкоуглеродного развития РФ и сопутствующие документы	Нет данных
Следование руководящим принципам МГЭИК	Нет	Да	Да	Нет
Применяемые углеродные пулы и фракции	Живая фитомасса, мертвая древесина, почва (включая подстилку)	21 фракция	Живая фитомасса, мертвая древесина, подстилка, почва	Живая фитомасса, мертвая древесина, подстилка, почва
Метод балансовой оценки МГЭИК	Не соответствует	Сочетание “разности запасов” и “поступлений-потерь”	“Поступления-потери”	“Поступления-потери”
Управляемые леса	Относит все леса РФ к управляемым	На основе карты управляемых лесов Канады	691 млн га из 897 млн га лесных земель	Относит почти все леса лесного фонда РФ к управляемым
Тип расчета поглощения	“Полуэмпирический” метод оценки чистой первичной продукции, базирующийся на моделировании полной продуктивности лесных экосистем по компонентам фитомассы	Нет данных	Ежегодное поглощение по классу возраста	Среднее поглощение за время жизни дровостоя
Расчет лесопожарных эмиссий	По данным ДДЗ в комплексе со средними показателями запасов горючих материалов и их потеря	ДДЗ	По площади гарей, по данным ГЛР	По площади гарей, по данным ГЛР
Источник данных	ДДЗ/ГИС, ГЛР	База данных по Канаде	ГУЛФ/ГЛР	ГУЛФ/ГЛР

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты сравнения основных методик оценки поглощения лесами приведены в табл. 1.

В результате сравнения основных методик были выделены следующие различия, которые можно считать ключевыми.

1) Важное значение имеет соответствие международным требованиям и возможность официального применения результатов расчетов. Если

методика ПАСА носит скорее исследовательский характер и направлена на комплексное изучение углеродного цикла в лесных экосистемах, то методики СВМ-CFS3, РОБУЛ и ВНИИЛМ ориентированы, прежде всего, на применение руководящих указаний МГЭИК. При этом методика ВНИИЛМ, хотя и использовалась для отчетности FAO, не вполне соответствует требованиям РКИК ООН и по этой причине не может служить основой для предоставления официальной ин-

формации о балансе углерода в российских лесах без верификации со стороны экспертов РКИК ООН.

2) Различные методики предлагают разное деление по фракциям пулов углерода, но в целом они покрывают все рекомендуемые МГЭИК пулы. Разделение в методиках РОБУЛ и ВНИИЛМ практически идентично и полностью соответствует международным рекомендациям. В СВМ-CFS3 используется более подробная дифференциация, включающая различные части надземной фитомассы и разные типы подстилки, что не противоречит указаниям МГЭИК. В методике ИААА подстилка является частью пула почвы. Однако в целом, изучаемые методики охватывают все минимально необходимые углеродные лесные пулы. Особенности методик также является разница в потоковых расчетах изменений запасов углерода подстилки и почвы (например, СВМ-CFS3) или принятых усредненных коэффициентах для оценки динамики пула подстилки и почвы (РОБУЛ, ВНИИЛМ).

3) Ключевым различием для методик, соответствующим рекомендациям МГЭИК, является вопрос применения подхода “поступлений-потерь”, либо подхода “по разности запасов”. СВМ-CFS3 сочетает эти подходы, методика ВНИИЛМ использует метод “поступлений-потерь”. В основе РОБУЛ также лежит подход “поступлений-потерь”, но, возможно, также имеются элементы “по разности запасов”.

4) Вопрос выбора того или иного метода прежде всего связан с точностью и надежностью национальной лесной инвентаризации. Именно этот критерий предлагается МГЭИК. С одной стороны, Российская Федерация обладает развитой системой управления и инвентаризации лесов, что позволяет применять наивысший методологический уровень. С другой стороны, информация о лесах во многом неактуальна и превышает рекомендуемые МГЭИК 10 лет. Кроме того, за последние 20 лет менялась сама инвентаризация, был произведен переход с ГУЛФ на ГЛР. Поэтому, в национальной отчетности справедливо используется метод “поступлений-потерь”. Однако, в других методиках, например СВМ-CFS3, применяется сочетание подходов. Относительно методик РОБУЛ и ВНИИЛМ стоит отметить другие важные различия: первая оценивает ежегодное поглощение по группам возраста, а вторая рассчитывает среднее поглощение за время жизни древостоя, что не соответствует требованиям МГЭИК.

5) В рассмотренных методиках учитываются различные лесные площади, и авторы демонстрируют разное отношение к вопросу управляемости лесов. Оценки ИААА не следуют логике МГЭИК по учету *только* антропогенных потоков и оцени-

вают потоки углерода во всех лесах, независимо от их управляемости. СВМ-CFS3 учитывает потоки углерода только в управляемых лесах. РОБУЛ следует указаниям МГЭИК, а также заявленной в Установочном докладе официальной позиции России относительно управляемости лесов и не учитывает резервные леса и другие неуправляемые леса. Стоит подчеркнуть, что согласно МГЭИК, потоки и запасы в неуправляемых лесах могут учитываться, но только в случае, если такие леса переводятся в управляемые, при условии осуществления в них дополнительных систематических действий. Например, в Национальный кадастр РФ 2021 г. были включены участки леса площадью 505 тыс. га в Красноярском крае, где компания РУСАЛ проводила проект по расширению зоны авиапатрулирования для предотвращения и тушения лесных пожаров (Национальный ..., 2021).

В целом, вопрос отнесения лесов к управляемым достаточно сложен. МГЭИК в качестве критерия предлагает наличие систематической антропогенной деятельности, однако не уточняет, что именно считается систематическим. В Российской Федерации обсуждение управляемости касается, в первую очередь, резервных лесов. С одной стороны, в них проводится лесоустройство и осуществляются авиационные или иные работы по охране от пожаров (Филипчук и др., 2017б). С другой стороны, среди специалистов идет дискуссия о том, можно ли это считать полноценной систематической деятельностью, так как пожары на таких, в основном труднодоступных, территориях тушатся в основном только в случае угрозы населению (Романовская и др., 2018). В 2021 г. в законодательстве РФ произошли значительные изменения относительно резервных лесов: согласно Распоряжению Минприроды № 3-р от 20.01.2021 оценка поглощения и выбросов парниковых газов проводится в том числе и для резервных лесов¹⁰. В национальной отчетности эта поправка учтена только в отношении резервных лесов из проекта РУСАЛа. Остальные площади резервных лесов могут быть отнесены к управляемым лесам, например, при условии выполнения на них климатических проектов. По мнению авторов статьи, минимальным критерием управляемости лесов в Российской Федерации должна стать функционирующая система обнаружения и тушения пожаров.

6) Ключевым вопросом в оценке углеродного баланса с помощью различных методик является

¹⁰Распоряжение Минприроды России от 20.01.2021 № 3-р “О внесении изменений в методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, утвержденные распоряжением Минприроды России от 30 июня 2017 г. № 20-р” (дата обращения 24.07.2022).

также достоверность и актуальность источников данных. СВМ-CFS3 использует собственные базы данных по Канаде, ИЗИС ПАСА сочетает методы ДЗЗ с данными ГЛР и авторскими моделями. Методики РОБУЛ и ВНИИЛМ используют официальные данные ГЛР и построены на основе авторских моделей поглощений и эмиссий лесами. Однако, исходные данные ГЛР для методик РОБУЛ и ВНИИЛМ, не являются полностью актуальными и достоверными (Кокорин, Луговая, 2018). Так, согласно Счетной палате РФ, возраст данных лесоустройства превышал 10 лет на 84.4% площади лесного фонда, а для лесов на землях обороны и ООПТ – на 91.1 и 68.7% площади, соответственно¹¹. Средний возраст данных лесоустройства, лежащих в основе ГЛР, составил около 20 лет (Кокорин, Луговая, 2018). Это связано с тем, что лесоустройство проводится, прежде всего, для арендованных участков леса (их площадь составляет порядка 230 млн га в 2021 г.), а также с недостатком бюджетного финансирования. Это приводит к систематическому занижению запасов древесины, некорректной оценке породного и возрастного состава древостоев. Если строго следовать требованию МГЭИК к периодичности инвентаризации лесов каждые 10 лет, то данные ГЛР нельзя признать достоверными. Тем не менее, МГЭИК принимает национальные отчеты РФ, построенные на данных ГЛР, ввиду отсутствия альтернативных официальных источников информации о лесах.

Более надежной основой для получения исходных данных может служить государственная инвентаризация лесов (ГИЛ). Международный опыт показывает, что аналоги ГИЛ в других странах представляют надежную информационную основу для управления лесами и подготовки отчетности по парниковым газам (Tomppo et al., 2011). ГИЛ использует подходы к сбору данных, определяемые порядком проведения государственной инвентаризации лесов¹² и Методическими рекомендациями по проведению государственной инвентаризации лесов¹³. Первый цикл ГИЛ проводился в 2007–2020 гг. С 2021 г. начался

второй цикл, который продлится до 2030 г. включительно. ГИЛ сочетает полевые методы на постоянных пробных площадях с данными ДЗЗ. Хотя у первого цикла ГИЛ отмечаются некоторые недостатки (Кокорин, Луговая, 2018), эта технология позволила обновить и уточнить информацию по российским лесам. Первые результаты обработки данных ГИЛ показывают увеличение поглощения и запасов углерода. В исследовании 2021 г., сочетающем полученные данные ГИЛ с ДЗЗ подсчитано, что российские леса содержат 111 млрд м³ древесины по состоянию на 2014 г., что на 39% выше официальных данных (Schepaschenko et al., 2021). Следует отметить, что полноценно использовать данные ГИЛ в национальном кадастре можно будет по завершении второго цикла. Материалы только одного цикла сложно интерпретировать, поскольку для этого необходимы данные по *изменению* запасов, а исследования ГИЛ выполнены пока только для одного года рассматриваемого периода. При этом годы учета для разных участков отличаются.

7) Оценки по РОБУЛ и ВНИИЛМ занижают объемы лесопожарных эмиссий углерода ввиду того, что для их расчета используются данные ГЛР по гарям. Гари образуются в результате верховых или низовых пожаров высокой интенсивности, в то же время как низовые пожары слабой и средней интенсивности, охватывающие до 70–80% площадей, пройденных пожарами, не приводят к образованию гарей. По данным Замолодчикова с соавт. (2014б), соотношение между площадью гарей и площадью, пройденной пожарами, составляет 1 : 3. Это означает, что расчет лесопожарных эмиссий на основе данных ГЛР существенно занижает объем таких эмиссий, по сравнению с данными ДДЗ, например, Информационной системы дистанционного мониторинга (ИСДМ) Рослесхоза. В отличие от РОБУЛ и ВНИИЛМ, методика ИЗИС позволяет гораздо точнее оценить объем лесопожарных эмиссий, так как использует данные ДЗЗ.

Таким образом, переход на использование данных ГИЛ в методиках РОБУЛ и ВНИИЛМ, скорее всего, приведет к повышению общего объема поглощения российскими лесами, а переход на использование данных ИСДМ Рослесхоза по площадям, пройденным пожарами, приведет к существенному увеличению объема лесопожарных эмиссий. Согласно нашим данным, общий баланс ПГ в лесах при этом может увеличиться с 619 (Национальный ..., 2021) до 701 млн т CO₂-экв. в год, при условии сохранения объема заготовки леса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проанализированы данные по потокам и запасам углерода в лесных эко-

¹¹ Отчет о результатах контрольного мероприятия “Проверка эффективности организации работ и расходования средств на проведение лесоустройства, выделенных из бюджетов бюджетной системы Российской Федерации и иных источников в 2015–2019 г.” (дата обращения 24.07.2022).

¹² Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.09.2021 № 686 “Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризации лесов” (Зарегистрирован 30.12.2021 № 66748) (дата обращения 24.07.2022).

¹³ Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов. Утверждены приказом Федерального агентства лесного хозяйства от 10.11.2011 № 472 (ред. от 07.05.2013 № 135) (дата обращения 24.07.2022).

системах РФ, основные принципы и подходы методологии МГЭИК, а также четыре наиболее часто используемые методики оценки углеродного баланса: ИЗИС ИАСА (Австрия), СВМ-CFS3 (Лесная служба Канады), РОБУЛ (Россия), ВНИИЛМ (Россия). В результате были выделены следующие критерии, обуславливающие применимость оценок:

1. возможность применения результатов оценки для формирования национальной отчетности;
2. выбор между двумя основными подходами МГЭИК к оценке изменения запасов углерода в пулах: методы “поступлений-потерь” и “по разности запасов”;
3. учет управляемых лесов и критерий управляемости;
4. актуальность исходных данных;
5. достоверность исходных данных.

Исходя из проведенного анализа, можно предложить следующие рекомендации по улучшению точности оценок и использованию методик.

1) Национальная оценка баланса парниковых газов в лесах имеет не только научное и управленческое, но и международно-политическое значение, поскольку вносит вклад в смягчение глобальных климатических изменений, а также выступает в качестве объективного подтверждения признания этого вклада другими странами. Поэтому любая методика должна обязательно соответствовать требованиям и рекомендациям МГЭИК.

2) Следует с осторожностью подходить к изменениям в оценке углеродного баланса. Осуществление Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. должно обеспечиваться не столько изменением методологии, сколько реальными мерами по защите лесов: снижением горимости, осуществлением лесоклиматических проектов, лесоразведением и лесовосстановлением. Недопустимо, чтобы достижение целей Стратегии обеспечивалось лишь корректировкой способов расчета: любые поправки должны сопровождаться поправками в целях. Тем более, что изменение климата может угрожать лесным экосистемам через увеличение числа пожаров и привести к уменьшению поглощения CO_2 .

3) Научная дискуссия играет важную роль в развитии знаний об углеродном цикле и в постоянном совершенствовании методик. Так, например, в результате обсуждений в РОБУЛ были внесены уточнения по поглощению CO_2 перестойными насаждениями.

4) Для учета управляемых земель рекомендуется подробнее изучить системы управления в резервных лесах и разделить их на управляемые и неуправляемые в зависимости от проводимой в

них деятельности. Кроме того, этот вопрос следует поднять на международном уровне – на данный момент руководства МГЭИК не дают подробных критериев выделения управляемых лесов и не суммируют международный опыт в этой области.

5) Большой проблемой в оценке углеродного баланса Российской Федерации является недостаток актуальных исходных данных. Независимо от применяемой методики, это приводит к неверному представлению о состоянии российских лесов. Применение данных ДЗЗ и совершенствование ГИЛ может способствовать решению этой проблемы.

В целом, применяемая в Российской Федерации на настоящий момент официальная методика является удовлетворительной и соответствует международным представлениям о запасах и потоках углерода в лесах. Более важным вопросом является не выбор определенной методики, а подход к ее применению на основе конкретных данных, на которых основываются оценки. Одним из главных вызовов в этой области для Российской Федерации является более частое обновление и повышение качества информации о лесах. Международное и научное сотрудничество в этой области значительно способствует достижению этой цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Куриц В.А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS3 // Тр. СПб НИИЛХ. 2014. № 1. С. 5–18.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Куриц В.А. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. № 2 (39). С. 23–31.
- Кокорин А.О., Луговая Д.Л. Поглощение CO_2 лесами России в контексте Парижского соглашения // Устойчивое лесопользование. 2018. № 2 (54). С. 13–18.
- Корзухин М.Д., Коротков В.Н. Модификация модели РОБУЛ для расчета углеродного баланса лесов России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 3. С. 30–53.
- Коротков В.Н., Романовская А.А. Оценка потерь углерода в результате гибели древостоев от пожаров в национальном кадастре парниковых газов: необходимость использования данных наземного и дистанционного мониторинга // Научные основы

- устойчивого управления лесами, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН: Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. (25–29 апреля 2022 г.). М.: ЦЭПЛ РАН, 2022. С. 284–286.
- Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 204 с.
- Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Лесной вестн. 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- МГЭИК. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. Подготовлены Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов / отв. ред. С. Игглестон, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе. Хаяма: ИГЕС, 2006. Т. 1–5.
- Моисеев Б.Н. Баланс органического углерода в лесах и растительном покрове России // Лесное хозяйство. 2007. № 2. С. 13–16.
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2018 гг. Росгидромет, 2020. Ч. 1.
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2019 гг. Росгидромет, 2021. Ч. 1.
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. Росгидромет, 2022. Ч. 1.
- Романовская А.А., Трунов А.А., Коротков В.Н., Карabanь Р.Т. Проблема учета поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. 2018. № 5. С. 323–334. <https://doi.org/10.1134/S0024114818050066>
- Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства / отв. ред. Д. Пенман, М. Гитарский, Т. Хираиши и др. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Женева, 2003. 649 с.
- Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс: монография. М.: Научный Консультант, 2017. 82 с.
- Федоров Б.Г., Моисеев Б.Н., Синяк Ю.В. Поглощающая способность лесов России и выбросы углекислого газа энергетическими объектами // Проблемы прогнозирования. 2011. № 3. С. 127–142.
- Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н., Малышева Н.В. Методика учета поглощения CO₂ лесами Российской Федерации // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. Второй Международ. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 24–26 мая) / отв. ред. Гедьо В.М. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. Т. 2. С. 155–158.
- Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н., Малышева Н.В. Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте Парижского соглашения об изменении климата // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2017. № 1. С. 88–98.
- Швиденко А.З., Шенаценко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Grassi G., Pilli R., House J., Federici S., Kurz W.A. Science-based approach for credible accounting of mitigation in managed forests // Carbon Balance Manage. 2018. Vol. 13. № 8. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0096-2>
- IPCC, 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Т. Hiraishi, Т. Krug, К. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (Eds.). IPCC, Switzerland.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E.C. Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, S. Federici (Eds.). IPCC, Switzerland.
- Kurz W.A., Birdsey R.A., Mascorro V.S., Greenberg D., Dai Z., Olgunn M., Colditz R. 2016. Integrated Modeling and Assessment of North American Forest Carbon Dynamics Technical Report: Tools for monitoring, reporting and projecting forest greenhouse gas emissions and removals. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation, 2016. 125 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3377.5129>
- Kurz W.A., Dymond C.C., White T. et al. CBM CFS3: a model of carbon dynamics in forestry and land use change implementing IPCC standards // Ecological Modelling. 2009. Vol. 220. № 4. P. 480–504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018>
- Luyssaert S., Schulze E.D., Burner A., Knohl A., Hessenmuller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks // Nature. 2008. Vol. 455. P. 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., Mccallum I. A system for heterotrophic soil respiration assessment of Russian land // International conference IBFRA. Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action (Krasnoyarsk, 15–21 August), 2011. P. 86–90.
- Newell J.P., Vos R.O. Accounting for forest carbon pool dynamics in product carbon footprints: Challenges and opportunities // Environ. Impact Asses. Rev. 2012. Vol. 37. P. 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.005>
- Operational-Scale Carbon Budget Model off the Canadian Forest Sector (CBM-CGS3) Ver. 1.0 / S.J. Kull, W.A. Kurz, G.J. Rampley, G.E. Banfield, R.K. Schivatcheva, M.J. Apps (Eds.). Northern Forestry Centre, 2010. P. 112.

- Schepaschenko D. et al.* Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Shvidenko A., Nilsson S.* A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // *Tellus*. 2003. Vol. 55B. P. 391–415.
<https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16722>
- Shvidenko A., Nilsson S.* Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961–1998: an assessment based on longterm forest inventory data // *Climatic Change*. 2002. Vol. 55. P. 5–37.
<https://doi.org/10.1023/A:1020243304744>
- Tomppo E., Heikkinen J., Henttonen H., Ihalainen A., Kattila M., Makela H., Tuomainen T., Vainikainen N.* Designing and Conducting a Forest Inventory – case: 9th National Forest Inventory of Finland. London–New York: Springer, 2011. P. 270.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-1652-0>

Comparative Analysis and Assessment of Methodologies Applied in the Russian Federation for Calculating Greenhouse Gas Absorption by Forest Ecosystems

D. D. Sorokina¹ *, A. V. Ptichnikov², and A. A. Romanovskaya¹

¹*Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

²*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: sorokina.di.dm@gmail.com

The assessment of the forest carbon balance is of great importance for the building of the climate policy of the Russian Federation at both national and international levels. At the same time, the results of such assessments conducted by different scientific groups vary depending on the approaches and methodologies used. This study considers the key systems for assessing the carbon balance of forest ecosystems in the Russian Federation: Integrated Land Information System, IZIS (International Institute for Applied Systems Analysis, Austria), The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM-CFS (Canada), Regional Forest Carbon Budget Assessment, ROBUL (Russia), the methodology of the All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry (Russia). The methodologies are compared with respect to their compliance with the IPCC requirements. The study identifies the individual characteristics of the methodologies and their application, and proposes recommendations for improving the accuracy of carbon balance estimates. The main key differences between the estimates of different scientific groups, include: compliance with the recommendations of IPCC; selection between the methods of “gain–loss” and “stock–difference”; approach to the identification of managed forests; calculation method of forest fire emissions; sources of initial data, and their reliability. The study notes the importance of scientific discussion and the necessity of compliance of the methodologies with international standards, emphasizes the problem of outdated initial data and underestimation of forest fire emissions, regardless of the chosen methodology. In general, the currently used methodology satisfactorily estimates forest carbon balance. It is recommended to improve the estimates based on remote sensing data and the second cycle of the State Forest Inventory (SFI). The implementation of the Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050 should be provided not only by changes in the method of calculating the carbon balance, but rather through real forest protection measures. Any significant adjustment to the methodology must be accompanied by an adjustment to national climate goals.

Keywords: forest carbon budget, absorption capacity of Russian ecosystems, Paris Agreement, climate change, greenhouse gases

REFERENCES

- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite Mapping of the Vegetation Cover of Russia]. Moscow: IKI RAS Publ., 2016. 208 p.
- Fedorov B.G. *Rossiiskii uglerodnyi balans: monografiya* [Russian Carbon Balance: Monograph]. Moscow: Nauch. Konsul'tant Publ., 2017.
- Fedorov B.G., Moiseev B.N., Sinyak Yu.V. Absorption capacity of Russian forests and carbon dioxide emissions from energy facilities. *Probl. Prognoz.*, 2011, no. 3, pp. 127–142. (In Russ.).
- Filipchuk A.N., Moiseev B.N., Malysheva N.V. Methodology for accounting for CO₂ uptake by forests of the Russian Federation. In *Lesnaya Rossiya: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy vtoroi mezhdun. nauch.-tekhn. konf., S.-Peterb., 24–26 maya 2017 g. Tom 2* [Russian Forests: Politics, Industry, Science, Education: 2nd Int. Sci.-Tech. Conf., S.-Peterb., May 24–26, 2017. Vol. 2]. Ged'o V.M., Ed. St.-Peterb.: SPbGLTU Publ., 2017, pp. 155–158. (In Russ.).
- Filipchuk A.N., Moiseev B.N., Malysheva N.V. New aspects of assessment of absorption of greenhouse gases the Russian forests in the context of the Paris agreement on climate change. *Lesokhoz. Inform.: Elektron. Setev. Zh.*, 2017, no. 1, pp. 88–98. (In Russ.).

- Grassi G., Pilli R., House J., Federici S., Kurz W.A. Science-based approach for credible accounting of mitigation in managed forests. *Carbon Balance Manage.*, 2018, vol. 13, no. 8. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0096-2>
- IPCC, 2014. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Wetlands*. Hiraiishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G., Eds. Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC, 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Buendia E.C., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Sherman P., Federici S., Eds. Switzerland: IPCC, 2019.
- Kokorin A.O., Lugovaya D.L. Absorption of CO₂ by forests of Russia in the context of the Parisian agreement. *Ustoich. Lesopol.*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 13–18. (In Russ.).
- Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Estimating carbon losses from stand mortality from fire in the national greenhouse gas inventory: the need to use ground and remote monitoring data. In *Nauchnye osnovy ustoichivogo upravleniya lesami, posvyashchennoi 30-letiyu TsEPL RAN. Mater. Vserossiiskoi nauch. konf. s mezhdun. uchastiem, 25–29 aprelya 2022 g.* [Scientific Foundations of Sustainable Forest Management, Dedicated to the 30th Anniversary of CEPF RAS. All-Russian Sci. Int. Conf., April 25–29, 2022]. Moscow: TsEPL RAN Publ., 2022, pp. 284–286. (In Russ.).
- Korzukhin M.D., Korotkov V.N. Modification of the RO-BUL model for calculating the carbon balance of forests in Russia. *Fundam. Priklad. Klimatol.*, 2018, vol. 3, pp. 30–53. (In Russ.).
- Kurnaev S.F. *Lesorastitel'noe raionirovanie SSSR* [Forest Zoning of the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1973.
- Kurz W.A., Birdsey R.A., Mascorro V.S., Greenberg D., Dai Z., Olguin M., Colditz R. *Integrated Modeling and Assessment of North American Forest Carbon Dynamics Technical Report: Tools for monitoring, reporting and projecting forest greenhouse gas emissions and removals*. Montreal: Commission for Environmental Cooperation, 2016. 125 p.
- Kurz W.A., Dymond C.C., White T., Stinson G., Shaw C.H., Rampley G.J., Smyth C., Simpson B.N., Neilson E.T., Trofymow J.A., Metsaranta J., Apps M.J. CBM-CFS3: a model of carbon dynamics in forestry and land use change implementing IPCC standards. *Ecol. Modelling*, 2009, vol. 220, no. 4, pp. 480–504. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018>
- Luyssaert S., Schulze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 2008, vol. 455, pp. 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N., Zolina T.A. The methods of carbon balance estimation in forest ecosystems and their application to calculate the annual carbon sequestration. *Lesnoi Vestn.*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- MGEIK. *Rukovodyashchie printsipy natsional'nykh inventarizatsii parnikovyykh gazov MGEIK 2006 g. Podgotovleny Programmoi MGEIK po natsional'nykh kadastram parnikovyykh gazov. Tom 1–5* [IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Program. Vol. 1–5]. Iggleston S., Buendia L., Miva K., Ngara T., Tanabe K., Eds. Khayama: IGES Publ., 2006.
- Moiseev B.N. Balance of organic carbon in forests and plant cover of Russia. *Lesn. Khozyaistvo*, 2007, no. 2, pp. 13–16. (In Russ.).
- Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., Mccallum I. A system for heterotrophic soil respiration assessment of Russian land. In *International conference IBFRA. Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Action*. Krasnoyarsk, 2011, pp. 86–90.
- Natsional'nyi doklad o kadastrakh antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Montreal'skim protokolom za 1990–2018 gg. Ch. 1* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Abstraction by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2018. Part 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2020.
- Natsional'nyi doklad o kadastrakh antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Montreal'skim protokolom za 1990–2019 gg. Ch. 1* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Abstraction by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2019. Part 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2021.
- Natsional'nyi doklad o kadastrakh antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Montreal'skim protokolom za 1990–2021 gg. Ch. 1* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Abstraction by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2021. Part 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022.
- Newell J.P., Vos R.O. Accounting for forest carbon pool dynamics in product carbon footprints: Challenges and opportunities. *Environ. Impact Asses. Rev.*, 2012, vol. 37, pp. 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.005>
- Operational-Scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CGS3) Version 1.0*. Kull S.J., Kurz W.A., Rampley G.J., Banfield G.E., Schivatcheva R.K., Apps M.J., Eds. Ottawa: Northern Forestry Centre, 2010. 112 p.
- Romanovskaya A.A., Trunov A.A., Korotkov V.N., Karaban' R.T. The problem of accounting for the absorptive capacity of Russian forests in the Paris Agreement. *Lesoved.*, 2018, no. 5, pp. 323–334. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114818050066>
- Rukovodyashchie ukazaniya po effektivnoi praktike dlya zemlepol'zovaniya, izmenenii v zemlepol'zovanii i lesnogo khozyaistva. Programma MGEIK po natsional'nykh kadastram parnikovyykh gazov* [Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. IPCC Program on National Greenhouse Gas Inventories]. Penman D., Gitariskii M., Khiraiishi T. et al., Eds. Genève, 2003. 649 p.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V.,

- Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Shvidenko A., Nilsson S. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998. *Tellus*, 2003, vol. 55B, pp. 391–415.
<https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16722>
- Shvidenko A., Nilsson S. Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961–1998: an assessment based on longterm forest inventory data. *Climatic Change*, 2002, vol. 55, pp. 5–37.
<https://doi.org/10.1023/A:1020243304744>
- Shvidenko A.Z., Shepashchenko D.G. Carbon budget of Russian forests. *Sibir. Lesnoi Zh.*, 2014. (In Russ.).
- Tomppo E., Heikkinen J., Henttonen N., Ihalainen A., Kattila M., Mäkelä N., Tuomainen T., Vainikainen N. *Designing and Conducting a Forest Inventory – case: 9th National Forest Inventory of Finland*. London; New York: Springer Publ., 2011. 270 p.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N. Dynamics of the carbon budget of the forests of Russia in two last decades. *Lesoved.*, 2011. (In Russ.).
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kurts V.A. Carbon balance management of Russian forests: Past, Present and Future. *Ustoich. Lesopol'zov.*, 2014. (In Russ.).
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kurts V.A. Effect of forest management on the volume of the carbon balance of forests in Russia: predictive analysis on CBM-CFS3 model. In *Trudy SPbNIIILH* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2014. (In Russ.).

УДК 574.4

МОНИТОРИНГ ЭКОСИСТЕМНЫХ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ: СЕТЬ RUFLUX

© 2023 г. О. А. Куричева^{a, *}, В. К. Авиллов^a, А. В. Варлагин^{a, **}, М. Л. Гитарский^b,
А. А. Дмитриченко^c, Е. А. Дюкарев^{c, d, ***}, С. В. Загирова^{e, ****}, Д. Г. Замолотчиков^{f, g, *****},
В. И. Зырянов^h, Д. В. Карелин^{i, *****}, С. В. Карсанаев^j, И. Н. Курганова^{k, *****},
Е. Д. Лапшина^c, А. П. Максимов^j, Т. Х. Максимов^{j, *****}, В. В. Мамкин^{a, g, *****},
А. С. Марунич^l, М. Н. Мигловец^e, О. А. Михайлов^e, А. В. Панов^h, А. С. Прокушкин^{h, *****},
Н. В. Сиденко^h, А. В. Шилкин^{f, m}, Ю. А. Курбатова^{a, *****}

^aИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

^bРоссийское энергетическое агентство, Москва, Россия

^cЮгорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

^dИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

^eИнститут биологии Коми научного центра УО РАН, Сыктывкар, Россия

^fЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

^gНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

^hИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

ⁱИнститут географии РАН, Москва, Россия

^jИнститут биологических проблем криолитозоны СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН,
Якутск, Россия

^kИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

^lВалдайский филиал Государственного гидрологического института, Валдай, Россия

^mНПО Тайфун, Обнинск, Россия

*e-mail: olga.alek.de@gmail.com

**e-mail: varlagin@sevin.ru

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

****e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

*****e-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

*****e-mail: dkarelin7@gmail.com

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

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

*****e-mail: vadimmamkin@gmail.com

*****e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

*****e-mail: kurbatova.j@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2022 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Впервые дается обобщенная информация по истории формирования, состоянию наблюдений и основным научным результатам региональных сетей и станций, включенных в RuFlux – общероссийскую систему мониторинга экосистемных потоков парниковых газов (ПГ). Измерения проводятся по мировым стандартам методом турбулентных пульсаций (eddy covariance method), обеспечивающим сопоставимые оценки потоков ПГ на пространственном уровне отдельных экосистем. Получены многолетние (более 190 станций-лет наблюдений) ряды потоков ПГ. По состоянию на осень 2022 г. 86% станций сети RuFlux расположено в лесных и болотных экосистемах, 77% всех станций – в средней и южной тайге. Почти все ненарушенные экосистемы России являются стоками CO₂ из атмосферы с диапазоном средних годовых оценок нетто-поглощения от 80 до 240 г С/(м² год). Баланс ПГ определяется комплексом абиотических и биотических факторов. Среднее многолетнее нетто-поглощение CO₂ выше в мерзлотных лиственничниках Сибири, чем в ельниках Европейской территории России, несмотря на краткость вегетационного сезона (менее 4 мес. у лиственничников и более 6 мес. у ельников). При движении с запада на восток интенсивность стока CO₂ в середине лета увеличивается, а эмиссия CO₂ в середине зимы резко снижается. Природные и антропогенные на-

рушения приводят к трансформации углеродного баланса за счет увеличения выделения CO_2 в атмосферу. В целом, сеть RuFlux охватывает широкий спектр климатических условий и типов экосистем, но для повышения ее репрезентативности по всей территории России требуется создание станций, работающих по методу турбулентных пульсаций, в тундровых, северо-таежных, лесостепных, степных и полупустынных экосистемах. Также нужна организация мониторинга ПГ в антропогенно-измененных экосистемах (в том числе агроценозах) и в экосистемах с сукцессиями, вызванными природными нарушениями.

Ключевые слова: метод турбулентных пульсаций, экосистемы, чистый экосистемный обмен, сеть измерений, эколого-климатические станции

DOI: 10.31857/S2587556623040052, **EDN:** СТГОНО

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимические и биогеофизические процессы, определяющие обмен энергией и веществом между наземными экосистемами и атмосферой, в последние годы все чаще рассматриваются в контексте оценки климаторегулирующих функций экосистем. Развитие инструментальной базы метеорологических наблюдений, средств регистрации, хранения и обработки больших массивов данных позволило научному сообществу в 1990-е годы создать новый инструмент для количественной оценки энергообмена и потоков ПГ между экосистемами и атмосферой — эколого-климатические станции (ЭКС). На встрече исследователей в Ла-Туиле (Италия) в 1995 г. (Baldocchi et al., 1996*¹) были представлены первые результаты длительных непрерывных наблюдений за чистым экосистемным обменом CO_2 (баланс CO_2 с атмосферой или нетто-обмен CO_2 ; в англоязычной литературе — net ecosystem exchange, или *NEE*) на основе МТП. Прямые оценки баланса CO_2 экосистем вызвали одобрение у научного сообщества и энтузиазм для развития сетей станций на территории Европы, США, Японии и Юго-Восточной Азии. Единый методический подход к оценке потоков энергии и вещества дал возможность развивать региональные сети, которые были объединены в единую мировую сеть станций FLUXNET при поддержке NASA (США) в 1997 г. Основная цель развития сети наблюдений состояла в интеграции данных наземных измерений и дистанционного зондирования Земли (приборов MODIS). В настоящее время доступная база данных FLUXNET² включает результаты наблюдений более 1000 станций, которые работали ранее или на которых продолжают наблюдения в настоящее время. Многолетние исследования позволили оценить пространственно-временную измен-

чивость потоков CO_2 , влаги и энергии в зависимости от абиотических и биотических факторов для всех биомов мира (Baldocchi, 2020). Для масштабирования потоков энерго- и массообмена, а также для создания прогнозов используются математические модели. Данные наблюдений за потоками ПГ, влаги и энергии востребованы как входные данные, а также основа для параметризаций и валидации моделей. Мировая сеть станций является непрерывно развивающимся инструментом для решения широкого круга экологических задач.

На территории России сеть станций мониторинга экосистемных потоков ПГ начала развиваться одновременно с развитием национальных и региональных сетей в мире. По нашим оценкам на основе данных, приведенных в научной печати и открытых интернет-ресурсах³, в последние два десятилетия на территории нашей страны в разные периоды велись исследования на 35 станциях. Как правило, многолетние наблюдения на основе МТП были начаты в рамках международных проектов и частично были завершены по их окончании (Vygodskaya et al., 2002*).

В то же время некоторые научные коллективы в РФ отдали предпочтение МТП как основному инструменту получения экспериментальных данных о потоках CO_2 на экосистемном пространственном уровне. В соответствии с собственными научными целями коллективы развивали локальные или региональные сети станций. Исторически на территории России сложились следующие сети: в Красноярском крае (KrasFlux), в Республике Саха (Якутия) (SakhaFluxNet), в Тверской области, в Республике Коми и в Ханты-Мансийском АО. Многолетние исследования проводятся в Новгородской области. Эти станции стали основой для создания в 2022 г. общероссийской сети мониторинга экосистемных потоков ПГ RuFlux. Национальная сеть создана в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения Научно-образовательный центр “Углерод в экосистемах: мониторинг” (далее — ВИП ГЗ). Всего

¹ Здесь и далее “*” отмечены литературные источники, которые вынесены в Расширенный список литературы (ДМ_1; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО).

² <https://fluxnet.org/sites/site-list-and-pages/> (дата обращения 13.11.2022).

³ <https://cosima.nceas.ucsb.edu/carbon-flux-sites/> (дата обращения 13.11.2022).

в 2022 г. в сеть мониторинга экосистемных потоков ПГ вошли 22 станции, из них 18 станций семи научных коллективов вели мониторинг ПГ в 2010-х — начале 2020-х годов. В рамках ВИП ГЗ планируется организация наблюдений в Московской, Курской областях, расширение сетей наблюдений в Красноярском крае и Ханты-Мансийском АО.

Данные ряда российских ЭКС входят в базу FLUXNET. На лесных станциях в Тверской области и в Центральной Якутии получены непрерывные ряды наблюдений за потоками тепла, H_2O и CO_2 длительностью более 20 лет — одни из самых продолжительных в мире. Результаты таких длительных наблюдений являются крайне востребованными в мировом научном сообществе и регулярно используются при составлении глобальных оценок экосистемных потоков ПГ, калибровке спутниковых измерений и математических моделей, изучении факторов пространственного и временного распределения потоков ПГ (Besnard et al., 2018*; Delwiche et al., 2021*; Johnston et al., 2021*). Ряды длиной более 20 лет позволяют уловить тенденции масштабных изменений экосистем, и дальнейшее продолжение мониторинговых исследований позволит давать обоснованные прогнозы изменений углеродного баланса.

Лесам уделяется повышенное внимание в оценках баланса ПГ, так как 90% поглощения углерода на территории России приходится именно на них (Dolman et al., 2012). В соответствии с категориями земель МГЭИК, по данным Росреестра, леса в 2020 г. составляли 52% территории России, водно-болотные угодья — 13% (Романовская и др., 2022b*). Оценки площадей лесов и болот сильно варьируют в зависимости от точного определения типов поверхности. Так, по оценкам, сделанным с использованием данных дистанционного зондирования (Щепашенко и др., 2015*), леса составляют 42% территории России; по оценкам Вомперского и др. (2011*), болота вместе с мелкоотторфованными заболоченными землями составляют более 20% площади страны. Нетто-поглощение CO_2 в лесах России (сток CO_2 из атмосферы в экосистемы) за 2001–2019 гг. составляло около четверти от поглощения во всех лесах мира (Harris et al., 2021*). Поглощение CO_2 в лесах России перекрывает значительную часть выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива и от промышленной деятельности. Сток CO_2 в лесах России больше, чем в любой другой стране мира; в Канаде, следующей за Россией, сток CO_2 слабее в полтора раза (Harris et al., 2021*). В то же время при оценках баланса ПГ территорий необходимо учитывать природные и антропогенные нарушения лесных экосистем, особенно лесные пожары и рубки, а также нашествия насекомых, которые могут значительно снижать сток CO_2 в леса (Исаев и др., 1995*; Rödenbeck et al., 2003*). Эффективная система монито-

ринга климатически активных газов на территории РФ требует тщательного учета потоков ПГ в разных типах лесов, в том числе находящихся в зоне деградирующей многолетней мерзлоты.

Покрытие территории России станциями наблюдений потоков ПГ значительно меньше, чем в ЕС, США и Китае. На Россию приходится 60% площади арктических и таежных экосистем мира, при этом количество полученных месячных значений *NEE* в базе данных для этих экосистем ABCflux (Virkkala et al., 2022*) на всех российских станциях в сумме составляет только 16% от количества месячных значений на станциях в тундровой и таежной зонах Северного полушария. Количество публикаций и цитирований с 1990 по 2022 г. в журналах, индексируемых в базе данных WoS, по ключевым словам, “Net ecosystem exchange” (7307 результатов) и “Net ecosystem exchange + Siberia, Net ecosystem exchange + Russia, Eddy covariance + Russia” (40, 33 и 52 результата) показывает, что их количество по России даже в последние годы составляет не более 1% мирового количества публикаций и цитирований по этой теме.

Оценки баланса углекислого газа всех природных экосистем России на сегодняшний день различаются почти на порядок. Так, разброс оценок, полученных разными авторами в 2010-х годах, составляет от 172 до 1400 млн т С в год (Филипчук и др., 2020*). И хотя данные станций, использующих МТП, не входят в международную климатическую отчетность, они используются для площадных оценок баланса ПГ на территории разных стран и являются дополнительным инструментом для верификации оценок на уровне страны. Так, А. Долман с соавторами (Dolman et al., 2012) по данным 14 станций наблюдений, использующих МТП, оценили нетто-поглощение углекислого газа в природных экосистемах России в 2009 г. в 342 млн т С в год, что в 2 раза больше модельных оценок Национального доклада о кадастре РФ (Романовская и др., 2022a*). Полученная оценка баланса С на территории России (Dolman et al., 2012) базируется на данных, полученных лишь на 14 станциях наблюдений, поэтому она является в значительной мере экспертной. Для ее верификации необходимо расширение и дальнейшее развитие национальной сети RuFlux.

В XXI в. прогнозируются значительные изменения баланса углерода природных экосистем, в первую очередь в связи с современными изменениями климата (IPCC, 2021*). В среднем по России повышение среднегодовой температуры воздуха (*T*) в 1976–2018 гг. составило 2.0°C (Доклад ..., 2019*), и такое значительное потепление, безусловно, может сильно влиять на потоки тепла и ПГ в экосистемах различных климатических зон. Одним из основных преимуществ исследований с помощью ЭКС является возможность детально отслежи-

вать, как экосистема в целом реагирует на факторы среды, такие как свет, T , осадки (P), влажность почвы, концентрация CO_2 , элементы питания (Baldocchi, 2020). Длительные наблюдения позволяют дать оценки будущих изменений баланса ПГ экосистем при климатических изменениях, а также в результате природных и антропогенных нарушений.

Целью данной работы является описание развития сети, состояния наблюдений, а также анализ результатов, полученных на региональных сетях и станциях, включенных в RuFlux – национальную систему мониторинга ПГ в природных экосистемах. Задачами работы являются оценка репрезентативности сети; обобщение сумм NEE за год и вегетационные сезоны; оценка межгодовой изменчивости и многолетних трендов NEE ; сравнение сезонного хода NEE на станциях с разными климатическими условиями; описание влияния факторов среды на NEE , а также описание возможностей прогнозирования и площадных оценок углеродного баланса с помощью данных станций RuFlux.

МЕТОД ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Для оценки потоков и баланса ПГ в наземных экосистемах используется линейка методов (в порядке увеличения пространственных масштабов исследований): камерные измерения, учет биомассы на пробных площадях и учет углерода в почве, метод турбулентных пульсаций, метод высотных (атмосферных) мачт, спутниковые наблюдения. Единственный прямой метод, позволяющий оценить поток CO_2 на уровне экосистемы (от 100×100 до 1000×1000 м) с высоким временным разрешением – метод турбулентных пульсаций (МТП). МТП позволяет рассчитать, сколько граммов вещества (например, CO_2) переместилось с единичной площади (квадратный метр) экосистемы в атмосферу или из атмосферы в экосистему. МТП в настоящее время является одним из наиболее точных и теоретически обоснованных методов определения потоков энергии и вещества между экосистемами и атмосферой (Бурба и др., 2016; Курбатова, Ольчев, 2017*; Baldocchi, 2020; Baldocchi et al., 1988*; Burba, 2022*; Eddy ..., 2012; Foken, 2008*).

Теоретическая основа метода базируется на теории турбулентности Колмогорова–Обухова, которая описывает мелкомасштабную структуру пульсаций в полях T и скорости турбулентного переноса в атмосфере (Монин, Яглом; 1965*; Montgomery, 1948*; Obukhov, 1951*; Swinbank, 1951*). Вертикальный турбулентный поток ПГ рассчитывается как ковариация (осредненное произведение пульсаций) вертикальной компоненты скорости ветра (w) и концентрации исследуемого газа (c) (Бурба и др., 2016).

Так как основной для расчета потока являются пульсации (мгновенные отклонения от средних значений), МТП также называют пульсационным методом.

Инструментальные наблюдения, организованные в соответствии с теоретическими основами МТП, позволяют осуществлять автоматический непрерывный мониторинг потоков ПГ (CO_2 , CH_4 , H_2O и др.) и энергии. Первичные измерения основных параметров МТП – скорости ветра по трем пространственным осям и концентраций исследуемых газов – ведутся с частотой 50–100 Гц. Регистрация данных требует высокоточных и малоинерционных приборов: трехмерных ультразвуковых анемометров и инфракрасных газоанализаторов. Параллельно осуществляются актинометрические, метеорологические и биометрические автоматические наблюдения с частотой от 1 с до 1 мин, которые позволяют интерпретировать оценки потоков газов, полученные на основе МТП. Системы пульсационных и дополнительных измерений объединяют в единый программно-аппаратный комплекс – ЭКС (рис. 1).

С помощью ЭКС круглосуточно и круглогодично либо в течение вегетационного сезона регистрируются потоки ПГ и метеорологические параметры. Дальнейшая обработка данных (расчет потоков, ввод поправок, контроль качества, фильтрация данных, заполнение пропусков) проводится с помощью специального программного обеспечения. Расчет потоков и осреднение метеорологических данных обычно осуществляется для временных интервалов 30 мин. Непрерывная запись позволяет оценить баланс ПГ экосистемы как на коротких отрезках времени (0.5 ч), так и в сумме за месяц или за год (годы).

Рассчитанные величины потоков содержат случайные и систематические погрешности, возникающие из-за нарушений допущений метода, сбоев в работе оборудования или ошибок при обработке данных (Eddy ..., 2012). Процедура обработки данных предполагает использование статистических тестов для отбраковки некоторых данных, а также ввод поправок, учитывающих особенности турбулентного переноса, характеристики оборудования, его размещение в пространстве и условия регистрации данных. Регулярное обслуживание оборудования, обработка данных в строгом соответствии с принятыми в международном научном сообществе рекомендациями (Baldocchi, 2020; Eddy ..., 2012; Pastorello et al., 2020*) и большая продолжительность непрерывных наблюдений позволяет значительно сократить неопределенность оценок экосистемных потоков, получаемых на основе МТП. На сегодняшний день благодаря стандартизации требований к оборудованию, организации эксперимента и процедуры обработки данных МТП способен обеспечить высокую точ-

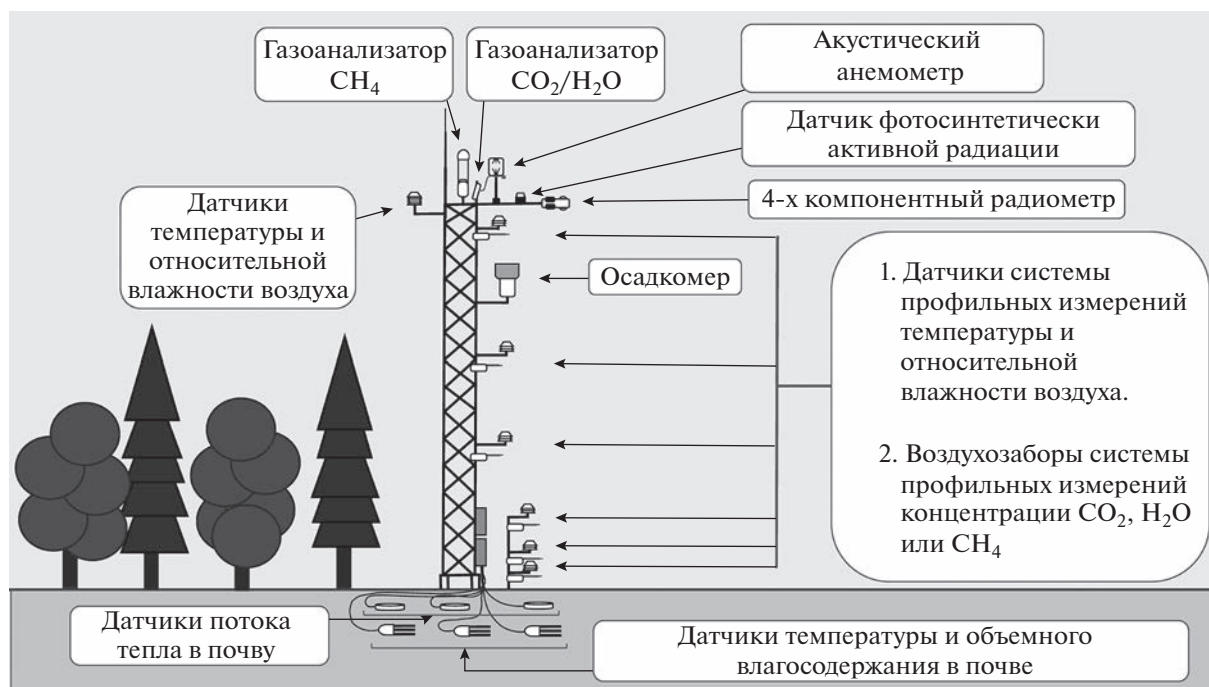


Рис. 1. Схема стандартной эколого-климатической станции в лесной экосистеме.

ность и сопоставимость получаемых оценок (Курбатова, Ольчев, 2017*).

Измеренные потоки являются осредненными по области вокруг вышки, которая называется зоной охвата или зоной влияния (в англоязычной литературе – footprint) (Hsieh et al., 2000*; Kljun et al., 2004*; Kormann and Meixner, 2001*). Осреднение осуществляется с весовой функцией (функцией футпринта), зависящей от метеорологических условий и убывающей с увеличением расстояния от вышки. 90% дальности зоны охвата вышек – это десятки–сотни метров в зависимости от высоты размещения оборудования над растительным пологом и погодных условий и типа поверхности (Vurba, 2022*). Высота вышки должна быть в 1.5–2 раза больше высоты растительности (Бурба и др., 2016).

Согласно русскоязычной терминологии изучения углеродного цикла (Кудеяров и др., 2007*), с помощью МТП можно прямо оценить чистый экосистемный обмен CO_2 (NEE), представляющий собой баланс вертикальных потоков CO_2 между экосистемой и атмосферой. NEE является разницей между выделением и поглощением CO_2 в экосистеме, то есть результирующей двух биологических процессов: экосистемного дыхания, TER , и валовой первичной продукции, GPP (Chapin et al., 2006*):

$$NEE = TER - GPP, \quad (1)$$

TER представляет собой выделение CO_2 в результате разложения органического вещества и

дыхания растений, а GPP – усвоение углерода растениями в процессе фотосинтеза. При $NEE > 0$ экосистема является источником CO_2 для атмосферы, а при $NEE < 0$ – стоком (происходит поглощение CO_2 из атмосферы). С помощью МТП можно непосредственно оценить только баланс экосистемы с атмосферой по вертикальным потокам CO_2 , т.е. NEE . Измеренный NEE можно затем расчетным способом разделить на TER и GPP (Wutzler et al., 2018*).

МТП также широко используется для изучения суммарного испарения экосистем, турбулентных потоков тепла и потока импульса в приземном слое атмосферы. Главное преимущество МТП – это пространственно-интегральный характер получаемых оценок потоков энергии и вещества, соответствующих площади исследуемой экосистемы (Курбатова, Ольчев, 2017*; Baldocchi, 2003*; Tramontana et al., 2016*).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщение информации по станциям RuFlux⁴

Краткая информация по 22 станциям мониторинга, включенным в сеть RuFlux, представлена в табл. 1, на рис. 2 и 3. Фотографии станций, подробное описание растительности, типы почв, подробности обработки данных и описание приборной базы представлены в Дополнительных

⁴ Регионы в табл. 1 и в следующем подразделе расположены в алфавитном порядке.

Таблица 1. Станции российской сети мониторинга потоков парниковых газов между экосистемами и атмосферой RuFlux (по состоянию на ноябрь 2022 г.)

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы	Годы измерений	Публикация
Красноярский край	Зотино Сосняк Новый (Zotino Pine New)	KR-Zo1	60.80694	89.3575	112	Средняя тайга	Сосняк лишайниковый	с 2012	Park et al., 2021*
	Зотино Болото Новое (Zotino Bog New)	KR-Zo2	60.81753	89.3887	76	Средняя тайга	Сосново-кустарничково-сфагновое болото	с 2012	Park et al., 2021*
	Тура Лиственничник (Тура)	KR-Tur	64.203	100.4453	217	Северная тайга	Лиственничник кустарничково-лишайниково-зеленомошный	с 2004	Nakai et al., 2008*
Новгородская область	Игарка Пальза (Igarika)	KR-Iga	67.48135	86.43709	29	Лесотундра (граница северной тайги)	Плоскобугристое болото (торфяник)	с 2016	Oichev et al., 2022*
	Лог Тажный (Log Tauzhny)	NO-LTa	57.96267	33.339	226	Южная тайга	Ельник с примесью сосны мелкоствчатого-зеленомошный	2010–2011, с 2016	Karelin et al., 2021
	Ляли (Lyaly)	KO-Lya	62.26772	50.68032	100	Средняя тайга	Ельник черничный влажный	с 2013	Zagirova et al., 2020*
Республика Коми	Якша (Yaksha)	KO-Yak	61.81667	56.86666	139	Средняя тайга	Сосняк бруснично-лишайниковый	2013, с 2020	Zagirova et al., 2021*
	Усть-Пожег (Ust Pojeg)	KO-UPo	61.93406	50.227	78	Средняя тайга	Мезолигнотрофное кочковато-мочажинное болото	2008–2019, планир. в 2023	Zagirova et al., 2019a*
	Спасская Падь Лиственничник (Spasskaya Pad' Larch)	YA-SP1	62.255	129.6185	214	Средняя тайга	Лиственничник брусничный (среднепродуктивный)	с 2000	Dolman et al., 2004*
Республика Саха (Якутия)	Эльгэйти (Elgeeyi)	YA-Elg	60.016	133.824	202	Средняя тайга	Лиственничник брусничный с примесью березы (высокопродуктивный)	с 2010	Niyama et al., 2021*
	Чокурдах (Chokurdakh)	YA-CKd	70.8291	147.4943	5	Южная гипоарктическая (кустарничковая) тундра	Тундра: высокие участки – карликовая береза; влажная тундра с кочками; влажные сфагново-осоковые участки	2003–2021, планир. в 2023	Dolman et al., 2012
	Федоровское заболоченный ельник (Fedorovskoye)	TV-Fyo	56.46153	32.92208	265	Южная тайга	Ельник с примесью березы сфагново-черничный	с 1998	Mamkin et al., 2023

Таблица 1. Окончание

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы	Годы измерений	Публикация
	Федоровское неморальный ельник (Fedorovskoye dry spruce stand)	TV-Fy2	56.4476	32.9018	265	Южная тайга	Ельник с примесью клена, вяза, осины и березы ксилочно-щитовниковый	с 2000	Mamkin et al., 2022
	Федоровское вырубка (Fedorovskoye Clear-cut)	TV-Fy3	56.4435	33.0478	250	Южная тайга	Зарастающая разнотравно-кипрейная вырубка с подростом осины и березы	с 2016	Mamkin et al., 2019a, b
	Федоровское болото (Fedorovskoye bog)	TV-Fy4	56.4727	33.0413	240	Южная тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное сфагновое болото	1998–2000, 2013, с 2015	Mamkin et al., 2023
Томская область	Плотниково (Plotnikovo)	TO-Pit	56.81374	82.85209	121	Южная тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное болото	с 2022	—
ХМАО	Мухрино Болото (Mukhrino Bog)	KM-Muh	60.89146	68.67641	34	Средняя тайга	Олиготрофное грядово-мочажинное болото	2015–2019, с 2021	Alekseychik et al., 2017
	Мухрино Рям (Mukhrino Pine)	KM-Mu2	60.89429	68.68298	34	Средняя тайга	Сосново-кустарничково-сфагновое болото	с 2022	—

Планируемые в 2023 г. станции

Регион	Название станции на русском (англ.)	Идентификатор	Долгота, в.д.	Широта, с.ш.	Высота над ур. м., м	Природная зона и подзона	Тип экосистемы
Красноярский край	Золитно Низинное Болото	KR-Zo4	60.790278	89.490556	60	Средняя тайга	Низинное мезотрофное болото
ХМАО	Мухрино Смешанный лес (Mukhrino Mixed forest)	KM-Mu3	60.89454	68.70976	35	Средняя тайга	Смешанный темнохвойно (ель, кедр)-березово-осиновый лес
Курская область	Курская биосферная станция (Kursk Biosphere Station)	KU-Kbs	51.54	36.09	243	Лесостепь дубовая	Агроландшафт (пашни) с остаточными участками широколиственных лесов и луговых степей
Московская область	Пушино, лесозарастающая пашня (Pushchino, Reforestation area)	MO-Pus	54.83041	37.55922	185	Широколиственные леса	Березняк молодой (ср. возраст древостоя 15–20 лет) с сосновым подростом. Зарастающая пашня

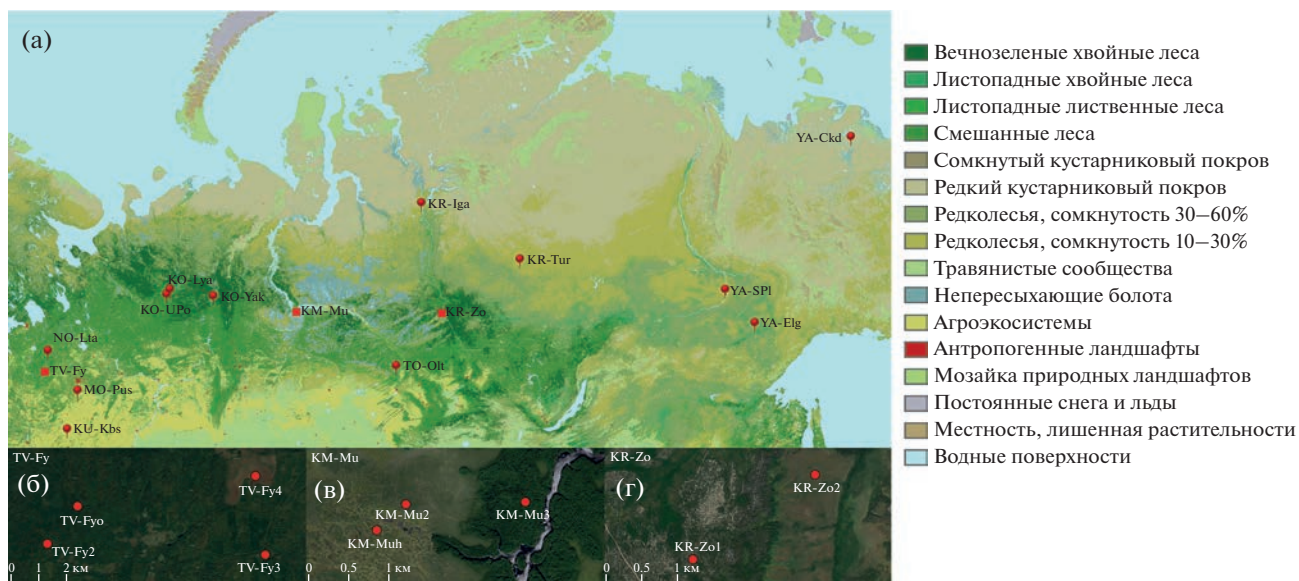


Рис. 2. Размещение измерительных комплексов (точками) и локальных сетей измерений (квадратами) RuFlux (a). В увеличенном масштабе показаны на врезках локальные сети: (б) в Тверской области (TV-Fyo, TV-Fy2, TV-Fy3, TV-Fy4), (в) Ханты-Мансийском автономном округе (KM-Muh, KM-Mu2, KM-Mu3) и (г) Красноярском крае (KR-Zo1, KR-Zo2). Индексы станций приведены в табл. 1.
Примечание: Основа карты размещения измерительных комплексов построена по данным MODIS (Broxton et al., 2014). Основа карт локальных сетей измерений – Imagery ©2022 TerraMetrics, Map Data ©2022 Google.



Рис. 3. Типичные измерительные комплексы RuFlux: (a) на плоскобугристом болоте (высота вышки 6 м, станция KR-Iga) и (б) в лесу (высота вышки 34 м, станция YA-Elg).

материалах (ДМ_2, рис. 10–12; ДМ_3, табл. 3; ДМ_4, текст и табл. 4); дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGONO.

Развитие сети наблюдений по МТП на территории России

Красноярский край — один из первых регионов России, где были начаты измерения экосистемных потоков ПГ по МТП. Региональная сеть ЭКС KrasFLUX создана на базе Института леса им. В.Н. Сукачева (ИЛ СО РАН) в экосистемах ключевых биоклиматических провинций бассейна реки Енисей (60°–67° с.ш.). История региональных исследований баланса углерода в экосистемах Средней Сибири ведет свое начало с пилотных работ в 1996–1998 гг. (Schulze et al., 1999) и их развития в рамках проектов ЕС EuroSiberian CarbonFlux (1998–2000 гг.) (Heimann, 2002) и Terrestrial Carbon Observation System (TCOS): Siberia (2002–2004 гг.) (Schulze et al., 2002a) под руководством профессора Э.-Д. Шульце, Институт биогеохимии общества Макса Планка (Германия). Помимо регулярных круглогодичных авиационных измерений газового состава (концентрация и изотопный состав CO₂, CH₄ и CO) в пограничном слое атмосферы Енисейского трансекта (Levin et al., 2002*; Lloyd et al., 2002a*), в 1996–1998 гг. были запущены измерения *NEE* в сосняке лишайниковом и на трех участках торфяных болот в районе п. Зотино Туруханского района Красноярского края (Чебакова и др., 2014; Arneeth et al., 2002*; Lloyd et al., 2002b*; Schulze et al., 1999; Schulze et al., 2002b*; Shibistova et al., 2002a*, b*; Tchebakova et al., 2002*), четырехзлаковой степи с преобладанием ковыля в Северной Хакасии (южные районы Средней Сибири) (Чебакова и др., 2014; Belelli Marchesini et al., 2007*). Позднее, в 2000 г., ЭКС начали функционировать на трех участках средней тайги: в березняке, смешанном темнохвойном лесу и пихтарнике в районе п. Ворогово Туруханского района (Röser et al., 2002*). Наблюдения по МТП на ЭКС в районе п. Ворогово осуществлялись до конца вегетационного сезона 2000 г., в районе п. Зотино и в Хакасии — до 2002–2004 гг., после чего, в связи с окончанием международной программы исследований, измерительные системы были демонтированы. В 2004–2006 гг. была создана международная обсерватория “ЗОТТО” в (25 км западнее п. Зотино) и запущены круглогодичные прецизионные исследования концентрации ПГ и аэрозолей атмосферы с помощью уникального комплекса научного оборудования на базе мачты высотой 300 м (Тимохина и др., 2018*; Урбан и др., 2019*). Зона охвата измерений обсерватории составляет более 2.5 млн км² (Урбан и др., 2019*). Для масштабирования инте-

грированных оценок баланса углерода в период с 2004 по 2016 г. была размещена целая сеть ЭКС в ключевых экосистемах. В 2016–2019 гг. работала ЭКС в пихтарнике осоково-разнотравном (вышка демонтирована в 2022 г.). Измерения *NEE* на базе ЭКС дополнены регулярными камерными наблюдениями потоков углерода. В 2018 г. в эстуарной зоне р. Енисей создана обсерватория “DIAMIS” и запущены круглогодичные измерения ПГ в приземной/приводной атмосфере на юго-западном побережье полуострова Таймыр для территории площадью ~625 тыс. км² (Панов и др., 2022*; Panov et al., 2022*).

В настоящее время в Средней Сибири функционируют ЭКС в четырех биогеоценозах (KR-Zo1, KR-Zo2, KR-Tur, KR-Iga; см. ДМ_5, ч. 1; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGONO). На двух южных ЭКС поддерживаются стационарные круглогодичные наблюдения, на двух северных — сезонные (апрель–октябрь). В 2023 г. планируется запуск новой станции (KR-Zo4) на низинном болоте около обсерватории “ЗОТТО”.

В *Новгородской области*, в северо-западной части Европейской территории России, на Валдайской возвышенности расположен исследовательский полигон “Лог Таежный”, принадлежащий Валдайскому филиалу Государственного гидрологического института (ВФ ГГИ), проводящему здесь гидрологические наблюдения. ЭКС NO-Lta (см. ДМ_5, ч. 2; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGONO) расположена на территории Национального парка “Валдайский” в 110-летнем ельнике мелкотравчато-зеленомошном с примесью сосны (Замолодчиков и др., 2017*).

Республика Коми. Первые комплексные исследования гидрологического режима, растительного покрова, запасов углерода и энерго-массообмена на мезо-олиготрофном болоте Усть-Пожер (станция КО-УРо), или Медла-Пэв-Нюр, проведены в 2006–2010 гг. специалистами из Германии в рамках международного проекта Евросоюза “Quantifying the carbon budget in northern Russia: past, present and future”. В 2012–2016 гг. исследования были продолжены сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН в рамках международного проекта ПРООН/ГЭФ “Strengthening protected area system of the Komi Republic to conserve virgin forest biodiversity in the Pechora river headwaters”. В 2013–2014 гг. был обновлен измерительный комплекс КО-УРо, а также открыты еще 3 ЭКС (см. ДМ_5, ч. 3; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGONO): в ельнике (КО-Луа), в сосняке

(КО-Уак), а также на крупнобугристом болоте в Инте. Станция в Инте к 2022 г. остановлена.

В Республике Саха (Якутия) силами сотрудников Института биологических проблем криолитозоны СО РАН создана уникальная в мире и в России международная сеть ЭКС SakhaFluxNet по изучению климатических и биогеохимических циклов в мерзлотной зоне на Северо-востоке России. Здесь в течение 30 лет в рамках 53-х международных и межправительственных проектов по изучению изменения климата с 18 странами мира созданы четыре крупные научные станции мирового уровня, входящие в сети наблюдений Global Carbon Project, CarboEurope, AsiaFlux и ScanNet. Исследованы климатические и биогеохимические особенности репрезентативных мерзлотных экосистем России, оценено состояние природной среды, выявлен характер взаимодействия всех ее частей — атмосферы, биосферы, гидросферы, криолитосферы. ЭКС (см. ДМ_5, ч. 4; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО) были организованы в репрезентативных лесных, лесотундровых и тундровых экосистемах Восточной Сибири (“Эльгээйи” — YA-Elg, 60° с.ш.; “Спасская падь” — YA-SPl, 62° с.ш.; “Кодак”, 70° с.ш.; “Чокурдах” — YA-Ckd, 70° с.ш.). ЭКС Кодак демонтирована в 2016 г. На всех станциях Якутии в связи с суровыми зимними погодными условиями измерения ведутся только в период апрель—октябрь. Для оценки *NEE* в остальную часть года используется зависимость *TER* от *T*, и *NEE* в холодный период (между измерениями) оценивается по модели (Dolman et al., 2004*).

В Тверской области в конце прошлого века были начаты первые на Европейской территории РФ наблюдения на ЭКС на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Исследования проводят сотрудники Лаборатории биогеоэкологии им. В.Н. Сукачева Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Растительность заповедника представлена, в основном, ельниками различной продуктивности, значительную долю территории занимают верховые болота (Минаева, 2001*; Пузаченко и др., 2007*). Основные факторы динамики лесных экосистем — ветровалы и сплошные рубки в зоне рационального природопользования заповедника (Пузаченко и др., 2015*; Vygodskaya et al., 2002*). В рамках международного проекта EuroSiberian Carbonflux в июне 1998 г. начали работу ЭКС в ельнике сфагново-черничном (Milyukova et al., 2002*) и ЭКС на верховом болоте Старосельский мох (Новенко, 2011*; Носова, 2009*; Ivanov et al., 2021*; Kurbatova et al., 2002*); также работала станция на ветровале (Knohl et al., 2002*). В 1999 г. программа исследований была расширена станцией наблюдений в неморальном ельнике.

В 2000 г. на болоте в связи с окончанием международного проекта измерительный комплекс был демонтирован. В 2015 г. при поддержке грантов российских научных фондов пульсационные наблюдения на болоте были возобновлены, а также установлены датчики метана и обновлена приборная база на лесных ЭКС. По состоянию на осень 2022 г. круглогодичные наблюдения ЭКС поддерживаются в 4-х экосистемах (см. ДМ_5, ч. 5; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО); двух ельников с различным гидрологическим режимом (TV-Fyo, TV-Fy2), на зарастающей вырубке (TV-Fy3), а также на верховом болоте (TV-Fy4). Подробное описание объектов исследования и приборной базы представлено в публикациях (Kurbatova et al., 2008; Mamkin et al., 2022; Vygodskaya et al., 2004*).

Томская область. Стационар Плотниково (Плотниковский таежный стационар) основан в 1970 г. Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск) в с. Плотниково Бакчарского района Томской области. Проводятся комплексные исследования почв и растительности. В 1993 г. на Бакчарском болоте (в 16 км на юго-запад от стационара) начаты исследования потоков CH_4 и CO_2 на границе “болото—атмосфера” (Краснов и др., 2015*; Паников, 1995*; Maksyutov et al., 1999*). Первые измерения по МТП на олиготрофном грядово-мочажинном комплексе и открытом мезотрофном участке Бакчарского болота (ТО-Plt) в вегетационные сезоны 1998 (с апреля) и 2000 гг. проводили исследователи из Японии (Shimoyama et al., 1999*, 2003*, 2004*). В рамках Программы СО РАН, проекта Минобрнауки РФ, а также в рамках программы Карбонового полигона Томской области пульсационные наблюдения возобновлены в 2022 г.

Ханты-Мансийский автономный округ. Наблюдения по МТП проводятся на базе международной полевой станции Мухрино (Alekseychik et al., 2016*; Lapshina et al., 2015*) Югорского государственного университета. Станция расположена в центральной части Западной Сибири, в 20 км к юго-западу от Ханты-Мансийска, на второй террасе левого берега р. Иртыш (недалеко от слияния с р. Обь). Станция открыта в 2009 г. при поддержке Правительства Ханты-Мансийского автономного округа и компании “Салым Петролеум Девелопмент Н.В.”, развивалась при поддержке проектов INTERACT, РФФИ, гранта Правительства Тюменской области, а также Карбонового полигона “Мухрино”. Ведется мониторинг биоразнообразия, скорости разложения органического вещества, гидрометеорологические наблюдения (Dyukarev et al., 2021a*, b*). Нетронутое болото Мухрино имеет площадь около ~75 км²,

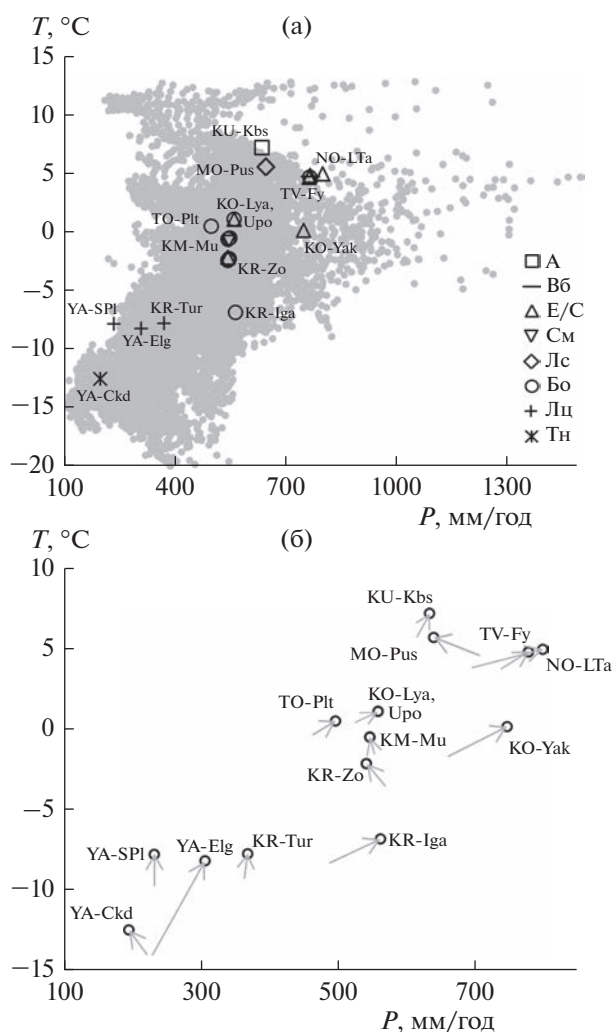


Рис. 4. Распределение станций наблюдений по среднегодовой температуре воздуха (T) и годовой сумме осадков (P) по ближайшей к измерительному комплексу стандартной метеостанции за 1991–2020 гг.: (а) распределение на фоне T и P по всей территории России; (б) современное изменение климата по ближайшей к станции RuFlux метеостанции. Коды станций приведены в табл. 1.

Примечания. На рис. 4а серые кружки показывают среднегодовую T и P из архива CRU TS v4.03 (Harris et al., 2020*) по регулярной сетке 0.5° для всей территории России за 1991–2020 гг. Значки, обозначающие станции (в зависимости от типа экосистемы и растительности): А – агроландшафт, В6 – вырубка, Е/С – еловый или сосновый лес, См – смешанный лес, Лс – лиственный лес, Бо – болото, Лц – лиственничный лес, Тн – тундра. Индексы станций приведены в табл. 1. На рис. 4б начало стрелки – T и P за 1961–1990 гг., черные кружки – T и P за 1991–2020 гг. Первый период для станции TO-Plt – 1966–1990 гг., для MO-Pus – 1973–1990 гг.

основную часть занимают обширные грядово-мочажинные комплексы, по периферии расположены сосново-кустарничково-сфагновые участки (Lamentowicz et al., 2015*; Tsyganov et al., 2021*). Средняя глубина торфа составляет 3.3 м, макси-

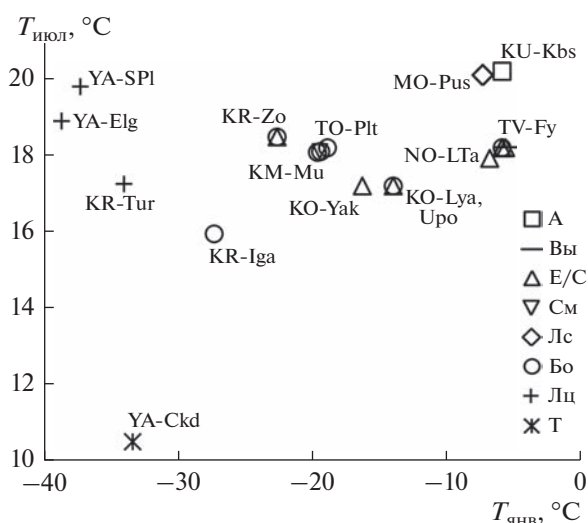


Рис. 5. Распределение станций наблюдений по средней температуре января ($T_{\text{январь}}$) и июля ($T_{\text{июль}}$) по ближайшей к измерительному комплексу стандартной метеостанции за 1991–2020 гг. Обозначение станций см. на рис. 4. Индексы станций приведены в табл. 1.

мальная – более 5 м (Bleuten et al., 2020*). По состоянию на осень 2022 г. в Мухрино действуют две ЭКС: KM-Mu1 и KM-Mu2 (см. ДМ_5, ч. 6; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: СТГОНО).

Система наблюдений за потоками ПГ на станции “Мухрино” продолжает расширяться. Установлена вышка в массиве смешанного леса, в 2023 г. планируется запуск наблюдений.

Таким образом, 16 действующих станций измерений объединены в пять региональных сетей в следующих регионах: Красноярский край, Республика Коми, Республике Саха (Якутия), Тверская область, Ханты-Мансийский автономный округ; еще две станции функционируют в Новгородской и Томской областях. В 2023 г. планируется установка двух новых ЭКС в Московской (MO-Pus) и Курской (KU-Kbs) областях. Еще по одной станции планируется запустить в Красноярском крае (KR-Zo4) и Ханты-Мансийском автономном округе (KM-Mu3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Репрезентативность станций для территории России

Для оценки репрезентативности распределения станций по территории России они размещены в координатах средней многолетней T и годовой суммы P (рис. 4), T января и июля (рис. 5), показана доля станций в разных биоклиматических зонах и типах экосистем (рис. 6).

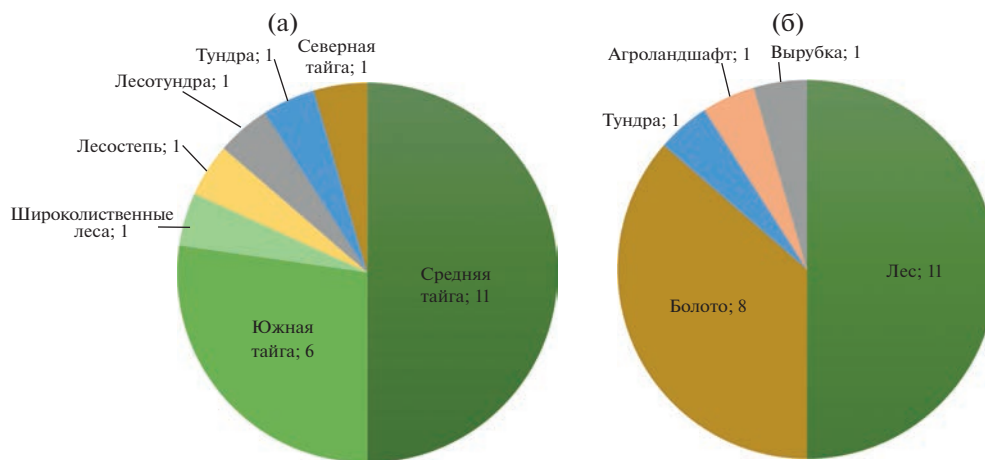


Рис. 6. Распределение станций наблюдений RuFlux по основным биоклиматическим зонам (а) и в разных типах экосистем (б).

Примечание: Деление природных зон и подзон дано согласно общим принципам классификации С.Ф. Курнаева (1973*, 1982*).

Диапазон среднегодовых T на станциях RuFlux составил от -12.5 (YA-Ckd) до 5.0°C (NO-LTa). Диапазон среднегодовых P составил от 196 (YA-Ckd) до 799 мм (NO-LTa). T июля на всех станциях, кроме лесотундровой станции KR-Iga и тундровой станции YA-Ckd, находится в пределах $17-20^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5), в то время как T января изменяется при движении с востока на запад от -38.7 (YA-Elg) до -5.9°C (KU-Kbs). По средней T июля ($+10.5^{\circ}\text{C}$) резко выделяется самая северо-восточная станция сети в тундре Якутии, YA-Ckd.

В районах всех станций RuFlux, согласно данным ближайших к ним станций стандартной метеорологической сети, наблюдается увеличение среднегодовых T в период 1991–2020 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг. (см. рис. 46, серые стрелки). Для 12 станций из 22 увеличение среднегодовой T превышает одно среднеквадратичное отклонение. Минимальное увеличение составило 0.7°C (KO-Lya, KO-UPo), максимальное – 5.9°C (YA-Elg), среднее – $1.4 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ($\pm\text{SD}$); это меньше, чем по России за тот же период – около 2.0°C (Доклад ..., 2020*). Это свидетельствует о том, что регионы России, в которых изменения климата происходят наиболее интенсивно, слабо охвачены измерениями потоков ПГ. На семи станциях отмечено увеличение среднегодового количества P , на девяти – уменьшение, на шести изменения крайне малы; в среднем по сети ни на одной станции изменение годовой суммы P не превышало среднеквадратичного отклонения. Тренды P не зависели от географического положения.

Большая часть (76%) станций RuFlux расположена в подзонах средней и южной тайги (см. рис. 6) в лесных и болотных экосистемах. Четыре из пяти станций в лесных экосистемах Европейской терри-

тории России находятся в еловых лесах (NO-LTa, KO-Lya, TV-Fyo, TV-Fy2); единственная станция расположена в сосновом лесу (KO-Yak), по состоянию на 2022 г. ни одной станции не действовало в мелколиственных лесах. В 2023 г. планируется запустить измерения на двух станциях (TV-Fy3, MO-Pus) в молодняках, сформированных мелколиственными лесообразующими породами (береза, осина).

Количество станций-лет либо станций-вегетационных сезонов, измеренных на ЭКС сети RuFlux, также намного больше в лесах, чем во всех остальных типах экосистем. Так, если сравнивать июльские данные, для лесов имеются измерения более чем по 70 таким месяцам, а для болот – только 13. В первую очередь это обусловлено наличием длинных рядов наблюдений на станциях в двух лесных экосистемах: TV-Fyo (24 полных года наблюдений по состоянию на 2022 г.) и YA-SPI (23 полных года наблюдений).

Чистый экосистемный обмен

Суммы NEE за год и за вегетационный сезон. По состоянию на 2015–2020 гг. все экосистемы, кроме вырубки (TV-Fy3) и двух ельников Тверской области (TV-Fyo, TV-Fy2), функционировали как стоки CO_2 из атмосферы (табл. 2). При этом суммы NEE только за вегетационный сезон в ельниках были также отрицательными. На разных станциях суммы NEE за вегетационный сезон варьировали от -40 до -270 г $\text{C}/\text{м}^2$.

Если не учитывать станцию на вырубке (TV-Fy3), только одна экосистема – заболоченный ельник в Тверской области (TV-Fyo) – являлась в среднем за все годы (с 1999 г.) источником CO_2 для атмосферы. Из 23 лет измерений еловый лес TV-Fyo 19

Таблица 2. Чистый экосистемный обмен углекислого газа (*NEE*) на станциях RuFlux

Станция	<i>NEE</i> * ± <i>SD</i> между годами (годы, за которые посчитана сумма), г С/м ²		Источник
	год	вегетационный период	
KR-Zo1	–193 (2015)	От –139 до –253 (2013–2021)	Данные авторов
KR-Zo2	–91 (2015)	От –86 до –132 (2013–2021)	Данные авторов
KR-Tur	–	От –53 до –168 (2004–2005, 2007–2008, 2013–2021)	Данные авторов
KR-Iga	–	От +23 до –58 (2016–2020)	Данные авторов
NO-LTa	–300 (2010–2011), –90 (2018)		Karelin et al., 2021
KO-Lya	–	–327 (2013), –174 (2016)	Zagirova et al., 2019b
KO-UPo	–	–85 (2012), –77 (2013)	Mikhaylov et al., 2019
YA-SPI	–212 ± 34 (2000–2001, 2003–2011, 2013–2014)		Maximov et al., 2019
YA-Elg	–243 ± 23 (2010–2015)		Maximov et al., 2019
YA-Ckd	–75 ± 14 (2003–2011)		Maximov et al., 2019
TV-Fyo	200 (1999–2004)	–	Kurbatova et al., 2008
	73 ± 80 (2005–2014)		FLUXNET2015***
	31 ± 74 (2015–2020)	От –142 до 28 (2015–2020)	Mamkin et al., 2023
	106 ± 122** (1999–2020)		FLUXNET2015 ³ и Mamkin et al., 2023
TV-Fy2	–144 (1999–2004)	–	Kurbatova et al., 2008
	89 ± 103 (2016–2020)	От –158 до 121 (2016–2020)	Mamkin et al., 2022
TV-Fy3	–	От 193 до 553 (2016–2020)	Mamkin et al., 2019a, b
TV-Fy4	–	–60 (1998)	Schulze et al., 1999
	–	26 (1999)	Kurbatova et al., 2009
	–95 (2020)	От –108 до –132 (2016, 2019, 2020)	Mamkin et al., 2023
KM-Muh	–	–202 (2015)	Alekseychik et al., 2017
	–83 (2022)	–115 (2022)	Данные авторов
TO-Plt	–	–88 (2022)	Данные авторов

Примечание. * Отрицательный *NEE* означает нетто-сток углекислого газа из атмосферы в экосистему.

** Ряд нестационарен: имеется значимый нисходящий тренд.

*** <https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/> (дата обращения 13.11.2022).

лет был источником CO₂ и всего 4 года – стоком. В ельнике TV-Fyo около 80% высокой экосистемной эмиссии CO₂ составляло дыхание почвы (Kurbatova et al., 2013*). В неморальном ельнике TV-Fy2, находящемся в нескольких километрах от заболоченного, в среднем за 1999–2004 гг. зафиксировано нетто-поглощение CO₂ (*NEE* = –200 г С/м² в год), а в среднем за 2016–2020 – уже нетто-эмиссия (*NEE* менее 100 г С/м² в год).

В ельнике в Республике Коми (KO-Lya) *NEE* составил –327 (2013 г.) и –174 г С/м² (2016 г.) за вегетационный сезон; судя по имеющимся отрывочным измерениям *NEE* в зимний период, в первом случае ельник был средним по величине стоком CO₂ в целом за год, а во втором годовой баланс CO₂ был около нуля. В сезон с меньшим стоком отмечен дефицит *P* и высокая *T* в начале вегетации. *NEE* по области охвата вышки в Новгородской об-

ласти (NO-LTa) изменился с –300 г С/(м² год) в 2010–2011 г. до –90 г С/(м² год) в 2018 г. (Karelin et al., 2021).

В отличие от тайги Европейской территории, среднетаежные экосистемы Сибири были стабильным стоком CO₂ для атмосферы с величинами от умеренных до значительных. Среднетаежные листовенничники Якутии в зоне многолетней мерзлоты (YA-SPI и YA-Elg) представляют собой большой по величине сток CO₂, в среднем более 200 г С/(м² год). *NEE* в зимний период, по оценкам (Dolman et al., 2004*; Takata et al., 2017*), составлял на станции YA-SPI всего лишь около 20–35 г С/(м² сезон). Оценки *NEE* за вегетационный сезон для станций YA-SPI и YA-Elg составляют –230...–275 г С/(м² сезон) соответственно. Очень схожие значения стока зафиксированы в среднетаежном сосняке лишайниковом (KR-Zo1) в Крас-

ноярском крае (до 250 г С/(м² сезон)). Северотаежный лиственничник в зоне многолетней мерзлоты в Красноярском крае за вегетационный сезон был более слабым стоком CO₂ (в пределах 50–170 г С/(м² сезон)), чем упомянутые выше экосистемы.

Три болота и сосновый рям подзоны средней тайги на Европейской территории России, в Западной и Средней Сибири (КО-Уро, КМ-Мух, ТО-Plt, KR-Zo2) были небольшим или средним (в пределах 100–150 г С/м² в год) стоком CO₂. Плоскобугриное болото около Игарки (KR-Iga) в экотоне лесотундры, а также верховое болото в Тверской области (TV-Fy4) выступали слабым источником CO₂ в один год среди пяти лет измерений (в пределах 50 г С/м² в год), а в остальные четыре года измерений они представляли собой стоки CO₂ с величиной до 100 г С/м² в год. Таким образом, болота являются небольшими либо средними по интенсивности стоками CO₂, за исключением единичных лет на отдельных болотах.

Единственная по состоянию на осень 2022 г. станция мониторинга RuFlux в тундре (YA-Ckd) была относительно небольшим (в пределах 100 г С/м² в год) и устойчивым стоком CO₂.

В отличие от ненарушенных экосистем, единственная в выборке антропогенно-измененная экосистема – вырубка – была очень сильным источником CO₂ для атмосферы (от 190 до 550 г С/м² за вегетационный сезон). По данным измерений в 1998 г., ветровал второго года зарастания в еловом лесу Тверской области также являлся источником CO₂ для атмосферы (Knohl et al., 2002*).

Межгодовая изменчивость и многолетние тренды NEE. На подавляющем большинстве лесных станций отмечена значительная межгодовая изменчивость баланса CO₂, связанная, в первую очередь, с межгодовыми вариациями погодных условий и, во вторую очередь, – с режимом нарушений. Межгодовая изменчивость баланса CO₂ в лесах России в целом снижалась с запада на восток.

Четыре ельника Европейской территории России, в которых ведутся наблюдения по МТП, демонстрируют большие межгодовые вариации NEE по сравнению с лесами Сибири. В трех ельниках также зафиксированы долговременные тренды NEE. Ельник КО-Луа был стоком CO₂ для атмосферы либо был примерно углеродно-нейтральным в 2013 и 2016 гг., TV-Fy2 был стоком в начале 2000-х, но стал источником в 2016–2020 гг., TV-Fyо был снижающимся источником CO₂ для атмосферы в течение периода с 1998 по 2020 г., и NO-LTa был стоком в 2010–2011 и 2018 гг., но стал источником в 2020–2022 гг.

Баланс углекислого газа ельника TV-Fyо отличался двумя специфическими особенностями: во-первых, большим разбросом значений NEE между годами (от 359 до –63 г С/м² в год за период 1999–2020) и, во-вторых, значимым (тест Манна–Кендалла, $p < 0.01$) снижением годовых сумм NEE на протяжении многолетнего ряда измерений. За 23 года из сильного источника CO₂ (до 350–360 г С/м² в год в 1999 и 2001 гг.) ельник стал слабым источником (в пределах 50 г С/м² в год в среднем за 2016–2020). Вероятно, это было связано с повышением весенних и зимних T (что смещало баланс углерода ельника в сторону стока CO₂), а также с интенсивным развитием подроста. Такая же большая изменчивость между годами, но при этом противоположно направленный тренд NEE выявлен для соседнего неморального ельника TV-Fy2. В зоне охвата измерений TV-Fy2 вследствие сильного ветра в 2017 г. появились отдельные упавшие деревья и небольшая площадь, занятая ветровалом.

Ельник NO-LTa в 2010–2011 гг. был сильным стоком CO₂ для атмосферы, в 2018 г. – уже слабым стоком, а после ветровала 29.10.2019 перешел в состояние источника CO₂. Анализ величины NEE по направлениям ветра показал высокую положительную корреляцию между эмиссией CO₂ и площадями, занятыми усыхающим древостоем и безлесными участками в области охвата вышки (Karelin et al., 2021). Снижение модуля NEE между 2010–2011 и 2018 гг. не может быть объяснено только различием погодных условий; наиболее вероятно, оно было связано с массовой гибелью древостоя (Karelin et al., 2021).

Таким образом, в непосредственной близости от станций NO-Lta, TV-Fyо и TV-Fy2, в зоне охвата вышек, в 2010-х годах появились большие очаги усохших елей и/или ветровалов; фактически, на этих станциях по состоянию на 2022 г. оцениваются потоки CO₂ в экосистемах с сильными природными нарушениями. В целом, обобщение данных пульсационных измерений в еловых лесах Европейской территории России показывает значительную нестабильность баланса углерода в этих лесах.

Для лесных экосистем Средней и Восточной Сибири характерны наименьшая из всех лесов относительная изменчивость сумм NEE по годам и устойчивый год от года сток CO₂. Диапазон изменчивости NEE в лесах северной и средней тайги (KR-Zo1, KR-Tug, YA-SPl, YA-Elg) составлял около 100 г С/м² в год. Межгодовая изменчивость в лиственничниках Якутии была связана с вариацией погодных условий. Из 16 лет (2000–2015) на станции YA-SPl наименьший сток (170 г С/м² в год) был зафиксирован в очень сухой 2001 г., а максимальный (270 г С/м² в год) – в сравнительно влажный 2006 г. Наблюдалось значительное умень-

шение аккумуляции CO_2 как в засушливые, так и в сильно переувлажненные годы (Максимов и др., 2005*; Iwasaki et al., 2010*; Maximov et al., 2003*). В целом, высокочувствительные экосистемы криолитозоны могут быть и источниками CO_2 в зависимости от сезона, погодных условий и интенсивности лесных пожаров (Maximov et al., 2019). Межгодовые вариации углеродного баланса мерзлотных лесных экосистем важно учитывать при верификации и валидации бюджета углерода России.

Межгодовая вариация абсолютных значений *NEE* в тундре северо-восточной Якутии (YA-Ckd) была еще меньше, чем в среднепродуктивном лиственничном лесу (YA-SPI) в Центральной Якутии (Maximov et al., 2019).

Болота являются достаточно устойчивыми стоками CO_2 , хотя отдельные болота в засушливые годы могут стать слабыми источниками CO_2 (TV-Fy4 в 1999 г. и KR-Iga в 2016 г.).

Сезонный ход *NEE* и продолжительность вегетационного сезона. Все экосистемы, кроме вырубки (TV-Fy3) функционировали в среднем за вегетационный период как стоки CO_2 из атмосферы (рис. 7) благодаря преобладанию *GPP* над *TER*. Так как почти все холодное время года экосистемы были источниками CO_2 из-за преобладания эмиссии CO_2 из почв в атмосферу, то длительность вегетационного сезона может быть важным фактором, влияющим на экосистемный баланс CO_2 в сумме за год (Masyagina et al., 2020*).

Продолжительность вегетационного сезона⁵ уменьшалась при движении с запада на восток и от лесов к безлесным типам растительности (рис. 8). Средняя длительность вегетационного сезона в течение 2015–2022 гг. (за имеющиеся годы измерений) для разных ЭКС в лесах составляла от 117 дней в средней тайге Восточной Сибири до 188 дней в южной тайге западной части Европейской территории России.

На болотах Европейской территории России вегетационный сезон был на три-семь недель короче по сравнению с лесами из-за более позднего таяния снега. На сосновом ряме KR-Zo2 неттопоглощение CO_2 длилось на две недели меньше, чем в сосняке KR-Zo1. На тундровой (YA-Ckd) и лесотундровой (KR-Iga) станциях вегетационный сезон составлял всего 62 и 72 дня соответственно и был в среднем вдвое короче вегетационного сезона лесов средней тайги (YA-SPI, YA-Elg, KR-Zo1).

⁵ Вегетационный сезон определен как сезон между сроками перехода среднесуточного *NEE* экосистемы от источника к стоку весной или в начале лета и от стока к источнику осенью. Начало и конец вегетационного сезона для большинства станций определены по графикам кумулятивного *NEE* (см. рис. 7) как локальные экстремумы: положительный весной либо в начале лета и отрицательный – осенью.

Весенние значения *NEE*

В ельниках Европейской территории России (TV-Fyo, TV-Fy2, KO-Lya), а также на станции измерений в пихтарнике в Зотино отмечено раннее начало поглощения CO_2 , еще при отрицательных среднесуточных *T*. Отрицательные значения *NEE* в это время зависели от фотосинтетически активной радиации и *T* и, по-видимому, представляли собой не технические артефакты измерений, а результат фотосинтетической активности вечнозеленых растений (полога и нижних ярусов). Более того, в апреле либо мае, при еще отрицательных *T*, до полного схода снежного покрова, измерительные системы фиксировали небольшие стоки даже в лиственничниках (KR-Tur, YA-Spl, YA-Elg). Их происхождение остается вопросом дальнейших исследований.

У заболоченного ельника TV-Fyo поглощение CO_2 в основном происходило весной (май), а уже начиная с июля он становится источником CO_2 для атмосферы. Таким образом, погодные условия весны во многом определяли годовой баланс CO_2 TV-Fyo.

Летние значения *NEE*

Для сравнения способности к поглощению CO_2 экосистемами рассмотрены значения в июле, т.е. в середине лета, когда на большинстве станций отмечается близкое к максимальному неттопоглощение CO_2 . Для каждой станции было найдено среднее значение, а также стандартное отклонение (рис. 9а) для всех дней из нескольких июлей, выбранных для анализа. Июли были включены в выборку, если выполнялись три условия: 1) имеются измерения для всего месяца; 2) на станциях с большим количеством лет наблюдений были взяты только 3 последних года (для обеспечения сопоставимых размеров выборок на станциях с малым и большим количеством лет наблюдений); 3) год не был аномальным по погодным условиям. В середине лета вариации суточного *NEE* в лесах Европейской территории России оказались больше, чем в Сибири.

Из всех анализируемых экосистем наибольшие флуктуации июльских значений оказались характерны для единственной антропогенно нарушенной экосистемы – вырубки TV-Fy3. На Европейской территории России вариация суточных сумм *NEE* в июле на болоте (TV-Fy4) была меньше, чем в лесах (TV-Fyo, TV-Fy2, NO-LTa, KO-Lya). Требуется уточнить, что у сосняка в Республике Коми KO-Yak максимальный сток был отмечен в июне, у ельника TV-Fyo – в мае. Суточные суммы *NEE* в июле сравнительно слабо менялись на болотах подзон средней и южной тайги Западной Сибири (KM-Muh, TO-Plt). Однако на этих станциях имеются данные только по одному

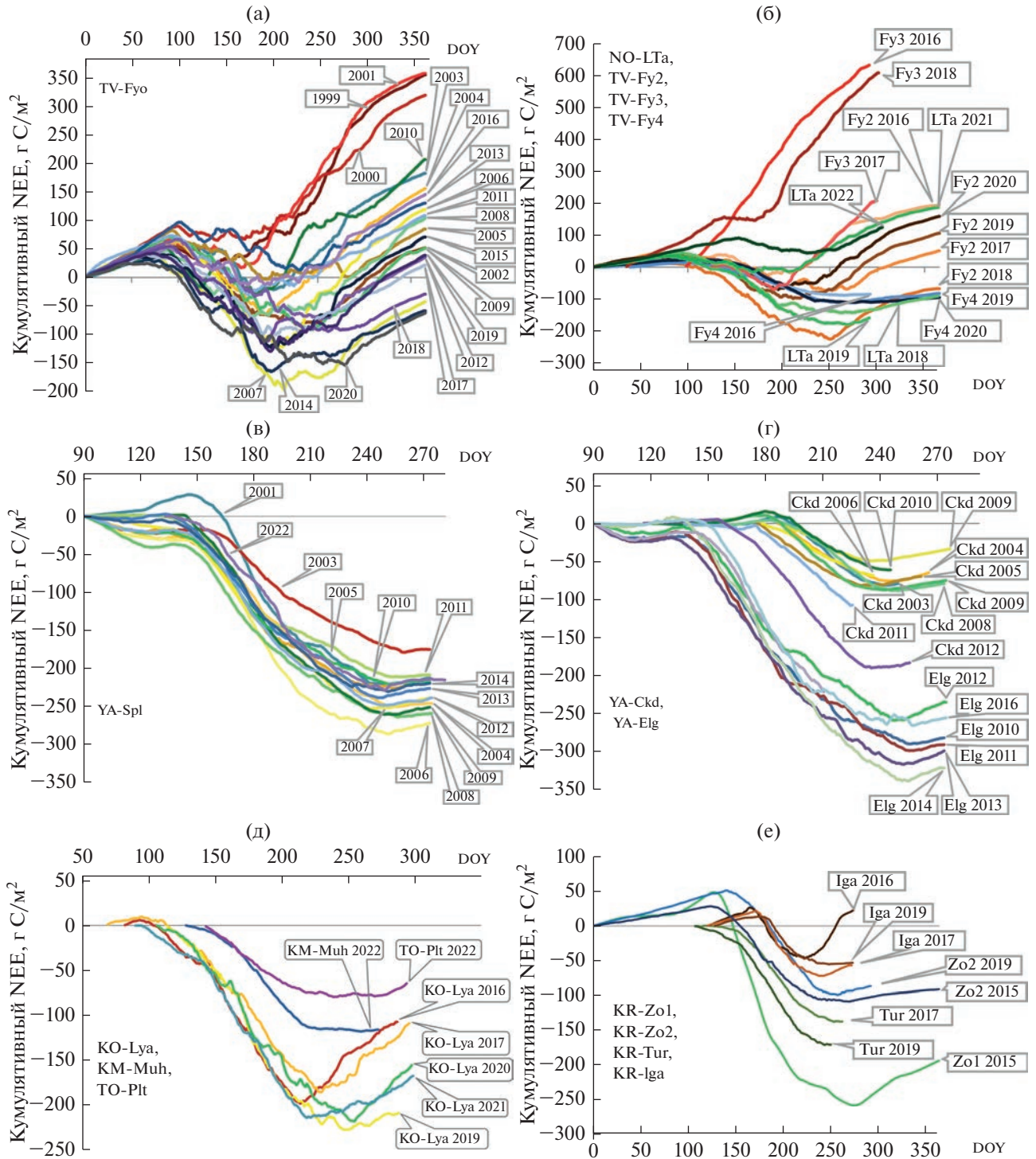


Рис. 7. Кумулятивный чистый экосистемный обмен CO_2 (NEE) в зависимости от дня года (DOY): в различных экосистемах Тверской и Новгородской областей (а, б); в лиственничниках и тундре Якутии (в, г); в лесных и болотных экосистемах Республики Коми, Ханты-Мансийского АО и Томской области (д); в лесных и болотных экосистемах Красноярского края (е).
 Примечание: Каждая линия представляет собой накопление суточных значений NEE за один год измерений. Коды станций приведены в табл. 1.

году и для более надежных выводов требуются более длительные измерения. Вариация NEE в июльские дни увеличивалась в лиственничниках

от низкопродуктивного северотаежного (KR-Tur) к среднепродуктивному среднетаежному (YA-SPI) и далее к высокопродуктивному средне-

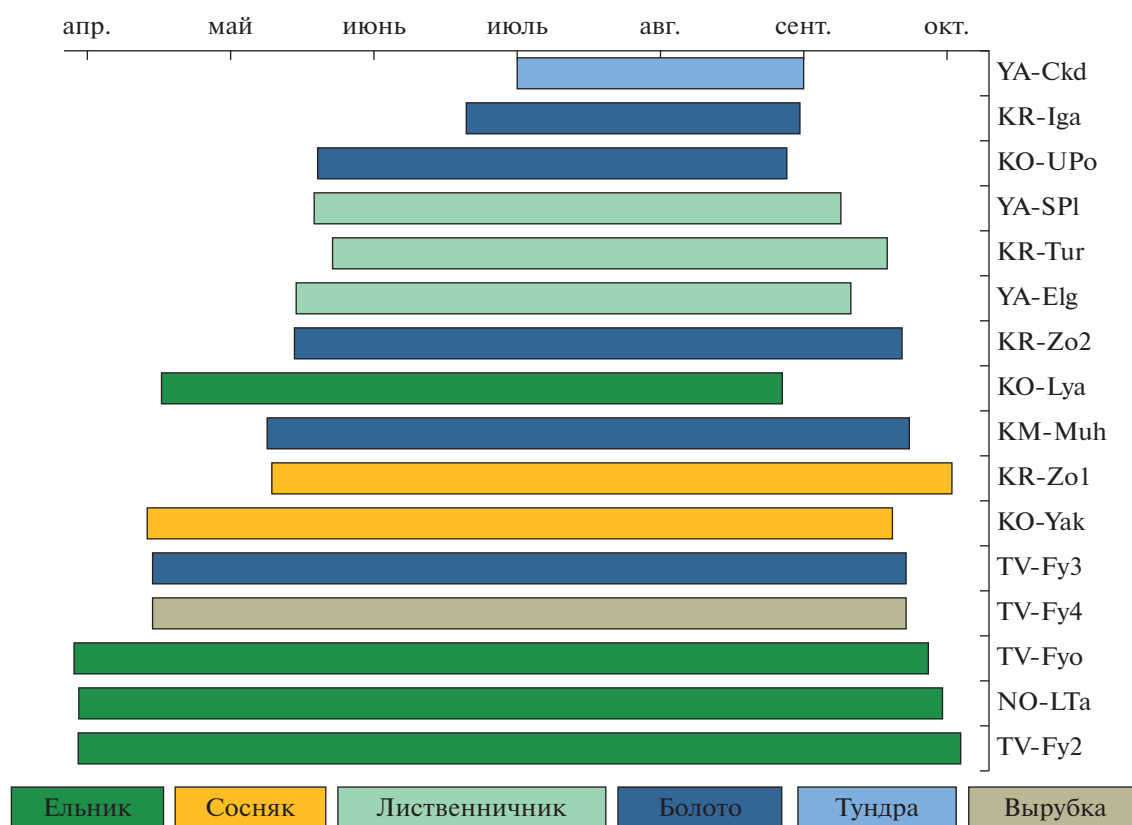


Рис. 8. Вегетационный сезон на станциях сети RuFlux.

таежному (YA-Elg). Средним разбросом значений характеризовались станции на болоте в лесотундре (KR-Iga) и в тундре (YA-Ckd), а также облесенное болото Средней Сибири (KR-Zo2). Слабый разброс и низкие значения NEE в июле (значительный сток) отмечен для сосняка лишайникового Средней Сибири (KR-Zo1). Среди всей выборки наиболее сильное нетто-поглощение в середине лета выявлено в высокопродуктивном лиственничнике (YA-Elg).

Среднее суточное значение июльского NEE и стандартное отклонение значений по всем дням июля для лесов (TV-Fyo, TV-Fy2, NO-LTa, KO-Lya, KR-Zo1, KR-Tur, YA-SPI, YA-Elg), оказалось равно -1.55 ± 0.76 г C/(м² сут), среднее значение для болот (TV-Fy4, KM-Muh, TO-Plt, KR-Zo2) составило -1.40 ± 0.40 г C/(м² сут). Средние значения для лесов и болот не отличались значимо (U -критерий Манна–Уитни, $p = 0.05$). При этом разброс суточных значений в июле для болот по имеющейся выборке в 2 раза ниже, чем в лесах (различие дисперсий по F -тесту также не значимо при $p = 0.05$). Частично это может быть связано с меньшим количеством станций-лет в выборке по болотам ($n = 11$) по сравнению с лесами ($n = 22$). Разброс суточных значений NEE для июля на станции с наибольшими вариациями NEE – вы-

рубке TV-Fy3 (± 2.99 г C/(м² сут)) – более чем в 6 раз превышает разброс на станции с наиболее стабильным NEE в середине лета, т.е. на болоте в Мухрино KM-Muh (± 0.43 г C/(м² сут)).

NEE в зимнее время

Для оценки средних величин и изменчивости NEE в середине зимы были построены средние суточные и стандартные отклонения NEE в январе на разных станциях (рис. 9б). Абсолютная величина NEE снижалась с усилением суровости зим с величин $0.4–0.65$ г C/(м² сут) в ельниках Европейской территории России до близких к нулю величин в лиственничниках Якутии при средних январских T ниже -35°C .

В ельниках Европейской территории России (KO-Lya, TV-Fyo, TV-Fy2) в январе при оттепелях ЭКС фиксировали отрицательные значения NEE (сток CO₂), зависевшие от фотосинтетически активной радиации и T . Несмотря на преобладание зимой экосистемной эмиссии CO₂, сильно зависящей от T , в относительно теплые зимы баланс CO₂ TV-Fyo и KO-Lya смещался в сторону поглощения. Сравнение потоков CO₂ на TV-Fyo, полученных зимой 2015/2016 гг., когда средняя T была близка к норме, и в аномально теплую зиму

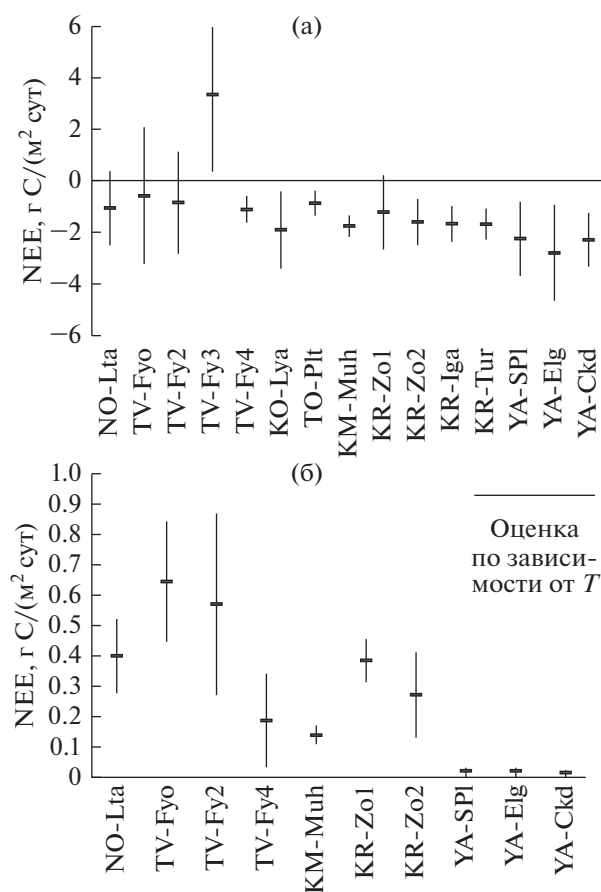


Рис. 9. Среднесуточная величина чистого экосистемного обмена CO₂ (*NEE*) на каждой станции за июль (а) и январь (б).

Примечание: Среднее показано черточкой, “усами” – стандартные отклонения по всем значениям всех дней в нескольких выбранных месяцах. Станции слева направо расположены по снижению средней годовой температуры воздуха.

2019/2020 гг. с отсутствием устойчивого снежного покрова показало, что положительная аномалия *T* зимой привела к достоверному увеличению соотношения *GPP/TER* в ельнике (Mamkin et al., 2022).

Для станции KR-Iga в период активного снеготаяния (третья декада мая–начало июня) и вплоть до полного схода снежного покрова средняя величина эмиссии CO₂ составляла 0.42 г C/м² сут, что может быть связано с всплесками дыхания почв и высвобождением CO₂ при оттаивании. В пихтарнике в Зотино средняя величина *NEE* в зимний период (октябрь–апрель) достигала 0.6 г C/м² сут.

Для экосистем Средней Сибири зимние оценки эмиссии CO₂ по МТП оказались на 75–80% ниже оценок, полученных камерным и градиентным методами (Панов и др., 2021*). Причина расхождений, вероятно, заключается в невыполнении допущений МТП в условиях стабильной

стратификации атмосферы при низкой зимней *T*. Для получения зимних оценок с помощью МТП при низких *T* требуется тщательный анализ условий турбулентности, также желательна верификация зимнего дыхания, полученного с помощью МТП, с помощью камерных методов.

NEE в зимний период, с октября по апрель, на станции YA-SPI оценивался всего лишь в 20 г C/(м² сезон) (Dolman et al., 2004*) или 35 г C/(м² сезон) (Takata et al., 2017*) из-за очень низких зимних *T* (среднее суточное значение за весь холодный сезон составило 0.10–0.17 г C/м²). При этом в декабре–феврале экосистемный поток CO₂ близок к нулю (Dolman et al., 2004*; Takata et al., 2017*).

Влияние факторов среды на *NEE*. Влияние факторов среды на *NEE* было неоднозначным и различалось в разных экосистемах, даже расположенных близко, в первую очередь вследствие того, что величина *NEE* является результирующей двух разных процессов – продукции экосистемы (*GPP*) и ее дыхания (*TER*). На эти процессы оказывают влияние различные факторы среды: *TER* в первую очередь зависит от *T* и влажности почвы (в заболоченных экосистемах – от уровня грунтовых вод, в мерзлотных – от протаивания сезонного талого слоя); *GPP* – от освещенности и *T*.

В лесах Европейской территории России в вегетационный период увеличение *T* могло привести и к снижению, и к увеличению *NEE* в зависимости от условий увлажнения. Весеннее увеличение *T*, когда влаги в почве достаточно, приводило к усилению стока заболоченного ельника TV-Fyo. Летом, если рост *T* сопровождался увеличением *P*, то величина *NEE* ельников NO-LTa и TV-Fyo также снижалась (экосистемы смещались в сторону большего стока CO₂). Небольшие положительные аномалии *T* приводили к усилению поглощения CO₂ в ельниках TV-Fyo и TV-Fy2 (Mamkin et al., 2022). При низком уровне грунтовых вод увеличивалась эмиссия CO₂ из почвы в TV-Fyo. В сухих и жарких условиях одного и того же 2016 г. *NEE* TV-Fy2 снизился и ельник стал стоком вместо источника, а *NEE* KO-Lya при дефиците *P* и высокой *T* в начале вегетации, наоборот, сместился от значительного стока к не такому большому в целом за вегетационный сезон. При среднесуточной *T* воздуха выше 27°C (аномально жаркие летние условия) ельник NO-LTa становился источником CO₂ (Замолодчиков и др., 2017*). В экстремально засушливое лето 2010 г. *NEE* снижался (экосистема становилась стоком CO₂ вместо источника) при увеличении объемной влажности почвы с 5 до 20%, при этом в периоды с обычным увлажнением такой зависимости не было выявлено (Замолодчиков и др., 2017*). При среднесуточной *T* от 10 до 20°C сток CO₂ в экосистему NO-LTa был максимален (Замолодчиков и др., 2017*). Параболическая температурная зависи-

мость стока была также показана для тундры на станции Лаврентия (Zamolodchikov et al., 2003*): минимальный сток наблюдался как в наиболее холодный, так и в самый теплый год измерений. На протяжении вегетационного периода интенсивность NEE в экосистеме KR-Zo1 возрастала пропорционально росту T , с пиковыми значениями NEE в конце июня—начале июля.

Величина стока в лиственничниках (KR-Tur, YA-SPI, YA-Elg) с середины июля начинала снижаться в связи с сезонным протаиванием многолетнемерзлых пород и ростом почвенного эмиссионного потока CO_2 в атмосферу. В засушливые годы NEE лиственничников YA-SPI и YA-Elg был максимальным в июне (в начале вегетации), а не в июле (Maximov et al., 2019). Переход от ассимиляции углерода растительным покровом KR-Tur к его выделению отмечался при понижении среднесуточной T до $+5^\circ C$. Очень влажный год привел к пожелтению хвои лиственниц на станции YA-SPI (Iwasaki et al., 2010*).

Сток CO_2 в северотаежные и среднетаежные лиственничники был выше, чем у ельников Европейской территории России, несмотря на сокращение вегетационного сезона до 3,5 мес. по сравнению с 6–7 мес. у ельников. Анализ соотношения TER и GPP в этих экосистемах дает объяснение, почему лиственничники Восточной Сибири были большими стоками CO_2 , чем ельники Европейской территории России даже за те годы измерений, когда ельники были слабонарушенными. Во-первых, фотосинтез лиственничников в тех же условиях более интенсивный, чем у елей (Yugodskaya et al., 1997*) и, во-вторых, почвенное дыхание в сумме за год ниже у экосистем Сибири по сравнению с Европейской территорией России (Максимов, 2007*). В сумме за вегетационный сезон дыхание ниже вследствие более короткого вегетационного сезона, а в зимний период — вследствие значительно более низких зимних T .

Переключение болот TV-Fyo и KR-Iga от стока CO_2 к источнику произошло вследствие очень сухих и теплых условий. При этом теплые вегетационные сезоны, в которые выпадало достаточно осадков для поддержания высокого уровня грунтовых вод, обеспечивают большое нетто-поглощение CO_2 в болотах и заболоченных лесах (Alekseychik et al., 2017; Arneth et al., 2002*; Kurbatova et al., 2008, 2009; Mamkin et al., 2023). Низкие зимние T ведут к снижению суммарной эмиссии CO_2 болот в зимнее время. Так, вместе со снижением зимних T снижалась эмиссия CO_2 на верховом болоте Красноярского края по сравнению с верховым болотом в Тверской области (Arneth et al., 2002*).

Возможность прогнозов баланса углекислого газа и площадных оценок с помощью данных станций RuFlux

Продолжение измерений на станциях сети RuFlux, дальнейшее обобщение и анализ данных мониторинга позволит делать прогнозы изменений сумм и сезонного хода NEE на основе анализа зависимостей NEE от факторов среды, а также региональные и национальные оценки баланса CO_2 природных экосистем. Для прогнозов требуются достаточно длительные ряды наблюдений, а для площадных оценок — накопление данных по пространству, в разных типах экосистем. Ниже представлены примеры уже опубликованных работ по прогнозам и площадным оценкам по станциям России, а также перспективные направления развития сети мониторинга RuFlux.

Прогнозы баланса углекислого газа. С помощью данных по МТП получены прогнозы баланса углекислого газа для некоторых станций. Карелин и др. (2020) прогнозируют превращение елового леса в Новгородской области NO-LTa из стока в источник углерода для атмосферы при увеличении площади, занятой распадающимися древостоями, до 27%. Засушливые и жаркие годы часто приводят к массовой гибели елей (Карелин и др., 2020). Волны жары будут усиливаться с потеплением климата (IPCC, 2021*); весьма вероятно усиление тенденций массовой гибели ельников (Yuste et al., 2019*), являющихся самыми распространенными типами лесов на Европейской территории России.

Два ельника в Тверской области, различающихся условиями почвенного увлажнения (TV-Fyo, TV-Fy2), показывали различный отклик на жаркие и засушливые условия (Mamkin et al., 2022), а также противоположные многолетние тренды. Таким образом, необходимо учитывать локальные условия почвенного увлажнения при прогнозе баланса углерода лесных экосистем в условиях современных изменений климата.

При прогнозируемом потеплении одновременно с увеличением количества осадков в таежной зоне (IPCC, 2021*) болота и заболоченные леса будут становиться более интенсивным стоком CO_2 из атмосферы [по (Kurbatova et al., 2008)], однако изменения углеродного баланса будут зависеть от соотношения P и суммарного испарения (Helbig et al., 2020*). Ключевым параметром для прогноза углеродного баланса болот и заболоченных лесов является уровень грунтовых вод.

Учитывая увеличение лет с экстремальными погодными условиями (IPCC, 2021*), усиление таяния многолетней мерзлоты, повышение частоты лесных пожаров и увеличение площади перестойных лесов, можно с большой уверенностью говорить о существенном изменении круговоротов углерода и воды в мерзлотных экосистемах при

прогнозируемом потеплении климата. Продукционный процесс лиственных лесов Сибири в условиях потепления климата будет в основном лимитирован эндогенными факторами – устьичной проводимостью, а также экзогенными – обеспеченностью растений влагой и элементами минерального питания, особенно азотом (Максимов, 2007*).

Площадные оценки. Первая попытка вычисления баланса углекислого газа экосистем России с помощью данных по МТП предпринята А. Долманом с соавторами в 2012 г. (Dolman et al., 2012). Для моделирования баланса было выделено девять типов поверхности: 1) тундры, 2) болота, 3) травянистые сообщества, 4) агроценозы, 5) лиственные леса, 6) сосняки, 7) ельники, 8) пихтарники, 9) смешанные и другие леса. Для каждого типа поверхности была взята оценка *NEE* по наблюдениям на ЭКС; так как использовались данные 14 станций измерений, на каждый тип поверхности приходилось всего лишь 1–2 станции. Для лесов сделана поправка на средний возраст лесообразующей породы. Авторы комментируют обоснованность своей оценки так: “Мы сознаем, что оценка биосферного стока в России по 14 станциям измерений потоков является скорее большим предположением, к которому нужно относиться с осторожностью” (Dolman et al., 2012, p. 5331). С точки зрения поглощения ПГ было выделено три группы экосистем (Dolman et al., 2012): болота, аккумулирующие от 50 до 90 г С/(м² год), травянистые сообщества, поглощающие от 125 до 170 г С/(м² год) и леса, в которых баланс углекислого газа изменялся в широких пределах. В семи лесных экосистемах нетто-поглощение варьировало от 0 до 300 г С/(м² год) (Dolman et al., 2012).

Анализ данных станций сети RuFlux по состоянию на 2022 г. выявляет ограничения оценок (Dolman et al., 2012), касающиеся входных данных для моделирования баланса ПГ по площади страны. Например, для еловых лесов были использованы данные двух ельников Тверской области, расположенных в нескольких километрах друг от друга (TV-Fy₀, TV-Fy₂). В настоящем исследовании на основе многолетних данных уже по четырем средне- и южнотаежным ельникам Европейской территории России (TV-Fy₀, TV-Fy₂, NO-LTa, KO-Lya) показано, что *NEE* ельников отличался большой межгодовой изменчивостью и в трех случаях из четырех – нестационарностью вследствие природных нарушений и изменений природной среды. Таким образом, эти станции нельзя рассматривать как репрезентативные для всех еловых лесов, требуется анализ причин трендов *NEE* и связи потоков с интенсивностью нарушений. В работе (Dolman et al., 2012) были использованы данные двух станций в тундре, которые представляли умеренный сток CO₂. Однако обоб-

щение результатов многих станций измерений показывает, что тундры могут выступать как стоком, так и источником CO₂ (Замолодчиков, 2015*; Karelin et al., 2013*). По состоянию на 2022 г. сеть RuFlux включает только одну станцию в тундре. Тем не менее, существуют результаты измерений *NEE* как минимум на пяти станциях, функционировавших ранее (Карелин, Замолодчиков, 2008*; Karelin et al., 2013*), а также в настоящее время действуют не менее пяти станций ЭКС (3 станции в районе пос. Черский, в дельте Лены на о. Самойловский, в Тикси), не вошедших в сеть RuFlux. Для мониторинга потоков ПГ в условиях современных быстрых и неоднородных в пространстве изменений климата в Арктике крайне желательно включение в сеть RuFlux станций в тундрах Европейской территории России, Западной и Средней Сибири.

Нетто-поглощение CO₂ лиственными лесами Якутии, основанное на данных нескольких станций по МТП (в том числе YA-SPI), а также авиационных измерений потоков ПГ, оценено в 180 млн т С в год (Maximov et al., 2019), что, возможно, не является верхней границей и может варьировать от года к году (Dolman et al., 2004*). Годовое нетто-поглощение всех лиственных лесов России оценено в 450–617 млн т С/год при общей площади этих лесов в России, равной 257.1 млн га (Maximov et al., 2019). Эта оценка базируется на данных нескольких станций по МТП, работавших ранее и продолжающих работать сейчас на левом и правом берегу р. Лена, и оценок потоков ПГ по данным авиационных измерений. Аргументами в пользу обоснованности этой оценки в случае лиственных лесов России служит, во-первых, устойчивость стока CO₂ в лиственных лесах по данным уже более 30 станций-лет наблюдений, и, во-вторых, использование инвентаризационных многолетних данных древостоя, по ботаническим показателям, а также по запасу углерода в почве и древесине, типичного для усредненного лиственного леса в 29 регионах России (по данным масштабных самолетных исследований).

Для более надежных площадных оценок поглощения CO₂ из атмосферы всей территорией России в первую очередь требуется охватить измерениями экосистемы южных регионов Европейской и Азиатской территории России (полупустыни, степи, горные территории), а особенно агроценозы зернового пояса и заброшенные сельскохозяйственные угодья. Развитие сети мониторинга экосистемных потоков ПГ требуется и в субарктических и арктических биоклиматических зонах, на долю которых приходится значительная доля территории РФ: тундре, лесотундре, редколесьях северной тайги и горных экосистемах высоких широт – Урала, Средней и Восточной Сибири, Дальнего Востока. В севернотаежной

подзоне климат становится более благоприятным для произрастания лесов и сток CO_2 в экосистемы может усиливаться. В мерзлотных экосистемах, напротив, учащение лесных пожаров и нашествий насекомых, усиление термокарстовых процессов может приводить к большим выбросам углерода.

Природные и антропогенные нарушения резко меняли характер чистого экосистемного обмена CO_2 лесов с атмосферой. Во-первых, значительно увеличивалась межгодовая изменчивость баланса; во-вторых, NEE экосистем смещался в положительную сторону, т.е. от стока к источнику CO_2 для атмосферы (Karelin et al., 2021; Knohl et al., 2002*). Как и следовало ожидать, кардинальная сплошная рубка леса сильно влияет на баланс CO_2 , превращая экосистему в сильный источник CO_2 в первые несколько лет после нарушения (Mamkin et al., 2019a, b). Таким образом, при анализе углеродного баланса территорий очень важно учитывать природные и антропогенные нарушения. Необходимо расширение сети RuFlux за счет включения нарушенных экосистем, в том числе после пожаров и на деградирующей многолетней мерзлоте.

В будущем площадные оценки могут быть уточнены на основе новой информации, полученной на станциях сети RuFlux.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании впервые представлены обобщенные оценки чистого экосистемного обмена CO_2 различных экосистем на территории России, полученные на конец 2022 г. на станциях мониторинга ПГ по методу турбулентных пульсаций. В течение последних 25 лет в рамках исследований научных коллективов институтов РАН происходило развитие локальных и региональных наблюдений за экосистемными потоками ПГ. Существующая инструментальная база, программное обеспечение, подходы к интерпретации результатов наблюдений на действующих эколого-климатических станциях стандартизированы в соответствии с рекомендациями международного сообщества. Стандартизация методики позволила рассматривать имеющиеся на территории России станции мониторинга потоков ПГ в экосистемах как основу для развития национальной российской сети — RuFlux — в рамках реализации ВИП ГЗ НОЦ “Углерод в экосистемах: мониторинг”. В 2023 г. в сеть планируется включить 22 станции, измерения на которых позволят получить оценки потоков основных ПГ в репрезентативных наземных экосистемах различных природных зон. Мониторинг потоков ПГ осуществляется по методу турбулентных пульсаций, который представляет собой единственный ин-

струмент прямых оценок баланса ПГ земной поверхности с атмосферой на масштабе экосистем.

По состоянию на осень 2022 г., 86% станций сети RuFlux расположено в лесных и болотных экосистемах, в основном в подзонах средней и южной тайги. Несмотря на то, что сеть RuFlux охватывает широкий спектр климатических, почвенных и растительных условий, для повышения ее репрезентативности для территории России требуется включение действующих и создание новых станций в тундровых, северо-таежных, лесостепных, степных и полупустынных экосистемах, в агроценозах, на зарастающих полях, на нарушенных лесных территориях. Одну из возможностей для расширения RuFlux представляет собой сеть карбоновых полигонов, развивающаяся с 2020 г., на которых также предполагаются непрерывные наблюдения за экосистемными потоками ПГ на основе метода турбулентных пульсаций. Благодаря реализации новых эколого-климатических государственных программ мониторинговыми исследованиями нетто-потоков ПГ в ближайшем будущем планируется охватить широкий спектр наземных экосистем, расположенных в различных климатических условиях.

Анализ многолетних рядов наблюдений показал, что почти все исследованные естественные ненарушенные экосистемы в России являются стоком CO_2 для атмосферы с диапазоном средних годовых оценок 80–240 г $\text{C}/(\text{м}^2 \text{ год})$ в разных экосистемах. Изменения климата, межгодовая изменчивость погодных условий и естественные нарушения (пожары, ветровалы, гибель деревьев из-за вредителей, деградация многолетней мерзлоты и пр.) приводят к трансформации углеродного баланса экосистем, являются причиной увеличения межгодовой изменчивости и обуславливают наличие долговременных трендов основных компонентов углеродного баланса. Антропогенные нарушения (сплошная рубка) резко смещают баланс углерода лесной экосистемы в сторону выделения CO_2 в атмосферу.

В контексте реализации стратегии низкоуглеродного развития РФ требуются оценки роли природных экосистем в балансе ПГ на территории России, основанные на более представительном экспериментальном материале. Развитие сети мониторинга потоков ПГ в строгом соответствии с профессиональными методическими рекомендациями позволит создать новый инструмент для оценки газообмена наземных экосистем с атмосферой. Дальнейшее обобщение имеющихся результатов и расширение сети RuFlux позволит получать обоснованные прогнозы реакции экосистем на изменения климата и природной среды. Оценки потоков ПГ, получаемые при помощи метода турбулентных пульсаций, могут быть использованы при калибровке и вери-

фикации моделей и данных дистанционного зондирования. Данные сети RuFlux могут быть востребованы профильными научными организациями, структурами Росгидромета, Министерства природных ресурсов и экологии, а также Министерства экономического развития в качестве фактического материала для верификации и оценки бюджета углерода на уровне страны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6). Работы в Институте географии РАН (Москва) были выполнены Д.В. Карелиным в рамках темы ГЗ FMGE-2019-0006 (моделирование). Работа в Республике Саха (Якутия) выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту “Исследование биогеохимических циклов и адаптивных реакций растений бореальных и арктических экосистем северо-востока России” (код научной темы: FWRS-2021-0024; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: AAAA-A21-121012190034-2; руководитель: д.б.н. Максимов Т.Х.) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ “ЯНЦ СО РАН” (грант № 13.ЦКП.21.0016): инфракрасный газоанализатор CO₂ и паров воды Li-7500 открытого типа (LI-COR), портативный инфракрасный газоанализатор EGM-4 (PP-System). Работы Югорского государственного университета выполнены на карбоновом полигоне “Мухрино” ФГБОУ ВО “ЮГУ” в рамках пилотного проекта Минобрнауки России по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса, реализуемого на основании Приказа Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 “О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса” (с изменениями от 21.01.2022), а также при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта “Наука”. Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020. Работа В.В. Мамкина (обработка данных пульсационных наблюдений в ЦЛГПБЗ, Тверская область) выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19). Работы для станций TV-Fy0 и TV-Fy2 выполнялись при поддержке гранта РФФ 21-14-00209.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность С.П. Швецову, С.Н. Кузину (ИБ Коми научного центра УО РАН), С.В. Титову, Р.А. Колосову, А.А. Цуканову (ИЛ СО РАН) за техническое обслуживание оборудования; Р.Е. Петрову (ИБПК СО РАН), Д.Г. Иванову (ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН), И.В. Железновой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за помощь в подготовке статьи.

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6). The work at the Institute of Geography RAS was carried out by D.V. Karelin in the framework of the state assignment FMGE-2019-0006 (modelling). The work in the Republic of Sakha (Yakutia) was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the project “Study of biogeochemical cycles and adaptive reactions of plants in boreal and arctic ecosystems of the north-east of Russia” (scientific theme code: FWRS-2021-0024; state registration no. AAAA-A21-121012190034-2; supervisor: Maximov T.Kh., Doctor of Biological Sciences) and using the equipment of the Central Collective Use Center of the Federal Research Center “YaNC SB RAS” (grant no. 13.TsKP.21.0016): an infrared open type gas analyzer for CO₂ and water vapor Li-7500 (LI-COR), portable infrared gas analyzer EGM-4 (PP-System). The work of Yugra University was carried out at the Mukhrino carbon polygon of the Yugra University as part of a pilot project of the Russian Ministry of Education and Science to create carbon polygons in the regions of Russia for the development and testing of carbon balance control technologies, implemented on the basis of the Order of the Russian Ministry of Education and Science of February 5, 2021 No. 74 On Carbon Polygons for the Development and Testing of Technologies of the Control of Carbon Balance (as amended on January 21, 2022), as well as with the support of the grant from the Government of Tyumen oblast in accordance with the program of the West Siberian Interregional Scientific and Educational Center of the World Level within the framework of the national project “The Science.” Agreement no. 94-DON/05.5/20-YUGU-231 dated December 14, 2020. The work of V.V. Mamkin (eddy covariance data processing from Tverskaya oblast) was supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. 1022031600002-1-1.6.19). The study for TV-Fy0 and TV-Fy2 sites has been supported by the grant of the Russian Science Foundation (no. 21-14-00209).

ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their deep gratitude to S.P. Shvetsov, S.N. Kuzin (Institute of Biology of the Komi Science Centre of the UB of the RAS), S.V. Titov, R.A. Kolosov, A.A. Tsukanov (Sukachev Institute of Forest of the SB of the RAS) for the maintenance of the equipment; to R.E. Petrov (Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the SB of RAS), D.G. Ivanov (Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS), I.V. Zheleznova (Lomonosov Moscow State University) for the assistance in preparing this manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ⁶

- Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авиллов В.К., Мамкин В.В.* Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Шилкин А.В., Куманяев А.С., Попов С.Ю., Тельнова Н.О., Гитарский М.Л.* Влияние прогрессирующего распада древостоя на углеродный обмен еловых лесов // ДАН. Сер. наук о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 89–93.
- Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А., Белелли Маркесини Л., Курбатова Ю.А., Парфенова Е.И., Валентини Р., Верховец С.В., Ваганов Е.А., Шульце Е.Д.* Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций) 2. Углеродный обмен и продуктивность // Изв. РАН. Сер. биол. 2014. № 1. С. 65–75.
- Alekseychik P., Mammarella I., Karpov D., Dengel S., Terentiev I., Sabrekov A., Glagolev M., Lapshina E.* Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with eddy covariance technique in a West Siberian bog // Atmospheric Chem. and Phys. 2017. Vol. 17. P. 9333–9345. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-43>
- Baldocchi D.D.* How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology // Global Change Biology. 2020. Vol. 26. № 1. P. 242–260.
- Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchebakova 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. Vol. 9. № 12. P. 5323–5340.
- Heimann M.* The EUROSIBERIAN CARBONFLUX project // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002. Vol. 54. № 5. P. 417–419.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Y., Kumanyaev A.S., de Gerenyu V.O., Tel'nova N.O., Gitar'skiy M.L.* The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest // European J. of Forest Research. 2021. Vol. 140. № 2. P. 287–305.
- Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N.* Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // Biogeosciences. 2008. Vol. 5. P. 969–980.
- Kurbatova J., Li C., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A.* Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // Environmental Research Lett. 2009. Vol. 4. № 4. P. 045022.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A.* Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga // Agric. For. Meteorol. 2019a. Vol. 265. P. 252–268.
- Mamkin V.V., Mukhartova Y.V., Diachenko M.S., Kurbatova J.A.* Three-year variability of energy and carbon dioxide fluxes at clear-cut forest site in the European southern taiga // Geography. Environment, Sustainability. 2019b. Vol. 12. № 2. P. 197–212.
- Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J.* Response of Spruce Forest Ecosystem CO₂ Fluxes to Inter-Annual Climate Anomalies in the Southern Taiga // Forests. 2022. Vol. 13. № 7. P. 1019. <https://doi.org/10.3390/f13071019>
- Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A., Kurbatova J.* Interannual variability of the ecosystem CO₂ fluxes at paludified spruce forest and ombrotrophic bog in southern taiga // Atmospheric Chem. and Phys. 2023. Vol. 23. № 3. P. 2273–2291. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2273-2023>
- Maximov T.C., Maksimov A.P., Kononov A.V., Kotani A., Dolman A.J.* Carbon Cycles in Forests // Water and Carbon Dynamics / T. Ohta, T. Hiyama, Y. Iijima, A. Kotani, T.C. Maximov (Eds.). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. P. 69–100. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6317-7>
- Mikhaylov O.A., Zagirova S.V., Miglovet's M.N.* Seasonal and inter-annual variability of carbon dioxide exchange at a boreal peatland in north-east European Russia // Mires and Peat. 2019. Vol. 24. № 34. P. 1–16.
- Schulze E.-D., Lloyd J., Kelliher F.M., Wirth C., Rebmann C., Lütker B., Mund M., Knohl A., Milyukova I.M., Schulze W., Ziegler W., Varlagin A.V., Sogachev A.F., Valentini R., Dore S., Grigoriev S., Kolle O., Panfyorov M.I., Tchebakova N., Vygodskaya N.N.* Productivity of forests in the Eurosiberian boreal region and their potential to act as a carbonsink – a synthesis // Global Change Biology. 1999. Vol. 5. № 6. P. 703–722.
- Schulze E.-D., Vygodskaya N.N., Tchebakova N.M., Czimeczik C.I., Kozlov D.N., Lloyd J., Mollicone D., Parfenova E., Sidorov K.N., Varlagin A.V., Wirth Ch.* The Eurosiberian transect: An introduction to the experimental region // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2002a. Vol. 54. № 5. P. 421–428.
- Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Elsakov V.V.* Carbon Dioxide and Water Exchange between Spruce Forest and Atmosphere in Spring–Summer under Different Weather Conditions // Contemporary Problems of Ecology. 2019b. Vol. 12. № 1. P. 45–58.

⁶ References приведены в ДМ_6; дополнительные материалы доступны для данной статьи по DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052> и EDN: CTGOHO.

RuFlux: The Network of the Eddy Covariance Sites in Russia

O. A. Kuricheva^{1, *}, V. K. Avilov¹, A. V. Varlagin^{1, **}, M. L. Ginarskiy², A. A. Dmitrichenko³,
 E. A. Dyukarev^{3, 4, ***}, S. V. Zagirova^{5, ****}, D. G. Zamolodchikov^{6, 7, *****}, V. I. Zyryanov⁸,
 D. V. Karelin^{9, *****}, S. V. Karsanaev¹⁰, I. N. Kurganova^{11, *****}, E. D. Lapshina³,
 A. P. Maksimov¹⁰, T. Ch. Maximov^{10, *****}, V. V. Mamkin^{1, 7, *****}, A. S. Marunich¹²,
 M. N. Miglovets⁵, O. A. Mikhailov⁵, A. V. Panov⁸, A. S. Prokushkin^{8, *****}, N. V. Sidenko⁸,
 A. V. Shilkin^{6, 13}, and Yu. A. Kurbatova^{1, *****}

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Energy Agency under the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russia*

³*Yugra University, Khanty-Mansiysk, Russia*

⁴*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

⁵*Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia*

⁶*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

⁷*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

⁸*Sukachev Institute of Forest of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate subdivision of the Federal Research Centre of the Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC KSC SB RAS), Krasnoyarsk, Russia*

⁹*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

¹⁰*Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate subdivision FSBIS Federal Research Centre “Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia*

¹¹*Institute of Phisicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, Pushchino, Russia*

¹²*Valday Branch of State Hydrological Institute, Valday, Russia*

¹³*Scientific and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia*

*e-mail: olga.alek.de@gmail.com

**e-mail: varlagin@sevin.ru

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

****e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

*****e-mail: dzamolod@cepl.rssi.ru

*****e-mail: dkarelin7@gmail.com

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

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

*****e-mail: vadimmamkin@gmail.com

*****e-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

*****e-mail: kurbatova.j@gmail.com

For the first time, the information is summarized on the history of establishment, the state of observations and the main scientific results on sites included in RuFlux, the Russian eddy covariance network for the monitoring of greenhouse gases (GHG). Eddy covariance technique provides estimates of GHG fluxes at the level of ecosystems. The long-term series of GHG fluxes (more than 190 site-years of observations) have been obtained. Up to the end of 2022, 86% of the sites of the RuFlux network are located in forests and wetlands, 77% of all sites are in the middle and southern taiga. Almost all undisturbed ecosystems in Russia are the sinks of CO₂ from the atmosphere with a range of average annual estimates of net absorption from 80 to 240 g C m⁻² yr⁻¹. The GHG balance is determined by a complex of abiotic and biotic factors. The average long-term net CO₂ absorption is higher in permafrost Siberian larch forests than in European spruce forests. When moving from west to east, the intensity of CO₂ sink in the middle of summer increases, and the emission of CO₂ in the middle of winter decreases sharply. Natural and anthropogenic disturbances lead to the transformation of the carbon balance by increasing the release of CO₂ into the atmosphere. RuFlux network covers a wide range of types of ecosystems, but it is needed to organize more GHG sites in tundra, northern taiga, forest-steppe, steppe, and semi-deserts; in the ecosystems disturbed by humans (including fields) and in the ecosystems with successions caused by natural disturbances.

Keywords: eddy covariance method, ecosystems, net ecosystem exchange, measurement network, ecoclimatic sites, monitoring

УДК 630+631.4+528

РОЛЬ СТАРОВОЗРАСТНЫХ ЛЕСОВ В АККУМУЛЯЦИИ И ХРАНЕНИИ УГЛЕРОДА

© 2023 г. Н. В. Лукина^{а, *}, С. А. Барталев^{а, b}, А. П. Гераськина^а, А. С. Плотникова^а, А. В. Горнов^а,
Д. В. Ершов^а, Е. А. Гаврилюк^а, А. И. Кузнецова^а, Н. Е. Шевченко^а, Е. В. Тихонова^а,
М. А. Данилова^а, Д. Н. Тебенькова^а, В. Э. Смирнов^а, Е. В. Ручинская^а

^аЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

^bИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

Поступила в редакцию 01.12.2022 г.

После доработки 04.02.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

В статье дан краткий анализ получивших широкую известность работ, содержащих доказательства накопления углерода в старовозрастных лесах. Проведенный анализ современного состояния проблемы позволяет сделать вывод о том, что старовозрастные леса продолжают накапливать углерод. Представлена карта старовозрастных лесов России, идентифицированных на основе возраста древостоя, превышающего 200 лет, с использованием данных дистанционного зондирования, и обсуждаются оценки пулов углерода в этих лесах. Согласно полученным оценкам, площадь старовозрастных лесов России составляла 163 млн га по состоянию на 2021 г., а запасы углерода в фитомассе достигли 7.33 млрд т при вкладе лиственных лесов и лиственных редколесий 86%. Показано, что важнейшей причиной неопределенностей в оценках циклов углерода в старовозрастных лесах является неопределенность самого понятия “старовозрастные леса”. Старовозрастные леса мозаичного строения Москворецко-Окской равнины накопили больше азота и углерода в почвах, чем леса на более ранней стадии сукцессии с невыраженной мозаичностью (в среднем около 80 т/га против 60 т/га в 30-сантиметровом слое). Старовозрастные пихто-буковые мертвопокровные леса Северо-Западного Кавказа, древостой которых отличается самой высокой в России и Европе продуктивностью и высокими запасами углерода в древостое, характеризуются низкими запасами углерода в почвах по сравнению с лесами на более ранней стадии развития (в среднем 58 т/га против 99 т/га в 30-сантиметровом слое). Это объясняется низким качеством опада бука и пихты и отсутствием выраженной оконной мозаики, что препятствует заселению светолюбивых видов растений, в том числе с высоким качеством опада. Показано, что, наряду с микроорганизмами, необходимо учитывать таких агентов разложения, минерализации и гумификации, как дождевые черви, которые играют ключевую роль в циклах углерода. Запасы углерода в подстилке северотаежных еловых лесов на порядок выше, чем в хвойно-широколиственных; в подстилке и в минеральном слое 0–30 см в сумме запасы углерода под кронами деревьев ели около 200 лет оказались значительно выше, чем в межкрупных пространствах, и превышали 80 т/га.

Ключевые слова: старовозрастные леса, мозаичность, углерод, азот, качество опада, почва, дождевые черви

DOI: 10.31857/S2587556623040064, **EDN:** SMCVVV

ВВЕДЕНИЕ

В экологии и лесоведении довольно длительное время существовало представление о том, что старовозрастные леса перестают накапливать углерод, то есть являются углероднейтральными (Odum, 1969). Однако в последние пятнадцать лет появились результаты исследований, свидетельствующих о том, что эти леса продолжают накапливать углерод. Обсуждение вопроса накопления углерода старовозрастными лесами активизировалось с 2006 г., когда в журнале *Nature* появилась статья, в которой авторы (Zhou et al., 2006) пока-

зали, что в верхнем 20-сантиметровом слое почв старовозрастных лесов на юге Китая атмосферный углерод в период с 1979 по 2003 г. аккумулировался с довольно высокой скоростью – в среднем 0.61 т на га в год. Результаты этого исследования показали, что в подземной сфере этих лесов идут процессы накопления углерода, и позволили усомниться в правомерности доминирующей концепции баланса между процессами поглощения и дыхания в старовозрастных лесах. В 2008 г. появилась статья С. Люиссарта с соавторами в этом же журнале (Luyssaert et al., 2008), в которой было показано, что леса, возраст древостоев ко-

торых варьировал от 15 до 800 лет, накапливают углерод, то есть чистый углеродный баланс лесов с учетом вклада почвы носит положительный характер во всех лесах, в том числе старовозрастных. В 2021 г. также в журнале *Nature* П. Гундерсен и его коллеги (Gundersen et al., 2021) опубликовали статью, в которой утверждали о несоответствиях между независимыми данными, которые использовали они, и результатами измерений потоков, представленными в работе С. Люиссарта с соавторами 2008 г., и сделали заключение о завышении оценок поглощения парниковых газов в данной работе.

Цель данной статьи – (1) дать краткий анализ получивших большую известность работ, содержащих доказательства накопления углерода в старовозрастных лесах, (2) идентифицировать и представить карту старовозрастных лесов России на основе возраста древостоя, превышающего 200 лет, (3) на примере модельных объектов сравнить пулы углерода в древостое и почвах хвойно-широколиственных лесов на разных стадиях сукцессии и в почвах северотаежных еловых лесов с учетом их мозаичности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами наших исследований послужили старовозрастные леса России. Поскольку в дискуссиях о накоплении углерода под старовозрастными лесами понимают объекты, на которых возраст древостоя превышает 200 лет, нами впервые проведено выделение и картографирование таких лесов в России (рис. 1). Построение карты возраста лесов России основано на использовании временных рядов спутниковых данных, полученных системой дистанционного зондирования Земли Terra-MODIS за период 2001–2021 гг. Оценка возраста лесов основана на использовании предварительно построенных по данным ДЗЗ временным рядом карт удельного запаса стволовой древесины и преобладающих пород лесных насаждений (Барталев, 2022; Барталев и др., 2016). На первом этапе эти данные вместе с цифровой моделью рельефа и значениями спектрального коэффициента отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, соответствующими сезонному максимуму нормализованного разностного индекса, используются для определения класса бонитета лесов. Оценка бонитета насаждений осуществлялась на основе множественной непараметрической регрессии методом случайных лесов, построенной с использованием в качестве опорных данных репрезентативной выборки таксационных выделов. Полученная карта классов бонитета лесов позволила оценить возраст насаждений на основе дистанционных оценок удельного запаса стволовой древесины и таблиц хода роста лесов (Швиденко и др.,

2008), описывающих связь их возраста с запасом лесов при известных значениях их породы и класса бонитета. Описанный подход позволяет по значениям запаса, бонитета и преобладающей породы однозначно установить возраст лесов.

При создании карты в качестве топографической основы использована глобальная карта ESRI World Topographic Map, включающая административные границы, города, водные объекты, физико-географические особенности, заповедные территории, автомобильные и железные дороги, растительный покров и рельеф¹. Дополнительно на карте в виде диаграмм представлены доли площадей преобладающих пород старовозрастных лесов в границах федеральных округов РФ. Даны оценки запасов углерода в древесной растительности старовозрастных лесов.

Также представлены результаты оценок запасов углерода в северотаежных еловых лесах и хвойно-широколиственных лесах на разных стадиях сукцессий, включая старовозрастные леса, на модельных примерах из нескольких регионов в европейской части России.

Для северотаежных лесов приводятся результаты исследований запасов азота и углерода в почвах сохранившихся старовозрастных (старше 200 лет) еловых лесов на северо-западе России (Мурманская область). Детальные описания объектов даны ранее (Орлова и др., 2015). В данной статье приводятся оценки по запасам почвенного углерода для наиболее распространенных ельников этого региона, формирующихся в автоморфных ландшафтах – ельников кустарничково-зеленомошных. При отборах почв учитывается мозаичное строение этих объектов, выделены 3 элемента мозаики: межкрупные кустарничково-зеленомошные, подкрупные пространства под деревьями ели около 200 лет с кустарничково-зеленомошным напочвенным покровом, подкрупные мертвопокровные пространства под елями старше 200 лет. Почвы представлены подзолами (Cargbic Albic Podzols (Arenic)) на моренных отложениях. Для каждого элемента мозаики и каждого горизонта/слоя анализ проведен для 5 смешанных образцов, каждый из которых состоял из 5 индивидуальных. Таким образом, приведены результаты для 75 профилей, по 25 для каждого элемента мозаики.

Объекты хвойно-широколиственных лесов представлены горными и равнинными лесами. Объекты, представляющие старовозрастные малонарушенные хвойно-широколиственные леса Северо-Западного Кавказа, выбраны в верховьях р. Белой (Кавказский биосферный заповедник, пос. Гужерипль (Республика Адыгея)). Эти леса

¹ <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f> (дата обращения 15.10.2022).

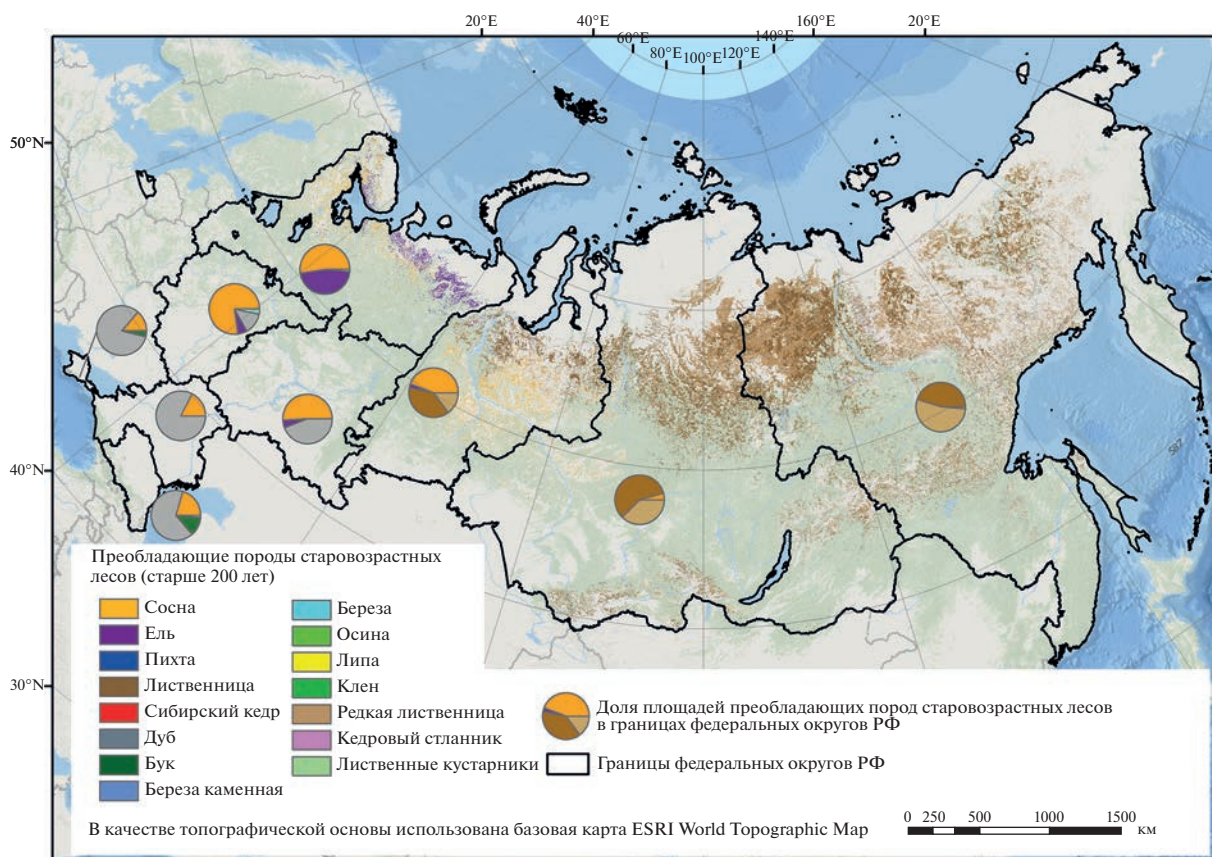


Рис. 1. Старовозрастные леса России, 2021 г.

характеризуются отсутствием следов рубок и пожара (нет следов углей в почве). Максимальный возраст деревьев пихты *Abies nordmanniana* достигает 450 и более лет, а бука *Fagus orientalis* превышает 200 лет. По эколого-фитоценотической классификации эти леса относятся к пихто-буквому мертвопокровному типу леса. Более подробная характеристика этих лесов и лесов на более ранних стадиях развития дана ранее (Аккумуляция ..., 2018; Шевченко и др., 2019). Объекты на более ранних стадиях восстановительной сукцессии, которые рассматриваются в сравнении со старовозрастными малонарушенными лесами, располагаются на территории Апшеронского лесничества Краснодарского края. Более подробные описания даны ранее (Аккумуляция ..., 2018). Преобладающим типом почвы Северо-Западного Кавказа являются буроземы, разной степени выраженности глеевого процесса (Dystric Cambisols) на элювии глинистых сланцев.

Равнинные хвойно-широколиственные леса доминирующих типов исследовали на территории Валуевского лесопарка (Москворецко-Окская равнина, Новомосковский административный округ Москвы). Выбраны леса на разных стадиях сукцессии: березово-липовые, липовые и

елово-широколиственные. Более подробные описания объектов исследования даны ранее (Аккумуляция ..., 2018). Преобладающий тип почв – дерново-подзолистые (Albic Retisols) на покровном суглинке, подстилаемым мореной.

Отбор образцов почв хвойно-широколиственных лесов проводили как по регулярной сетке (Аккумуляция ..., 2018), так и с учетом основных элементов мозаики, а именно, подкroновые пространства различных доминирующих древесных пород. В каждом типе леса в 2016 г. закладывали по три пробные площади размером 50 × 50 м, на которых в опорных разрезах и прикопках (с использованием почвенного бура) отбирали образцы основных генетических горизонтов почв с указанием мощности горизонтов. В 2019 г. в лесах Москворецко-Окской равнины и Северо-Западного Кавказа дополнительно отобраны почвы под доминирующими древесными растениями (подкroновые пространства древесных растений разных видов), в которых заложены прикопки до глубины 30 см (слой с наиболее динамично меняющимися свойствами) и отобраны смешанные образцы верхних горизонтов почв для оценки вариативности запасов углерода в верхних минеральных горизонтах.

Для определения содержания азота и углерода в почвах усредненные образцы в лабораторных условиях высушивали, просеивали через сито 2 мм, анализировали фракцию <2 мм согласно международным стандартам. Содержание азота и углерода определяли на CHN-анализаторе (EA 1110 (CHNS-O)).

Для определения плотности минеральных горизонтов в почвенных разрезах фиксировали мощность основных генетических горизонтов и отбирали образцы на плотность с примерных глубин 0–5, 5–15 и 15–30 см бюксом 100 см³. Отдельно учитывали самый верхний органоминеральный горизонт, который располагается сразу под подстилкой, поскольку, являясь переходным от подстилки к гумусовому горизонту, этот слой содержит много органического вещества и вносит большой вклад в общие запасы углерода. Для определения плотности сложения почвы использовали буровой метод Качинского. В лабораторных условиях из образцов почв удаляли корни, образцы высушивали до абсолютно сухого состояния при 105°C и взвешивали.

При оценке запасов углерода для расчета плотности учитывали скелетность почв (содержание частиц размером >2 мм) путем разделения образцов на фракции просеиванием через сито. Запасы углерода в минеральных слоях рассчитывали путем умножения плотности слоя (г/см³), оцененной с учетом доли мелкозема, на содержание углерода и мощность минерального слоя.

Почвенную макрофауну исследовали путем раскопки и ручного разбора почвенных проб площадью 25 × 25 см², глубиной 30 см в летне-осенние сезоны 2016, 2017 и 2019 гг. Количественные учеты в 2016–2017 гг. проведены по регулярной сети без учета лесных микросайтов, в 2019 – с учетом лесной мозаичности (подкромовые пространства доминирующих видов деревьев, “окна” – прорывы в пологе леса). Кроме того, проведен фаунистический учет дождевых червей в валеже. Всего в лесах Москворецко-Окской равнины отобрано 111 образцов, в лесах Северо-Западного Кавказа – 234. Дождевых червей фиксировали в 96% спирте. Видовую идентификацию проводили по определителю Т.С. Всеволодовой-Перель (1997). Морфо-экологические группы дождевых червей классифицировали согласно Т.С. Перель (1979). Биомассу определяли путем взвешивания фиксированных червей с наполненным кишечником.

КРАТКИЙ АНАЛИЗ РАБОТ, СОДЕРЖАЩИХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В СТАРОВОЗРАСТНЫХ ЛЕСАХ

Секвестрированный углерод запасается в живых тканях растений и медленно разлагающемся

органическом веществе почв, включая подстилку. Согласно данным ФАО (ФАО, 2020), в мире насчитывается не менее 1.11 млрд га так называемых первичных лесов, то есть 27% от общей площади лесов мира, которая составляет 4.06 млрд га. Более половины (61%) первичных лесов мира приходится в совокупности на три страны: Бразилию, Канаду и Россию. По оценкам С. Люиссарта с соавторами (Luysaert et al., 2008), леса бореальной и умеренной зон Северного полушария (6×10^8 га, то есть около половины первичных лесов, большая часть которых находится в России и Канаде) поглощают в среднем около 1.3 гигатонн углерода в год.

Значительная часть вопросов, поднятых П. Гундерсеном с соавторами (Gundersen et al., 2021), все еще, действительно, требует дальнейшего изучения, но в целом не опровергает выводов о том, что старовозрастные леса служат стоком углерода. Анализ проведенных ими данных показывает, что старовозрастные леса продолжают накапливать углерод, хотя и не с такой высокой скоростью, как показано в работе С. Люиссарта с соавторами (1.6 ± 0.6 Мг С га⁻¹ год⁻¹ против 2.4 ± 0.8 Мг С га⁻¹ год⁻¹).

Известно, что скорость поглощения углекислого газа лесами из атмосферы зависит от климата и обеспеченности лесных растений азотом. Один из основных аргументов в пользу завышения оценок в работе С. Люиссарта с соавторами, который приводится в статье П. Гундерсена с соавторами, – это стехиометрические соотношения между углеродом (С) и азотом (N). Как известно, эти элементы тесно связаны между собой в органическом веществе, а соотношения между ними являются тканеспецифичными. Ссылаясь на исследование 2006 г. Ф. Дэнтенера с соавторами (Dentener et al., 2006), согласно результатам которого в большинстве регионов мира выпадения азота из атмосферы не превышают 10 кг га⁻¹ год⁻¹, П. Гундерсен с соавторами заключают, что поддержание такого высокого уровня поглощения углерода старовозрастными лесами, установленного в работе С. Люиссарта с соавторами, невозможно, поскольку для этого необходимо около 50 кг N га⁻¹ год⁻¹. Однако в работе Ю. Янга с соавторами (Yang et al., 2011) на основе анализа результатов более сотни исследований показано, что леса в ходе развития обладают способностью по мере возрастания пула углерода одновременно накапливать в живой фитомассе, опаде и подстилке более 22 кг N га⁻¹ год⁻¹. Существует еще много неопределенностей в оценках цикла азота, на которые обращает внимание С. Люиссарт с соавторами (Luysaert et al., 2021), а именно, прайминг-эффект, химическое выветривание азота из осадочных пород, рецилинг азота микроорганизмами, азотфиксация.

С нашей точки зрения, важнейшей причиной неопределенностей в оценках циклов углерода в

старовозрастных лесах является неопределенность самого понятия “старовозрастные леса”. В ходе разработки систем добровольной лесной сертификации предложена концепция лесов высокой природоохранной ценности (ЛВПЦ). ЛВПЦ – леса, имеющие выдающееся или ключевое значение в связи с их высокой экологической, социально-экономической, ландшафтной ценностью или ценностью для сохранения биоразнообразия². Среди ЛВПЦ выделяется 6 типов, в том числе и малонарушенные лесные территории (МЛТ). Для отнесения к МЛТ лесной участок должен соответствовать следующим требованиям: отсутствует существенное влияние человека; отсутствуют объекты инфраструктуры; минимальная площадь участка составляет не менее 50 тыс. га (Атлас ..., 2003; Журавлева и др., 2016). Выделение и защита МЛТ от рубок с использованием механизмов лесной сертификации имело большое природоохранное значение, особенно в бореальных лесах. Однако в эти требования МЛТ не входит такая характеристика, как возраст древостоя. В экологических исследованиях используют разные подходы для отнесения лесов к старовозрастным (Old-Growth ..., 2005; Wirth et al., 2009), включая особенности структуры и возраст древостоя, биологическое разнообразие, историю природопользования и др. Например, при подготовке базы данных о первичных лесах Европы авторы исходили из представлений об МЛТ, но при этом относили леса к первичным, если признаки прежнего антропогенного воздействия не отмечены к 60–80-летнему возрасту древостоя (Sabatini et al., 2021). В нашей работе при отнесении лесов к старовозрастным исходили из ключевых биологических особенностей деревьев и специфики сукцессионной динамики лесных экосистем. Так, к возрасту 150–200 лет, при наличии источников семян, поздне-сукцессионные виды деревьев (*Picea abies*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides* и др.) внедряются в лесные экосистемы и формируют популяции с полночленными онтогенетическими спектрами и устойчивым оборотом поколений у большинства видов (Восточноевропейские ..., 2004а, б; Сукцессионные ..., 1999; European ..., 2017). Эта биологическая особенность определила возраст 200 лет и более как критерий для отнесения лесов к старовозрастным.

При этом важно заметить, что отнесение лесов к старовозрастным по возрасту древостоя хотя и необходимо, но недостаточно. Старовозрастные леса, идентифицированные по возрасту древостоя, могут быть разделены на две группы: (1) леса мозаичного строения с выраженными признаками оконной динамики, ветровально-почвенных комплексов (ВПК); (2) леса с невыраженными/отсутствующими признаками оконной динамики. При-

надлежность лесов к одной из этих групп, безусловно, отражается на их способности поглощать и накапливать углерод в основных пулах. При изучении параметров циклов углерода и азота в почвах старовозрастных лесов часто не учитывается их мозаичное строение, что приводит к неадекватным оценкам цикла углерода. К элементам мозаики, то есть элементарным единицам лесного биогеоценотического покрова и его отдельных компонентов, можно отнести лесные элементарные почвенные ареалы В.М. Фридланда (1986), лесную парцеллу Н.В. Дылиса (1969), ценобиотическую микрогруппировку Л.Г. Раменского (1938), тессеру Ханса Йенни (Jenny, 1958), тессеру Л.О. Карпачевского (1977), элементарный биогеоценотический ареал (ЭБГА) М.А. Орловой (2013). Подробный анализ этих единиц дан нами ранее в (Орлова, 2013). Значительная часть современного лесного покрова сформировалась в результате длительного антропогенного воздействия, связанного с сельскохозяйственным освоением территорий (распашка, выпас, сенокосение), сплошными рубками, пожарами, лесохозяйственными мероприятиями (создание лесных культур, санитарные рубки и рубки ухода) и др. (Восточноевропейские ..., 2004а, б; Разнообразие ..., 2012, 2013; European ..., 2017). Как правило, преобразованные леса отличаются менее значительным возрастом и находятся на менее продвинутых стадиях восстановительных сукцессий. При этом на труднодоступных территориях, где долгое время не было сплошных рубок, пожаров или других катастрофических воздействий, еще существуют старовозрастные малонарушенные леса (Атлас ..., 2003; Барталев и др., 2016; Potapov et al., 2008; Sabatini et al., 2021). В результате многолетних и разносторонних исследований лесными экологами выделены их основные индикаторы: абсолютная разновозрастность популяций деревьев; выраженное структурное разнообразие (горизонтальная и вертикальная структура), высокое таксономическое разнообразие (максимальное видовое богатство, присутствие видов, различающихся особенностями экологии и биологии и др.) и высокое функциональное биоразнообразие (Горнов и др., 2018; Лукина и др., 2020; Методические ..., 2010; Смирнова и др., 2006, 2018; Смирнова, Коротков, 2001; Smirnova et al., 1995). Структурное разнообразие экосистем – один из важнейших индикаторов, поскольку характеризует разнообразие местообитаний для всех представителей биоты (Биоразнообразие ..., 2021; Дылис, 1969; Онипченко, 2014). Выделяют следующие элементы структуры старовозрастных лесов: мозаика возрастных парцелл (разного возраста и состава), возникших в результате смерти одного или нескольких крупных деревьев; мозаика ветровально-почвенных комплексов разного возраста; валежник разных стадий разложения; микроместообитания (микросайты), создавае-

² <https://hcvf.ru/ru> (дата обращения 15.10.2022).

мые деятельностью животных (Евстигнеев, Горнова, 2017; Afterlife of a tree, 2005; Khanina, Vobrovsky, 2021; The mosaic-cycle ..., 1991). Однако необходимо подчеркнуть, что в современном лесном покрове существуют старовозрастные леса с невыраженной мозаичностью. Такие леса сформировались в результате специфической истории природопользования, а также из-за истребления крупных животных — ключевых лесных видов. Например, старовозрастные сосняки и ельники лишайниковые на Кольском полуострове с мощным лишайниковым покровом, отличающиеся низким уровнем биоразнообразия. Эти леса возникли в результате многовековой истории природопользования саами, применявших огонь в целях формирования лишайниковых пастбищ для северных оленей (Roturier and Roue, 2009). Еще один пример на Северо-Западном Кавказе, где в отсутствии лесных ключевых видов — зубров (*Bison bonasus*), сформировались пихтово-буковые мертвопокровные леса с сомкнутыми древостоями из бука и пихты, достигающей возраста 450 лет (Шевченко, 2016). Старовозрастные хвойно-широколиственные леса Северо-Западного Кавказа по сравнению с молодыми и средневозрастными лесами, представляющих раннюю и переходную стадию одного пространственно-временного ряда послерубочной демулационной сукцессии (Аккумуляция ..., 2018; Шевченко и др., 2019), характеризуются самыми низкими показателями видового богатства и видовой насыщенности. В молодых осино-грабовых мелкотравных лесах (возраст древостоя 50–60 лет) обнаружено 76 ± 6.8 видов при видовой насыщенности 35 ± 3.1 видов/400 м². В средневозрастных пихто-грабовых мелкотравных лесах (90–100 лет) видовое богатство достигает 93 ± 8.1 видов при видовой насыщенности 39 ± 4.4 видов/400 м². В старовозрастных пихто-буковых мертвопокровных лесах показатель видового богатства составляет 40 ± 3.8 видов, видовой насыщенности — 8 ± 1.1 видов/400 м². Низкие показатели видового богатства и видовой насыщенности в старовозрастных лесах по сравнению с молодыми и средневозрастными объясняются высокой сомкнутостью яруса древостоя и, как следствие, значительным затенением напочвенного покрова, в котором сохраняются только теневыносливые виды сосудистых растений и многообразных.

К лесам с низким уровнем биоразнообразия и низким качеством растительного опада, активная фракция которого состоит, в основном, из хвои лиственницы, относятся и старовозрастные лиственничники Центральной и Восточной Сибири, которые являются результатом регулярных пожаров (Schulze et al., 2012). Огонь ограничивает внедрение поздне-сукцессионных видов деревьев (*Abies sibirica* и *Picea obovata*) и препятствует формированию темнохвойных лесов. Виды рода *Larix*

могут выдерживать губительное действие пожаров, поскольку обладают толстой корой, которая защищает камбий (Larch ..., 2003).

Важным вопросом для понимания механизмов накопления, разложения и минерализации органического вещества в старовозрастных лесах является учет основных агентов этих процессов, происходящих в почвах. При оценках цикла азота, как и углерода, в старовозрастных, как и других лесах, в подавляющем большинстве работ как основной агент разложения и минерализации рассматриваются микроорганизмы, но не уделяется должного внимания роли почвенной фауны, в первую очередь, дождевых червей (Desie et al., 2020; Lemtiri et al., 2014), особенно в процессах гумификации. Но именно с сокращением биоразнообразия и биомассы дождевых червей, как группы “экосистемных инженеров”, связывают деградацию почв вследствие снижения ряда структурно-биологических характеристик почв (гумусированность, порозность и др.) (Lavelle, 1997; Lee and Foster, 1991). Дождевые черви не только способствуют гумусообразованию, но и обеспечивают горизонтальную и вертикальную миграцию соединений углерода в почвенном профиле в результате активной биотурбации. Также дождевые черви являются важным звеном минерализации углерода, они вносят прямой и косвенный, оказывая влияние на микроорганизмы, вклад в почвенное дыхание. Тем не менее, до сих пор сохраняется острая нехватка данных для адекватной характеристики функциональной роли дождевых червей в процессах секвестрации и потерь почвенного углерода (Garnier et al., 2022; Lemtiri et al., 2014). В то же время именно почвенную фауну называют “ключом к новым углеродным моделям” (Filser et al., 2016). Дискуссионным остается вопрос о роли дождевых червей в балансе минерализации/секвестрации углерода. Очень часто выводы о преобладании потерь углерода над секвестрацией строятся на результатах краткосрочных лабораторных или полевых экспериментов, в которых также демонстрируются разные результаты в зависимости от продолжительности эксперимента: чем длительнее период измерений, тем больше оказывается в расчетах вклад червей в секвестрацию углерода, чем в почвенное дыхание (Garnier et al., 2022). Не принимается во внимание сезонная активность, продолжительность жизни разных групп червей и т.д. В связи с этим можно утверждать, что все еще остается множество неопределенностей в оценке роли дождевых червей в балансе почвенного углерода. Многолетние полевые данные показывают, что деятельность дождевых червей приводит к значительному перевесу в сторону стабилизации углерода по сравнению с его минерализацией, что создает “углеродные ловушки”, опосредованные дождевыми червями — earthworm-mediated “C trap” (ECT)

(Zhang et al., 2013). Почвенные микроагрегаты, содержащие органическое вещество, благодаря деятельности дождевых червей оказываются внутри крупных водоустойчивых макроагрегатов, что служит защитой от минерализации соединенный углерода микробиотой и может приводить к повышению общего пула углерода на 22% (Bossuyt et al., 2005). Исключение дождевых червей из почвы снижает накопление почвенного органического углерода на глубине 30–40 см до 75%, что связано с уменьшением указанной доли водоустойчивых агрегатов (Schmidt et al., 2011).

Дождевые черви вносят значительный вклад в круговорот питательных веществ в почве, в особенности в цикл азота (Lavelle and Martin, 1992). Дождевых червей относят к группе нитролиберантов – почвенных организмов, оказывающих значительное влияние на миграцию азота (Жуков, 2000; Козловская, 1976), что реализуется, в первую очередь, благодаря гумификации органического вещества в почве. Через популяции дождевых червей проходит около 40% всего азота, ежегодно поглощаемого растениями (Битюцкий и др., 2007). Дождевые черви, как правило, потребляют органическое вещество с относительно широким соотношением C/N и преобразуют его в органическое вещество с узким C/N (Стриганова, 1968; McDaniel et al., 2013). В ходе жизнедеятельности червей происходит экскреция соединений аммония, мочевины, мочевой кислоты. В экспериментах с норными червями показано, что содержание доступного азота в почве увеличивалось на 0.03 мг/кг на каждые 0.1 г биомассы дождевого червя (Andriuzzi et al., 2016).

Кроме того, дождевые черви способствуют обогащению почвы азотом за счет собственной гибели. Показано, что в почвах Центральной Европы после естественной смерти дождевых червей выход азота достигает 24 г/м², что сопоставимо с ежегодной дозой минеральных азотных удобрений (100–200 кг N на 1 га). Биомасса дождевых червей, содержащая 65–75% белка, в почве быстро разлагается, но азот вымывается не так быстро, поскольку связывается микроорганизмами (Lee, 1985; Makeshin, 1997). Пищеварительные ферменты кишечника червей активизируют как нитрофицирующие, так и аммонифицирующие бактерии. Также происходит уменьшение соотношения биомассы грибы/бактерии. Возрастание в сотни раз числа бактерий-аммонификаторов, после пассажа почвы через пищеварительный тракт червей, вероятно, происходит за счет реутилизации бактериями грибной биомассы (Кайдун, 2018).

Неоднозначны оценки биоразнообразия и биомассы дождевых червей в ходе естественного развития лесов. При переходе от молодых раннесукцессионных светлохвойных или мелколист-

венных к старовозрастным позднесукцессионным хвойно-широколиственным лесам, как правило, происходит повышение таксономического, функционального разнообразия и биомассы дождевых червей (Ганин, Стриганова, 2012; Гераськина, 2018; Cavard et al., 2011). Низкое разнообразие и биомасса на ранних этапах сукцессии связаны с предшествующими нарушениями, запустившими демулационную сукцессию (рубки, пожары и др.), в ходе которых прямое и косвенное воздействие внешних факторов приводит к гибели ряда видов и групп дождевых червей, а также к нарушению местообитаний, необходимых для их функционирования. Далее при восстановлении структурного разнообразия леса (валеж, “окна” – прорывы в пологе леса), формирования смешанного древостоя, продуцирующего наиболее благоприятный в трофическом и топическом отношении опад для сапрофагов – создается мозаика местообитаний, поддерживающая разнообразие дождевых червей (Kooch and Haghverdi, 2014; Kuznetsova et al., 2021; Shevchenko et al., 2021). Принято считать, что формирование позднесукцессионных темнохвойных лесов приводит к обедненному составу фауны дождевых червей и их низкой биомассе (Акулова и др., 2017; Перель, 1979; Rozen et al., 2013). Однако последние исследования показывают, что в таких лесах большая роль в поддержании разнообразия и биомассы дождевых червей принадлежит напочвенному покрову и структурной неоднородности леса (Гераськина, 2016; Гераськина, Антощенко, 2018; Ashwood et al., 2019; Shevchenko et al., 2021). В данной статье мы приводим примеры связей биомассы дождевых червей с запасами азота в почвах в хвойно-широколиственных лесах на наиболее продвинутых стадиях сукцессий, чтобы подчеркнуть их важную роль в циклах азота и углерода в старовозрастных лесах.

Следует подчеркнуть, что старовозрастные леса накапливали углерод в древесной растительности и почвах на протяжении веков, и поэтому очевидно, что значительная часть этого углерода окажется снова в атмосфере, если эти леса будут нарушены. Поэтому для оценки биогеохимических циклов и прогнозов, наряду с оценкой скорости накопления углерода в старовозрастных лесах, большое значение имеет оценка современных пулов углерода в этих лесах. Примеры оценки изменений запасов азота и углерода в почвах таежных и хвойно-широколиственных лесов с учетом возраста лесов и мозаичности покрова даны в разделе “Результаты и обсуждение” представленной статьи.

Таблица 1. Площади формаций старовозрастных лесов по федеральным округам Российской Федерации по состоянию на 2021 г., млн га

Федеральный округ	Сосновая	Еловая	Лиственничная	Кедровая	Дубовая	Буковая	Березовая	Лиственничное редколесье	Кедровый стланик
Центральный	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
Северо-Западный	5.00	4.41	0.03	0	0	0	0.13	0.01	0
Приволжский	0.09	0.01	0	0	0.08	0	0	0	0
Южный	0.03	0	0	0	0.17	0	0	0	0
Северо-Кавказский	0.04	0	0	0	0.12	0.02	0	0	0
Уральский	6.77	0.40	5.86	0.11	0	0	0.08	2.27	0.01
Сибирский	1.80	0.10	25.37	0.08	0	0	0.13	16.32	0.23
Дальневосточный	0.07	0.06	41.87	0	0	0	0.01	49.91	1.15

Таблица 2. Площадь старовозрастных лесов и запасы углерода по формациям по состоянию на 2021 г.

Формация лесов	Общий запас С, млн т	Удельный запас С, т/га	Площадь, млн га
Сосновая	600.24	43.35	13.85
Еловая	247.83	49.79	4.98
Пихтовая	0.90	95.42	0.01
Лиственничная	3752.44	51.30	73.15
Кедровая (кедр сибирский)	10.67	56.53	0.19
Дубовая	38.91	105.91	0.37
Буковая	3.26	119.43	0.03
Березовая (береза каменная)	0.14	41.29	0.003
Березовая	16.30	45.93	0.35
Осиновая	0.23	57.89	0.004
Липовая	0.11	52.60	0.002
Кленовая	0.002	131.46	0.00002
Лиственничное редколесье	2596.19	37.90	68.51
Кедровый стланик	57.53	41.41	1.39
Лиственные кустарники	1.96	35.26	0.06

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Площадь старовозрастных (более 200 лет) лесов России и запасы углерода в древесной фитомассе этих лесов

Проведенные картографические оценки на основе данных дистанционного зондирования показали, что площадь старовозрастных лесов России старше 200 лет составляла 163 млн га по состоянию на 2021 г. (см. рис. 1, табл. 1). Среди старовозрастных лесов России преобладают лиственничники, которые доминируют в Дальневосточном и Сибирском федеральных округах. В Уральском федеральном округе (ФО), наравне с лиственнични-

ками, представлены сосняки; в Северо-Западном ФО на севере сохранились старовозрастные сосняки и ельники. В Центральном и Приволжском федеральных округах представлены сосновые старовозрастные леса. На территории Приволжского, Южного и Северо-Кавказского федеральных округов сохранились старовозрастные дубовые леса на небольшой площади, не превышающей 0.37 млн га. Запасы углерода в древесной фитомассе старовозрастных лесов достигли 7.33 млрд т (табл. 2), что составляет 13% от общих запасов углерода лесов. При этом 86% углерода старовозрастных лесов аккумулируется в фитомассе лиственничников, 8% — в сосняках и только 3% — в

ельниках. Удельные запасы варьируют от 37 т/га в лиственничных редколесьях до 106, 119 и 131 т/га в дубовых, буковых и кленовых лесах соответственно.

Таким образом, доля старовозрастных лесов России, в которых возраст древостоя составляет 200 лет и более, составляет около 16%. Эти лесные экосистемы, в отличие от древостоя, являются невозобновляемым природным ресурсом. Их невозможно восстановить, поскольку недостаточно знаний об их функционировании, о взаимодействии различных компонентов этих лесов. Кроме того, эти леса являются рефугиумами биоразнообразия и источником восстановления биоразнообразия всех других лесов.

Запасы углерода в старовозрастных лесах

В лесах Москворецко-Окской равнины в ходе естественной послерубочной сукцессии запасы углерода в стволовой живой древесине возрастали от 134 т/га в березово-липовых сообществах до 181 т/га в широколиственно-еловых лесах, возраст которых превышает 100 лет (табл. 3). Древостой этих лесов имеет смешанный состав: доминирует *Picea abies*, постоянна небольшая примесь *Quercus robur*, сохраняются единичные старые деревья *Populus tremula* и *Betula pendula*. В подчиненном древесном подъярусе доминирует *Picea abies*, встречается *Tilia cordata*. Ярус подлеска и подроста хорошо развит, в нем доминирует *Corylus avellana* (Аккумуляция ..., 2018). При этом запас углерода в сухой древесине на более продвинутой стадии сукцессии, представленной широколиственно-еловыми лесами, составлял в среднем 18.9 т С/га и в три раза превышал запас на более ранних стадиях.

В почвах этих лесов на продвинутых стадиях сукцессии запасы азота и углерода выше, чем на более ранних стадиях (табл. 4). Хотя леса пока лишь достигли возраста немногим более 100 лет, в них уже выражены элементы ветровально-почвенных комплексов. Таким образом, приведенные примеры равнинных хвойно-широколиственных лесов с выраженной мозаикой демонстрируют более высокий уровень накопления и азота, и углерода в почвах, по сравнению с лесами на ранней стадии развития. В ходе развития этих лесов происходит накопление углерода как в древостое, так и в почвах.

Запасы углерода в стволах древостоя в молодых осино-грабовых и средневозрастных пихто-грабовых мелкотравных лесах Северо-Западного Кавказа составляют в среднем около 120 и 142 т С/га соответственно (см. табл. 3). При этом запасы углерода в сухой древесине не превышали 8 т С/га. Старовозрастные малонарушенные пихто-буковые мертвопокровные леса на Северо-Западном Кавказе в верховьях р. Белая относятся к самым вы-

сокопродуктивным лесам России и Европы, и запасы углерода в стволовой древесине в среднем здесь в три раза выше, чем на менее продвинутых стадиях сукцессии, на отдельных учетных площадках запасы превышают 786 т С/га. Таким образом, в старовозрастных пихто-буковых мертвопокровных лесах Северо-Западного Кавказа происходит значительное депонирование углерода за счет высокого общего запаса стволовой живой древесины. Запасы углерода в сухой древесине в среднем составляли 2.2 т С/га.

Запасы углерода и азота в подстилках лесов Северо-Западного Кавказа незначительны, варьировали от 2.5 до 5 т С/га, от 0.11 до 0.2 т N/га. В минеральных горизонтах почв запасы азота и углерода достигали высоких уровней в средневозрастных смешанных лесах (см. табл. 4): в слое 0–30 см запасы азота и углерода могли достигать 9 и 112 т/га в подкромовых пространствах светолюбивых древесных видов (граб и осина) соответственно. Однако в лесах, сформированных древостоем более 200 лет, запасы азота, и углерода в минеральном слое почв 0–30 см ниже в полтора-два раза. Это снижение объясняется сменой растительности: если на менее продвинутых стадиях сукцессии в составе сообщества доминируют светолюбивые граб и осина с опадом высокого качества, отличающимся высоким содержанием азота и, соответственно, узким отношением C/N и высокой скоростью разложения, то на терминальной стадии доминируют бук и пихта, которые характеризуются опадом низкого качества с низкой скоростью разложения. Миграция органического вещества вниз по почвенному профилю в лесах на терминальной стадии затормаживается и, соответственно, содержание и запасы углерода в минеральных горизонтах снижаются. Таким образом, можно заключить, что в таких старовозрастных лесах происходит истощение пулов почвенного азота и углерода. Повернуть этот процесс вспять могло бы формирование окон достаточной площади, в которые могли бы заселиться светолюбивые виды с высоким содержанием азота в опаде и узким отношением C/N. Однако в настоящее время в этих лесах отсутствует основной ключевой вид – зубр (*Bison bonasus*), который в результате жизнедеятельности способствовал созданию такой оконной мозаики и, соответственно, накоплению азота, и углерода в почвах. По историко-археологическим и палеонтологическим данным вплоть до XV в. в лесах Восточной Европы на большей части реконструированного ареала зубры были весьма многочисленны, особенности их поведения и питания создавали сложную мозаику растительных сообществ (Шевченко, 2016). Окна, сформированные в результате ветровала одного-двух деревьев из-за их очень небольшой площади и, соответственно, недостатка света не могут способствовать развитию светолюбивых видов, и поэтому в этих окнах по-

Таблица 3. Запасы стволовой древесины и углерода в стволах древостоя хвойно-широколиственных лесов по состоянию на 2021 г.

Тип леса	Возраст древостоя, лет	Запас живой древесины, м ³ /га	Запас сухой древесины, м ³ /га	Общий запас древесины, м ³ /га	Запас С в живой древесине, т/га	Запас С в сухой древесине, т/га	Общий запас С в древесине, т/га
Северо-Западный Кавказ							
Осино-грабовые жимолостно-мелкограбные	50–60	274.8 ± 31.2	18.1 ± 8.7	292.9 ± 34.1	119.9 ± 17.6	8.1 ± 3.4	128.1 ± 18.8
Буко-пихто-грабовые мелкограбные	80–110	313.7 ± 81.6	5.3 ± 2.2	319.1 ± 86.5	142.2 ± 34.5	2.4 ± 0.2	144.6 ± 36.7
Пихто-буковые мертвопокровные	Более 450	1089.3 ± 254.6	7.9 ± 9.9	1097.2 ± 264.6	471.6 ± 121.1	2.2 ± 0.3	473.8 ± 123.7
Москворецко-Окская равнина							
Березово-липовые снытево-волосистоосоковые	60–70	374.1 ± 37.3	12.5 ± 4.4	386.6 ± 34.3	133.8 ± 11.12	5.5 ± 2.2	139.2 ± 9.8
Липовые волосистоосоковые	75–90	446.9 ± 30.7	13.1 ± 9.6	460.0 ± 21.2	154.4 ± 7.9	5.2 ± 4.0	159.5 ± 4.1
Широколиственно-еловые зеленчуково-кисличные	90–125	457.6 ± 9.4	35.3 ± 4.5	492.9 ± 10.8	181.0 ± 4.1	18.9 ± 3.1	199.9 ± 3.5

Таблица 4. Сравнительная оценка запасов С и N в почвах хвойно-широколиственных лесов, 2015–2016 гг.

Запасы	v-test	\bar{X}_1	\bar{X}_2	SD_1	SD_2	p
Северо-Западный Кавказ						
Осино-грабовые жимолостно-мелкотравные ($n = 30$)						
С в подгоризонте L	−2.74	1.37	1.64	0.42	0.65	0.006
N в подгоризонте L	−1.55	0.06	0.06	0.02	0.02	0.121
С в подгоризонте FH	−1.90	1.68	2.04	0.84	1.25	0.058
N в подгоризонте FH	−1.23	0.08	0.09	0.03	0.05	0.218
С в слое 0–30 см	1.95	90.62	82.73	22.01	26.59	0.052
N в слое 0–30 см	2.45	7.51	6.75	1.76	2.05	0.014
Буко-пихто-грабовые мелкотравные ($n = 36$)						
С в подгоризонте L	−0.88	1.57	1.64	0.42	0.65	0.376
N в подгоризонте L	−1.32	0.06	0.06	0.02	0.02	0.187
С в подгоризонте FH	2.60	2.47	2.04	1.69	1.25	0.010
N в подгоризонте FH	3.11	0.11	0.09	0.07	0.05	0.002
С в слое 0–30 см	4.50	98.62	82.73	24.15	26.59	0.000
N в слое 0–30 см	1.78	7.23	6.75	2.52	2.05	0.074
Пихто-буковые мертвопокровные ($n = 33$)						
С в подгоризонте L	3.57	1.97	1.64	0.87	0.65	0.000
N в подгоризонте L	2.86	0.07	0.06	0.03	0.02	0.004
С в подгоризонте FH	−0.80	1.90	2.04	0.81	1.25	0.425
N в подгоризонте FH	−1.97	0.07	0.09	0.03	0.05	0.049
С в слое 0–30 см	−6.49	58.21	82.73	11.20	26.59	0.000
N в слое 0–30 см	−4.21	5.52	6.75	0.83	2.05	0.000
Москворецко-Окская равнина						
Березово-липовые снытево-волосистоосоковые ($n = 21$)						
С в подгоризонте L	−2.79	0.95	1.55	0.25	1.19	0.005
N в подгоризонте L	−3.26	0.03	0.06	0.01	0.04	0.001
С в подгоризонте FH	−2.09	0.02	0.31	0.05	0.75	0.037
N в подгоризонте FH	−2.31	0.00	0.01	0.00	0.03	0.021
С в слое 0–30 см	−2.67	58.29	68.40	11.66	20.85	0.008
N в слое 0–30 см	−2.29	5.06	5.46	0.90	0.97	0.022
Липовые волосистоосоковые ($n = 17$)						
С в подгоризонте L	−2.14	1.02	1.55	0.38	1.19	0.032
N в подгоризонте L	−2.23	0.04	0.06	0.01	0.04	0.026
С в подгоризонте FH	−1.75	0.03	0.31	0.06	0.75	0.079
N в подгоризонте FH	−1.90	0.00	0.01	0.00	0.03	0.057
С в слое 0–30 см	−1.79	60.58	68.40	12.90	20.85	0.074
N в слое 0–30 см	0.17	5.50	5.46	0.98	0.97	0.863
Широколиственно-еловые зеленчуково-кисличные ($n = 30$)						
С в подгоризонте L	4.46	2.28	1.55	1.48	1.19	0.000
N в подгоризонте L	4.98	0.08	0.06	0.05	0.04	0.000
С в подгоризонте FH	3.48	0.66	0.31	1.03	0.75	0.001
N в подгоризонте FH	3.81	0.03	0.01	0.04	0.03	0.000
С в слое 0–30 см	4.04	79.91	68.40	23.92	20.85	0.000
N в слое 0–30 см	1.98	5.72	5.46	0.95	0.97	0.048

Примечание. \bar{X}_1 – среднее в категории, \bar{X}_2 – общее среднее, SD_1 – стандартное отклонение в категории, SD_2 – общее стандартное отклонение, p – уровень значимости.

Таблица 5. Запасы азота и углерода в почвах северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных, 2010–2011 гг., т/га

ЭБГА	L подгоризонт подстилки				F подгоризонт подстилки				H подгоризонт подстилки				0–30 см			
	C		N		C		N		C		N		C		N	
	x	SD	x	SD	x	SD	x	SD	x	SD	x	SD	x	SD	x	SD
Межкроновый кустарничково-зеленомошный	2.02	0.54	0.05	0.01	14.52	3.60	0.38	0.14	7.66	1.22	0.18	0.05	38.69	7.04	1.91	0.41
Еловый кустарничково-зеленомошный	2.24	0.91	0.07	0.03	5.67	1.61	0.18	0.05	12.88	3.37	0.36	0.12	57.65	24.06	2.70	1.25
Еловый мертвопокровный	3.03	0.88	0.10	0.03	3.82	0.98	0.14	0.03	29.75	13.13	0.99	0.47	44.68	17.04	2.17	0.64

Примечание. ЭБГА – элементарный биогеоценотический ареал; x – среднее; SD – стандартное отклонение.

прежнему доминируют теневыносливые бук и пихта. Таким образом несмотря на то, что такие пихтово-букковые леса достигают значительного возраста (450 лет), в них не наблюдается накопления азота и углерода, а напротив, происходит истощение почв этими элементами. Это объясняется низким качеством опада бука и пихты, содержащего мало азота, и низкой скоростью его разложения. Из-за недостатка света светолюбивые виды с опадом высокого качества развиваться в таких лесах не способны.

Нами ранее было показано, что самые высокие уровни накопления углерода в минеральных горизонтах почв хвойно-широколиственных лесов обнаруживаются в лесах с наибольшим богатством видов растений, принадлежащих к разным функциональным группам и образующих опад разного качества (Kuznetsova et al., 2021). Опад видов хвойных древесных растений и бука характеризуется низкой скоростью разложения, благодаря чему происходит накопление массы органического горизонта, тогда как опад неморальных трав и лиственных деревьев (липа, береза и граб) разлагается с высокой скоростью, что приводит к интенсивной миграции соединений углерода в минеральные слои. Такой смешанный опад является благоприятным субстратом для функционирования почвенной биоты, включая дождевых червей, что способствует накоплению углерода в почве (Гераськина, 2020; Kuznetsova et al., 2021). Высокое функциональное разнообразие расте-

ний, связанное с разным качеством опада, способствует увеличению запасов углерода в минеральных горизонтах почв хвойно-широколиственных лесов. Таким образом, функциональное разнообразие растений, прежде всего, древесных, имеет не меньшее значение для накопления углерода в почвах, чем возраст лесообразователей. Высокому функциональному разнообразию способствует структурное разнообразие, выражающееся в формировании мозаичности и создании высокого разнообразия местообитаний для биоты.

В северотаежных старовозрастных еловых лесах запасы углерода в фитомассе древостоя, как и следовало ожидать, значительно ниже, чем в хвойно-широколиственных лесах, согласно расчетам не превышают 26.4 т С/га [посчитано на основе данных (Манаков, Никонов, 1981)], однако запасы углерода в почвах еловых лесов Мурманской области и хвойно-широколиственных лесов Московского региона сопоставимы (см. табл. 4, 5). Для того, чтобы оценить влияние ели сибирской – основного поздне-сукцессионного вида таежных лесов европейской части России – на аккумуляцию почвенного углерода, проведем сравнение запасов углерода в почвах межкроновых пространств и подкroновых пространств деревьев ели. В нижних гумифицированных слоях подстилки подкroновых пространств старовозрастной ели по сравнению с межкroновыми пространствами в значительных количествах накапливается и азот, и углерод: запасы азота возрастают почти в пять

раз, а углерода — более, чем в три раза. Максимальные запасы углерода и азота в подстилке (с учетом всех трех подгоризонтов L, F, H) наблюдаются в подкروновых пространствах ели с мертвопокровными пространствами (см. табл. 5): в среднем 37 т/га углерода и 1.2 т/га азота против 24 т/га углерода и 0.7 т/га азота в межкروновых пространствах. Заметно накопление углерода в подкроновых пространствах ели в минеральных слоях почв 0–30 см: 39 т/га в межкроновых пространствах против 58 и 45 т/га под кронами ели возрастом около и старше 200 лет соответственно. Также заметно выше запасы азота в минеральных слоях почв подкроновых пространств ели с кустарничково-зеленомошным покровом, по сравнению с межкроновым пространством (2.7 против 1.9 т/га соответственно). Таким образом, результаты наших исследований показывают, что в таежных лесах без нарушений под деревьями высокого возраста происходит заметное накопление органического углерода и азота в почвах, включая подстилку. Приведенные примеры северотаежных еловых лесов подтверждают, что леса в ходе развития обладают способностью по мере возрастания запасов углерода накапливать в подстилке азот (Yang et al., 2011).

Влияние дождевых червей

В лесах Москворецко-Окской равнины и Северо-Западного Кавказа при переходе к более продвинутой стадии сукцессий происходит увеличение разнообразия почвенной макрофауны, биомассы сапрофагов, числа морфо-экологических (функциональных групп) дождевых червей. В молодых лиственных лесах Москворецко-Окской равнины и Северо-Западного Кавказа преобладают две группы дождевых червей — почвенно-подстилочные и собственно почвенные, группа подстилочных червей малочисленна и встречается преимущественно в валеже. В старовозрастных хвойно-широколиственных лесах обитают четыре группы любрицид, включая крупных норных червей. Представители каждой группы населяют как почву, так и валеж — хорошо выраженный микросайт старовозрастных лесов. По биомассе в этих лесах преобладают собственно почвенные и норные виды, за счет которых общая биомасса червей значимо выше, чем в более молодых лесах (Гераськина, 2018, 2020). Благоприятные условия для почвенной фауны создаются благодаря хорошей влагоудерживающей способности почв тяжелого гранулометрического состава и формированию смешанного опада в этих лесах (Kuznetsova et al., 2021).

Пространственное распределение почвенной макрофауны во многом определяется структурным разнообразием леса. В лесах Северо-Западного Кавказа выявлены значимые различия биомассы

сапрофагов между окнами и подкроновыми пространствами всех изученных видов деревьев (граба, пихты, бука, осины). Биомасса сапрофагов в окнах в 2–3 раза выше, чем под кронами деревьев трех стадий хроноряда. Различия в биомассе главным образом связаны с большим обилием дождевых червей в почве окон в сравнении с подкроновыми участками, где среди сапрофагов преобладают мелкие личинки двукрылых, личинки типулид, многоножки-кивсяки и мокрицы. В то время как в окнах высокая биомасса собственно почвенных и норных червей. Биомасса норного вида *Dendrobaena mariupolienis* (крымско-кавказский эндемик) в окнах в 9 раз выше, чем под пологом леса.

В лесах Москворецко-Окской равнины наибольшие значения численности и биомассы макросапрофагов в подкроновых пространствах липы и березы, наименьшие в подкроновых пространствах — ели и дуба. В этих лесах основной вклад в биомассу на всех стадиях сукцессии вносят дождевые черви. По численности под кронами липы и березы также преобладают дождевые черви, под кронами ели и дуба — дождевых червей меньше, многочисленны моллюски, двупарноногие многоножки, личинки двукрылых и мокрицы. Между окнами и подкроновыми пространствами выявлены значимые различия на продвинутой стадии сукцессии: численность и биомасса значимо выше в окнах (40 г/м²), чем под кронами деревьев (20 г/м²).

Дифференцированный подход к изучению влияния дождевых червей разных морфо-экологических групп на свойства почвы, сопряженные с аккумуляцией углерода, более перспективен в сравнении с оценками влияния общей биомассы всех групп червей на отдельные почвенные горизонты (Гераськина, 2020). Наиболее тесные связи выявлены в старовозрастных лесах между биомассой морфо-экологических групп дождевых червей, населяющих органоминеральные горизонты, с содержанием азота и показателем C/N. Биомасса группы почвенно-подстилочных червей отрицательно связана с соотношением C/N в гумусовом горизонте (5–15 см), группы собственно почвенных червей — в более глубоком органоминеральном горизонте (15–30 см), что соответствует глубинам их активности. Биомасса собственно почвенных и норных видов положительно связана с содержанием азота в глубоком органоминеральном горизонте (рис. 2). Также ранее была показана положительная связь между биомассой почвенно-подстилочных червей и содержанием азота в гумусовом горизонте в лесах Москворецко-Окской равнины, где данная группа вносит большой вклад в биомассу (Гераськина, 2020).

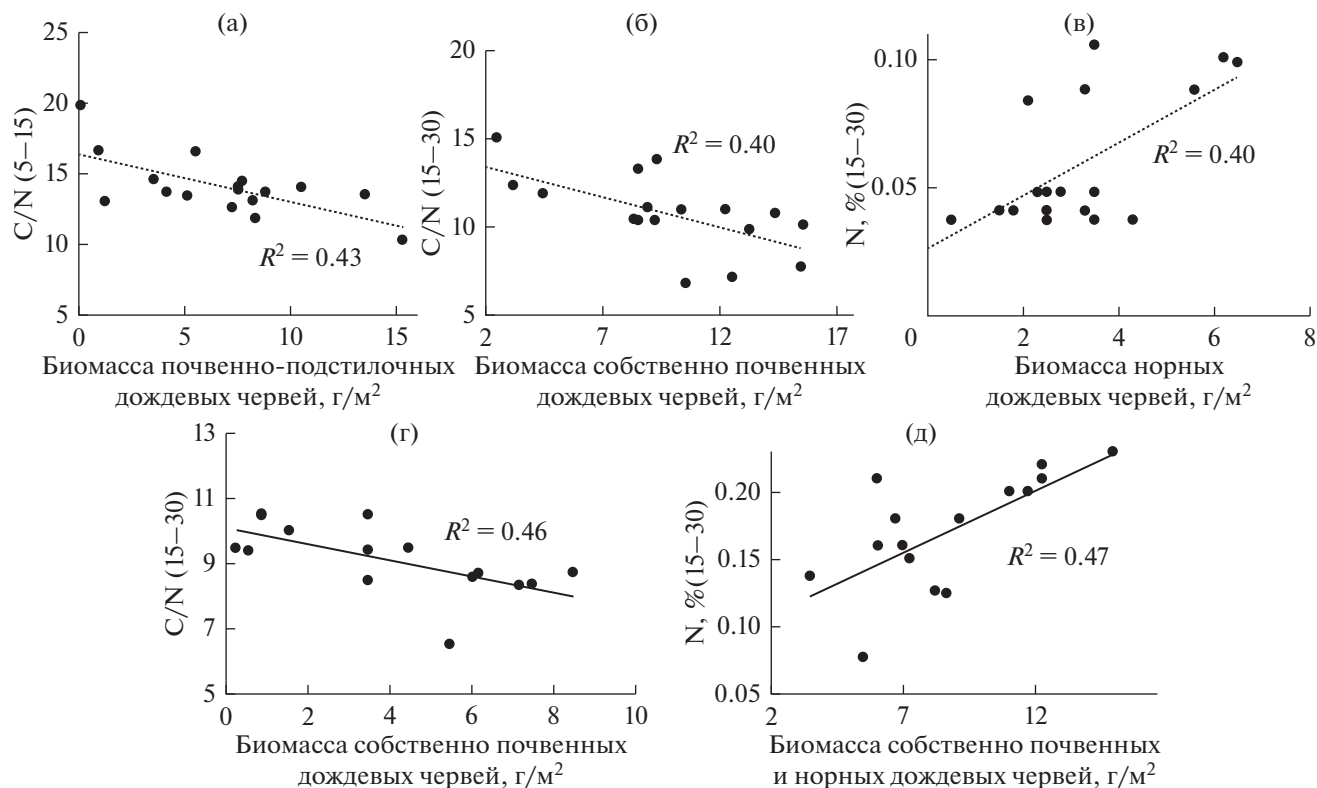


Рис. 2. Взаимосвязи показателя C/N, содержания азота (%) с биомассой разных групп дождевых червей, 2016–2017 гг. *Примечание:* а, б, в – позднесукцессионные леса Москворецко-Окской равнины (хвойно-широколиственные); г, д – леса Северо-Западного Кавказа (пихтово-буковые). В скобках приведены глубины почвенных горизонтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки на основе методов дистанционного зондирования показали, что площадь старовозрастных лесов России, возраст древостоя в которых превышает 200 лет, составляла 163 млн га по состоянию на 2021 г., то есть около 20% площади, покрытой лесом. Вклад лиственных лесов и лиственных редколесий достигал 87%. Запасы углерода в древесной фитомассе старовозрастных лесов достигли 7.33 млрд т, что составило 13% от общих запасов углерода лесов, при этом 86% углерода фитомассы аккумулируется в лиственных лесах. Актуальной задачей является оценка запасов углерода и их динамики в лесных почвах России, как в результате естественного развития, так и под влиянием антропогенных факторов.

Проведенный анализ литературных данных позволяет сделать вывод о том, что старовозрастные леса продолжают накапливать углерод. На наш взгляд, важнейшей причиной неопределенностей в оценках циклов углерода в старовозрастных лесах является неопределенность самого понятия «старовозрастные леса». Старовозрастные леса, идентифицированные по возрасту древостоя, целесообразно разделять на две группы: (1) леса мозаичного строения с выраженными признаками окон-

ной динамики, ветровально-почвенных комплексов; (2) леса с невыраженными/отсутствующими признаками оконной динамики. Уровень биоразнообразия и особенности функционирования, включая формирование цикла углерода, в этих лесах различаются. Мозаичное строение лесов, то есть высокое разнообразие горизонтальной структуры, способствует накоплению азота и углерода в почвах благодаря создаваемым для различных, в том числе светолюбивых, видов растений условиям функционирования и, соответственно, благодаря повышению качества опада для почвенной биоты. На примере модельных объектов в хвойно-широколиственных лесах Москворецко-Окской равнины показано, что на более продвинутых стадиях сукцессии со смешанным характером опада и выраженной мозаичностью запасы азота и углерода в почвах накапливаются.

Старовозрастные малонарушенные пихто-буковые мертвopoкpoвные леса Северо-Западного Кавказа относятся к самым высокопродуктивным лесам России и Европы. Запасы углерода в древостоях этих лесов в среднем в 4 раза выше, чем в лесах на ранних стадиях сукцессии, но запасы углерода в 30-сантиметровом минеральном слое почв ниже в 1.7 раза (в среднем около 58 т/га против 99 т/га). Это объясняется отсутствием

оконной мозаики, низким качеством опада бука и пихты, и соответственно, низкой скоростью его разложения. Отсутствие выраженной оконной мозаики в этих лесах препятствует заселению светлюбивых видов, в том числе с высоким качеством опада, что могло бы способствовать накоплению опада разного качества и, соответственно, аккумуляции азота и углерода в почвах.

Показана важная роль дождевых червей в регулировании циклов азота и углерода в старовозрастных хвойно-широколиственных лесах. В ходе изменения сукцессионного статуса лесов происходит усложнение видового состава и набора морфо-экологических групп дождевых червей. Видовое богатство, разнообразие морфо-экологических групп и биомасса дождевых червей при сходном гранулометрическом составе почв определяется качеством опада: наиболее благоприятный для поддержания функционального разнообразия дождевых червей — смешанный опад лиственных и хвойных видов древесного полога, подроста и кустарников. Показатели, сопряженные с аккумуляцией углерода, к которым относятся соотношения C/N и содержание азота, коррелируют с биомассой функциональных (морфо-экологических) групп дождевых червей в горизонтах их активности. При увеличении биомассы червей соотношение C/N уменьшается, содержание азота повышается именно в хвойно-широколиственных лесах, формируемых древесными растениями со смешанным (быстро- и медленно-разлагаемым) опадом. Сохранению таксономического и функционального разнообразия почвенной фауны в старовозрастных лесах способствует структурное разнообразие, в котором помимо полога разных видов деревьев большое значение отводится валежу и большим прорывам в пологе леса — “окнам”.

Хотя запасы углерода в древостое старовозрастных северотаежных еловых лесов значительно ниже, чем в хвойно-широколиственных лесах, в подстилке запасы углерода здесь на порядок выше, чем в равнинных и горных хвойно-широколиственных лесах. При этом максимальные запасы как углерода, так и азота обнаружены под старовозрастными елями, что свидетельствует о способности лесов в ходе развития накапливать азот и углерод в почвах. В минеральном профиле почв (слой 0–30 см) этих лесов запасы углерода в почвах под кронами деревьев ели также оказались существенно выше, чем в межкروновых пространствах, и варьировали в среднем от 45 до 58 т/га против 37 т/га в межкروновых пространствах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН (регистрационный № 1022090800034-7-1.6.19) в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2022 года

№ 25-15р в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

FUNDING

This work was carried out within the framework of the project (registration no. 1022090800034-7-1.6.19) as a component of the innovative project of national importance aimed at creating a unified national system monitoring of climatically active substances, in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated September 2, 2022, no. 25-15r.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
- Акулова Л.И., Долгин М.М., Колесникова А.А. Распространение и численность дождевых червей (Lumbricidae) в подзоне средней тайги Республики Коми // Вестн. Ин-та Биологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 1 (199). С. 4–16.
- Атлас малонарушенных лесных территорий России. М.: Изд-во МСОЭС; Вашингтон: Изд-во World Resources Inst., 2003. 187 с.
- Барталев С.А. Методология комплексного использования спутниковых данных дистанционного зондирования, выборочных наземных наблюдений и моделирования для мониторинга бюджета углерода в лесах России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы 20-й международ. конф. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 499.
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Биоразнообразие и функционирование лесных экосистем. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021. 327 с.
- Битюцкий Н.П., Соловьева А.Н., Лукина Е.И., Олейник А.С., Завгородняя Ю.А., Демин В.В., Бызов Б.А. Экскреты дождевых червей стимулятор минерализации соединений азота в почве // Почвоведение. 2007. № 4. С. 468–473.
- Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 2004 а. Кн. 1. 479 с.
- Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 2004 б. Кн. 2. 575 с.
- Всеволодова-Перель Т.С. Дождевые черви фауны России. Кадастр и определитель. М.: Наука, 1997. 101 с.
- Ганин Г.Н., Стриганова Б.Р. Факторы формирования и поддержания избыточного видового разнообразия животного населения почв (на примере Дальнего Востока) // Изв. РАН. Сер. биол. 2012. № 3. С. 346.

- Гераськина А.П.* Влияние дождевых червей разных морфо-экологических групп на аккумуляцию углерода в лесных почвах // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 2. С. 1–20.
- Гераськина А.П.* Динамика комплекса дождевых червей в ходе послерубочных сукцессий в лесах Северо-Западного Кавказа // Вопросы лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–14.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-14>
- Гераськина А.П.* Дождевые черви (Oligochaeta, Lumbricidae) окрестностей пос. Домбай Тебердинского заповедника (Северо-Западный Кавказ, Карачаево-Черкессия) // Тр. зоологического ин-та РАН. 2016. Т. 320. № 4. С. 450–466.
- Гераськина А.П., Антощенко В.Ф.* Роль микростадий в поддержании функционального разнообразия дождевых червей / Проблемы почвенной зоологии. М.: ИПЭЭ, 2018. С. 59.
- Горнов А.В., Горнова М.В., Тихонова Е.В. и др.* Оценка сукцессионного статуса хвойно-широколиственных лесов европейской части России на основе популяционного подхода // Лесоведение. 2018. № 4. С. 243–257.
<https://doi.org/10.1134/S0024114818040083>
- Дылис Н.В.* Структура лесного биогеоценоза // Комаровские чтения. XXI. М.: Наука, 1969. 55 с.
- Евстигнеев О.И., Горнова М.В.* Микросайты и поддержание флористического разнообразия высокогорных ельников (на примере памятника природы “Болото Рыжуха”, Брянская область) // Russian J. of Ecosystem Ecol. 2017. Vol. 2 (2). P. 1–21.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-2-2>
- Жуков А.В.* Экологическое разнообразие животного населения почв пойменных биогеоценозов р. Самара // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. 2000. № 7. С. 73–79.
- Журавлева И.В., Комарова А.В., Потанов П.В., Турубанова С.А., Ярошенко А.Ю.* Малонарушенные лесные территории в бореальных лесах мира. происхождение, развитие, значение и возможное будущее концепции малонарушенных лесных территорий применительно к бореальным лесам // Russian J. of Ecosystem Ecol. 2016. Vol. 1 (1). P. 1–11.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-1-5>
- Кайдун П.И.* Влияние дождевых червей на доступность растениям элементов минерального питания: азота, железа, цинка, марганца и кремния: Дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 2018. 153 с.
- Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
- Козловская Л.С.* Роль почвенных беспозвоночных в трансформации органического вещества болотных почв. Л.: Наука, 1976. 211 с.
- Лукина Н.В., Гераськина А.П., Горнов А.В., Шевченко Н.Е., Куприн А.В., Чернов Т.И., Чумаченко С.И., Шанин В.Н., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Горнова М.В.* Био-разнообразие и климаторегулирующие функции лесов: актуальные вопросы и перспективы исследований // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1–90.
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>
- Методические подходы к экологической оценке лесного покрова в бассейне малой реки / отв. ред. Л.Б. Заугольнова, Т.Ю. Браславская. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 383 с.
- Онипченко В.Г.* Функциональная фитоценология: Синэкология растений. М.: КРАСАНД, 2014. 576 с.
- Орлова М.А.* Элементарная единица лесного биогеоценологического покрова для оценки экосистемных функций лесов // Тр. Карельского НЦ. Сер. Экологические исследования. 2013. № 6. С. 126–132.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э.* Методические подходы к отбору образцов лесной подстилки с учетом мозаичности лесных биогеоценозов // Лесоведение. 2015. № 3. С. 214–221.
- Перель Т.С.* Распространение и закономерности распределения дождевых червей фауны СССР. М.: Наука, 1979. 272 с.
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России / под ред. А.С. Исаева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. Кн. 1. 461 с.
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России / под ред. А.С. Исаева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. Кн. 2. 478 с.
- Раменский Л.Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.—Л.: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
- Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э.* Сукцессионный статус старовозрастных темнохвойных лесов Европейской России // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126. № 1. С. 27–49.
- Смирнова О.В., Коротков В.Н.* Старовозрастные леса Пяозерского лесхоза северо-западной Карелии // Ботанический журн. 2001. Т. 86. № 1. С. 98–109.
- Смирнова О.В., Шевченко Н.Е., Ханина Л.Г., Бобровский М.В.* Рефугиумы таежных лесов приполярного Урала // Изв. РАН. Сер. биол. 2018. № 2. С. 237–244.
<https://doi.org/10.7868/S0002332918020133>
- Стриганова Б.Р.* Исследование роли мокриц и дождевых червей в процессах гумификации разлагающейся древесины // Почвоведение. 1968. № 8. С. 85–90.
- Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия / под ред. О.В. Смирновой, Е.С. Шапошников. СПб.: РБО, 1999. 549 с.
- Фридланд В.М.* Проблемы географии, генезиса и классификации почв. М.: Наука, 1986. 243 с.
- Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И.* Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). 2-е изд., доп. М.: Рослесхоз, 2008. 886 с.
- Шевченко Н.Е.* Роль *Bison bonasus* (Linnaeus, 1758) в формировании мозаики природного лесного покрова Восточной Европы. Сообщение первое. Динамика ареала и особенности трофической и топической деятельности Европейского зубра в позднем голоцене на территории Восточной Европы // Russian J. of Ecosystem Ecol. 2016. Т. 1. № 2. С. 1–41.
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-2-3>
- Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н. и др.* Сукцессионная динамика растительности и запа-

- сы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176.
<https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>
- Afterlife of a tree. Warszawa-Hajnowka: WWF Poland, 2005. 251 p.
- Andriuzzi W.S., Schmidt O., Brussaard L., Faber J.H., Bolger T. Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production // Applied Soil Ecol. 2016. Vol. 104. P. 148–156.
- Ashwood F., Vanguelova E.I., Benham S., Butt K.R. Developing a systematic sampling method for earthworms in and around deadwood // Forest Ecosystems. 2019. Vol. 6. № 33. P. 1–12.
- Bossuyt H., Six J., Hendrix P.F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts // Soil Biol. and Biochem. 2005. Vol. 37. P. 251–258.
- Cavard X., Macdonald S.E., Bergeron Y., Chen H.Y. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: Evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests // Environ. Reviews. 2011. Vol. 19. P. 142–161.
- Dentener F., Drevet J., Lamarque J.F. et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multi-model evaluation // Glob. Biogeochem. Cycles. 2006. Vol. 20. № 4. Article GB4003.
<https://doi.org/10.1029/2005GB002672>
- Desie E., Van Meerbeek K., De Wandeler H. et al. Positive feedback loop between earthworms, humus form and soil pH reinforces earthworm abundance in European forests // Functional Ecol. 2020. Vol. 34. № 12. P. 2598–2610.
- European Russian Forests. Their Current State and Features of Their History / O.V. Smirnova, M.V. Bobrovsky, L.G. Khanina (Eds.). Heidelberg, Germany: Springer Berlin, 2017. 556 p.
<https://doi.org/10.1007/978-94-024-1172-0>
- FAO and UNEP. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome, 2020. 188 p.
<https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Filser J., Faber J.H., Tiunov A.V., Brussaard L. et al. Soil fauna: key to new carbon models // Soil. 2016. Vol. 2. № 4. P. 565–582.
- Garnier P., Makowski D., Hedde M., Bertrand M. Changes in soil carbon mineralization related to earthworm activity depend on the time since inoculation and their density in soil // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 1. P. 1–10.
- Gundersen P., Thybring E.E., Nord-Larsen T., Vesterdal L., Nadelhoffer K.J., Johannsen V.K. Old-growth forest carbon sinks overestimated // Nature. 2021. Vol. 591. P. E21–E23.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-z>
- Jenny H. Role of the plant factor in the pedogenic functions // Ecology. 1958. Vol. 39. № 1. P. 5–16.
- Khanina L., Bobrovsky M. Value of large *Quercus robur* fallen logs in enhancing the species diversity of vascular plants in an old-growth mesic broad-leaved forest in the Central Russian Upland // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 491. P. 119172.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119172>
- Kooch Y., Haghverdi K. Earthworms – good indicators for forest disturbance // J. of BioSci. & Biotechnol. 2014. Vol. 3. № 2. P. 155–162.
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V. Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests // Forests. 2021. Vol. 12. № 9. Article 1179.
- Larch wood – a literature review / A. Bergstedt, C. Lyck (Eds.). Copenhagen: Forest & Landscape Denmark, 2007 115 p.
- Lavelle P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function // Advances in Ecol. Research. 1997. Vol. 27. P. 93–132.
- Lavelle P., Martin A. Small-scale and large-scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics // Soil Biol. and Biochem. 1992. Vol. 24. № 12. P. 1491–1498.
- Lee K.E. Earthworms. Their ecology and relationships with soils and land use. Sydney: Academic Press, 1985. 411 p.
- Lee S.Y., Foster R.C. Soil fauna and soil structure // Australian J. of Soil Research. 1991. Vol. 29. P. 745–775.
- Lemtiri A., Colinet G., Alabi T., Cluzeau D., Zirbes L., Haubruge E., Francis F. Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review // Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement. 2014. Vol. 18. P. 1–13.
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Knohl A., Law B.E., Ciais P., Grace J. Reply to: Old-growth forest carbon sinks overestimated // Nature. 2021. Vol. 591. P. E24–E25.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03267-y>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks // Nature. 2008. Vol. 455. P. 213–215.
<https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Makeschin F. Earthworms (Lumbricidae: Oligochaeta): Important promoters of soil development and soil fertility / G. Benckiser (Ed.). Fauna in soil ecosystems. Recycling processes, nutrient fluxes and agricultural production. Florida: CRC Press, 1997. P. 173–223.
- McDaniel J.P., Stromberger M.E., Barbarick K.A., Cranshaw W. Survival of *Aporrectodea caliginosa* and its effects on nutrient availability in biosolids amended soil // Applied Soil Ecol. 2013. Vol. 71. P. 1–6.
- Odum E.P. The Strategy of Ecosystem Development // Sci. 1969. Vol. 164. P. 262–270.
<https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>
- Old-Growth Forests: A Literature Review of the Characteristics of Eastern North American Forests. Vermont Natural Resources Council. 2005. 20 p.
- Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S., Dubinin M., Laestadius L., Thies C., Aksenov D., Egorov A., Yesipova Y., Glushkov I., Karpachevskiy M., Kostikova A., Manisha A., Tsybikova E., Zhuravleva I. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing // Ecology and Society. 2008. Vol. 13 (2). P. 51.
<https://doi.org/10.5751/ES-02670-130251>
- Roturier S., Roue M. Of forest, snow and lichen: Sámi reindeer herders' knowledge of winter pastures in northern Sweden // Forest Ecology and Management. 2009. Vol. 258. P. 1960–1967.

- Rozen A., Myslajek R.W., Sobczyk L. Altitude versus vegetation as the factors influencing the diversity and abundance of earthworms and other soil macrofauna in montane habitat (Silesian Beskid Mts, Western Carpathians) // *Polish J. of Ecology*. 2013. Vol. 61. № 1. P. 145–156.
- Sabatini F.M., Bluhm H., Kun Z. et al. European primary forest database v2.0 // *Scientific Data*. 2021. Vol. 8. Article 220.
<https://doi.org/10.1038/s41597-021-00988-7>
- Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49–56.
- Schulze E.-D., Wirth C., Mollicone D., von Lüpke N., Ziegler W., Achard F., Mund M., Prokushkin A., Scherbina S. Factors promoting larch dominance in central Siberia: fire versus growth performance and implications for carbon dynamics at the boundary of evergreen and deciduous conifers // *Biogeosci.* 2012. Vol. 9. P. 1405–1421.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-1405-2012>
- Shevchenko N., Geraskina A., Kuprin A., Grabenko E. The role of canopy gaps in maintaining biodiversity of plants and soil macrofauna in the forests of the northwestern Caucasus // *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32. № 2. P. 93–110.
<https://doi.org/10.12775/EQ.2021.017>
- Smirnova O.V., Popadyuk R.V., Evstigneev O.I., Minaeva T.Yu., Shaposhnikov E.S., Morozov A.S., Yanitskaya T.O., Kuznetsova T.V., Ripa S.I., Samokhina T.Yu., Romanovskii A.M., Komarov A.S. Current state of coniferous-broad-leaved forests in Russia and Ukraine: historical development, biodiversity, dynamic. Pushchino: PRC RAS Preprint, 1995. 76 p.
- The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems / H. Remmert (Ed.). *Ecological Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1991. Vol. 85. 168 p.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-75650-4_1
- Wirth C., Messier C., Bergeron Y., Frank D., Kahl A. Old-Growth Forest Definitions: a Pragmatic View // *Old-Growth Forests*. *Ecological Studies*. 2009. Vol. 207. P. 11–33.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_2
- Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis // *New Phytologist*. 2011. Vol. 190. № 4. P. 977–989.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>
- Zhang W., Hendrix P.F., Dame L.E. et al. Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. № 1. P. 1–9.
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., Mo J. Old-growth forests can accumulate carbon in soils // *Sci*. 2006. Vol. 314. № 5804. P. 1417.
<https://doi.org/10.1126/science.1130168>

Role of Old-Growth Forests in Carbon Accumulation and Storage

N. V. Lukina¹ *, S. A. Bartalev^{1,2}, A. P. Geraskina¹, A. S. Plotnikova¹, A. V. Gornov¹, D. V. Ershov¹, E. A. Gavriluk¹, A. I. Kuznetsova¹, N. E. Shevchenko¹, E. V. Tikhonova¹, M. A. Danilova¹, D. N. Tebenkova¹, V. E. Smirnov¹, and E. V. Ruchinskaya¹

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

The paper provides a brief analysis of well-known works containing evidence of carbon accumulation in old-growth forests. The analysis of the current state of the problem allows us to conclude that old-growth forests continue to accumulate carbon. A map of old-growth forests in Russia, identified on the basis of tree age higher than 200 years, using remote sensing data, is presented, and estimates of carbon pools in these forests are discussed. According to the estimates obtained, the area of old-growth forests in Russia was 163 mln ha as of 2021, and carbon stocks in phytomass reached 7.33 bln t, with the contribution of larch forests and larch woodlands of 86%. It is shown that the most important cause of uncertainties in the estimates of carbon cycles in old-growth forests is the uncertainty of the concept of “old-growth forests.” The mosaic structure of forests, that is, the high horizontal structural diversity, contributes to the accumulation of nitrogen and carbon in soils due to the creation of functioning conditions for various plant species, including light-loving ones, and, accordingly, due to the presence of litter of different quality, which is important for soil biota. Old-growth mosaic forests in Moskvoretso-Oka Plain accumulated more nitrogen and carbon in soils than forests at an earlier stage of succession with a low mosaicity (in average 80 t/ha versus 60 t/ha in the 30-cm layer). The old-growth fir-beech dead-cover forests of the Northwestern Caucasus, whose tree stand is characterized by the highest productivity in Russia and Europe and high carbon reserves in the tree stand, are characterized by low carbon stock in soils compared to forests at an earlier stage of development (in average 58 t/ha versus 99 t/ha in 30-cm layer). This is due to the low quality of beech and fir litter and the absence of a pronounced window mosaic, which prevents the colonization of light-loving plant species, including with a high quality of litter. It is shown that, along with microorganisms, it is necessary to take into account such agents of decomposition, mineralization and humification as earthworms, which play a key role in carbon cycles. Carbon stock in the litter of northern taiga spruce forests is an order of magnitude higher than in coniferous-broad-leaved forests; in the litter and in the mineral layer of 0–30 cm, the carbon reserves under the crowns of spruce

trees for about 200 years turned out to be significantly higher than in the spaces between the crowns, exceeding 80 t/ha.

Keywords: old-growth forests, mosaic, carbon, nitrogen, litter quality, soil, earthworms

REFERENCES

- Afterlife of a tree.* Bobiec A., Ed. Warszawa-Hajnowka: WWF Poland, 2005. 251 p.
- Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov* [Carbon Accumulation in Forest Soils and Forest Succession Status]. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2018. 232 p.
- Akulova L.I., Dolgin M.M., Kolesnikova A.A. Distribution and abundance of earthworms (Lumbricidae) in middle taiga of the Komi Republic. *Vestn. Inst. Biol. Komi NTs UrO RAN*, 2017, vol. 199, no. 1, pp. 4–16. (In Russ.).
- Andriuzzi W.S., Schmidt O., Brussaard L., Faber J.H., Bolger T. Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production. *Appl. Soil Ecol.*, 2016, vol. 104, pp. 148–156.
- Ashwood F., Vangelova E.I., Benham S., Butt K.R. Developing a systematic sampling method for earthworms in and around deadwood. *For. Ecosyst.*, 2019, vol. 6, no. 33, pp. 1–12.
- Atlas malonarushennykh lesnykh territorii Rossii* [Atlas of Intact Forest Territories of Russia]. Moscow: MSoES Publ.; Washington: World Resources Inst. Publ., 2003. 187 p.
- Bartalev S.A. Methodology for the integrated use of satellite remote sensing data, selected ground observations and modeling for monitoring the forest carbon budget in Russia. In *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: materialy 20-i mezhd. konf.* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. Proc. of the 20th International Conference]. Moscow: Space Res. Inst. RAS, 2022, p. 499. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Land Cover Mapping over Russia Using Earth Observation Data]. Moscow: Space Res. Inst. RAS, 2016. 208 p.
- Bioraznoobrazie i funktsionirovaniye lesnykh ekosistem* [Biodiversity and Functioning of Forest Ecosystems]. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2021. 327 p.
- Bityutskii N.P., Solov'eva A.N., Lukina E.I., Oleinik A.S., Zavgorodnyaya Yu.A., Demin V.V., Byzov B.A. Stimulating effect of earthworm excreta on the mineralization of nitrogen compounds in soil. *Eurasian Soil Sci.*, 2007, vol. 40, no. 4, pp. 426–431.
- Bossuyt H., Six J., Hendrix P.F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biol. Biochem.*, 2005, vol. 37, pp. 251–258.
- Cavard X., Macdonald S.E., Bergeron Y., Chen H.Y. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: Evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests. *Environ. Rev.*, 2011, vol. 19, pp. 142–161.
- Dentener F., Drevet J., Lamarque J.F., Bey I., Eickhout B., Fiore A.M., Hauglustaine D., Horowitz L.W., Krol M., Kulshrestha U.C., Lawrence M., Galy-Lacaux C., Rast S., Shindell D., Stevenson D., van Noije T., Atherton C., Bell N., Bergman D., Butler T., Cofala J., Collins B., Doherty R., Ellingsen K., Galloway J., Gauss M., Montanaro V., Müller J.F., Pitari G., Rodriguez J., Sanderson M., Solmon F., Strahan S., Schultz M., Sudo K., Szopa S., Wild O. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2006, vol. 20, iss. 4, no. GB4003.
<https://doi.org/10.1029/2005GB002672>
- Desie E., van Meerbeek K., de Wandeler H., Bruelheide H., Domisch T., Jaroszewicz B., Joly F.-X., Vancampenhout K., Vesterdal L., Muys B. Positive feedback loop between earthworms, humus form and soil pH reinforces earthworm abundance in European forests. *Funct. Ecol.*, 2020, vol. 34, iss. 12, pp. 2598–2610.
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.13668>
- Dylis N.V. Structure of the Forest Biogeocoenosis. In *Komarovskie chteniya, 21* [Komarovsky Readings, 21]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 55 p. (In Russ.).
- European Russian Forests. Their Current State and Features of Their History.* Smirnova O.V., Bobrovsky M.V., Khanina L.G., Eds. Heidelberg: Springer Berlin, 2017. 556 p.
- Evstigneev O.I., Gornova M.V. Microsites and maintenance of floristic diversity of tall-herb spruce forest (on the example of the Ryzhukha Swamp natural monument, Bryansk region). *Russ. J. Ecosyst. Ecol.*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 1–21. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-2-2>
- FAO and UNEP. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people.* Rome, 2020. 188 p.
<https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Filser J., Faber J.H., Tiunov A.V., Brussaard L., Frouz J., de Deyn G., Uvarov A.V., Berg M.P., Lavelle P., Loreau M., Wall D.H., Querner P., Eijsackers H., Jiménez J.J. Soil fauna: key to new carbon models. *Soil*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 565–582.
<https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016>
- Fridland V.M. *Problemy geografii, genezisa i klassifikatsii pochv* [Problems of Geography, Genesis and Classification of Soils]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 243 p.
- Ganin G.N., Striganova B.R. Factors determining the origin and maintenance of redundant species diversity of the soil animal population (by a case study of the Far East) *Biol. Bull.*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 288–301.
- Garnier P., Makowski D., Hedde M., Bertrand M. Changes in soil carbon mineralization related to earthworm activity depend on the time since inoculation and their density in soil. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1–10.
- Geraskina A.P. Dynamics of the complex of earthworms during of successions after-felling in the forests of the North-Western Caucasus. *Vopr. Les. Nauki*, 2018,

- vol. 1, no. 1, pp. 1–14. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-2018-1-1-1-14>
- Geraskina A.P. Earthworms (Oligochaeta, Lumbricidae) near the township Dombay of Teberda reserve (North-west Caucasus, Karachay-Cherkessia). *Tr. Zoolog. Inst. RAN*, 2016, vol. 320, no. 4, pp. 450–466. (In Russ.).
- Geraskina A.P. Impact of earthworms of different morpho-ecological groups on carbon accumulation in forest-soils. *Vopr. Les. Nauki*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 1–20. (In Russ.).
- Geraskina A.P., Antoshchenkov V.F. The role of microsites in the maintenance of earthworm functional diversity. In *Problemy pochvennoi zoologii* [Challenges of Soil Zoology]. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2018, 59 p. (In Russ.).
- Gornov A.V., Gornova M.V., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Ruchinskaya E.V., Teben'kova D.N. Population-based assessment of succession stage of mixed forests in European part of Russia. *Lesoved.*, 2018, no. 4, pp. 243–257. (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S0024114818040083>
- Gundersen P., Thybring E.E., Nord-Larsen T., Vesterdal L., Nadelhoffer K.J., Johannsen V.K. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 2021, vol. 591, no. E21–E23.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-z>
- Jenny H. Role of the plant factor in the pedogenic functions. *Ecol.*, 1958, vol. 39, no. 1, pp. 5–16.
- Kaidun P.I. The influence of earthworms on the availability of mineral nutrients to plants: nitrogen, iron, zinc, manganese and silicon. *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. St. Petersburg, 2018. 153 p. (In Russ.).
- Karpachevskii L.O. *Pestota pochvennogo pokrova v lesnom biogeotsenoze* [Heterogeneity of the Ground Cover in the Forest Biogeocenoses]. Moscow: MSU Publ., 1977. 312 p.
- Khanina L., Bobrovsky M. Value of large Quercus robur fallen logs in enhancing the species diversity of vascular plants in an old-growth mesic broad-leaved forest in the Central Russian Upland. *For. Ecol. Manage.*, 2021, vol. 491, pp. 119172.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119172>
- Kooch Y., Haghverdi K. Earthworms – good indicators for forest disturbance. *J. BioSci. Biotechnol.*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 155–162.
- Kozlovskaya L.S. *Rol' pochvennykh bespozvonochnykh v transformatsii organicheskogo veshchestva bolotnykh pochv* [The Role of Invertebrates in the Transformation of Organic Matter of Bog Soils]. Leningr.: Nauka Publ., 1976. 211 p.
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., et al. Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests. *Forests*, 2021, vol. 12, iss. 9, no. 1179.
- Larch wood – a literature review*. Bergstedt A., Lyck C., Eds. Copenhagen: Forest & Landscape Denmark, 2007. 115 p.
- Lavelle P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Adv. Ecol. Res.*, 1997, vol. 27, pp. 93–132.
- Lavelle P., Martin A. Small-scale and large-scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics. *Soil Biol. Biochem.*, 1992, vol. 24, no. 12, pp. 1491–1498.
- Lee K.E. *Earthworms: Their ecology and relationships with soils and land use*. Sydney: Academic Press, 1985. 411 p.
- Lee S.Y., Foster R.C. Soil fauna and soil structure. *Aust. J. Soil Res.*, 1991, vol. 29, pp. 745–775.
- Lemtiri A., Colinet G., Alabi T., Cluzeau D., Zirbes L., Haubruge E., Francis F. Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 2014, vol. 18, pp. 1–13.
- Lukina N.V., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Shevchenko N.E., Kuprin A.V., Chernov T.I., Chumachenko S.I., Shanin V.N., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Gornova M.V. Biodiversity and climate regulating functions of forests: current issues and prospects for research. *Vopr. Les. Nauki*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 1–90. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-90>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Knohl A., Law B.E., Ciais P., Grace J. Reply to: Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 2021, vol. 591, no. E24–E25.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03267-y>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 2008, vol. 455, pp. 213–215.
<https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Makeschin F. Earthworms (Lumbricidae: Oligochaeta): Important promoters of soil development and soil fertility. In *Fauna in soil ecosystems. Recycling processes, nutrient fluxes and agricultural production*. Benckiser G., Ed. Florida: CRC Press, 1997, pp. 173–223.
- McDaniel J.P., Stromberger M.E., Barbarick K.A., Cranshaw W. Survival of Aporectodea caliginosa and its effects on nutrient availability in biosolids amended soil. *Appl. Soil Ecol.*, 2013, vol. 71, pp. 1–6.
- Metodicheskie podkhody k ekologicheskoi otsenke lesnogo pokrova v basseine maloi reki* [Methodological Approaches to Environmental Assessment of the Forest Cover in the Basin of the Small Rivers]. Zaugol'nova L.B., Braslavskaya T.Yu., Eds. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2010. 383 p.
- Odum E.P. The Strategy of Ecosystem Development: An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *Science*, 1969, vol. 164, pp. 262–270.
<http://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>
- Old-Growth Forests: A Literature Review of the Characteristics of Eastern North American Forests*. Vermont: Vermont Natural Resources Council, 2005. 20 p.
- Onipchenko V.G. *Funktsional'naya fitotsenologiya: Sinekologiya rastenii* [Functional Phytosociology: Plants Synecology]. Moscow: KRASAND Publ., 2014. 576 p.
- Orlova M.A. Elementary unit of the forest biogeocenotic cover for investigation of forest ecosystem functions. *Tr. Kareli. NTs. Ser. Ekolog. Issled.*, 2013, no. 6, pp. 126–132. (In Russ.).
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E. Methodology of forest litter sampling taking into account the patchiness of forest biogeocenoses. *Lesoved.*, 2015, no. 3, pp. 214–221. (In Russ.).

- Perel' T.S. *Rasprostraneniye i zakonomernosti raspredeleniya dozhddevykh chervei fauny SSSR* [Distribution and Distribution Regularities of Earthworms in the USSR Fauna]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 272 p.
- Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S., Dubinin M., Laestadius L., Thies C., Aksenov D., Egorov A., Yesipova Y., Glushkov I., Karpachevskiy M., Kostikova A., Manisha A., Tsybikova E., Zhuravleva I. Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecol. Soc.*, 2008, vol. 13, iss. 2, no. 51. <https://doi.org/10.5751/ES-02670-130251>
- Ramenskii L.G. *Vvedeniye v kompleksnoye pochvenno-geobotanicheskoye issledovaniye zemel'* [Introduction to a Comprehensive Soil-Geobotanical Study of Land]. Moscow-Lening. Sel'khozgiz Publ., 1938. 620 p.
- Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii. Tom 1* [Forest Ecosystems of Russia: Diversity and Dynamics. Volume 1]. Isaev A.S., Ed. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2012. 461 p.
- Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii. Tom 2* [Forest Ecosystems of Russia: Diversity and Dynamics. Volume 2]. Isaev A.S., Ed. Moscow: KMK Sci. Press Publ., 2013. 478 p.
- Roturier S., Roue M. Of forest, snow and lichen: Sámi reindeer herders' knowledge of winter pastures in northern Sweden. *For. Ecol. Manage.*, 2009, vol. 258, pp. 1960–1967.
- Rozen A., Mysłajek R.W., Sobczyk L. Altitude versus vegetation as the factors influencing the diversity and abundance of earthworms and other soil macrofauna in montane habitat (Silesian Beskid Mts, Western Carpathians). *Pol. J. Ecol.*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 145–156.
- Sabatini F.M., Bluhm H., Kun Z., Aksenov D., Atauri J.A., Buchwald E., Burrascano S., Cateau E., Diku A., Marques Duarte I., Fernández López Á.B., Garbarino M., Grigoriadis N., Horváth F., Keren S., Kitenberga M., Kiš A., Kraut A., Ibisch P.L., Larrieu L., Lombardi F., Matovic B., Nicolae Melu R., Meyer P., Midteng R., Mikac S., Mikoláš M., Mozgeris G., Panayotov M., Pisek R., Nunes L., Ruete A., Schickhofer M., Simovski B., Stillhard J., Stojanovic D., Szwagrzyk J., Tikkanen O.-P., Toromani E., Volosyanchuk R., Vrška T., Waldherr M., Yermokhin M., Zlatanov T., Zagidullina A., Kuemmerle T. European primary forest database v2.0. *Sci. Data*, 2021, vol. 8, no. 220. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00988-7>
- Schmidt M.W., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, vol. 478, pp. 49–56.
- Schulze E.-D., Wirth C., Mollicone D., von Lüpke N., Ziegler W., Achard F., Mund M., Prokushkin A., Scherbina S. Factors promoting larch dominance in central Siberia: fire versus growth performance and implications for carbon dynamics at the boundary of evergreen and deciduous conifers. *Biogeosci.*, 2012, vol. 9, pp. 1405–1421. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1405-2012>
- Shevchenko N.E. The role of Bison *bonasus* (Linnaeus, 1758) in the mosaic formation of natural forest cover in Eastern Europe. First article. The dynamics of the area, and features of the food and topical activity of the European bison in the late Holocene in Eastern Europe. *Russ. J. Ecosyst. Ecol.*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 1–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-2-3>
- Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Grabenko E.A., Tikhonova E.V., Lukina N.V. Succession dynamics of vegetation and storages of soil carbon in mixed forests of Northwestern Caucasus. *Lesoved.*, 2019, no. 3, pp. 163–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>
- Shevchenko N., Geraskina A., Kuprin A., Grabenko E. The role of canopy gaps in maintaining biodiversity of plants and soil macrofauna in the forests of the northwestern Caucasus. *Ecol. Quest.*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 93–110. <https://doi.org/10.12775/EQ.2021.017>
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Yu.I. *Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdenii osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* [Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (Standard and Reference Materials)]. Moscow: Fed. Forest. Agency, 2008. 886 p.
- Smirnova O.V., Bobrovskii M.V., Khanina L.G., Smirnov V.E. Succession status of old-growth spruce and spruce-fir forests in European Russia. *Uspekhi Sovrem. Biol.*, 2006, vol. 126, no. 1, pp. 27–49. (In Russ.).
- Smirnova O.V., Korotkov V.N. Oldgrowth forests of North-West Karelia Pjaozero forest management unit. *Botanich. Zh.*, 2001, vol. 86, no. 1, pp. 98–109. (In Russ.).
- Smirnova O.V., Popadyuk R.V., Evstigneev O.I., Minaeva T.Yu., Shaposhnikov E.S., Morozov A.S., Yanitskaya T.O., Kuznetsova T.V., Ripa S.I., Samokhina T.Yu., Romanovskii A.M., Komarov A.S. *Current state of coniferous-broad-leaved forests in Russia and Ukraine: historical development, biodiversity, dynamic*. Pushchino: PRC RAS Preprint, 1995. 76 p.
- Smirnova O.V., Shevchenko N.E., Khanina L.G., Bobrovskii M.V. Refugium of Boreal Forests of the Circumpolar Urals. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Biol.*, 2018, no. 2, pp. 237–244. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0002332918020133>
- Striganova B.R. Investigation of the role of woodlice and earthworms in the processes of humification of decomposing wood. *Pochvoved.*, 1968, no. 8, pp. 85–90. (In Russ.).
- Suktsessionnyye protsessy v zapovednikakh Rossii i problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya* [Succession Processes in Russian Nature Reserves and Problems of Biological Diversity Conservation]. Smirnova O.V., Shaposhnikova E.S., Eds. St. Petersburg: Rus. Botan. Soc., 1999. 549 p.
- The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems. Ecological Studies*, Remmert H., Ed. Heidelberg: Springer, 1991, vol. 85. 168 p.
- Vostochnoevropeiskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost'. Tom 1* [Eastern European Forest in the Holocene and Modern History. Volume 1.]. Smirnova O.V., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2004a. 479 p.

- Vostochnoevropеiskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost'. Tom 2* [Eastern European Forest in the Holocene and Modern History. Volume 2]. Smirnova O.V., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2004b. 575 p.
- Vsevolodova-Perel' T.S. *Dozhdevye chervi fauny Rossii. Kadastr i opredelitel'* [Earthworms of Russia. Cadastr and Key-book]. Moscow: Nauka Publ., 1997. 101 p.
- Wirth C., Messier C., Bergeron Y., Frank D., Kahl A. Old-Growth Forest Definitions: a Pragmatic View. In *Old-Growth Forests. Ecological Studies*, vol. 207, Heidelberg: Springer Berlin, 2009, pp. 11–33.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-92706-8_2
- Yang Y., Luo Y., Finzi A.C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. *New Phytol.*, 2011, vol. 190, iss. 4, pp. 977–989.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03645.x>
- Zhang W., Hendrix P.F., Dame L.E., Burke R.A., Wu J., Neher D.A., Li J., Shao Y., Fu Sh. Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 1–9.
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., Mo J. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, vol. 314, iss. 5804, no. 1417.
<https://doi.org/10.1126/science.1130168>
- Zhukov A.V. The soil zoological diagnostics on the basis of the trophic structure analysis of soil mesofauna in steppe Pridneprovsky region. *Visn. Dnipropetr. Univ. Biol. Ekol.*, 2000, no. 7, pp. 73–79. (In Russ.).
- Zhuravleva I.V., Komarova A.V., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu. Mildly-damaged forest areas in boreal forests of the world. The origin, development, importance and probable future of the concept of mildly-damaged forest areas with regard to boreal forests. *Russ. J. Ecosyst. Ecol.*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 1–11. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21685/2500-0578-2016-1-5>

УДК 630;641

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К АДАПТАЦИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

© 2023 г. А. В. Константинов*

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: konstantinov_a82@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Установлены корреляционные зависимости между количественными значениями абиотических факторов, связанных с климатическими изменениями и критериями уязвимости лесных экосистем, для 24 модельных субъектов Российской Федерации. Выявлена высокая степень тесноты связи между климатическими параметрами и лесными пожарами для лесных экосистем центра и юга России, а также Восточной Сибири. С использованием матричной модели позиционирования адаптационного потенциала лесных экосистем модельных субъектов выявлены кластеры с их наиболее уязвимыми к климатическим изменениям группами. Применение разработанной методики для анализа лесных экосистем модельных субъектов позволило установить, что происходит смещение показателей их адаптационного потенциала к нижней границе устойчивости (Архангельская, Ленинградская, Воронежская, Тюменская, Иркутская области, Ханты-Мансийский автономный округ, Хабаровский край). На основании изучения и кластеризации модельных субъектов Российской Федерации по уровню адаптационного потенциала выполнена дифференциация управленческих решений и лесохозяйственных мер по крупным территориальным объектам, включающим различные субъекты Российской Федерации, с целью поддержания и усиления адаптационного потенциала лесных экосистем. Меры адаптации лесных экосистем к климатическим изменениям могут быть реализованы в разрезе трех сценариев: ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем); реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем); восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем).

Ключевые слова: изменения климата, лесные экосистемы, уязвимость, адаптационный потенциал, сценарный подход

DOI: 10.31857/S2587556623040039, EDN: VJTUSW

ВВЕДЕНИЕ

Современные климатические модели демонстрируют, что глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей мере, до середины столетия. Глобальное потепление на 1.5 и 2°C будет достигнуто в течение XXI в., если в предстоящие десятилетия не произойдет резкого сокращения выбросов CO₂ и других парниковых газов (МГЭИК, 2021). Лесное хозяйство характеризуется крайней степенью уязвимости к прямому воздействию климатических и метеорологических факторов. Изменяющиеся климатические условия являются основой исчезновения видов в лесных экосистемах, изменения ареалов их распространения и смещения границ лесорастительных зон, изменений в продуктивности лесных сообществ (Григорьева и др., 2016; Сергиенко, Константинов, 2016). Ущерб от лесных пожаров,

вредных организмов и других неблагоприятных факторов значительно превышает величину общих расходов на охрану, защиту и воспроизводство лесов. Кроме того, на степень уязвимости лесного сектора к климатическим изменениям оказывает влияние множество экономических, социальных, технологических факторов. Анализ подобного комплекса неклиматических факторов позволяет оценить источники возникновения рисков нестабильности лесного хозяйства, способствовать укреплению потенциала для осуществления мер по смягчению и адаптации, в связи с чем тема исследования является актуальной.

Длительные изменения климатических условий, наиболее ярко проявившиеся в текущем столетии, были и остаются ключевым фактором, оказывающим прямое и косвенное влияние на состояние всех компонентов лесных экосистем,

приводя в ряде случаев к их деградации и гибели древостоев на значительных площадях (Кашкаров, Поморцев, 2007; Коломыш, 2003; Семёнов и др., 2019; Харук и др., 2008; Bonan, 2008; Gamache and Payette, 2005; Soja et al., 2007).

Проблемы динамики состояния лесных экосистем Российской Федерации в условиях климатических изменений текущего столетия в различных аспектах нашли отражение во многих работах (Демаков, 2000; Замолодчиков, Краев, 2016; Истомин, 2009; Константинов, Бурцев, 2013; Матвеев, 2005; Миронов, 2007; Хантемиров и др., 2008; Чебакова и др., 2003; Шиятов, 2009; и др.).

Изменение климата, являясь важнейшим современным глобальным вызовом, определяет необходимость применения комплексного междисциплинарного подхода, охватывающего широкий спектр экологических, экономических и социальных аспектов устойчивого развития. Природные объекты, включая леса, различаются, на фоне региональных природно-экологических особенностей, по характеру и степени их уязвимости к неблагоприятным последствиям изменений климата, что необходимо учитывать при разработке и реализации комплекса мер по предотвращению и нейтрализации неблагоприятных последствий изменения климата или сведению их к минимально возможному уровню. Такие адаптационные меры должны обеспечиваться на долгосрочной основе с учетом региональных особенностей, а также масштабности и глубины их воздействия на различные аспекты функционирования секторов экономики.

В настоящее время решение данных вопросов в Российской Федерации находится на этапе становления, что требует, как с теоретической, так и с практической точек зрения, уточнения ключевых положений адаптационной стратегии лесного хозяйства с учетом произошедших и прогнозируемых изменений климата, научного обоснования системы устойчивого управления лесными ресурсами в условиях климатической нестабильности, развития практики планирования, реализации и контроля за осуществлением мер по адаптации лесного хозяйства к климатическим изменениям на разных уровнях государственного управления.

Целью настоящего исследования явилось обоснование сценарного подхода к деятельности в отношении адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата, как части адаптационной стратегии лесного хозяйства Российской Федерации к произошедшим и прогнозируемым изменениям климата.

Основные задачи исследования. 1. Установить наличие и направленность связи между количественными показателями динамики климатических факторов и уязвимости лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации. 2. С использованием матричной модели позиционирования

адаптационного потенциала лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации выявить кластеры с их наиболее уязвимыми к климатическим изменениям группами. 3. Разработать сценарии, включающие дифференцированные комплексы управленческих решений и лесохозяйственных мер реагирования в отношении адаптации лесных экосистем, реализуемых на уровне государственного и частного сектора и направленных на сглаживание деструктивных процессов и минимизацию потенциального экономического ущерба в лесном хозяйстве России.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка адаптационного потенциала лесных экосистем, характеризующего способность лесных экосистем приспосабливаться к климатическим изменениям и иным неблагоприятным факторам для сохранения экосистемных функций, основывалась на изучении динамики количественных показателей двух групп критериев и расчета индекса адаптационного потенциала в соответствии с авторской методикой (Константинов, 2014; Константинов, Матвеев, 2020). Первая группа критериев характеризует среднегодовую динамику климатических параметров (среднегодовые температуры атмосферного воздуха, сумма выпадающих атмосферных осадков, относительная влажность атмосферного воздуха, частота повторяемости опасных гидрометеорологических явлений, высота снежного покрова, частота повторяемости крупных лесных пожаров). Вторая группа критериев характеризует уязвимость лесных экосистем, т.е. их предрасположенность к неблагоприятному воздействию рассматриваемых факторов с течением времени (лесистость региона, площадь погибших лесных насаждений от вредных организмов, площадь погибших лесных насаждений от лесных пожаров, запас основных лесобразующих пород, площадь спелых и перестойных насаждений, изменение ареалов основных лесобразующих пород). Для согласованной оценки долгосрочной динамики количественных значений двух групп критериев рассчитывались их средние значения за два последовательных тридцатилетия (1961–1991 и 1991–2018 гг.).

Для изучения адаптационного потенциала лесных экосистем 24 модельных субъектов семи федеральных округов Российской Федерации (Северо-Западный федеральный округ: Архангельская область, Ленинградская область, Республика Карелия, Республика Коми, Ненецкий автономный округ, Новгородская область; Центральный федеральный округ: Брянская область, Воронежская область; Южный федеральный округ: Ростовская область; Приволжский федеральный округ: Нижегородская область; Уральский федеральный округ:

Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ; Сибирский федеральный округ: Забайкальский край, Иркутская область, Омская область, Алтайский край, Красноярский край; Дальневосточный федеральный округ: Республика Саха (Якутия), Камчатский край, Магаданская область, Хабаровский край, Сахалинская область, Приморский край, Амурская область) в условиях изменений климата использованы данные открытого массива данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также данные, предоставленные Федеральным агентством лесного хозяйства. Подбор модельных субъектов Российской Федерации обусловлен ее лесорастительным районированием. Представленные в исследовании модельные субъекты представлены для каждой из восьми лесорастительных зон Российской Федерации и значительно различаются в экологическом и лесоводственно-типологическом отношении, но их объединяют потенциальная уязвимость к изменению климата и возрастающая антропогенная нагрузка. В каждом субъекте исследованиями охвачены насаждения, выявленные маршрутно-ключевым методом и соответствующие решаемым задачам, что, в свою очередь, благодаря разнообразию лесных экосистем, позволяет сформировать целостное представление об уровне изменчивости и уязвимости модельных объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования состояния лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации выявлены нарушения их биологической устойчивости, проявляющиеся в снижении адаптационного потенциала при наступлении критических климатических условий. Высокие темпы роста деструктивных процессов в лесных экосистемах наблюдаются как в северных зонах страны, так и в зонах переходов от одних лесорастительных условий к другим (табл. 1).

Высокая степень тесноты прямой связи (значение коэффициента корреляции 0.71–0.9) по одной паре сравниваемых значений обнаружена для трех модельных субъектов (Магаданская, Архангельская области и Забайкальский край). В Архангельской области – это количество опасных метеорологических явлений и площадь лесных насаждений, погибших под воздействием вредных организмов ($r = 0.8$), когда вследствие воздействия совокупности неблагоприятных факторов наступает снижение биологической устойчивости древостоев и поражение их вредными организмами. В Забайкальском крае и Магаданской области – это количество пожаров и площадь погибших от них насаждений ($r = 0.74$ и 0.73 соответственно). Значительная (значение коэффициента корреляции 0.51–0.7) и умеренная (значение коэффициента

корреляции 0.31–0.5) степень тесноты связи обнаружена повсеместно, за исключением субъектов, где она вообще отсутствует. Сюда относятся Ненецкий автономный округ, Тюменская область и Приморский край. Значимую связь по одной-двум парам сравниваемых показателей имеют такие субъекты, как Ханты-Мансийский автономный округ, Омская и Магаданская области, Хабаровский край, по трем – Красноярский край и Амурская область. В иных субъектах, из числа исследуемых, значимая корреляция представлена по более широкому набору сравниваемых критериев. В целом, в ходе аналитического исследования установлен высокий уровень корреляции между климатическими параметрами и лесными пожарами для лесных экосистем центра и юга России, а также Восточной Сибири.

Значительная и умеренная корреляция повсеместно обнаружена для лесных пожаров и средней температуры воздуха. Наименьшее количество значимых корреляционных связей с климатическими факторами характерно для показателей площади насаждений, погибших под воздействием вредных организмов во всех региональных системах из числа изученных.

Выявленная сходная динамика между двумя группами факторов, определяющих адаптационный потенциал лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации позволила на последующих этапах исследования решить задачу прогнозирования их способности адаптироваться к климатическим изменениям и сформировать на этой основе соответствующие адаптационные мероприятия. Выделение комплексов лесных экосистем со схожими траекториями развития и состояния позволяет снизить многовариантность управленческих решений и набор мер, обеспечивающих их адаптацию.

В рамках исследования, используя количественные значения индекса адаптационного потенциала лесных экосистем, проведена их кластеризация в отношении модельных субъектов Российской Федерации для трех временных периодов (1991–2000, 2001–2010, 2011–2019 гг.) методом *k*-средних, целью которого является разделение числа наблюдений на кластеры, при этом каждое наблюдение относится к тому кластеру, к центру которого оно ближе всего. Использование этого метода позволило установить их общность по ключевым признакам. Для малого количества точек используемый метод кластеризации обеспечивает быструю сходимость на этапе элементарной кластеризации.

В каждом анализируемом периоде по результатам кластеризации выделено три группы кластеров, объединяющих лесные экосистемы модельных субъектов, различающиеся уровнем адаптационного потенциала, и, как следствие, требующих дифференцированных управленческих решений и лесохозяйственных мероприятий.

Таблица 1. Распределение лесных экосистем модельных субъектов Российской Федерации по степени тесноты связи (коэффициенту корреляции) абиотических факторов и критериев уязвимости

Степень тесноты связи $r = 0.71-0.9$		Степень тесноты связи $r = 0.51-0.7$		Степень тесноты связи $r = 0.31-0.5$	
факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации	факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации	факторы, диапазон уровня корреляции	комплексы лесных экосистем субъектов Российской Федерации
Опасные метеорологические явления/Площадь насаждений, поврежденных вредными организмами (0.69–0.8)	АО, РКо, СО	Температура воздуха/Запас лесообразующих пород (0.68–0.7)	АО, ЛО, РО, РКо, БО, ВО, НО	Температура воздуха/Лесистость (0.39–0.51)	АО, ЛО, РКа, РКо, БО, РС, КК, СО
		Количество природных пожаров в лесах/Площадь лесных насаждений, погибших от пожаров (0.54–0.74)	ЛО, РКо, НО, ЗК, ИО, КК, МО	Количество природных пожаров в лесах/Средняя площадь пожаров в лесах (0.3–0.49)	АО, БО, ВО, ХМАО, ОО, СО
				Атмосферные осадки/Площадь лесных насаждений, погибших от пожаров (–0.36... –0.51))	ЛО, РКо, НО, АК, СО
				Высота снежного покрова/лесистость (0.31–0.42)	АО, ЛО, БО, РС, СО

Примечание. r – линейный коэффициент корреляции; АО – Архангельская область; РКо – Республика Коми; СО – Сахалинская область; ЛО – Ленинградская область; РО – Ростовская область; БО – Брянская область; ВО – Воронежская область; НО – Нижегородская область; ЗК – Забайкальский край; ИО – Иркутская область; КК – Камчатский край; МО – Магаданская область; РКа – Республика Карелия; РС – Республика Саха (Якутия); ХМАО – Ханты-Мансийский автономный округ; ОО – Омская область; АК – Алтайский край.

зайственных мер. В соответствии с упомянутой выше авторской методикой выделены группы (кластеры) лесных экосистем модельных субъектов, имеющих стабильный, не стабильный и деградирующий адаптационный потенциал.

Стабильный адаптационный потенциал в 60-летней динамике имеют лесные экосистемы Республики Карелия, Приморского края, Нижегородской, Новгородской, Мурманской, Амурской

областей, что составляет 29% модельных субъектов. Нестабильный адаптационный потенциал имеют 38% комплексов лесных экосистем модельных субъектов (Республика Коми, Брянская, Ростовская, Омская области, Забайкальский и Алтайский края), который проявляется в высоком динамизме и изменчивости под внешним воздействием параметров своего функционирования, в том числе уровня продуктивности.

Для комплексов лесных экосистем Архангельской, Ленинградской, Воронежской, Тюменской, Иркутской областей, Ханты-Мансийского автономного округа, Хабаровского края (33% модельных субъектов) характерен деградирующий характер развития, отличительной характеристикой которого является утраченный адаптационный потенциал. Применение разработанной методики для анализа лесных экосистем модельных субъектов позволило установить, что происходит смещение показателей их адаптационного потенциала к нижней границе устойчивости.

Выделенные кластеры лесных экосистем необходимы для целей лесопользования и проектирования мер адаптационного характера.

Сценарный подход является способом прогнозирования последовательно сменяющихся друг друга ситуаций в процессе развития какого-либо явления от современного состояния к качественно новому.

Основной задачей сценарного прогнозирования является выявление связей между процессом управленческой деятельности и возможностью выбора решений из нескольких альтернативных вариантов с учетом прогнозируемых рисков.

Теоретически использование метода разработки сценариев связано с анализом уникальных явлений, не имеющих репрезентативной статистики, для прогнозирования их возможных последствий. Однако на практике этот метод часто используют для поиска компромиссных решений внешне обусловленных проблем. Следовательно, при рассмотрении задачи адаптации национального лесного хозяйства к условиям меняющегося климата вполне логичным представляется использование этой научной парадигмы.

Адаптационные меры – это определенные действия, направленные на уменьшение уязвимости лесной экосистемы и повышение ее способности к адаптации. Меры адаптации лесных экосистем к климатическим изменениям могут быть реализованы в разрезе трех сценариев: во-первых, это ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем), во-вторых, реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем), в-третьих, восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем) (рис. 1).

Сценарий № 1. Ведение лесного хозяйства с элементами реактивной адаптации к климатическим изменениям (для стабильных лесных экосистем)

Комплекс практических мер в рамках сценария № 1 может быть реализован в условиях, когда эволюционно-сложившийся уровень стабильности лесных экосистем существенно превосходит дестабилизирующее воздействие климатических изменений, даже при условии дополнительной антропогенной нагрузки. Это состояние может быть описано с помощью следующих положений:

– лесные экосистемы обладают большой степенью стабильности благодаря своей полночленности и наличию ключевых малонарушенных участков, связанных общим экологическим каркасом;

– изменения климата, угнетая либо благоприятствуя отдельным компонентам фитоценоза, в целом не меняют его макроструктуру и закономерности функционирования;

– все виды использования лесов носят щадящий характер либо не превышают пределов естественной ресурсной емкости.

Сценарий № 1 предполагает ведение лесного хозяйства в регионах с преобладанием стабильных экосистем на основе существующих представлений о лесорастительном районировании с использованием современных лесоводственных систем, регламентированных действующим лесным законодательством и системой управления лесным хозяйством, с существующим на сегодняшний день распределением полномочий между федеральными и региональными органами власти, органами местного самоуправления.

Сценарий № 2. Разработка и реализация стратегии адаптации лесного хозяйства к изменениям климата (для нестабильных лесных экосистем)

Группа мероприятий, предусмотренных сценарием № 2, может быть реализована в условиях, когда неустойчивость климатических факторов может привести к частичной дестабилизации лесных экосистем в пределах того или иного региона. Это состояние может быть описано с помощью следующих положений:

– природно-климатические и лесорастительные пояса начнут интенсивно сдвигаться в направлении с юга на север;

– породный состав и структура древостоев начнет достаточно интенсивно меняться. Хвойные породы будут постепенно сменяться лиственными;

– смягчение климата с одной стороны увеличит период вегетации и повысит продуктивность древостоев, с другой – создаст более благоприятные



Рис. 1. Сценарии и управленческие меры реагирования в отношении адаптации лесных экосистем.

условия для развития вредных организмов (в том числе для проникновения инвазивных форм);

- изменения в структуре лесного фонда могут приобретать разную интенсивность в различные периоды времени и на разных территориях;

- вероятность возникновения неблагоприятных метеорологических явлений в целом вырастет, ситуация локально может обостряться;

- изменения климата будут оказывать интенсивное влияние на насаждения, но в целом не приведут к деградации лесных экосистем.

С целью ответа на обозначенные вызовы сценарий № 2 предусматривает разработку на основе прогнозирования, моделирования и анализа уязвимости лесного хозяйства к изменениям клима-

та, соответствующей стратегии адаптации на краткосрочную и долгосрочную перспективу. Основной целью разрабатываемой стратегии должно стать сохранение устойчивости управления и пользования лесными ресурсами в условиях дестабилизации климатических параметров.

Сценарий № 3. Восстановление и поддержание экосистемных функций лесов (для деградирующих лесных экосистем)

Реализация практических действий в рамках сценария № 3 может быть реализована в условиях, когда влияние климатических изменений на лесные экосистемы приведет к их выходу из

ВЫВОДЫ

устойчивого состояния и развитию деградационных процессов. Указанная неустойчивость может быть описана с помощью следующих положений:

– уменьшается биологическое разнообразие лесных экосистем, они становятся все более неполноценными;

– изменения породного состава идут быстрыми темпами, хвойные и/или твердолиственные породы (в зависимости от лесорастительного пояса региона) стремительно замещаются мягколиственными, сопутствующими породами;

– территория покрытых лесом земель лесного фонда деградирует, увеличивается площадь нелесных и не покрытых лесом земель;

– испытывают подтопление либо, наоборот, подвергаются процессу аридизации большие территории, активизируются процессы ветровой и водной эрозии почв;

– увеличивается площадь потерявших устойчивость и погибших насаждений, идет накопление отмершей древесины;

– резко увеличивается вероятность возникновения вспышек массового размножения вредителей и болезней леса (в первую очередь стволовых насекомых, дереворазрушающих грибов, корневых гнилей). Ряд вредителей и болезней из сапрофитной стадии переходят в паразитную;

– возрастает общий класс пожарной опасности территории, пожары часто переходят в верховой тип, охватывают большие площади и наносят существенный ущерб;

– естественное лесовосстановление существенно затруднено.

Сущность противодействия негативным процессам, предусмотренным сценарием № 3, состоит в выдвигании на первый план защитной, средообразующей роли лесов как основы экологического каркаса в условиях жесткого негативного воздействия изменений климата на лесные экосистемы. Использование лесов для заготовки древесины в этой связи станет играть, по существу, роль побочного пользования. В условиях крайней степени воздействия климатических факторов серьезной проблемой становится поддержание оптимальной лесистости региона, с учетом необходимости сохранения оптимального водного баланса, купирования процессов водной и ветровой эрозии почв. Основным инструментом этих процессов должно стать искусственное лесовосстановление и лесоразведение с использованием последних достижений лесной селекции и биотехнологии.

На основании изучения и кластеризации модельных субъектов Российской Федерации по уровню адаптационного потенциала их лесных экосистем представляется возможным осуществление дифференциации управленческих решений и лесохозяйственных мер по укрупненным территориальным объектам, включающим различные субъекты России, с целью поддержания и усиления адаптационного потенциала лесных экосистем.

Установлено, что содержание и природа устойчивости лесных сообществ, обусловленная климатическими изменениями, возрастом антропогенной нагрузки, а также реакция комплексов лесных экосистем модельных субъектов на изменение абиотических факторов, значительно различаются в региональном аспекте. В некоторых субъектах происходят разнонаправленные изменения, что вызывает необходимость дифференцированного подхода к комплексу управленческих решений и лесохозяйственных мер при выборе стратегии лесоправления.

Многофакторность воздействия климатических изменений и многообразие их последствий для лесных экосистем Российской Федерации предопределяют необходимость разработки и осуществления соответствующих отраслевых адаптационных программ.

Уменьшение уязвимости и подверженности является основной целью программ адаптивного управления. Однако, эффективной разработке и применению адаптивных стратегий в лесном секторе препятствует рассогласованность экономических интересов субъектов лесных отношений. Для построения адекватного адаптационного потенциала, который бы обеспечивал превентивное управление процессами антропогенного изменения климата, необходимы значительные финансовые, технологические, организационные ресурсы. Комплексный подход к разработке адаптационных мер, объединяющий последние научные достижения, технологии и оптимальные управленческие решения, будет способствовать снижению уязвимости общества и экономики к изменениям климата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 29.12.2022 г. № 053-00011-23-00 по теме № 2 “Научно-аналитическое и организационно-методическое обеспечение реализации государственной климатической политики в области лесного хозяйства”.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Forestry Agency dated December 29, 2022 no. 053-00011-23-00 on topic no. 2 “Scientific-analytical, organizational and methodological support for the implementation of the state climate policy in the field of forestry.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорьева С.О., Константинов А.В., Школьник И.М.* Влияние изменений климата на состав древостоев, их устойчивость и ареалы основных лесообразующих пород // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 3. С. 4–21. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.3.4>
- Демаков Ю.П.* Диагностика устойчивости лесных экосистем: методологические и методические аспекты. Йошкар-Ола, 2000. 416 с.
- Замолодчиков Д., Краев Г.* Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4 (48). С. 23–31.
- Истомин А.В.* Некоторые реакции биоты на изменение климата в лесных ландшафтах Каспийско-Балтийского водораздела // Вестн. Рос. гос. ун-та им. И. Канта. 2009. № 7. С. 15–22. <https://doi.org/10.5922/2223-2095-2009-7-2>
- Кашкаров Е.П., Поморцев О.А.* Глобальное потепление климата: ритмическая основа прогноза и ее практическое значение в охране лесов Северного полушария // Хвойные бореальной зоны. 2007. Т. 24. № 2–3. С. 207–216.
- Коломыц Э.Г.* Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
- Константинов А.В.* Методология оценки уязвимого лесного сектора экономики в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2014. № 3. С. 73–77.
- Константинов А.В., Бурцев Д.С.* Изучение и оценка динамики продуктивности лесов Российской Федерации в период с 1961 по 2011 год // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2013. № 4. С. 5–24.
- Константинов А.В., Матвеев С.М.* Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2020. № 2. С. 14–33. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>
- Матвеев С.М.* Цикличность прироста сосновых древостоев Центральной лесостепи в 11-летнем цикле солнечной активности // Лесной журн. 2005. № 1–2. С. 15–22.
- МГЭИК, 2021: Резюме для политиков. В: Изменение климата, 2021 год: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / ред. В. Массон-Дельмотт, М.П. Чжай, А. Пирани, С.Л. Коннорс, К. Пеан, С. Бергер, Н. Кауд, Ю. Чэнь, Л. Гольдфарб, М.И. Гомис, М. Хуан, К. Лейтцелл, Э. Лонной, Дж.Б. Мэтьюз, Т.К. Мэйкок, Т. Уотерфилд, О. Йелекчи, Р. Ю, Б. Чжоу. Cambridge: Cambridge Univ. Press; New York, 2021. 48 с. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Миронов А.Г.* Динамика лесных экосистем юга Средней Сибири в условиях изменяющегося климата и активации биотического воздействия: Автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: СибГТУ, 2007. 23 с.
- Семёнов М.А., Высоцкий А.А., Пащенко В.И.* Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями // Изв. ВУЗов. Лесной журн. 2019. № 5 (371). С. 57–69. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57>
- Сергиенко В.Г., Константинов А.В.* Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Тр. Санкт-Петербург. науч.-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 29–44. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.27>
- Хантемиров Р.М., Сурков А.Ю., Горланова Л.А.* Изменение климата и формирование возрастных поколений лиственницы на полярной границе леса на Ямале // Экология. 2008. № 5. С. 323–328.
- Харук В.И., Двинская М.Л., Им С.Т., Рэнсон К.Дж.* Древесная растительность экотона лесотундры Западного Саяна и климатические тренды // Экология. 2008. № 1. С. 10–15.
- Чебакова Н.М., Рейфельдт Дж., Парфенова Е.И.* Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата // Сибирский экол. журн. 2003. № 6. С. 677–686.
- Шиятов С.Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Приполярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 215 с.
- Bonan G.B.* Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests // Science. 2008. Vol. 320: 5882. P. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Gamache I., Payette S.* Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada // J. Biogeography. 2005. Vol. 32. P. 849–862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01182.x>
- Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin III F.S., Stackhouse Jr. P.W.* Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Glob. and Planetary Change. 2007. Vol. 56. № 3–4. P. 274–296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>

Scenario Approach to Adaptation of Forest Ecosystems in the Russian Federation under Climate Change

A. V. Konstantinov*

St. Petersburg Forestry Research Institute, St. Petersburg, Russia

**e-mail: konstantinov_a82@mail.ru*

Correlations between the quantitative values of abiotic factors associated with climate change and the criteria for the vulnerability of forest ecosystems for 24 model subjects of the Russian Federation have been established. A high degree of closeness of the relationship between climatic parameters and forest fires was revealed for forest ecosystems in the Center and the South of Russia, as well as Eastern Siberia. Using a matrix model for positioning the adaptive potential of a single regional forest ecosystem, clusters with the most vulnerable to climate change groups of regional forest ecosystems were identified. The application of the developed methodology for the analysis of regional complexes of forest ecosystems made it possible to establish that there is a shift in the indicators of their adaptive potential to the lower limit of their sustainability (Arkhangelsk, Leningrad, Voronezh, Tyumen, Irkutsk oblasts, Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Khabarovsk krai). Based on the study and clustering of model federal subjects according to the level of adaptive potential, differentiation of management decisions and forestry measures for enlarged territorial objects, including various federal subjects, was carried out in order to maintain and strengthen the adaptive potential of forest ecosystems. Measures for adapting forest ecosystems to climate change can be implemented in the context of three scenarios: forest management with elements of reactive adaptation to climate change for stable forest ecosystems, implementation of the forestry adaptation strategy to climate change for unstable forest ecosystems and restoration and maintenance of ecosystem functions of forests for degrading forest ecosystems.

Keywords: climate change, forest ecosystems, vulnerability, adaptive potential, scenario approach

REFERENCES

- Bonan G.B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests. *Science*, 2008, vol. 320, no. 5882, pp. 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Chebakova N.M, Reifel'dt Dzh., Parfenova E.I. Redistribution of vegetation zones and populations of Siberian Larch and Scots Pine in Central Siberia under climate warming. *Sib. Ekol. Zh.*, 2003, no. 6, pp. 677–686. (In Russ.).
- Demakov Yu.P. *Diagnostika ustoichivosti lesnykh ekosistem: metodologicheskie i metodicheskie aspekty* [Diagnosis of the Sustainability of Forest Ecosystems: Methodological and Methodical Aspects]. Ioshkar-Ola, 2000. 416 p.
- Gamache I., Payette S. Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *J. Biogeogr.*, 2005, vol. 32, pp. 849–862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01182.x>
- Grigor'eva S.O., Konstantinov A.V., Shkol'nik I.M. The impact of climate change on the composition of forest stands, their stability and areas of the main forest-forming species. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2016, no. 3, pp. 4–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.3.4>
- IPCC 2021. *Summary for Policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge: CUP; New York, 2021, pp. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Istomin A.V. Some responses of biota to climate change in forest landscapes of the Caspian-Baltic watershed. *Vestn. Balt. Feder. Univ. im. I. Kanta. Ser.: Estestv. i Med. Nauki*, 2009, no. 7, pp. 15–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.5922/2223-2095-2009-7-2>
- Kashkarov E.P., Pomortsev O.A. Global climate warming: the rhythmic basis of the forecast and its practical significance in the protection of forests in the Northern Hemisphere. *Khvoynye Boreal'noi Zony*, 2007, vol. 24, no. 2–3, pp. 207–216. (In Russ.).
- Khantemirov R.M., Surkov A.Yu., Gorlanova L.A. Climate change and the formation of larch age generations at the polar forest boundary in Yamal. *Ekol.*, 2008, no. 5, pp. 323–328. (In Russ.).
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T., Ranson K.J. Woody vegetation of the Western Sayan forest-tundra ecotone and climate trends. *Ekol.*, 2008, no. 1, pp. 10–15. (In Russ.).
- Kolomyts E.G. *Regional'naya model' global'nykh izmenenii prirodnoi sredy* [Regional Model of Global Environmental Changes]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 371 p.
- Konstantinov A.V., Burtsev D.S. Study and assessment of the dynamics of forest productivity in the Russian Federation in the period from 1961 to 2011. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2013, no. 4, pp. 5–24. (In Russ.).
- Konstantinov A.V. Methodology for assessing the vulnerable forest sector of the economy in the context of climate change. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2014, no. 3, pp. 73–77. (In Russ.).
- Konstantinov A.V., Matveev S.M. Methodological approach to assessing the adaptive potential of forest ecosystems in the Russian Federation. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2020, no. 2, pp. 14–

33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>
- Matveev S.M. Cyclic growth of pine stands in the Central forest-steppe in the 11-year cycle of solar activity. *Iz. Vyssh. Ucheb. Zaved. Lesnoi Zh.*, 2005, no. 1–2, pp. 15–22. (In Russ.).
- Mironov A.G. *Dinamika lesnykh ekosistem yuga Srednei Sibiri v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata i aktivatsii bioticheskogo vozdeistviya* [Dynamics of Forest Ecosystems in the South of Central Siberia under Changing Climate and Activation of Biotic Impact]. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Agric.) Dissertation*. Krasnoyarsk: Sib. St. Tech. Univ., 2007. 23 p.
- Semenov M.A., Vysotskii A.A., Pashchenko V.I. Forecast of adaptive adaptations in forestry due to possible climate change. *Iz. Vyssh. Ucheb. Zaved. Lesnoi Zh.*, 2019, no. 5 (371), pp. 57–69. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.57>
- Sergienko V.G., Konstantinov A.V. Forecast of the impact of climate change on the diversity of natural ecosystems and species of floristic and faunistic complexes of the biota of Russia. *Tr. S.-Peterb. Nauch.-Issled. Inst. Lesn. Khoz.*, 2016, no. 2, pp. 29–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21178/2079-6080.2016.2.27>
- Shiyatov S.G. *Dinamika drevesnoi i kustarnikovoї rastitel'nosti v gorakh Pripolyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenii klimata* [Dynamics of Tree and Shrub Vegetation in the Mountains of the Subpolar Urals under the Influence of Modern Climate Change]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2009. 215 p.
- Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin III F.S., Stackhouse Jr. P.W. Climate induced boreal forest change: Predictions versus current observations. *Glob. Planet. Change*, 2007, vol. 56, no. 3–4, pp. 274–296.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>
- Zamolodchikov D., Kraev G. Impact of climate change on Russian forests: recorded impacts and forecasts. *Ustoichivoe Lesopol'zovanie*, 2016, no. 4 (48), pp. 23–31. (In Russ.).

УДК 631.4

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЧВАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

© 2023 г. В. С. Столбовой^а, *, П. П. Филь^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Почвы и их органическое вещество (ПОВ) признаны главным регулятором глобального цикла углерода. Вместе с тем, результаты расчетов содержания ПОВ не учитываются в формировании задач климатических проектов и остаются не востребуемыми. Цель исследования – продемонстрировать перспективу анализа содержания ПОВ для планирования и принятия решений в рамках программ, реализуемых в секторе землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства. В исследовании использованы современные цифровые базы почвенных данных, обработанные средствами QGIS. На примере сельскохозяйственных почв Европейской территории России показано, что запасы ПОВ в 0.3-метровом слое базового 1990 г. составляли 7.0 Гт С на пахотных угодьях и 3.1 Гт С на пастбищных землях. Выявлено, что за весь период времени сельскохозяйственного использования содержание ПОВ снизилось на 1.8 Гт С (21% от исходного содержания) на пашнях и на 0.3 Гт С (9% от исходного содержания) на пастбищах. Суммарная потеря ПОВ из 0.3-метрового слоя составила около 2.1 Гт С (около 7.7 Гт CO₂-экв.), что в пять раз превышает совокупный выброс парниковых газов РФ в 2020 г. Суммарно потери ПОВ из 0.3–1.0 м слоя пашен и пастбищ составили около 1.4 Гт С или 5.2 Гт CO₂-экв., что достигает почти 70% от потерь поверхностного 0.3-метрового слоя. Предлагается включить более глубокие горизонты сельскохозяйственных почв в национальный стандарт по учету выбросов и поглощения парниковых газов. Показан подход к использованию пространственного распределения ПОВ для предварительного планирования климатических проектов в рамках сектора землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства. Для практической организации проектов поглощения парниковых газов требуются детальные обоснования. Выполненные исследования гармонизированы с требованиями Межправительственной группы экспертов по изменению климата, что подтверждает потенциал использования почв в климатических проектах РФ.

Ключевые слова: секвестрация углерода, запасы углерода, управление углеродом, землепользование, изменение землепользования

DOI: 10.31857/S2587556623040143, **EDN:** TINGKW

ВВЕДЕНИЕ

Киотский протокол¹ (Watson et al., 2000) признал квоты² на выбросы парниковых газов (ПГ) в качестве нового товара, который может продаваться и покупаться на внутреннем и внешнем

рынках. Протокол сделал легитимными рыночные механизмы для обеспечения наиболее эффективного выполнения взятых государствами обязательств по сокращению выбросов ПГ. В качестве одного из инструментов снижения концентрации ПГ в атмосфере Киотский протокол предусматривает использование землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) (Watson et al., 2000, Статьи 3.3 и 3.4). В разделе Землепользование³ имеются в виду варианты модификации производства в направ-

¹ UNFCCC: 1998. Report of the Conference of the Parties on its Third Session, held in Kyoto from 1 to 11 December 1997 / Addendum, Document FCCC/CP.1998/16/Add.1. <http://www.unfccc.de/> (дата обращения 22.03.2023).

² Углеродная квота – норма допустимой эмиссии парниковых газов, которая устанавливается государством для предприятий. Измеряется в тоннах CO₂-экв. В случае превышения квоты эмитент должен купить, недостающую часть (рынок) или заплатить углеродный налог. https://nesra-konk.ru/carbon_credit/ (дата обращения 26.03.2023).

³ Соответствует понятию МГЭИК cropland management – система технологий выращивания сельскохозяйственных культур на землях, отведенных для растениеводства.

лении внедрения углерод-накопительных технологий природоохранного, органического и восстановительного сельского хозяйства, таких как минимальная обработка, сохранение растительных остатков, применение севооборотов, сидерации и др. В разделе об Изменениях землепользования⁴ предполагается трансформация видов землепользования с относительно низким содержанием углерода в землепользования с относительно большим содержанием, например, посадка лесных насаждений на безлесных землях сельскохозяйственного назначения (пашня → лес), залужение пахотных земель (пашня → луг) и, наоборот, распашка пастбищ (пашня ↔ пастбище), осушение (луг → пашня), обводнение (луг → торфяник) и пр. Главным условием продвижения трансформации землепользования выступает наличие свободных земельных ресурсов. Этому условию отвечает РФ, которая обладает значительным резервом свободных залежных земель. Вместе с тем Изменение землепользования в рамках ЗИЗЛХ на сельскохозяйственных угодьях означает переориентацию использования конкретного земельного участка с производства продовольствия на создание углеродных квот/единиц. Выбор в пользу производства первого или второго в условиях рыночных отношений будет определяться функциональной конкуренцией цен, которые отвечают за экономическую эффективность/привлекательность для сельскохозяйственных производителей. Вместе с тем необходимо отметить, что массовая переориентация землепользования на создание углеродных квот/единиц может поставить под угрозу производство продовольствия.

Перечисленные выше мероприятия в контексте Киотского протокола рассматривают растительность и подстилающую почву сопряженно, как экосистему, в которой функционируют потоки и осуществляются взаимодействия резервуаров углерода. В сельскохозяйственном землепользовании нативная экосистема трансформируется в агроэкосистему – природно-техногенный комплекс для производства сельскохозяйственной продукции. Отметим, что важную роль в углеродном цикле агроэкосистемы играют агротехнологии, которые тесно связывают задачу регулирования углеродного цикла для устойчивого получения/увеличения продукции сельскохозяйственного производства и снижения концентрации ПГ в атмосфере. Таким образом, практика ЗИЗЛХ имеет очевидную взаимную (win-to-win) выгоду (Lal, 2020).

⁴ Соответствует понятию целевого вида сельскохозяйственных угодий. Согласно действующему Земельному кодексу РФ (ред. от 14.07.2022 г.), включает: пашни, залежи, сенокосы, пастбища.

Выделяют два механизма связывания углерода в почвах: абиотический и биотический⁵ (Six et al., 2002). Абиотическое связывание осуществляется в результате химических реакций, которые превращают диоксид углерода (CO₂) в почвенные углеродные соединения, такие как карбонаты кальция и магния. Биотический процесс связывания осуществляется через фиксацию CO₂ из атмосферы с помощью фотосинтеза растений и накопления в почве органических растительных остатков. В процессе разложения и микробной трансформации последних выделяется газообразная фаза CO₂, которая возвращается в атмосферу (гетеротрофная респирация), а оставшаяся твердая масса формирует ПОВ. Содержание ПОВ отражает долгосрочный баланс между высвобождением/эмиссией и поглощением/накоплением CO₂. Этот баланс выступает объектом управления углеродным циклом в рамках мероприятий ЗИЗЛХ. При этом баланс эмиссия ↔ поглощение определяется как среднее изменение содержания ПОВ за 20-летний период в верхнем 30-сантиметровом слое почв (IPCC, 2000, 2003).

Определение изменения запасов ПОВ в категориях землепользования при выполнении климатических проектов выступает основой для принятия решений РФ в области формирования/производства углеродных квот/единиц⁶. Очевидно, что признание последних на международных площадках торговли углеродными квотами (Emission trading, ETS) может быть достигнуто в случае, если подсчеты будут гармонизированы с общепринятыми международными подходами, которые включают три составляющие: измерение (Measure), отчетность (Reporting), верификация (Verification) (MRV). Рекомендуемые международным сообществом принципы и подходы к учету запасов ПОВ изложены в руководствах по учету парниковых газов⁷ (IPCC, 2006) и детализированы в последующих изданиях по надлежущей практике (IPCC, 2003). Под гармонизацией понимается соблюдение общих правил MRV. Кроме научно-познавательного значения, следование такому подходу позволяет оценить качество данных с позиций сопоставимости результатов учета ПГ в

⁵ Kane D. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices By Daniel Kane November 2015. In association with: National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC. <http://sustainableagriculture.net/publications> (дата обращения 22.03.2023).

⁶ Углеродная единица – объем выбросов парниковых газов, измеряемый в тоннах CO₂-экв., образовавшийся в результате реализации климатического проекта (углеродная квота на выброс, англ. Carbon credit). https://nesrakonk.ru/carbon_credit/ (дата обращения 26.03.2023).

⁷ Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html> (дата обращения 22.03.2023).

разных странах. Важным также является выбор специализации и национальной стратегии регулирования выброса и поглощения ПГ.

В последние годы группа ученых, входящих в международную общественную организацию Глобальное почвенное партнерство, инициировала создание регламента MRV и проверки содержания органического углерода в почвах сельскохозяйственных ландшафтов^{8,9}. Необходимо отметить, что регламент не является нормативным, поскольку не прошел техническую экспертизу и не утвержден Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК).

В дополнение подчеркнем, что отмеченные выше международные MRV правила (IPCC, 2000, 2003) носят не обязательный для исполнения, а рекомендательный характер. В отношении РФ, как страны, входящей в Приложение I Киотского протокола, требования МГЭИК включают необходимость “постоянно развивать и использовать национальные системы учета антропогенных эмиссий и абсорбции парниковых газов”¹⁰. Это требование позиционирует РФ в группе стран третьего уровня (Tier 3) глобальных правил учета (IPCC, 2006), которым предоставляется право использовать национальные статистические данные с детализацией на региональном уровне, собственные базы данных по запасам и потокам углерода, модели углеродного цикла и пр. Игнорирование опции третьего уровня влечет понижение статуса РФ до Уровня 1 и Уровня 1-2 и обязывает следовать международным нормам учета антропогенных эмиссий и абсорбции ПГ по умолчанию. Следствием может быть искажение реальных данных национального учета. Примером негативного искажения выступают публикации фактографически необоснованных интерпретаций почв РФ, как эмитента CO₂ при потеплении климата (Zimov et al., 2006). Неправомерность этого мнения состоит в том, что выводы основываются на локальных наблюдениях, которым, при отсутствии анализа географической представительности, придается преувеличенное глобальное значение. В действительности картина баланса потоков углерода в почвах страны исключительно мозаична, что делает невозможным определение типичных участков для географических экстра-

поляций. В этой ситуации глобальные оценки могут проводиться на основе суммарного сплошного учета баланса углерода. Исследования методом сплошного учета показывают, что почвы РФ являются поглотителями CO₂ (Национальный..., 2018; Stolbovoy et al., 2014).

Необходимость использования национальных почвенных баз данных также подтверждается специфическими особенностями почв РФ, которые, в силу доминирующего холодного гумидного климата, накапливают в два раза больше ПОВ, чем принято при осреднении в глобальном масштабе (Национальный ..., 2018; Stolbovoy, 2002). Добровольный отказ от возможностей третьего уровня учета противоречит имеющимся национальным данным и создает дополнительные риски. К последним можно отнести перспективу внедрения невыгодных для РФ изменений международных правил и норм учета выбросов и поглощения парниковых газов, которые принимаются не всегда объективным голосованием стран на международных форумах.

Несмотря на признание огромного значения почв в углеродном цикле, климатические проекты по использованию почв для секвестрации углерода не получили развития. Среди причин сложившейся ситуации можно отметить разнообразие почв, сложность процессов и механизмов поглощения, огромное число почвенных свойств и природных факторов, контролирующих накопление углерода и продолжительность времени его пребывания в почве, дискуссионность теорий образования ПОВ.

Различают три механизма закрепления углерода в почве: физический, химический и биологический¹¹ (Six et al., 2002).

Физически ПОВ может быть стабилизировано путем его капсулирования внутри почвенных микро- и макроагрегатов, где он становится труднодоступным для почвенных организмов. Химически ПОВ может быть адсорбирован в глинистых минералах посредством химических связей, что предотвращает его потребление организмами. Биохимически ПОВ может быть повторно синтезировано в сложные молекулярные структуры, которые могут препятствовать разложению (Baldock, 2000; Paustian et al., 2019; Six et al., 2006).

Рассмотренные механизмы контролируют процесс поглощения ПОВ или его секвестрацию (IPCC, 2021). При этом дискуссионными остаются вопросы о потенциале поглощения ПОВ и продолжительности времени, в течение которого накопленный ПОВ может храниться в почве.

Потенциал поглощения ПОВ достаточно подробно рассмотрен в ряде отечественных (Когут и

⁸ Использование Протоколом GSOC MRV термина “сельскохозяйственный ландшафт” противоречит принятому МГЭИК понятию “категория землепользования” и вносит неопределенность в определение агроэкосистемы как объекта учета.

⁹ FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en> (дата обращения 22.03.2023).

¹⁰ COP and/or COP/MOP-FCCC/CP/2001/13/Add13. Decision 20.CP.7 Annex 1 Art 9. <https://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a01.pdf> (дата обращения 22.03.2023).

¹¹ OurWorldinData.org. <https://ourworldindata.org.statscrops.com> (дата обращения 22.03.2022).

др., 2020) и зарубежных обзоров (Stewart et al., 2007). Приводятся предварительные оценки степени насыщенности основных типов почв ПОВ сельскохозяйственных угодий ЕТР (Когут и др., 2020). Вместе с тем представленный подход не поддерживается другими исследованиями (Stewart et al., 2007), которые отмечают наличие четких кривых, описывающих стабилизирующую способность почв, но констатируют отсутствие абсолютного предела насыщения ПОВ. Авторы также подчеркивают, что наибольшая эффективность насыщения почв ПОВ проявляется в почвах, подверженных большей дегумификации.

Относительно ограниченное внимание исследователей уделяется вопросу углеродного рынка, в частности, отмеченному выше времени пребывания, поглощенного ПОВ, которое определяет продолжительность получения выгоды углеродного кредита (Schmid et al., 2011). Постоянство устанавливает различия между высококачественными и низкокачественными климатическими проектами и является минимальным требованием для достоверной компенсации выбросов углерода с течением времени. Секвестрация ПОВ, восстановление водно-болотных угодий относятся к проектам с кратковременным хранением углерода (менее 100 лет). Проекты с длительным хранением углерода (более 100 лет) включают трансформацию ПОВ в биоуголь, улучшение устойчивости в результате оглинивания, перемещение углерода в глубокие горизонты почв¹².

Все современные подходы секвестрации ПОВ, так или иначе, базируются на теории гумусообразования (Орлов, 1990; Тюрин, 1937; Stevenson, 1995). Считается, что гумус на 85–90% состоит из гуминовых веществ, содержащих высокомолекулярные, не встречающиеся в других средах соединения. Гумус представляет собой гетерогенную систему полимеров разной степени конденсации, имеющих общие черты строения и варьирующие свойства (относительную молекулярную массу, различный химический состав и степень растворимости). В последние годы предложена концептуально новая континуальная модель, которая представляет ПОВ в качестве непрерывно работающего механизма (конвейера) по переработке и повторному использованию органики, от крупных биополимеров до продуктов их деградации, мономеров, и, наконец, CO₂ (Lehmann, 2015). Иными словами, новая теория подвергает сомнению процесс гумификации, вторичный синтез и

существование специфических гумусовых веществ в почве. Очевидно, что новая модель требует дальнейшего изучения. Однако необходимо иметь в виду, что продвижение новой теории неизбежно приведет к ревизии изложенных выше взглядов на управление поглощением ПОВ. Последствия этих изменений для использования почв на рынке углеродных квот могут оказаться критическими.

Цель настоящей статьи состоит в том, чтобы продемонстрировать перспективу применения существующих баз почвенных данных как основы для разработки национальных стандартов содержания, изменения содержания, потенциала секвестрации и глубины учета ПОВ, а также трансформации землепользования для целей климатических проектов в РФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено в административных границах субъектов, расположенных на Европейской территории России (ЕТР). В работе использована новейшая ГИС платформа Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ (ГИС ПРСХ) (Столбовой и др., 2021а, б). Слой Почвы ГИС ПРСХ включает национальный почвенный информационный стандарт – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (Единый ..., 2014), принятый Министерством сельского хозяйства РФ и Министерством природных ресурсов и Экологии РФ. Атрибутивная база данных ГИС ПРСХ содержит необходимые для подсчета запасов ПОВ параметры, включая содержание органического углерода в пахотном горизонте (%), мощность пахотного горизонта (см), мощность гумусового горизонта (см) (Столбовой и др., 2021а, б). Географическая привязка данных связана с координатами точек заложения типичных разрезов, отобранных методом простого случайного отбора¹³ (Единый ..., 2014). В этом методе вероятность включения почвенного разреза в выборку одинакова при условии равенства комбинации свойств почв. Вторая группа данных связана со средними показателями почв полигона типологических единиц качества почв (ТЕКП), распределенных по фаціальным подтипам почв сельскохозяйственных угодий (Физико-химические ..., 1996).

В случаях отсутствия прямых определений объемного веса почв последний определялся на основе нелинейной модели парной регрессии

¹²Whiting T. Content Marketing Permanence in carbon offsetting, explained // Carbon markets. 2022. <https://lune.co/blog/permanence-in-carbon-offsetting-explained/> (дата обращения 22.03.2022).

¹³Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia // CD-ROM, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2002. https://iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 02.06.2022).

между удельным весом и содержанием органического углерода в минеральных и органических почвах РФ (Единый ..., 2014). Аналогичный метод практикуется и в других странах (Hiederer et al., 2009). В анализе использовано 407 параллельных определений объемного веса почв и содержания ПОВ. Тесная связь между этими показателями ($R^2 = 0.89$) описывается уравнением $y = 25.122X^2 - 72.34X + 52.668$ и обнаруживает увеличение объемного веса при уменьшении содержания ПОВ (Национальный ..., 2018). Это объясняется тем, что потеря ПОВ (дегумификация) приводит к разрушению структуры и уплотнению почвы. Описанный факт имеет большое значение для мониторинга, который должен основываться на расчете запасов ПОВ по слоям (кг С/м², т С/га). Использование данных содержания ПОВ в % приводит к ошибкам, поскольку не учитывает, что даже при низком содержании ПОВ, но высокой плотности почвы его запасы будут высокими, тогда как при высоком содержании ПОВ, но менее плотной почве, запасы будут невелики.

Характеристики изменения содержания ПОВ в результате сельскохозяйственной деятельности определены на основе опубликованных данных, полученных сопоставлением близких по условиям почвообразования пар нативных и используемых почв (83 наблюдений) (Stolbovoi et al., 2002).

Разнообразие почв сельскохозяйственных угодий представлено слоем Качество почв ГИС ПРСХ. ТЕКП представляют повторяющиеся по набору атрибутов и функций, относительно однородные по качеству (бонитет, нормативная урожайность зерновых культур) и природно-технологическим (агроклиматический потенциал, сельскохозяйственные культуры, гранулометрический состав и др.) особенностям почвы. Картографические единицы качества почв (КЕКП) включают контура/полигоны ТЕКП, выделенные на карте качества почв сельскохозяйственных угодий. Карта качества почв РФ содержит 10107 ТЕКП и 54695 КЕКП, что соответствует детальности географического масштаба 1 : 300000–1 : 500000 (Столбовой и др., 2021а, б). В исследовании использована часть карты качества почв, покрывающая ЕТР, которая включает 3607 ТЕКП и 7071 КЕКП.

Виды землепользования ЕТР сформированы на основе базы данных наземного покрова, разработанной для анализа Полного бюджета углерода России¹⁴.

Подсчеты и цифровые карты выполнены в среде QGIS и характеризуют базовый (1990 г.) период времени. Этот период соответствует дате от-

чета обязательств РФ по сокращению выбросов парниковых газов^{15,16}.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рекомендации МГЭИК по учету выбросов и поглощения парниковых газов рассматривают общие подходы, которые должны применяться в масштабе страны для определения национальной стратегии на международных площадках торговли углеродными квотами. В контексте внутреннего рынка углеродных квот/единиц результаты учета должны быть оценены с точки зрения количественных и качественных характеристик ПОВ на конкретных полях, участках лесопользования и др. В этих целях необходимо создавать более точные, экономически эффективные специальные методы.

Запасы углерода в сельскохозяйственных почвах. Разнообразие сельскохозяйственных почв ЕТР сгруппировано по видам землепользования, включая пашни и пастбища, которые входят в число обязательных по стандарту ЗИЗЛХ (IPCC, 2006). Виды сенокосы, многолетние насаждения и залежи детально не исследовались в связи с отсутствием точных границ (например, сенокосы на лесных полянах, участках речных пойм или огромное число отдельных залежных полей и др.).

На рис. 1 показана агрегированная почвенная карта территории исследований. Представленная карта и характеристики ТЕКП являются основой подсчета ПОВ. Карта демонстрирует фрагментированное распространение сельскохозяйственных почв без учета осушенных торфяно-глеевых почв, почв лесного фонда и др. Легенда почвенной карты включает преобладающие типы сельскохозяйственных почв, которые представляют главные агроклиматические зоны РФ: лесолуговую (дерново-подзолистые), лесостепную (серые лесные), степную (черноземы типичные и южные), сухостепную (каштановые) и субтропическую (коричневые).

Несмотря на фрагментарность (см. рис. 1), на почвенной карте четко прослеживается зональность почв, что характерно для почвенного покрова ЕТР. Наибольшая интенсивность сельскохозяйственного землепользования (достигающая 60–80% территории) отмечается в лесостепной и

¹⁴Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V.S. et al. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Laxenburg: IIASA, 2000. 201 p. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6224/1/IR-00-021.pdf> (дата обращения 22.03.2022).

¹⁵Указ Президента РФ № 666 от 04.11.2020 “О сокращении выбросов парниковых газов”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (дата обращения 22.03.2022).

¹⁶Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/00012021070200031> (дата обращения 22.03.2022).

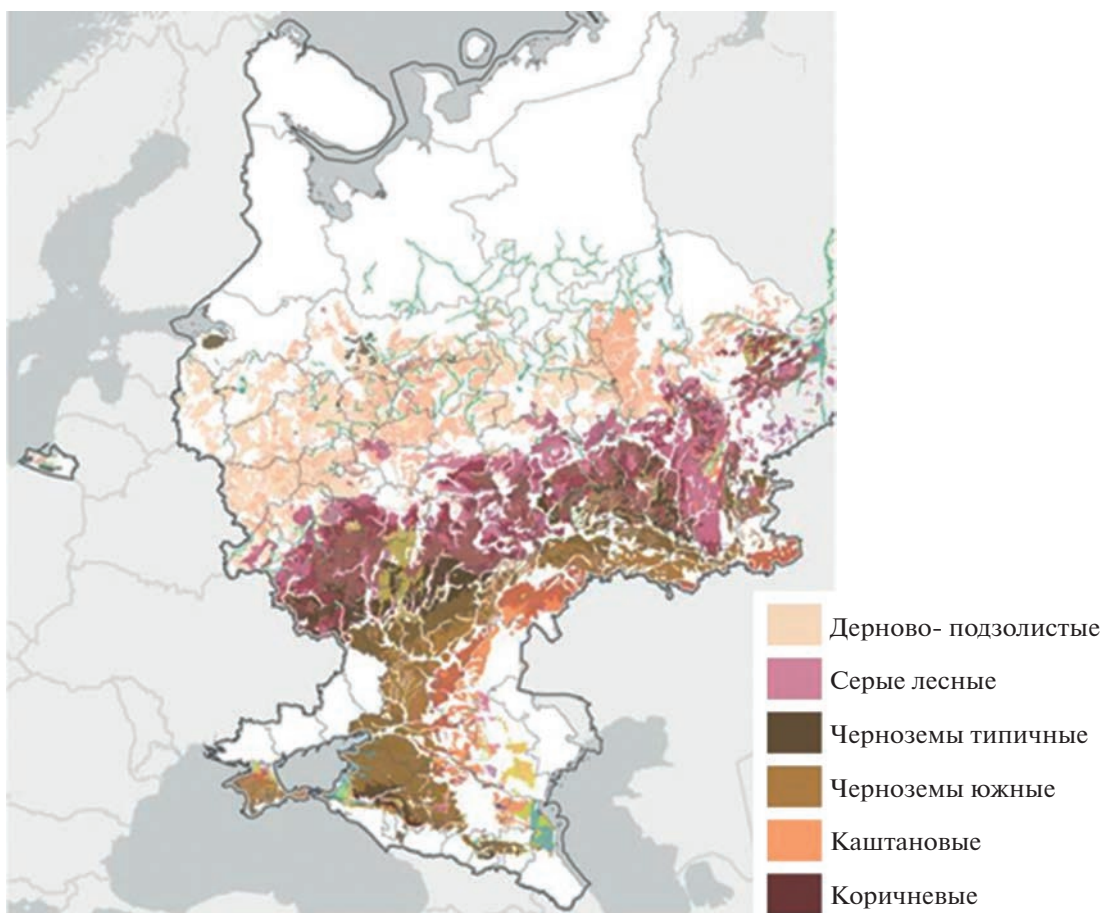


Рис. 1. Почвы сельскохозяйственных угодий Европейской территории России.

Источник: слой Качество почв ГИС платформа “Почвенные ресурсы сельскохозяйственных угодий РФ” (Столбовой и др., 2021a).

степной агроклиматических зонах. В масштабе карты не выделяются пашни и пастбища северных регионов, в которых сельскохозяйственная деятельность носит очаговый характер.

Пространственный рисунок содержания ПОВ до распашки (рис. 2-1а) следует зональной картине почв (см. рис. 1). Это связано с тем, что в равнинных условиях ЕТР с массивами относительно однородных покровных отложений и близкими характеристиками гранулометрического и минералогического составов содержание ПОВ в значительной степени контролируется зональными биоклиматическими условиями, определяющими продукцию/поступление фитомассы в почвы и ее педогенетическую трансформацию.

В процессе распашки естественных экосистем содержание ПОВ изменяется, что обнаруживается по снижению цветовой контрастности карты (см. рис. 2-1б) по сравнению с картой исходного содержания ПОВ (см. рис. 2-1а). Вместе с тем это изменение лишь частично повторяет зональный рисунок, что можно объяснить относительно

ограниченной долей физически и биологически поглощенного ПОВ в пахотных почвах. Регулярная механическая обработка приводит к разрушению структуры и интенсифицирует потерю физически связанного ПОВ. В дополнение химический состав сельскохозяйственных культур менее разнообразен по сравнению с нативными фитоценозами. В результате относительная доля химически закрепленного ПОВ возрастает.

Изменение содержания ПОВ зависит от его исходного содержания (рис. 3). При этом статистически значимые потери ПОВ ($r = -0.7$, $p = 0.03$) проявляются более выражено в почвах с большим содержанием углерода. В определенной степени этот вывод созвучен с отмеченной выше закономерностью более интенсивного накопления в почвах, потерявших больше ПОВ (Stewart et al., 2007; Stolbovoy, 2002a). Вместе с тем необходимо отметить, что точность аппроксимации недостаточна ($R^2 < 0.55$) и модель требует улучшения в части более детального учета факторов закрепления углерода в почвах.

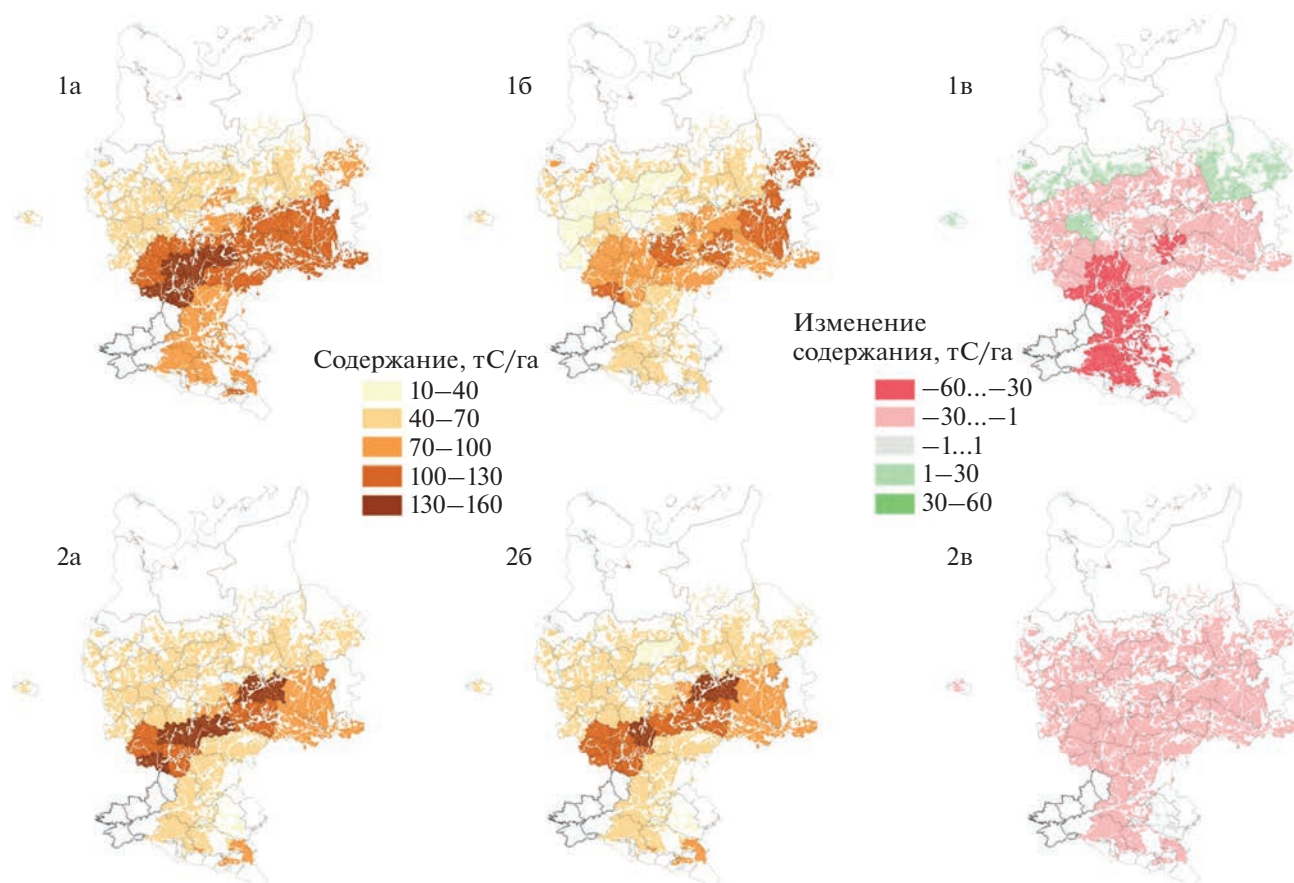


Рис. 2. Содержание углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России: пашни (1а – нативные почвы до сельскохозяйственного освоения, 1б – фактическое, современное содержание в базовый (1990 г.) период времени, 1в – накопленное изменение содержания в результате сельскохозяйственного использования); пастбища (2а – нативные почвы до сельскохозяйственного освоения, 2б – фактическое, современное содержание в базовый (1990 г.) период времени, 2в – накопленное изменение содержания в результате сельскохозяйственного использования).

Вовлечение в сельскохозяйственное использование почв лесолуговой зоны (дерново-подзолистые, см. рис. 1), которые в исходном состоянии имеют маломощный органо-аккумулятивный горизонт, приводит к обогащению ПОВ пахотного слоя (см. рис. 2-1в). Это происходит в результате формирования гумусированного пахотного слоя после дополнительного поступления корневых остатков, применения органических удобрений, известкования и др. (Stolbovoy, 2002b). Аналогичные данные приводятся и для почв других стран (Batjes, 1996).

Пространственный рисунок содержания ПОВ до выпаса животных (см. рис. 2-2а) и после освоения (см. рис. 2-2б) в целом повторяет рассмотренную выше зональную картину в пахотных почвах. Вместе с тем выпас, как и распашка, меняет картину содержания ПОВ, что отражается в сглаживании цветовой контрастности карты (см. рис. 2-2б) по сравнению с картой исходного содержания ПОВ (см. рис. 2-2а). Картина измене-

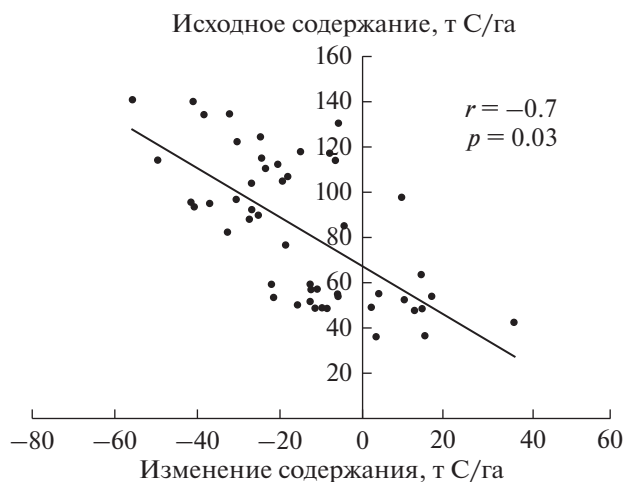


Рис. 3. Зависимость изменения содержания ПОВ в результате распашки от его исходного содержания в нативных почвах Европейской территории России.

Таблица 1. Запасы, потери и потенциал поглощения ПОВ (Гт С/га) по слоям в видах сельскохозяйственного землепользования ЕТР

Вид землепользования	0.3 м					0.3–1.0 м				
	исходное	актуальное	потери углерода	доля потерь, % от исходного	потенциал поглощения, Гт CO ₂ -экв.	исходное	актуальное	потери углерода	доля потерь, % от исходного	потенциал поглощения, Гт CO ₂ -экв.
Пашни	8.9	7.0	1.8	21	6.6	5.3	4.0	1.3	25	4.8
Пастбища	3.1	2.9	0.3	9	1.1	2.0	1.9	0.1	5	0.4
Сумма	12.0	9.9	2.1	18	7.7	7.3	5.9	1.4	20	5.2

ний содержания ПОВ в результате выпаса (см. рис. 2–2в) демонстрирует относительно одинаковое уменьшение содержания ПОВ в разных ТЕКП. Можно предполагать, что это связано с достаточно ограниченным воздействием выпаса животных, небольшим поголовьем скота и неинтенсивным потреблением фитомассы.

Запасы ПОВ в 0.3-метровом слое нативных почв ЕТР до распашки составляли 8.9 Гт С (табл. 1). В почвах пастбищ запасы ПОВ в нативных почвах были 3.1 Гт С. Запасы ПОВ в 0.3–1.0 м слое нативных почв до распашки были 5.3 Гт С, а пастбищ – 2.0 Гт С, что составляет для пашни и пастбищ 60 и 65% от запасов в поверхностном слое.

Сельскохозяйственное использование привело к потере углерода (дегумификации почв). За все время использования пахотных почв ЕТР совокупные потери ПОВ составили 1.8 Гт С (около 21% от исходного) на пашне и 0.3 Гт С (почти 9% от исходного) на пастбищах. Подчеркнем, что отмеченные потери в 2–3 раза меньше, чем аналогичные в зарубежных развитых странах, которые колеблются в диапазоне 25–75% от исходного содержания углерода в нативных почвах¹⁷. Относительно невысокие потери ПОВ в результате сельскохозяйственного производства в РФ связаны с планированием землепользования, проводившемся институтами РосНИИземпроекта до 1990 г., направленном на землеустройство, внедрение противоэрозионных и углерод сберегающих технологий производства и др.

Наряду с поверхностным 0.3-метровым слоем, сельскохозяйственное землепользование изменило содержание ПОВ и в более глубоких горизонтах (см. табл. 1). Так, потеря ПОВ на пашне в слое 0.3–1.0 м достигает 1.3 Гт С, что составляет 25% от исходного содержания. Относительно большие потери глубоких горизонтов по сравне-

нию поверхностным 0.3-метровым слоем (25% по сравнению с 21%, соответственно) согласуются с существенной долей (более 60%) черноземных почв в пахотном фонде ЕТР, которые имеют мощный (0.8–1.2 м) гумусовый горизонт.

Потеря ПОВ в слое 0.3–1.0 м на пастбищах составляет 0.1 Гт С или 5% от исходного содержания. Меньшие потери ПОВ на пастбищах по сравнению с пашней объясняются отсутствием механического воздействия пахоты, сохранением естественных фитоценозов в условиях ограниченного поголовья скота и пр.

Суммарная потеря ПОВ в результате сельскохозяйственной деятельности из 0.3-метрового слоя составила около 2.1 Гт С (см. табл. 1). Эта величина соответствует теоретическому (расчетному) потенциалу поглощения равному 7.7 Гт CO₂-экв. Суммарная потеря ПОВ из 0.3–1.0 м слоя почв составила 1.4 Гт С, что соответствует расчетному потенциалу поглощения около 5.2 Гт CO₂-экв. Суммарный потенциал поглощения метровой толщей сельскохозяйственных почв ЕТР равен 12.9 Гт CO₂-экв., что составляет почти 8.6 годовых выбросов парниковых газов в РФ¹⁸.

Отметим, что приведенные выше значения потенциала поглощения отражают теоретическую величину для случая возвращения всех почв РФ в нативное состояние. Естественно, что такой сценарий практически трудно осуществим. Вместе с тем такое развитие может оказаться перспективным для территорий деградированных почв залежных земель¹⁹.

Приведенные данные (см. табл. 1) показывают, что учет запасов и потерь ПОВ, ограниченный исключительно поверхностным 0.3-метровым слоем, существенно занижает фактическое

¹⁷ Kane D. Carbon Sequestration Potential on Agricultural Lands: A Review of Current Science and Available Practices by Daniel Kane, November 2015. In association with: National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC. <http://sustainableagriculture.net/publications> (дата обращения 22.03.2023).

¹⁸ Суммарный выброс ПГ в 2020 г., по данным Национального кадастра антропогенных выбросов, составил около 1.5 Гт С (Романовская и др., 2022).

¹⁹ По данным МСХ РФ, площадь залежных земель составляет 44 млн га, из которых к возвращению в сельскохозяйственный оборот планируется 12 млн га. <https://asm-agro.ru/articles/nepahanoe-pole-kak-vernut-v-оборот-zaleznyh-zemli/> (дата обращения 26.03.2023).

содержание ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ, его изменение в результате сельскохозяйственного использования и оценку поглощающего потенциала почв. Очевидно, что неполный учет потерь приведет к существенно искаженной, неоправданно заниженной величине накопления ПОВ и почти двукратному снижению экономической эффективности климатических проектов в РФ. Полученные нами данные могут служить основанием для предложения о включении более глубоких горизонтов почв в Национальный стандарт по учету поглощения ПГ. Отметим, что это предложение не является излишне академичным. Действительно, как показано выше, перемещение и закрепление углерода в глубоких горизонтах почв считается одним из перспективных инструментов повышения качества климатических проектов²⁰. Сообщается также об интенсификации селекции в США, направленной на увеличение глубины корневой системы сельскохозяйственных культур для закрепления ПОВ в глубоких слоях почв (Lal, 2020). Таким образом, высказанное предложение об увеличении глубины учета ПОВ в РФ вполне практично и соответствует мировому тренду.

Содержание углерода в стратегии изменения землепользования

Традиционно практика землепользования в России строилась на гумус сберегающих технологиях, которые достаточно полно рассмотрены в научной литературе и приложениях к задачам климатических проектов (Иванов и др., 2019). В настоящем сообщении акцент сделан на исполь-

зовании трансформации видов землепользования в целях климатических проектов.

На рис. 4 показано распределение содержания ПОВ в видах сельскохозяйственного землепользования во Владимирской и Рязанской областях. Выбор областей делался с целью продемонстрировать различия в содержании ПОВ для отдельных видов землепользования. Во Владимирской области (см. рис. 4а) отмечается увеличение содержания ПОВ в ряду видов землепользования пашня–пастбище–сенокос. Можно предполагать, что в случае относительно одинаковых почвенно-экологических условий, трансформация пашни в пастбище (залужение) приведет к накоплению более 19 т С/га, а при трансформации пастбища в сенокос – составит более 47 т С/га. Перевод пашни в сенокос может привести к накоплению 67 т С/га. Согласно правилам (IPCC, 2006), отмеченное накопление реализуется в течение 20 лет, т.е. рассчитанное ежегодное поглощение ПОВ будет около 1.0, 2.3 и 3.3 т С/га соответственно. Перевод видов землепользования в ряду сенокос–пастбище–пашня приведет к потерям ПОВ в обратном отмеченному выше порядке, т.е. будет стимулировать дегумификацию и сопутствующую эмиссию CO₂.

Распределение содержания ПОВ по видам землепользования Рязанской области обнаруживает наименьшее значение на пастбищах по сравнению с пашней и сенокосами (см. рис. 4б). Можно ожидать, что трансформация пашни в пастбище в случае Рязанской области не будет сопровождаться накоплением ПОВ и этот вариант не может рассматриваться в рамках задач климатических проектов. Перевод пашни в сенокос стимулирует накопление около 77 т С/га, а трансформация пастбищ в пашню почти 30 т С/га. Перевод пастбищ в сенокосы может привести к накоплению более 106 т С/га. Можно рассчитать, что в годовом выражении рассмотренные изменения

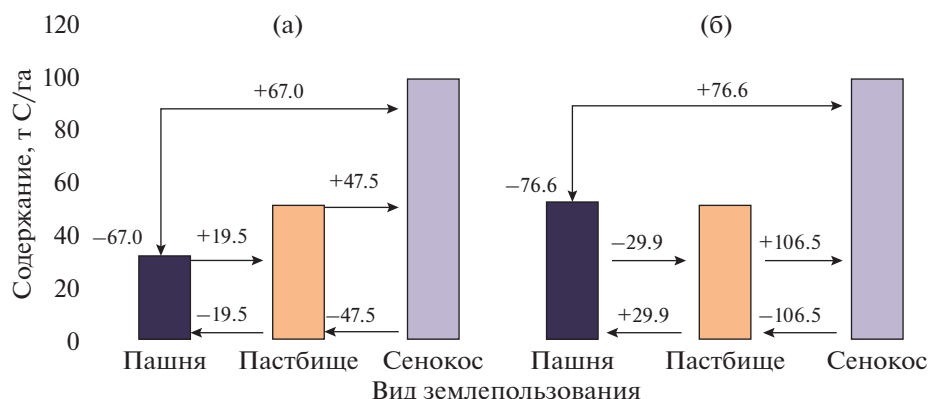


Рис. 4. Влияние изменения (трансформации) видов сельскохозяйственного землепользования на содержание ПОВ в слое 0.3 м: (а) Владимирская область, (б) Рязанская область.

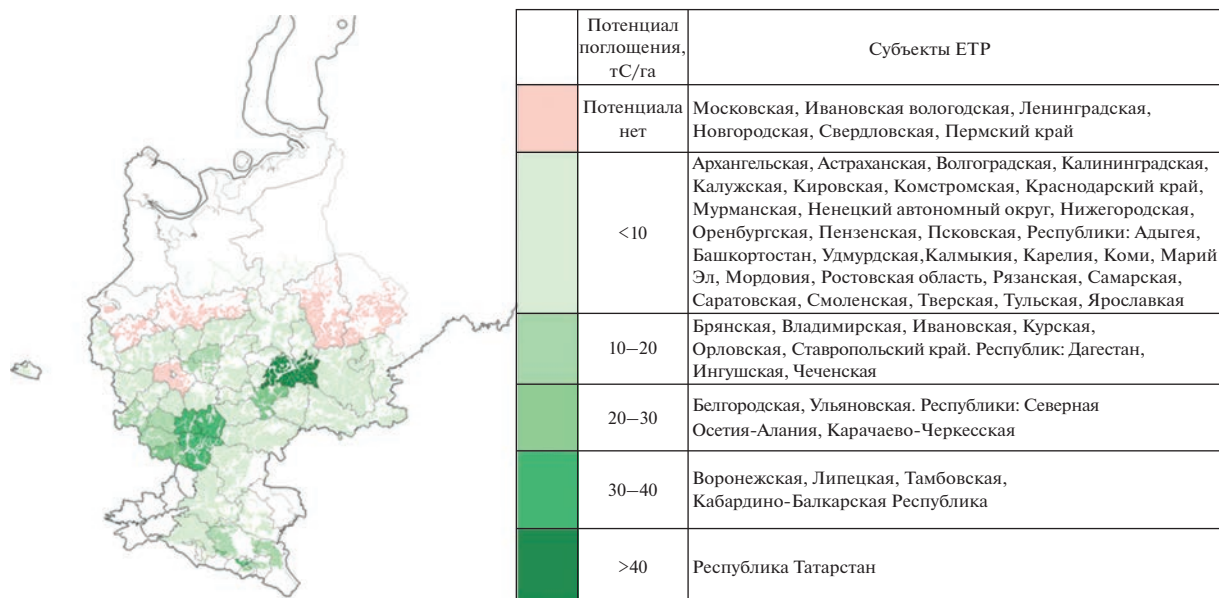


Рис. 5. Ранжирование субъектов Европейской территории России по потенциалу поглощения ПОВ в секторе “Изменение сельскохозяйственного землепользования” ЗИЗЛХ (пашня → пастбище).

содержания ПОВ составят 3.8, 1.5 и 5.3 т С/га соответственно.

Заметим, что рассчитанные варианты ежегодных изменений содержания ПОВ в результате трансформации видов сельскохозяйственного землепользования гораздо выше прогнозируемых оценок накопления ПОВ в результате применения модификаций землепользования, которые, как правило, меньше 1.0 т С/га (Когут и др., 2020; Lal, 2020). Это делает трансформацию видов землепользования в рамках ЗИЗЛХ экономически более привлекательной с точки зрения производства углеродных квот/единиц.

Приведенный анализ на данных (см. рис. 4) перспективен для оценки потенциала изменения землепользования в целях накопления ПОВ. Следует подчеркнуть, что мероприятия в секторе ЗИЗЛХ, направленные на стабилизацию баланса углерода, в климатических проектах не имеют смысла, поскольку не создают дополнительных углеродных квот/единиц.

На рис. 5 представлена карта, на которой демонстрируется ранжирование субъектов ЕТР по потенциалу поглощения ПОВ в случае использования трансформации видов сельскохозяйственного землепользования. На карте (см. рис. 5) показано, что перевод пашни в пастбища в 47 из 54 субъектов ЕТР приведет к накоплению ПОВ в количестве от 10 до более чем 40 т С/га, для оставшихся 7 субъектов, в которых лесохозяйственная деятельность привела к накоплению ПОВ потенциал поглощения не выявляется. Очевидно, что использование

опций трансформации видов землепользования не является рекомендацией и должно основываться на детальном социально-экономических, экологических и других критериях. Вместе с тем целесообразность выбора этой опции с экономической точки зрения будет определяться величиной потенциала секвестрации ПОВ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Основным аспектом анализа выступает главный вопрос, заключающийся в том, соответствуют ли имеющиеся национальные данные содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ международному стандарту MRV. Если да, то могут ли подходы и результаты проведенного нами исследования использоваться: а) для планирования климатических проектов и б) для обоснования производства углеродных квот/единиц на международных площадках торговли (ETS)?

Для ответа на главный вопрос необходимо проанализировать существующую в РФ практику измерений, отчетности и верификации (MRV) содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах.

Измерение. Россия обладает огромной базой данных многолетних измерений содержания ПОВ в сельскохозяйственных почвах, которые получены в результате сплошных почвенных съемок и анализов образцов в профессиональных лабораториях. Так, до 1990 г. основные работы проводились институтами РосНИИземпроекта, которыми было выполнено два полных тура об-

следования сельскохозяйственных почв страны и ее отдельных областей. В середине 90-х годов завершился четвертый тур обследований. В настоящее время обследования сельскохозяйственных почв проводятся сетью Агротехцентров МСХ РФ в рамках государственных программ^{21,22}. В обследовании применяется комплекс современных методов, включая дистанционное зондирование, наземные обследования, гидрометеорологические, сбор образцов почв, лабораторные исследования, статистический анализ данных и др.

Сложившаяся практика мониторинга состояния почв сельскохозяйственного назначения РФ включает определение содержания органического вещества и объемного веса почв. Сбор данных проводится по фиксированной сети мониторинговых участков с унифицированным методом отбора смешанных почвенных образцов пахотного горизонта. Отобранные образцы исследуются в лаборатории методом мокрого окисления бихроматом калия (метод Тюрина). В настоящее время периодичность опробования почв составляет 10 лет. Результаты представляются в форме среднего содержания гумуса в пахотном горизонте почв сельскохозяйственных угодий муниципального (административного) района и субъекта РФ. Рассмотренная система государственного мониторинга содержания ПОВ земель сельскохозяйственного назначения может быть адаптирована к требованиям МГЭИК и использоваться в национальных сообщениях, а также применяться для планирования климатических проектов.

Приведенные в исследовании данные пересчитаны на стандартную глубину (0.3 м) и дополнены данными содержания органического углерода на глубине 0.3–1.0 м. В настоящее время эти данные входят в базу данных ГИС ПРСХ и проходят государственную регистрацию. В дальнейшем эти данные следует адаптировать к требованиям МГЭИК для создания национальной базы почвенных данных климатических проектов.

В части точности оценок запасов углерода на национальном уровне, а также в масштабе крупных регионов (например, ЕТР) максимально достижимым уровнем ошибки можно считать 10% (средняя точность определения гумуса в почвах методом Тюрина). Необходимо отметить, что, используемые для национальных расчетов содержа-

ния ПОВ коллекции почвенных разрезов²³ (Stolbovoi, 2002) создавались по принципу доступности данных без их статистически обоснованной представительности, например отбора средних, площадь взвешенных значений для почв и др. Подход по принципу доступности используется и при создании глобальных коллекций (Batjes, 1996). В итоге варьирование содержания углерода для отдельных почв, например Gleisoil в глобальной коллекции превышает 150% (Batjes, 1996). Очевидно, что расчеты, основанные на таких неопределенных данных, носят оценочный характер и рассуждения об их статистической достоверности весьма условны.

Определение изменений содержания ПОВ для конкретного климатического проекта требует значительной точности, поскольку результатом проекта выступает вес товара – вес произведенной квоты/углеродной единицы. В настоящее время на фоне общего понимания подходов измерений изменений содержания ПОВ международный консенсус на нормы производства последних отсутствует. При этом в числе главных проблем выступают: 1) экономическая целесообразность определения изменений содержания ПОВ и 2) достоверная воспроизводимость результатов определения.

Рекомендуемый МГЭИК (IPCC, 2003; 2006) статистический подход достоверного определения небольших изменений в больших объемах содержания ПОВ требует огромного числа определений, что делает стоимость идентификации квоты/углеродной единицы запретительно большой. Так стоимость определения 1 т С в 0.3-метровом слое пахотных почв ЕС варьирует в интервале 241–643 Евро²⁴. Высокая стоимость, при цене квоты/углеродной единицы на рыночных площадках ETS равной 30–50 Евро/т С, делает ее производство экономически не выгодным. Проблема достоверной воспроизводимости определения изменений ПОВ связана со значительным пространственным варьированием почвенных свойств на небольших расстояниях в пределах поля. В этих условиях изменение содержания ПОВ может быть следствием смещения точек отбора проб почв при повторном опробовании. К сожа-

²¹Приказ Минсельхоза России от 24.12.2015 № 664 “Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения” (Зарегистрировано в Минюсте России 21.03.2016 № 41470). <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-24122015-n-664/> (дата обращения 22.03.2022).

²²Федеральный закон от 30.12.2021 г. № 475-ФЗ О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47493> (дата обращения 22.03.2023).

²³Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia // CD-ROM, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria and the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2002. https://iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 02.06.2022).

²⁴Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007. 56 p. ISBN: 978-92-79-05379-5. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eu-soils_docs/other/EUR21576_2.pdf (дата обращения 26.04.2023).

лению, достоверная воспроизводимость определения изменений ПОВ руководствами МГЭИК не обсуждаются. Таким образом, предлагаемый МГЭИК статистический подход определения изменений содержания ПОВ нельзя признать полностью достаточным, и он требует существенной доработки.

В настоящее время предлагается комплексный подход определения изменений содержания ПОВ, который включает площадную рандомизацию и координатную географическую фиксацию площадок опробования, соблюдение стандартных глубин и процедур рандомизированного отбора смешанных образцов почв, методов лабораторных исследований²⁵. Метод прошел проверку в Италии и предлагается для стран ЕС. Рассматривается перспектива адаптации метода в РФ.

Отчетность. Результаты обследований, выполненных в процессе проведения туров обследования до 1990 г., архивированы и документированы в ряде обобщающих публикаций (Крылатов, 1998; Физико-химические ..., 1996). Данные измерений, получаемые сетью (102 организации) Агротехцентров, передаются в МСХ РФ (Единая ..., 2020) и распространяются заинтересованным организациям Министерства природных ресурсов и Экологии РФ, Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии РФ, Росприроднадзору для формирования и обновления государственных информационных ресурсов.

Верификация. Под верификацией понимают “проверку”, при которой текущее измерение сравнивается с ранее сохраненным.

Опубликованные данные (Крылатов, 1998; Физико-химические ..., 1996) содержат анализ динамики ПОВ за 1970–1990 гг. Начиная с 1993 г. в РФ ежегодно издается Национальный доклад об использовании и состоянии земель сельскохозяйственного назначения (Доклад ..., 2022). Доклад периодически публикует данные по содержанию ПОВ. Национальный доклад размещается в Интернете и находится в свободном доступе, что позволяет верифицировать динамику содержания ПОВ.

Приведенные в статье данные по содержанию ПОВ в сельскохозяйственных почвах РФ верифицировались с ранее опубликованными данными РосНИИземпроекта (Крылатов и др., 1998; Физико-химические ..., 1996). Для сопоставимости

данные РосНИИземпроекта были приведены к стандартному слою 0.3 м. Обсуждение методов и детали пересчета опубликованы ранее (Национальный ..., 2018; Stolbovoy, 2002). Различия результатов в содержании ПОВ составили 5%.

Таким образом, использованные выше национальные базы данных содержания ПОВ соответствуют требованиям международного стандарта MRV. В части соблюдения подходов учета антропогенных эмиссий и абсорбции ПГ, выполненное нами исследование соответствует рекомендациям МГЭИК (IPCC, 2000, 2006).

Предложение о включении подповерхностного слоя 0.3–1.0 м в Национальный стандарт учета поглощения ПГ отвечает рекомендации МГЭИК о необходимости “постоянно развивать и использовать национальные системы учета”. Таким образом, полученные результаты могут быть представлены на международных площадках торговли углеродными квотами/единицами (ETS).

ВЫВОДЫ

Анализ запасов ПОВ в сельскохозяйственных почвах в рамках мероприятий, проводимых в секторе ЗИЗЛХ, выступает главным для принятия решений в области организации климатических проектов. При этом общие запасы ПОВ определяют национальную стратегию планирования снижения эмиссии и увеличения поглощения ПГ почвами.

Показано, что сельскохозяйственные почвы ЕТР содержали в 0.3-метровом слое базового 1990 г. 7.0 Гт С на пахотных угодьях и 3.1 Гт С на пастбищных землях. За весь период сельскохозяйственного использования содержание ПОВ снизилось на 1.8 Гт С (21% от исходного содержания) и 0.3 Гт С (9% от исходного содержания), соответственно. Суммарная потеря ПОВ из 0.3-метрового слоя почв в результате сельскохозяйственной деятельности составила около 2.1 Гт С. Эта величина соответствует теоретическому (расчетному) потенциалу поглощения ПГ равному 7.7 Гт CO₂-экв., что в пять раз превышает совокупный выброс парниковых газов РФ в 2020 г. Суммарная потеря ПОВ из 0.3–1.0 слоя почв составила 1.4 Гт С, что соответствует потенциалу поглощения около 5.2 Гт CO₂-экв. Суммарный потенциал поглощения 1.0 м поверхностной толщей почв ЕТР равен 12.9 Гт CO₂-экв., что составляет почти 8.6 суммарных выбросов ПГ в РФ в 2020 г. Очевидно, что даже частичное возвращение этого углерода в ПОВ может способствовать выполнению обязательств РФ по сокращению выбросов ПГ.

Приведенные данные демонстрируют, что учет запасов и потерь ПОВ, ограниченный поверхностным 0.3-метровым слоем, существенно занижает фактическое содержание ПОВ в сель-

²⁵Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Ver. 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007. 56 p. ISBN: 978-92-79-05379-5. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eu-soils_docs/other/EUR21576_2.pdf (дата обращения 26.04.2023).

скохозйственных почвах РФ, его изменение в результате сельскохозяйственного использования и величину поглощающего потенциала почв. Очевидно, что неполный по глубине учет потерь приведет к существенно искаженной, неоправданно заниженной оценке поглощения ПОВ и почти двукратному снижению экономической эффективности климатических проектов в РФ. Полученные нами данные служат основанием для предложения о включении более глубоких горизонтов почв в Национальный стандарт по учету поглощения парниковых газов.

Различия в содержании ПОВ в видах землепользования являются значимыми для ранжирования субъектов РФ, перспективных для применения опции ЗИЗЛХ Изменения землепользования для поглощения ПГ.

Проведенные исследования гармонизированы с международными принципами и подходами учета запасов ПОВ, изложенными в руководствах по учету выбросов и адсорбции ПГ, а также изданиях по надлежащей практике. Используемые данные отвечают требованиям международных правил MRV, что в целом подтверждает перспективу использования сельскохозяйственных почв РФ в климатических проектах в секторе ЗИЗЛХ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

FUNDING

The study was carried out as a part of the implementation of the most important innovative project of national significance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes on the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of a system for recording data on flows of climatically active substances and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. РАН. Комиссия по сохранению и разработке научного наследия академика В.И. Вернадского / ред. А.Л. Яншин. Институт геохимии и аналитической химии. М.: Наука, 1994. 669 с.

Глазовская М.А. Роль и функции педосферы в геохимических углеродных циклах // Почвоведение. М.: Наука, 1996. № 2. С. 174–186.

Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2020 году. М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2022. 384 с.

Докучаев В.В. Учение о зонах природы и классификация почв. Собрание сочинений. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1951. Т. 6. С. 375–535.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 / ред. А.Л. Иванов, С.А. Шоба. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.

Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставляемых для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий. Руководство пользователя. 2020. 117 с.

Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива “4 Промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185–202.

<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-20>

Козут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. № 102. С. 103–124.

Крылатов А.К. и др. Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: Госкомзем России, 1998. 60 с.

Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель, адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. А.И. Бедрицкого. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, ГЕОС. 2018. 286 с. ISBN 978-5-89118-762-2

Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество в почвах России. М.: Наука, 1996. 256 с.

Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 325 с.

Романовская А.А., Нахутин А.И., Гинзбург В.А. и др. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. М., 2022. Ч. 1. 468 с.

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К. и др. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0 / Коллективная монография. Иваново: ПресСто, 2021а. 260 с. ISBN 978-5-6046374-0-1

Столбовой В.С., Гребенников А.М., Оглезнев А.К., Шилов П.М., Филь П.П. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621903 “Информационно-справочная база данных индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий РФ”. 2021б.

Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии. Л.: Сельхозгиз, 1937. 287 с.

Крылатов А.К., Родин А.З., Носов С.И. Физико-химические свойства почв сельскохозяйственных угодий

- и баланс гумуса в пашне Российской Федерации. М.: Русслит, 1996. 392 с. ISBN 5-86508-049-0
- Baldock J.A., Skjemstad J.O.* Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack // *Organic Geochem.* 2000. Vol. 31. № 7–8. P. 697–710.
- Batjes N.H.* Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European J. of Soil Sci.* 1996. Vol. 47. № 2. C. 151–163.
- Bolin B. et al.* Global carbon cycle: SCOPE 13. NY: John Wiley & Sons, 1979. № CONF-7703140.
- IPCC, 2000. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2000) / J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanuel, L. Buendia, R. Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa, K. Tanabe (Eds.). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC, 2003. Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme UNEP / J. Penman, M. Guitarsky, T. Hiraishi (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme / H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe (Eds.). Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex VII: Glossary / J.B.R. Matthews, V. Möller, van Diemen R., J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (Eds.). Cambridge; NY: Cambridge Univ. Press, 2021. P. 2215–2256.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- Hiederer R., Jones R.J.A.* Development of a Spatial European Soil Property Data Set. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 30 p. ISBN 978-92-79-12535-5, ISSN 1018-5593.
<https://doi.org/10.2788/19220>
- Lal R.* Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security // *Soil Sci. and Plant Nutrition.* 2020. Vol. 66. № 1. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature.* 2015. Vol. 528. № 7580. P. 60–68.
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma.* 2017. Vol. 292. P. 59–86.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A.* Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy // *Front. Clim.* 2019. P. 1–8.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Poultou P. et al.* Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom // *Global Change Biology.* 2018. Vol. 24. № 6. P. 2563–2584.
- Schmid M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A. et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature.* 2011. Vol. 478. P. 49–56.
<https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Six J., Frey S.D., Thiet R.K., Batten K.M.* Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems // *Soil Sci. Society of America J.* 2006. Vol. 70. P. 555–569.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil.* 2002. Vol. 241. P. 155–176.
<https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Stevenson F.J.* Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, 1995. 512 p.
- Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T. et al.* Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation // *Biogeochemistry.* 2007. Vol. 86. P. 19–31.
- Stolbovoi V.* Carbon in Russian soils // *Climatic Change.* 2002. Vol. 55. № 1–2. P. 131–156.
- Stolbovoy V.* Carbon in agricultural soils of Russia. In: *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses.* Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada / C.A.S. Smith (Ed.). Ottawa: Agricult. Agri-Food; Paris: OECD, 2002. P. 301–306.
- Stolbovoy V., Ivanov A.* Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia // *Soil Carbon. Progress in Soil Science / A.E. Hartemink, K. McSweeney (Eds.).* 2014. P. 381–391.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38
- Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al.* Land Use, Land Use Change, and Forestry. IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 375 p.
- Zimov S.A., Schuur E.G., Chapin F.S.* Permafrost and the global carbon budget // *Science.* 2006. Vol. 312. № 5780. P. 1612–1613.

Assessment of the Carbon Content in Agricultural Soils of the European Russia for Climate Projects

V. S. Stolbovoy¹, * and P. P. Fil¹

¹*Dokuchaev Soil Institute, Moscow, Russia*

*e-mail: vladimir.stolbovoy@gmail.com

Soils and their organic carbon (SOC) are recognized as the main regulators of the global carbon cycle. At the same time, the calculations of SOC stock are not considered for climate projects and remain unclaimed. The

aim of the study is to demonstrate the perspective of SOC stock analysis for planning and decision-making within the framework of Land Use, Land-Use Change and Forestry Programs. The study exploits modern available digital soil databases processed by QGIS tools. Using the example of agricultural soils in European Russia, it has been shown that SOC reserves in the 0.3 m layer of the base year 1990 were 7.0 Gt C in arable and 3.1 Gt C in pasture lands. It was found that during the period of agricultural use, the stock of SOC decreased by 1.8 Gt C (21% of the original content) on arable land and 0.3 Gt C (9% of the original content) on pastures. The loss of SOC stock from 0.3 m layer amounted to about 2.1 Gt C (some 7.7 Gt CO₂-eq.). The decline of SOC stock from the 0.3–1.0 m layer of arable and pasture lands amounted to about 1.4 Gt C or 5.2 Gt CO₂-eq., which reaches almost 70% of the loss of the surface 0.3 m layer. The total loss of SOC stock from agricultural soils from a 1.0 m layer is about 12.9 Gt CO₂-eq., which is almost 9 times higher than the total greenhouse gas emission of the Russian Federation in 2020. It is proposed to include deeper layers of agricultural soils in the national standard for emissions and removals of greenhouse gas accounting. An approach is shown to use the spatial distribution of SOC stock for preliminary planning of climate projects within the framework of Land Use, Land-Use Change and Forestry Programs. For the practical establishment of greenhouse gas absorption projects, detailed justifications are required. The performed studies are harmonized with the requirements of the Intergovernmental Panel on Climate Change, which confirms the potential of soils use in climate projects of the Russian Federation.

Keywords: organic carbon, carbon sequestration, carbon stocks, carbon management, land use, land use change

REFERENCES

- Baldock J.A., Skjemstad J.O. The role of soil matrix and minerals in the protection of natural organic materials from biological effects. *Org. Geochem.*, 2000, vol. 31, iss. 7–8, pp. 697–710. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8)
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.*, 1996, vol. 47, no. 2, pp. 151–163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bolin B. et al. *The Global Carbon Cycle: SCOPE 13*. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskoi Federatsii v 2020 godu* [Report on the State and Use of Agricultural Lands of the Russian Federation in 2020]. Moscow: FSBI "Rosinformagrotekh", 2022. 384 p.
- Dokuchaev V.V. The doctrine of nature zones and soil classification. *Sobr. Soch.*, 1951, vol. 6, pp. 375–535. (In Russ.).
- Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii. Versiya 1.0* [Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0]. Ivanov A.L., Shoba S.A., Eds. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Sci. Inst., 2014. 768 p.
- Edinaya federal'naya informatsionnaya sistema o zemlyakh sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya i zemlyakh, ispol'zuemykh ili predostavlennykh dlya vedeniya sel'skogo khozyaistva v sostave zemel' inykh kategorii. Rukovodstvo pol'zovatelya* [Unified Federal Information System on Agricultural Lands and Lands Used or Provided for Agriculture as Part of Lands of Other Categories. User's Guide]. 2020. 117 p.
- Glazovskaya M.A. The role and functions of the pedosphere in geochemical carbon cycles. *Pochvoved.*, 1996, no. 2, pp. 174–186. (In Russ.).
- Hiederer R., Jones R.J.A. *Development of a Spatial European Soil Property Data Set*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 30 p.
- IPCC, 2000. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2000). A guide to good practice and uncertainty management in National Greenhouse Gas Inventories*. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nienzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meyer J., Miwa K., Tanabe K., Eds.). Hayama, 2000.
- IPCC, 2000. *Land Use, Land Use Change, and Forestry. IPCC Special Report*. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J., Eds. Cambridge: CUP, 2000. 375 p.
- IPCC, 2003. *The Intergovernmental Panel on Climate Change's Guide to Good Practices in Land Use, Land-use Change and Forestry, the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Program of UNEP*. Penman J., Guitarsky M., Hiraishi T. et. al., Eds. Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2003.
- IPCC 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Eds. Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex VII: Glossary*. Matthews J.B.R., Möller V., van Diemen R., Fuglestedt J.S., Masson-Delmotte V., Méndez C., Semenov S., Reisinger A., Eds. Cambridge; New York: CUP, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- Ivanov A.L., Stolbovoi V.S. The Initiative "4 per mile" – a new global challenge for the soils of Russia. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2019, no. 98, pp. 185–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Kogut B.M., Semenov V.M. Assessment of soil saturation with organic carbon. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2020, no. 102, pp. 103–124. (In Russ.).
- Krylatov A.K., Nosov S.I., Yuditskii B.A., Bondarev B.E., Pervushina V.N. *Dinamika balansa gumusa na pakhotnykh zemlyakh Rossiiskoi Federatsii* [Dynamics of Humus Balance on Arable Lands of the Russian Federation]. Moscow: Agroprogress Publ., 1998. 60 p.
- Krylatov A.K., Rodin A.Z., Nosov S.I. *Fiziko-khimicheskie svoistva pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii i balans*

- gumusa v pashne Rossiiskoi Federatsii* [Physical and Chemical Properties of Agricultural Soils and Humus Balance in Arable Lands of the Russian Federation]. Moscow: Russlit Publ., 1996. 392 p.
- Lal R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020, vol. 66, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>
- Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, vol. 528, no. 7580, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke Sh., Richerde-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui Ch.-Ch., Vagen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 2017, vol. 292, pp. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: otsenka riskov i ekologo-ekonomicheskikh posledstviy degradatsii zemel', adaptivnye sistemy i tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)"* [National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Assessment of Risks and Ecological and Economic Consequences of Land Degradation, Adaptive Systems and Technologies of Rational Nature Management (Agriculture and Forestry)"]. Bedritsky A.I., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2018. 286 p.
- Natsional'nyi doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom, za 1990–2020 gg. Tom 1* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Vol. 1]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 468 p.
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. *Organicheskoe veshchestvo v pochvakh Rossii* [Organic Matter in the Soils of Russia]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 256 p.
- Orlov D.S. *Gumusovye kisloty pochv i obshchaya teoriya gumifikatsii* [Humic Acids of Soils and the General Theory of Humification]. Moscow: MSU Publ., 1990. 325 p.
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Front. Clim.*, 2019, pp. 1–8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. Major limitations to achieving "4 per 1000" increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Glob. Change Biol.*, 2018, vol. 24, no. 6, pp. 2563–2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>
- Schmid M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, vol. 478, pp. 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Six J., Frey S.D., Thiet R.K., Batten K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, vol. 70, pp. 555–569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 2002, vol. 241, pp. 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Stevenson F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1995. 512 p.
- Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. *Biogeochemistry*, 2007, vol. 86, pp. 19–31.
- Stolbovoi V. Carbon in Russian soils. *Clim. Change*, 2002, vol. 55, iss. 1–2, pp. 131–156.
- Stolbovoi V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Ivanov A.L., Il'in L.I., Kolesnikova L.G., Petrosyan R.D., Shilov P.M., Fil' P.P., Korchagin A.A. *Reestr indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii Rossiiskoi Federatsii. Versiya 1.0* [Register of Indicators of Soil Quality of Agricultural Lands of the Russian Federation. Version 1.0]. Kozlov D.N., Sapozhnikov P.M., Eds. Moscow; Suzdal': Verkhnevolszh. Fed. Agrar. Nauch. Tsent, 2021a. 260 p.
- Stolbovoi V.S., Grebennikov A.M., Ogleznev A.K., Shilov P.M., Fil' P.P. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2021621903 v "Informatsionno-spravochnoi baze dannykh indikatorov kachestva pochv sel'skokhozyaistvennykh ugodii RF"* [Certificate of State Registration of the Database no. 2021621903 in "Information and Reference Database of Indicators of Soil Quality of Agricultural Lands of the Russian Federation"]. 2021b.
- Stolbovoy V. Carbon in agricultural soils of Russia. In *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting, Ottawa Canada*. Smith C.A.S., Ed. Ottawa: Agriculture, Agri-Food; Paris: OECD, 2002, pp. 301–306.
- Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon Balance in Soils of Northern Eurasia. In *Soil Carbon. Progress in Soil Science*. Hartemink A.E., McSweeney K., Eds. Cham: Springer, 2014, pp. 381–391. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38
- Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*. Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Tyurin I.V. *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii* [Organic Matter of Soils and Its Role in Soil Formation and Fertility]. Leningr.: Selkhozgiz, 1937. 287 p.
- Vernadskii V.I. *Zhivoe veshchestvo i biosfera* [Living Matter and the Biosphere]. Yanshin A.L., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1994. 669 p.
- Zimov S.A., Schuur E.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 2006, vol. 312, iss. 5780, pp. 1612–1613. <https://doi.org/10.1126/science.1128908>

УДК 631.4:631.417.1:631.95:631.17

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ВОЗДЕЛЫВАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ СТРАТЕГИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ

© 2023 г. В. А. Романенков^{a, b}, Ю. Л. Мешалкина^{a, c, *}, А. Ю. Горбачева^a,
В. А. Добровольская^a, А. Н. Кренке^d

^aМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

^cРГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

^dИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: jlmesh@list.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 09.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Потенциал секвестрации органического углерода в верхнем 30-сантиметровом слое почв возделываемых земель для Европейской территории России оценен на основе почвенно-экологического районирования с использованием Ротамстедской углеродной динамической модели RothC и общедоступных глобальных баз данных, таких как массив климатических данных Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020, коллекция карт SoilGrids250m версия 2.0, а также временной ряд вегетационных индексов NDVI и EVI, полученных со спутника MODIS (MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices). Для оценки современных запасов углерода использованы данные национальной карты запасов почвенного органического углерода на глубине 0–30 см. Методика работы соответствовала унифицированной методологии ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода. Средняя скорость секвестрации углерода по природным зонам при неизменном хозяйствовании изменялась от 0.076 до –0.002 т/га в год, убывая от зоны северной тайги к полупустыне. Увеличение поступления углерода на 5% при внедрении углеродосберегающих технологий может обусловить рост секвестрации углерода в два раза, а увеличение на 20% – в 5 раз. При росте поступления углерода в почву отмечено двукратное возрастание скорости секвестрации углерода от южной тайги с максимумом в зоне лесостепи, с последующим снижением в 1.5 раза и более в степной и сухостепной зоне. Используемая методика позволяет с пространственным разрешением 1 км выделить контуры, обладающие наибольшим и наименьшим потенциалом изменения запасов углерода при внедрении углеродосберегающих технологий.

Ключевые слова: секвестрация углерода, углеродосберегающие технологии в сельском хозяйстве, изменение климата, модель RothC, сельскохозяйственные земли, баланс углерода, инициатива “4 per 1000”

DOI: 10.31857/S2587556623040106, EDN: ZPYRTE

ВВЕДЕНИЕ

При переходе России на траекторию низкоуглеродного развития оценка запасов и мониторинг изменений содержания углерода в почве является важным шагом к принятию обоснованных решений, способствующих повышению плодородия почв, сокращению деградации земель, и тем самым позволяющих обеспечить продовольственную безопасность страны.

Одной из перспективных стратегий низкоуглеродного развития является компенсация выброса парниковых газов путем секвестрации углерода почвами. Привлекательность секвестрации почвенного углерода заключается в том, что запас

углерода в возделываемых землях снижен по сравнению с естественными экосистемами (Paustian et al., 2019a). Различные авторы оценивают обычно потери в 20–40% от первоначального запаса за 50–200 лет использования пашни (Романенков, 2011; Masson-Delmotte et al., 2021). В недавнем исследовании (Иванов и др., 2021a) приведены оценки средних потерь в 20% по сравнению с нативными пахотными почвами России в слое 0–30 см. Запасы органического углерода в почвах сельскохозяйственных земель России оцениваются как 16.8 Гт С в верхних 0.3 м и 28.0 Гт С в верхнем метровом слое (Minasny et al., 2017).

При внедрении технологических приемов, обеспечивающих накопление углерода в органическом веществе растений с последующей трансформацией в почвенное органическое вещество возможно ожидать длительного периода увеличения запасов почвенного углерода – от 10 до нескольких сотен лет (Когут, Семенов, 2020). Другим важным обстоятельством является сохранение структуры землепользования, поскольку удаление CO_2 из атмосферы не требует, например, залесения сельхозземель, что актуально при конкуренции за земельные ресурсы. Увеличение запасов углерода также обеспечивает дополнительные преимущества, поскольку изменяет целый ряд почвенных процессов, связанных с трансформацией органического вещества – ведущего макропроцесса в почве по количеству перерабатываемого вещества и выделяемой энергии, что обуславливает рост почвенного плодородия.

Количественная оценка эффективности данного процесса получила развитие после Парижской конференции по климату 2015 г. и известна как глобальная инициатива “4 промилле” или “4 на 1000”. Она предполагает возможность компенсации антропогенных выбросов углерода в атмосферу за счет прироста запасов почвенного углерода в верхних 40 см почвы в среднем на 0.4% в год, что глобально соответствует примерно 12.6 Гт CO_2 /год и компенсирует большую часть годового прироста CO_2 в атмосфере (15.8 Гт CO_2 /год) (Paustian et al., 2019a). Сразу после появления инициативы возникли бурные обсуждения относительно достижимости данной цели различными почвами, в том числе почвами пахотного фонда, однако она привлекла внимание к ключевой роли почв в секвестрации углерода как потенциальной стратегии смягчения последствий изменения климата. В публикации (Иванов, Столбовой, 2019) приводятся оценочные расчеты, показывающие, что цель инициативы “4 промилле” не может быть достигнута в России полностью и предлагается трансформировать ее в национальную цель “2 промилле” с периодом реализации в течение 12–15 лет, после чего прогнозируется насыщение пахотных почв углеродом.

Наиболее распространенным в настоящее время способом оценки и мониторинга баланса углерода и парниковых газов на национальном уровне является эмпирическое моделирование для прогноза изменений запасов органического вещества почвы. В качестве *первого* уровня таких расчетов используются предложенные экспертно МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, ИРСС) (Watson et al., 2000) данные о запасах углерода в эталонных естественных экосистемах и коэффициенты изменения запасов для возделываемых земель, стратифицированные по климату и типам почв,

оценивающие изменение запасов во времени при смене способов землепользования и технологий (Paustian et al., 2019a).

Корректировка на основе имеющейся внутри страны информации позволяет перейти на *второй* уровень оценки с “использованием более точной информации о почвах, климате и наземном покрове, чем рекомендовано экспертами МГЭИК для уровня 1” (Иванов и др., 2021a). В качестве источника такой информации в России предложено использовать, например, почвенную карту РСФСР масштаба 1 : 2500000.

Хотя динамические углеродные модели используются в основном как инструмент для фундаментальных исследований, они все чаще применяются и в национальных масштабах для целей инвентаризации почвенного углерода и парниковых газов в почве. Подобный подход позволяет перейти к *третьему* уровню анализа как составной части схемы организации работы по созданию Национальной системы наблюдения и учета баланса углерода на сельскохозяйственных и лесохозяйственных землях России (Иванов и др., 2021a, б). Возможность использования моделей основана на их настройке по данным наземных мониторинговых и полевых исследований, использующих пространственно распределенные данные о почве, климате и управляющих воздействиях, в том числе дистанционные и данных длительных полевых опытов (Иванов и др., 2021a; Harden et al., 2018; Paustian et al., 2019b). Такие модели могут обеспечить надежную и недорогую количественную оценку изменений запасов углерода в почве и потоков парниковых газов для анализа на национальном уровне, поддержке национальных программ и международных соглашений. Одной из наиболее используемых моделей является Ротамстедская углеродная модель RothC, в связи с чем пространственная версия данной модели предложена ФАО для составления Глобальной карты секвестрации почвенного углерода (Technical ..., 2020).

Успешное использование модели RothC для описания динамики углерода в длительных полевых опытах с удобрениями, проводящихся на территории России, дало основание для ее идентификации на более обширных региональных данных в системе мониторинга состояния пахотных земель Европейской территории России (ЕТР) (Романенков и др., 2009; Романовская, 2006; Романовская, 2007). Модель использовалась для оценки баланса углерода пахотных земель России, в том числе выбывших из сельскохозяйственного оборота. В материалах “Второго оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях для территории Российской Федерации” (Второй ..., 2014) баланс углерода пахотных почв ЕТР в XXI в.

(раздел 4.5.4.2) также был рассчитан на основе модели RothC.

Мониторинг и прогнозирование запасов почвенного органического углерода актуальны для ЕТР в условиях изменения климата. Согласно Третьему оценочному докладу об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации (2022), “сельскохозяйственные районы ЕТР, и особенно ее южные области, более чувствительны к современному потеплению, чем районы Урала, Сибири и Дальнего Востока”. Европейская часть России занимает около 390 млн га: 23% территории страны и 35% территории всей Европы (Россия ..., 2020). На ней находятся наиболее плодородные и ценные земли. По нашим оценкам 74.6% (82.8 млн га) пахотных (активно обрабатываемых) земель страны находятся на ее европейской части и занимают 24% от общей площади ЕТР. Учитывая большую площадь пахотных земель, усовершенствованные методы управления, позволяющие сохранять и увеличивать содержание углерода в почве, могут оказать значительное влияние на национальный углеродный бюджет.

При внедрении агротехнологических приемов, направленных на связывание органического углерода в почве, таких как прямой посев для минимизации воздействия на почвы, мульчирование поверхности почвы, возделывание покровных культур, широкое применение различных биологических методов, смешанные (уплотненные) посевы, применение навоза или компоста — две трети потерь могут быть компенсированы. Поскольку накопление углерода в почве происходит нелинейно, содержание углерода в почве достигает нового равновесного состояния в течение нескольких десятилетий, в связи с чем влияние устойчивых методов управления почвой может быть заметно только в среднесрочной или долгосрочной перспективе (Herzfeld et al., 2021). В исследованиях, проведенных на различных пахотных почвах мира, было показано, что скорости поглощения органического углерода почвой могут достигать от 0.2 до 0.5 т С/га в год (Chernova et al., 2020). Однако реальный потенциал для секвестрации углерода почвами Европейской территории России пока еще недостаточно изучен.

Задачей данной работы была оценка потенциала секвестрации органического углерода в верхнем 30-сантиметровом слое пахотных почв для территории ЕТР на основе моделирования в соответствии с методикой ФАО по составлению Глобальной карты секвестрации почвенного углерода¹. Карта может быть использована для первичной оценки достижимости задач по секвестрации

углерода и выделения приоритетных областей с высоким потенциалом накопления углерода почвы при внедрении углеродосберегающих технологий (Technical ..., 2020). В этой связи исследование соответствует выполнению задачи 6.5 “Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.” — “моделирование процессов, происходящих в климатической системе, включая моделирование последствий различных форм активного воздействия на эти процессы в глобальном, региональном и локальном масштабах”². Согласно интенсивному сценарию низкоуглеродного развития Стратегии, предполагается рост поглощающей способности управляемых экосистем, в том числе за счет внедрения климато-ориентированных технологий и практик, позволяющих обеспечить дополнительное депонирование углерода в почвах сельскохозяйственных земель и сокращение его потерь (Виноградова и др., 2022).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Расчеты проводились для отдельных зон почвенно-экологического районирования России (Урусевская и др., 2020), для субъектов и федеральных округов РФ ЕТР с разрешением в 1 км. Прогноз проводился на 20-летний период.

Создание маски пахотных земель

На первом этапе работы была получена карта пахотных земель России, включающую поля интенсивного сельскохозяйственного использования и исключая заброшенные сельскохозяйственные угодья. Она была разработана на основе вероятностной карты доли пашни в каждом километровом пикселе и сформирована путем синтеза двух масок на основе оригинальной методики (Кренке, 2020). Первая маска данных была сделана для проекта глобальной продовольственной безопасности (Global Food Security-Support Analysis Data at 30 m, GFSAD30)³. Карта содержит данные о пахотных землях и водопользовании с разрешением 30 м для всего земного шара. Вторая маска является слоем “используемые и зарастающие сельскохозяйственные земли” Карты неиспользуемых сельхозземель, потенциально пригодных для выращивания леса (Глушков и др., 2019).

² Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р. <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3f-WO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения 04.05.2023).

³ <https://www.usgs.gov/centers/western-geographic-science-center/science/global-food-security-support-analysis-data-30-m> (дата обращения 21.11.2022).

¹ <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-sequestration-potential-map-gsocseq/en/> (дата обращения 24.11.2022).

Входные данные

Источником *климатических данных* послужил массив Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020 Отдела исследования климата Университета Восточной Англии⁴ (Harris et al., 2020). Ежедневные данные имеют пространственное разрешение около 5 тыс. га (0.5/0.5 градуса). По ним были рассчитаны среднемесячные значения температуры (°C), осадков (мм) и эвапотранспирации (мм) по Пенманну–Монтейну за период с 1980 по 2020 г.

Данные по *содержанию фракции ила* (частицы размером менее 0.002 мм) были получены из коллекции карт свойств почв мира SoilGrids250m версия 2.0 (Poggio et al., 2021).

Расчеты поступающего в систему органического вещества были основаны на модели MIAMI, предложенной для оценки поступающего органического вещества при моделировании изменений климата (Gottschalk et al., 2012; Lieth et al., 1975). Модель рассчитывает чистую первичную продукцию (Net Primary Production – *NPP*) как минимальное значение из уравнений зависимости *NPP* от среднегодовой температуры и среднегодовой суммы осадков:

$$NPP = \min(NPP_T, NPP_P), \quad (1)$$

$$NPP_T = \frac{3000}{1 + e^{1.315 - 0.119T}}, \quad (2)$$

$$NPP_P = 3000 \times 1 - e^{-0.000664P}. \quad (3)$$

Величина *NPP* используется для расчета количества растительных остатков, исходя из предположения о пропорциональной связи количества органических остатков и чистой первичной продукции (Smith et al., 2005; Technical ..., 2020):

$$C_t = \frac{C_{t-1}NPP_t}{NPP_{t-1}}, \quad (4)$$

где *C* – поступление углерода в год, т С/га, *t* – моделируемый период.

Сценарии поступления органических остатков в почву

Моделирование секвестрации углерода проводилось по 4 гипотетическим сценариям, что дало возможности сопоставить прогнозные результаты при применении углеродсберегающих технологий различной интенсивности. Описанным выше способом расчет поступившего углерода растительных остатков проводился для сценария неизменного хозяйствования (Business As Usual – BAU). Применение углеродсберегающих технологий учитывалось в остальных трех сценариях SSM1–SSM3 (SSM – Soil Sustainable Manage-

ment), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно.

Этапы моделирования

В качестве начальной точки для моделирования запасов углерода на 2000 г. была использована национальная карта *запасов почвенного органического углерода* в т С/га на глубине 0–30 см (Чернова и др., 2021).

Моделирование динамики запасов углерода подразумевает три этапа.

1. Фаза “инициализации” (SPIN UP). Моделирование до состояния равновесия. Запас углерода брался равным величине, отображаемой на Глобальной карте запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (GSOC17) (Technical ..., 2020). В качестве неизменных почвенных, растительных, сельскохозяйственных и климатических условий брались среднесреднегодные величины за каждый месяц года за период 1980–2000 гг. Изначальное поступление углерода с растительными остатками считается равным 1 т С га/год и для него рассчитывалось равновесное соотношение пулов углерода в почве (Smith et al., 2005).

2. “Временная гармонизация” (WARM UP). Гармонизация данных проводилась на основе фактических погодных условий 2000–2020 гг. и реального ежегодного поступления растительных остатков в почву. На выходе было получен запас почвенного органического углерода, соответствующий настоящему времени (2020 г.).

3. Фаза “прогноза” (FORWARD). Прогноз изменения запасов почвенного углерода, а также его скорости в 2020–2040 гг. был рассчитан согласно четырем ранее описанным сценариям.

Создание пакета карт секвестрации углерода

Построение карт потенциала секвестрации почвенного органического углерода проводилось согласно единой методике, разработанной ФАО и изложенной в Техническом руководстве (Technical ..., 2020).

В результате работы получен пакет карт, состоящий из карты запаса углерода в, так называемый, нулевой период, за который условно принят 2020 г., 18 карт прогноза запаса углерода, исходя из различных стратегий землепользования, и 10 карт, оценивающих неопределенности прогнозирования.

Основными картами были карты о величине **скорости секвестрации почвенного углерода** (т С/га в год), которая рассчитывалась как разница между запасами почвенного углерода в 2040 г. и в нулевой период (в 2020 г.), а затем делилась на период в 20 лет.

⁴ <https://crudata.uea.ac.uk> (дата обращения 22.11.2022).

Таблица 1. Суммарные по площади показатели скорости секвестрации почвенного углерода (Мт С/год) по федеральным округам при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате принятия реализации технологий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно

Федеральный округ	Площадь пашни, 2020 г., тыс. га	Сценарий хозяйствования			
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3
Приволжский	34.75	1.63	2.86	4.03	6.37
Северо-Западный	0.96	0.03	0.09	0.11	0.17
Северо-Кавказский	5.91	0.09	0.31	0.54	1.00
Центральный	22.56	1.23	2.15	3.00	4.68
Южный	18.60	-0.16	0.64	1.31	2.66

Три карты содержали данные относительной скорости секвестрации почвенного углерода (т С/га в год) как разница запасов почвенного углерода в 2040 г. по соответствующему сценарию SSM и по сценарию BAU, деленная на период в 20 лет. К вспомогательным картам также отнесены: 4 карты запасов почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для каждого сценария; 4 карты абсолютных различий в запасах почвенного углерода (т/га) в 2040 г. для каждого сценария и 3 карты относительных различий в запасах почвенного углерода (т/га) для сценариев SSM.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тенденции накопления почвенного углерода в пахотных почвах ЕТР

Суммарная абсолютная скорость секвестрации почвенного углерода пахотных почв ЕТР составила 2.827 Мт С/год для сценария неизменного хозяйствования, а для трех других сценариев (SSM1–SSM3), может достигать 6.052, 8.991, 14.863 Мт С/год соответственно. При этом увеличение на 5% поступления в почву органического углерода приведет к увеличению секвестрации углерода в два раза, а на 20% – в пять раз. Таким образом, в целом применение углеродосберегающих технологий на территории ЕТР более чем оправдано. В табл. 1 приведены абсолютные показатели скорости секвестрации почвенного углерода по федеральным округам. Всего пахотные почвы ЕТР за 20 лет потенциально могут накопить от 56.530 Мт при сценарии BAU, при SSM1 – до 121.048 Мт, при SSM2 – до 179.814 Мт и при SSM3 – до 297.258 Мт.

Детализация секвестрации углерода по округам и областям

Видно, что при реализации сценария неизменного хозяйствования потери запасов углерода почвы наблюдаются только в Южном федеральном округе.

В этом округе применение и внедрение различных углеродосберегающих агротехнологий крайне необходимо. Во всех остальных случаях происходит накопление углерода. Наибольший интерес для реализации потенциала секвестрации углерода представляют Приволжский и Центральный федеральные округа. Небольшие значения для Северо-Западного и Северо-Кавказского федеральных округов связаны с относительно небольшой площадью пашни в этих округах.

При детализации по областям (рис. 1 и 2) видно, что секвестрация углерода в пахотных почвах ЕТР носит зональный характер. При сценарии неизменного хозяйствования в ряде областей преобладают процессы его потерь в пахотных почвах. Это – Воронежская область, Ростовская область, Республика Калмыкия, Астраханская область, Калининградская область, Краснодарский край, Республика Крым и Республика Адыгея.

Тульская, Орловская и Тверская области обладают наибольшим потенциалом секвестрации углерода при неизменном хозяйствовании. На рис. 1 и 2 видно, что любая технология SSM приведет к увеличению запасов почвенного органического углерода по сравнению со сценарием BAU. Наибольшим потенциалом секвестрации углерода при увеличении поступления растительных остатков в почвы обладают следующие области: Волгоградская область, Самарская область, Краснодарский край, Ставропольский край, Республика Башкортостан, Республика Татарстан, Ростовская область, Саратовская область, Оренбургская область.

Потенциал секвестрации углерода возрастает от южной тайги к зоне широколиственных лесов (табл. 2), достигая там максимума, а затем вновь снижается в степной и сухостепной зоне.

Секвестрация углерода пахотными почвами по почвенно-экологическим зонам

По отклику на применение углеродосберегающих технологий различной интенсивности все

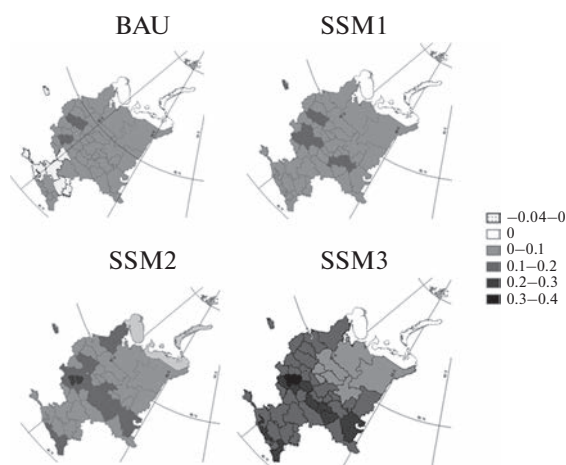


Рис. 1. Средние показатели скорости секвестрации почвенного углерода (т С га/год) по областям ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно.

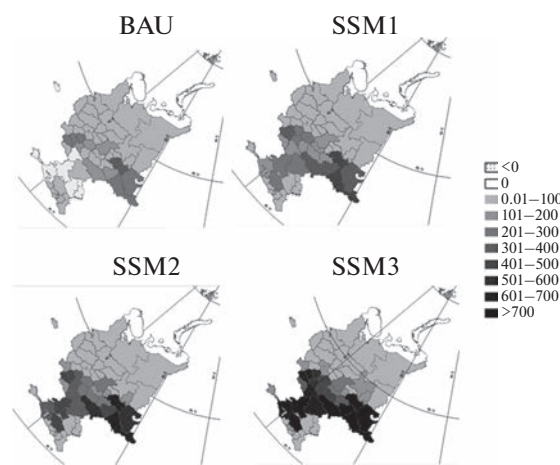


Рис. 2. Суммарные по контуру показатели по областям ЕТР скорости секвестрации почвенного углерода (Кт С га/год) при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно.

почвенно-экологические зоны можно условно разделить на 3 группы. Зоны обыкновенных и южных черноземов степи, темно-каштановых и каштановых почв сухой степи и светло-каштановых и бурых почв полупустыни демонстрируют высокую “отзывчивость” на применение сценариев, где увеличивается поступление углерода растительных остатков в почву. Подзона подзолистых почв средней тайги и зона дерново-подзолистых почв южной тайги показывают наименьшие изменения при внедрении углеродосберега-

ющих технологий. Остальные зоны проявляют промежуточную тенденцию.

Для всех карт была оценена неопределенность картографирования согласно методике ФАО (Technical ..., 2020). Она представлена в виде половины 95% доверительного интервала, деленной на среднее значение показателя. Карты, созданные по описанной процедуре, дают неопределенность прогноза модели от 9 до 25–26%. Среднее значение неопределенности лежит в интервале 14–17% (рис. 3).

Таблица 2. Средние показатели скорости секвестрации почвенного углерода (т С га/год) по почвенно-экологическим зонам ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате принятия реализации технологий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), предполагающих увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно

Зона или подзона		Сценарий хозяйствования			
		BAU	SSM1	SSM2	SSM3
Г	Подзона глееподзолистых почв, глееземов и подзолов северной тайги	0.076	0.094	0.120	0.171
Д	Подзона подзолистых почв средней тайги	0.057	0.062	0.074	0.098
Е	Зона дерново-подзолистых почв южной тайги	0.043	0.068	0.083	0.115
Л	Зона серых лесных почв лиственных лесов	0.069	0.098	0.124	0.175
М	Зона оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов и серых лесных почв лесостепи	0.055	0.099	0.140	0.225
Н	Зона обыкновенных и южных черноземов степи	0.006	0.041	0.080	0.154
О	Зона темно-каштановых и каштановых почв сухой степи	0.013	0.046	0.076	0.132
Р	Зона светло-каштановых и бурых почв полупустыни	-0.002	0.042	0.073	0.139

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты можно рассматривать как более детальную информацию о потенциале секвестрации углерода пахотными почвами ЕТР с учетом зональных особенностей почв, что показывают региональные оценки. Первоначально оценки, включающие территорию ЕТР на вторую половину XXI в. даны в работе (Dankers et al., 2010). В ней обсуждается возможное снижение запасов углерода пахотными почвами России. Основными факторами длительного тренда снижения запасов углерода почвами, даже на фоне среднесрочного его повышения, являются возможное снижение урожайности при увеличении вероятности засух в 2020–2070 гг., прогнозируемых с использованием глобальной климатической модели HadCM3 (Alcamo et al., 2007; Falloon et al., 2009), а также увеличение потерь углерода почвы за счет интенсификации респирации при потеплении. Более детальное исследование (Herzfeld et al., 2021) по 4 глобальным климатическим моделям HadGEM2_ES, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MIROC5 и 2 эмиссионным сценариям RCP2.6 и RCP8.5 также прогнозируют потерю органического углерода большинством пахотных почв ЕТР к концу XXI в. со скоростью 0.1–0.5 т/га в год, за исключением технологий с оставлением растительных остатков в Центрально-Черноземном районе, а также части Северного Кавказа, где поддерживается запас углерода, близкий к состоянию на начало моделирования – 2005 г. В то же время для стран Западной Европы и отдельных территорий Восточной Европы при реализации тех же технологий прогнозируется обеспечение накопления углерода за тот же период со скоростью 0.1–0.5 т/га в год. Региональные подходы базируются на оценках урожайности сельскохозяйственных культур. За 2013–2017 гг. рост урожайности озимой пшеницы и кукурузы в России составил 37 и 35% соответственно, по сравнению с 2003–2007 гг. (Pinke et al., 2022), что значительно повышает возможности управления органическим углеродом почвы даже при сохранении современных технологий хозяйствования.

Использованный в настоящем исследовании подход дает возможность рассмотреть зональные особенности управления запасами углерода пахотных почв. Согласно прогнозам, полученным по глобальной климатической модели HadCM3 и модели RothC (Romanenkov et al., 2007), для почв при неизменном хозяйствовании северо-западная часть ЕТР способна накопить за 35 лет 4–8 т/га С, то есть около 0.11–0.23 т/га в год, при практически постоянной скорости секвестрации углерода до 2030-х годов, после чего происходит замедление или снижение темпов накопления органических веществ. Для значительной части контуров Московской, Калужской, Брянской, Костромской,

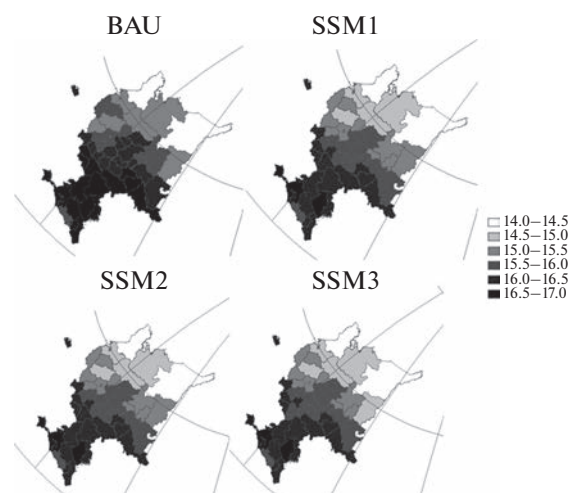


Рис. 3. Средняя неопределенность скорости секвестрации почвенного углерода по областям ЕТР при сохранении неизменного землепользования (BAU) и при трех сценариях прироста почвенного углерода в результате реализации стратегий устойчивого управления почвенными ресурсами (SSM 1–3), где предполагалось увеличение поступающего в почву органического вещества на 5, 10 и 20% соответственно. Неопределенность была представлена в виде половины 95% доверительного интервала, деленной на среднее значение показателя.

Кировской, Ивановской и Владимирской областей ожидается поддержание запасов углерода. Полученные в настоящем исследовании данные о возможности накопления в среднем около 1 т/га С агродерново-подзолистыми почвами зоны средней и южной тайги за 20-летний период соответствуют накоплению примерно 3–5% запасов углерода средне- и тяжелосулинистыми разностями в типичных агроценозах. Такое изменение находится на уровне точности мониторинговых исследований.

Необходимо отметить, что прямое сопоставление результатов, полученных в данном исследовании и расчетов, выполненных ранее для пахотных почв ЕТР для прогноза изменения запасов почвенного органического углерода до 2070 г. (Романенков и др., 2009), вряд ли возможно, несмотря на использование одной и той же динамической модели RothC. Основными отличиями ранее проведенного исследования при работе модели являлся расчет поступления углерода: он оценен по разным эмиссионным сценариям на основе расчетов урожайности динамической моделью Климат–Почва–Урожай с учетом влияния изменения климата и оптимизации условий минерального питания. Адаптационные сценарии были рассчитаны с помощью экономической региональной модели.

Для черноземной зоны (обыкновенные и южные подтипы) прогнозируемое накопление не превысит 0.15 т/га или примерно 0.2–0.3% от об-

щих запасов почвенного углерода за 20 лет (см. табл. 2). Это означает, что понижения урожайности одной культуры в севообороте ниже планируемой (при неблагоприятном вегетационном периоде, поражении вредителями или болезнями) будет достаточно для снижения накопленных ранее запасов углерода. Из анализа региональных прогнозных оценок скорости секвестрации углерода, приводимых (Herzfeld et al., 2021) до конца XXI в. видно, что при неизменных запасах углерода разброс значений скорости секвестрации углерода составляет $\pm 0.1-0.15$ т/га. Прогноз для черноземной зоны, полученный в работе (Romanenkov et al., 2007), оценивает данную область как территорию с потенциальными потерями углерода, составляющую до $0.06-0.17$ т С/га в год и выше для Центральной Черноземной зоны ЕТР. Тем не менее, прогнозируемое в работе (Romanenkov et al., 2007) снижение наблюдается главным образом после 2040 г., что частично может объясняться динамикой биоклиматического потенциала, достигающего максимальных значений в этот период, что влияет на количество поступающего в почву углерода с растительными остатками, а также изменением условий для минерализации органического вещества. Можно предполагать, что в период 2020–2040 гг. абсолютные потери будут существенно меньше.

Прогнозные оценки скорости секвестрации углерода для неизменного хозяйствования (см. рис. 1) показывают, что только Тверская область может отвечать критерию 4 промилле (Minasny et al., 2017) в 2020–2040 гг., при условии начального запаса углерода 25 т/га и ниже, что может соответствовать легким агродерново-подзолистым почвам типичных агроценозов.

Секвестрация углерода при альтернативных сценариях хозяйствования SSM2 и SSM3 может возрасти в 2.5–2.7 раз для агродерново-подзолистых и агросерых почв и более чем в 4 раза для агрочерноземов лесостепи. Эти результаты частично совпадают с прогнозами в работе (Romanenkov et al., 2007), где скорость депонирования для восточной части Центрального федерального округа (Ярославская, Костромская, Ивановская, Владимирская, Рязанская области), а также в таких приволжских регионах, как Ульяновская область и Мордовская республика может возрасти до 0.14 т/га в год до 2035 г. В случае реализации сценариев SSM2 и SSM3 расширяется территория, на которой возможна дополнительная секвестрация углерода, но условие 4 промилле обеспечивается в основном при сценарии SSM3 для ряда территорий Восточной части Центрального и Приволжского ЦО, находящихся в зоне лесостепи (см. рис. 1). Начальный запас углерода в выщелоченных и оподзоленных черноземах должен составлять около 60 т/га. На Северном Кавказе увеличение секвестрации углерода прогнозируется в

республиках Дагестан, Карачаево-Черкессия и Адыгея, но, вероятно, оно составит ниже 4 промилле, поскольку скорость секвестрации углерода даже при сценарии SSM3 агрокаштановыми и агрочерноземными почвами данных территорий ниже, чем требуется при ожидаемых запасах углерода в них.

Полученные результаты согласуются с оценками скорости секвестрации углерода при внедрении различных углеродсберегающих приемов в агротехнологиях, приводимыми в работе (Lugato et al., 2014) для территории Европы. Оценки составляли $0.1-0.25$ т/га в год в 2020 г., снижаясь к 2050 г. до $0.05-0.15$ т/га.

Важным фактором является доля углерода почвы, потерянная в результате распашки, поскольку почвы, сравнительно более бедные органическим веществом, будут накапливать его быстрее в сходных природно-климатических условиях при увеличении количества поступающего органического материала. В исследовании (Chernova et al., 2020) потери углерода из естественных почв при распашке для различных территорий ЕТР оценены в 24% для южной тайги и степной зоны и 37% для лесостепи. Данное обстоятельство может также влиять на наибольшее увеличение скорости секвестрации углерода, прогнозируемое при внедрении сценария SSM3 по сравнению с BAU в зоне лесостепи.

Методика, предложенная для расчетов потенциала секвестрации органического углерода верхним 30-сантиметровым слоем пахотных почв ФАО и использованная в настоящей статье, не может считаться исчерпывающей для национальных расчетов, поскольку методика ставит задачей унифицированный расчет Глобальной карты секвестрации почвенного углерода. В частности, проблемными моментами моделирования является отсутствие связи прогнозной урожайности культур с агроклиматическими условиями, задаваемыми обычно взаимосвязью данных эмиссионных сценариев и динамическими моделями роста и развития культур, а также невозможность проверки эффективности адаптационных углеродсберегающих приемов в агротехнологиях и оценка длительности такого процесса (Lugato et al., 2014; Pinke et al., 2022; Romanenkov et al., 2007; Romanenkov et al., 2019). Для учета таких факторов необходимо получить зависимости прироста урожайности в ответ на воздействие, учитывающие зональные почвенно-климатические особенности и специфику отклика отдельных групп культур, а затем скорректировать оценки поступления углерода с растительными остатками в почву. При использовании любой динамической углеродной модели это требует проведения отдельных исследований, уточняющих имеющиеся региональные оценки (Paus-tian et al., 2019b).

Высокий потенциал накопления органических веществ пахотными почвами может быть достигнут только при применении комплекса агротехнологических решений, включающих не только управление пожнивными остатками, но и применение органических удобрений и мелиорантов, включая биоуголь, осадки сточных вод, компост, а также внедрение приемов почвозащитной обработки, что позволяет приблизиться к обеспечению цели 4 промилле (Amelung et al., 2020; Herzfeld et al., 2021).

Тем не менее, при наличии ранее полученных оценок потенциала секвестрации, базирующихся на наземных наблюдениях, показавших, что возможность управления запасами органического углерода почв в сельскохозяйственном секторе производства географически зависима (Romanenkov et al., 2007), реализована возможность сравнения их с новыми данными.

Проведенное исследование может явиться основой для расширенного прогноза при включении дополнительной информации, способной уточнить локальный потенциал секвестрации углерода. Выделение регионов, где стратегия устойчивого управления почвенными ресурсами обеспечит наибольшее накопление углерода в почве, должно базироваться на анализе почвенных ареалов как основных картографических единиц, уточняясь при учете местных условий, в том числе возможностей управления поступлением растительных остатков в используемых агротехнологиях, устойчивостью урожайности, а также экономической обоснованности адаптационных решений (Amelung et al., 2020).

ВЫВОДЫ

Для ЕТР оценена потенциальная возможность секвестрации углерода пахотными почвами в слое 0–30 см в 2020–2040 гг. Прогноз и полученная на его основе серия карт базируется на анализе почвенных ареалов как основных картографических единиц. Перспективной для секвестрации почвенного углерода территорией, на которой целесообразно в первую очередь планировать увеличивать урожайность, либо соотношение побочной к основной продукции является зона лесостепи, где возможно обеспечение устойчивой секвестрации углерода в рассматриваемый 20-летний период. Тем не менее, при стратегии неизменного хозяйствования невозможно достичь показателя 4 промилле, обеспечивается накопление примерно 3–5% запасов почвенного углерода средне- и тяжелосуглинистыми разностями агроденородозольных почв в типичных агроценозах таежной зоны. Увеличение поступления углерода на 5% может обусловить рост секвестрации углерода в два раза, а увеличение на 20% – в пять раз.

Южнее, в зоне распространения агрочерноземов, можно ожидать поддержания текущих запасов углерода при условии сохранения современного уровня продуктивности агроценозов до 2040 г. В последнем случае возможно обеспечение условия 4 промилле для ряда территорий восточной части Центрального и Приволжского федеральных округов. Данная стратегия увеличения поступления растительных остатков оказывается также благоприятной для накопления органического углерода в зоне степи и сухой степи, в количестве 2.5–3 т С/га в течение 20 лет. Тем не менее, полученные оценки можно рассматривать как потенциальные, поскольку проанализированные сценарии хозяйствования не могут обеспечить достижение цели 4 промилле для большинства пахотных территорий ЕТР, то есть рассматриваться как агротехнологии с негативной эмиссией парниковых газов в соответствии с целями по снижению климатических изменений в соответствии с Парижским соглашением 2015 г. Полученные результаты можно рассматривать как оценку потенциальной возможности секвестрации, которая может быть уточнена на основе областных и региональных прогнозов накопления углерода почвами при применении стратегии устойчивого управления почвенными ресурсами. Оценка эффективности дополнительного комплекса агротехнологических приемов, обеспечивающих усиление накопления углерода почвами, должна отрабатываться при учете местных условий в используемых агротехнологиях. Одним из перспективных показателей в подобных оценках может стать учет доли потерянного за время распашки почвенного углерода как показателя, влияющего на изменение скорости секвестрации углерода при адаптационных решениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and

the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова В.В., Глезер О.Б., Грачева Р.Г. и др.* Воздействие изменения климата на человеческий потенциал, экономику и экосистемы: Докл. к XXIII Ясинской (Апрельской) междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 2022 г. Нац. исслед. ун-т “Высшая школа экономики”. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. 76 с.
- Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
- Глушков И.В., Лупачик В., Прищепов А.В., Потанов П.В., Пукинская М.Ю., Ярошенко А.Ю., Журавлева И.В.* Картирование заброшенных земель в восточной Европе с помощью спутниковых снимков Landsat и Google Earth Engine // Современная наука о растительности: Материалы науч. конф. (Москва, октябрь 2019). М., 2019. С. 35–37.
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 108. С. 175–218. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
- Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М.* Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 5–32. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Когут Б.М., Семенов В.М.* Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюл. Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103–124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
- Кренке А.Н.* Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации // Принципы экологии. 2020. № 3. С. 16–27. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10942>
- Романенков В.А.* Динамика запасов почвенного углерода в агроценозах Европейской территории России (по данным длительных агрохимических опытов): Дисс. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 403 с.
- Романенков В.А., Романенко И.А., Рухович Д.И., Королева П.В., Сиротенко О.Д., Шевцова Л.К.* Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России / ред. В.Г. Сычев. М.: ВНИИА, 2009. 95 с.
- Романовская А.А.* Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
- Романовская А.А.* Оценка неопределенности инвентаризации выбросов парниковых газов в сельском хозяйстве России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2007. Т. XXI. С. 44–57.
- Россия в цифрах. 2020: Краткий стат. сб. / под ред. П.В. Малкова. М.: Росстат, 2020. 550 с.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / общ. ред. И.А. Шумаков. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с.
- Урусевская И.С., Алябина И.О., Шоба С.А.* Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. М-б 1 : 8 000 000. Пояснительный текст и легенда к карте: Учеб. пособие / отв. ред. И.С. Урусевская. М.: МАКС Пресс, 2020. 100 с.
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Шенященко Д.Г.* Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030047>
- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A.* A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia // Global Environ. Change. 2007. Vol. 17. P. 429–444. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Amelung W., Bossio D., de Vries W., Kögel-Knabner I. et al.* Towards a global-scale soil climate mitigation strategy // Nature Communications. 2020. Vol. 11. № 5427. P. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A.* Historical trends in the amount and structure of organic carbon stocks in natural and managed ecosystems in European Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 438. № 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012005>
- Dankers R., Anisimov O., Falloon P., Gornall J., Reneva S., Wiltshire A.* Climate impacts in Russia: changes in carbon storage and exchange. UK: Met Office Hadley Centre, 2010. 112 p.
- Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C.D., Smith J., Hemming D., Challinor A.* Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats // Climate Change and Crops / S.N. Singh (Ed.). Berlin: Springer, 2009. Chapter 5. P. 81–111.
- Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M. et al.* How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios // Biogeosciences. 2012. Vol. 9. № 8. P. 3151–3171. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
- Harden J.W., Hugelius G., Ahlstrom A. et al.* Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter // Global Change Biology. 2018. Vol. 24. P. e705–e718. <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>
- Harris I., Osborn T.J., Jones Ph., Lister D.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate

- climate dataset // Scientific Data. 2020. № 7. P. 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Herzfeld T., Heinke J., Rolinski S., Müller C.* Soil organic carbon dynamics from agricultural management practices under climate change // *Earth System Dynamics*. 2021. Vol. 12. № 4. P. 1037–1055. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1037-2021>
- Lieth H.* Modeling the Primary Productivity of the World // *Primary productivity of the biosphere. Ecological studies, analysis and synthesis / H. Lieth, R.H. Whittaker (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975. P. 237–263.*
- Lugato E., Bampa F., Panagos P., Montanarella L., Jones A.* Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. № 11. P. 3557–3567. <https://doi.org/10.1111/gcb.12551>
- Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al.* Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 2338 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B. et al.* Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J. et al.* Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system // *Carbon Management*. 2019. Vol. 10. № 6. P. 567–587. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A.* Soil C sequestration as a biological negative emission strategy // *Front. Clim.* 2019. Vol. 1. № 8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Pinke Z., Decsi B., Jámbor A., Kardos M.K., Kern Z., Kozma Z., Ács T.* Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 7374. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10670-6>
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H. et al.* SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // *Soil*. 2021. Vol. 7. № 1. P. 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P.* Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia // *Geoderma Regional*. 2019. Vol. 17. № e00221. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2019.e00221>
- Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A.* Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance” // *Reg. Environ. Change*. 2007. Vol. 7. P. 93–104. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
- Smith J.O., Smith P., Wattenbach M. et al.* Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080 // *Global Change Biology*. 2005. Vol. 11. № 12. P. 2141–2152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
- Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Watson R.T., Noble I.R., Bolin B. et al.* Land use, land use change, and forestry. IPCC special report. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 375 p.

Forecasting the Carbon Stock Dynamics in the Soils of Cultivated Croplands in European Russia in the Context of the Low-Carbon Development

V. A. Romanenkov^{1,2}, Yu. L. Meshalkina^{1,3,*}, A. Yu. Gorbacheva¹, V. A. Dobrovolskaya¹, and A. N. Krenke⁴

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Moscow, Russia*

³*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia*

⁴*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: jlmesh@list.ru

Soil organic carbon sequestration potential in the cropland top soil layer (0–30 cm) of European Russia was assessed based on soil-ecological zoning using one of the most common global models of soil organic matter the Rothamsted dynamic carbon model (RothC) and open-access global databases such as Climatic Research Unit (CRU) TS v4.05, 1901–2020, SoilGrids250m 2.0 and time-series MODIS (MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices) NDVI and EVI. Data from the national Soil Organic Carbon Map at 0–30 cm depth were used to estimate the current carbon stocks. FAO unified technical specifications and guidance for the generation of national Soil Carbon Sequestration Map was used as the current study mapping approach. The average rate of carbon sequestration by natural zones under the business-as-usual scenario ranged from 0.076 to –0.002 t/ha per year, decreasing from northern taiga zone to semidesert. A 5% increase in carbon input due to carbon-conservation technologies adoption can result in a twofold increase in carbon capture, and a 20% increase in carbon capture can result in a fivefold increase. A two-fold increase in the rate of C sequestration from the southern taiga with a maximum in the broad-leaved forests zone, followed by 1.5 times decrease or more in the steppe and dry-steppe zone was found with increasing carbon input to the soil. The FAO meth-

odology determines, with a spatial resolution of 1 km, contour lines that have the highest and lowest potential for carbon stock changes when adopting sustainable soil management.

Keywords: carbon sequestration, carbon-conservation technologies in agriculture, climate change, RothC model, agricultural land, carbon balance, “4 per 1000” initiative

REFERENCES

- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., Golubev G., Kirilenko A. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Glob. Environ. Change*, 2007, vol. 17, pp. 429–444. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006>
- Amelung W., Bossio D., de Vries W., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Amundson R., Bol R., Collins C., Lal R., Leifeld J., Minasny B., Pan G., Paustian K., Rumpel C., Sanderman J., van Groenigen J.W., Mooney S., van Wesemael B., Wander M., Chabbi A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, no. 5427, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation. *Pochvoved.*, 2021, no. 3, pp. 273–286. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1064229321030042>
- Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Historical trends in the amount and structure of organic carbon stocks in natural and managed ecosystems in European Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 438, no. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012005>
- Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge; New York: CUP, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Dankers R., Anisimov O., Falloon P., Gornall J., Reneva S., Wiltshire A. *Climate Impacts in Russia: Changes in Carbon Storage and Exchange*. UK: Met Office Hadley Centre, 2010. 112 p.
- Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C.D., Smith J., Hemming D., Challinor A. Carbon sequestration and greenhouse gas fluxes in cropland soils – climate opportunities and threats. Chapter 5. In *Climate Change and Crops*. Singh S.N., Ed. Berlin: Springer, 2009, pp. 81–111.
- Glushkov I.V., Lupachik V., Prishchepov A.V., Potapov P.V., Pukinskaya M.Yu., Yaroshenko A.Yu., Zhuravleva I.V. Mapping of abandoned lands in Eastern Europe using Landsat and Google Earth Engine satellite images. In *Materialy nauchnoi konferentsii “Sovremennaya nauka o rastitel’nosti”* [Materials of the Sci. Conf. “Modern Science of Vegetation”]. Moscow, 2019, pp. 35–37. (In Russ.).
- Gottschalk P., Smith J.U., Wattenbach M., Bellarby J., Stehfest E., Arnell N., Osborn T.J., Jones C., Smith P. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. *Biogeosci.*, 2012, vol. 9, no. 8, pp. 3151–3171. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>
- Harden J.W., Hugelius G., Ahlström A., Blankinship J.C., Bond-Lamberty B., Lawrence C.R., Loisel J., Malhotra A., Jackson R.B., Ogle S., Phillips C., Ryals R., Todd-Brown K., Vargas R., Vergara S.E., Cotrufo M.F., Keiluweit M., Heckman K.A., Crow S.E., Silver W.L., DeLonge M., Nave L.E. Networking our science to characterize the state, vulnerabilities, and management opportunities of soil organic matter. *Glob. Change Biol.*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. e705–e718. <https://doi.org/10.1111/gcb.13896>
- Harris I., Osborn T.J., Jones Ph., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data*, 2020, no. 7, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Herzfeld T., Heinke J., Rolinski S., Müller C. Soil organic carbon dynamics from agricultural management practices under climate change. *Earth Syst. Dyn.*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 1037–1055. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1037-2021>
- IPCC, 2000. Land Use, Land Use Change, and Forestry. IPCC Special Report.* Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J., Eds. Cambridge: CUP, 2000. 375 p.
- Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N. Methodological approaches to the formation of a unified national system of monitoring and accounting of carbon balance and greenhouse gas emissions on lands of the agricultural fund of the Russian Federation. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2021, vol. 108, pp. 175–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
- Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoi V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M. Global climate and soil cover – implications for land use in Russia. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2021, vol. 107, pp. 5–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
- Ivanov A.L., Stolbovoi V.S. The initiative “4 per 1000” – a new global challenge for the soils of Russia. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2019, vol. 98, pp. 185–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
- Kogut B.M., Semenov V.M. Estimation of soil saturation with organic carbon. *Byull. Pochv. Inst. Dokuchaeva*, 2020, vol. 102, pp. 103–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
- Krenke A.N. Identification of invariant states of agricultural landscapes based on hierarchical factor analysis of remote sensing information. *Printsiy Ecol.*, 2020, no. 3, pp. 16–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10942>

- Lieth H. Modeling the Primary Productivity of the World. In *Primary productivity of the biosphere. Ecological studies, analysis and synthesis*. Lieth H., Whittaker R.H., Eds. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975, pp. 237–263.
- Lugato E., Bampa F., Panagos P., Montanarella L., Jones A. Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Glob. Change Biol.*, 2014, vol. 20, no. 11, pp. 3557–3567. <https://doi.org/10.1111/gcb.12551>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke Sh., Richerde-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbov V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui Ch.-Ch., Vågen T.-G., van Wesemael B., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 2017, vol. 292, pp. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Paustian K., Collier S., Baldock J., Burgess R., Creque J., DeLonge M., Dungait J., Ellert B., Frank S., Goddard T., Govaerts B., Grundy M., Henning M., Izaurralde R.C., Madaras M., McConkey B., Porzig E., Rice Ch., Searle R., Seavy N., Skalsky R., Mulhern W., Jahn M. Quantifying carbon for agricultural soil management: from the current status toward a global soil information system. *Carbon Manag.*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 567–587. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1633231>
- Paustian K., Larson E., Kent J., Marx E., Swan A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Front. Clim.*, 2019, vol. 1, no. 8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Pinke Z., Decsi B., Jámbor A., Kardos M.K., Kern Z., Kozma Z., Ács T. Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, no. 7374. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10670-6>
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G.B.M., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Romanenkov V.A. Dynamics of Soil Carbon Reserves in Agroecosystems of the European Territory of Russia (According to Long-Term Agrochemical Experiments). *Doc. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Lomonosov MSU, 2011. 403 p.
- Romanenkov V., Belichenko M., Petrova A., Raskatova T., Jahn G., Krasilnikov P. Soil organic carbon dynamics in long-term experiments with mineral and organic fertilizers in Russia. *Geoderma Reg.*, 2019, vol. 17, no. e00221, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00221>
- Romanenkov V.A., Romanenko I.A., Rukhovitch D.I., Koroleva P.V., Sirotenko O.D., Shevtsova L.K. *Prognoz dinamiki zasobov organicheskogo ugleroda pakhotnykh zemel' Evropeiskoi territorii Rossii* [Forecast of the Organic Carbon Dynamics of Arable Soil of the European Territory of Russia]. Moscow: VNIIA Publ., 2009. 95 p.
- Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovitch D.I., Romanenko I.A. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance”. *Reg. Environ. Change*, 2007, vol. 7, pp. 93–104. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
- Romanovskaya A.A. Organic carbon in the soils of the fallow lands of Russia. *Pochvoved.*, 2006, no. 1, pp. 52–61. (In Russ.).
- Romanovskaya A.A. Uncertainty assessment of greenhouse gas inventory in agriculture of Russia. *Probl. Ecol. Monitor. Model. Ecosystem*, 2007, vol. 21, pp. 44–57. (In Russ.).
- Rossiya v tsifrakh, 2020: *Kratkii statisticheskii sbornik* [Russia in Numbers, 2020: a Short Statistical Collection]. Malkov P.V., Ed. Moscow: Rosstat, 2020. 550 p.
- Smith J.O., Smith P., Wattenbach M., Zaehle S., Hiederer R., Jones R.J.A., Montanarella L., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Ewert F. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Glob. Change Biol.*, 2005, vol. 11, no. 12, pp. 2141–2152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
- Technical Specifications and Country Guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*. Rome: FAO, 2020. 34 p.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Obshcheye rezyume* [The Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General summary]. Shumakov I.A., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2022. 124 p.
- Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. *Karta pochveno-ekologicheskogo raionirovaniya Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 8000000. Poyasnitel'nyi tekst i legenda k karte: Uchebnoe posobie* [Map of Soil and Ecological Zoning of the Russian Federation. Scale 1 : 8000000. Explanatory Text and Legend to the Map: Training Manual]. Urusevskaya I.S., Ed. Moscow: MAKS Press Publ., 2020. 100 p.
- Vinogradova V.V., Glezer O.B., Gracheva R.G., Dorina A.L., Zolotokrylin A.N., Kotov A.V., Kurichev N.K., Morgunov B.A., Potashnikov V.Yu., Ptichnikov A.V., Proskuryakova L.N., Safonov G.V., Safonova Yu.A., Semakina A.A., Semiletov I.P., Sizonov A.G., Stetsenko A.V., Titkova T.B., Shakhova N.E., Sheludkov A.V. *Vozdeistvie izmeneniya klimata na chelovecheskii potentsial, ekonomiku i ekosistemy: doklad k 23 Yasinskoj (Aprel'skoj) mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva* [The Impact of Climate Change on Human Potential, Economy and Ecosystems: a Report for the 23rd Yasin (April) International Scientific Conference on the Problems of Economic and Social Development]. Proskuryakova L.N., Ed. Moscow: Vyssh. Shk. Econ. Publ., 2022. 76 p.
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Rosgidromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 60 p.

УДК 551.558.3

ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОСУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ И СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

© 2023 г. **А. А. Сири́н^а**, **М. А. Медведева^{а, *}**, **В. Ю. Иткин^{а, б}**

^аЦентр сохранения и восстановления болотных экосистем, Институт лесоведения Российской академии наук, Успенское, Московская область, Россия

^бРоссийский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

*e-mail: evezza@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Осушенные торфяники являются значительным источником поступления парниковых газов (ПГ) в атмосферу. В случае оставления пользователем, они становятся наиболее вероятными объектами торфяных пожаров. Эффективный путь сокращения эмиссии ПГ и предотвращения торфяных пожаров на неиспользуемых осушенных торфяниках — вторичное обводнение и заболачивание. Это может внести весомый вклад в реализацию Парижского соглашения по климату в рамках сектора “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство” и, в конечном счете, в смягчение изменений климата. Представлен подход к оценке сокращения выбросов ПГ после вторичного обводнения, применимый для учета на национальном и региональном уровнях, а также для конкретных проектов обводнения. Он включает методику определения эффективно обводненных площадей, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья, приложения к ним коэффициентов эмиссии ПГ, предлагаемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата, а также оценку неопределенности. Подход был использован при включении с 2020 г. вторично обводненных торфяников в Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. Представлена оценка сокращения выбросов ПГ на примере участка торфяника площадью 1.5 тыс. га программы обводнения пожароопасных торфяников в Московской области (2010–2013 гг.). Сокращение выбросов CO₂ составило накопительным итогом к 2022 г. 33.4 тыс. т (с учетом потоков закиси азота, выноса растворенного углерода и увеличения эмиссии CH₄ — 20 тыс. т CO₂-экв.) и по прогнозу достигнет почти 113 (68) тыс. т к 2050 г. Отмечены показатели сокращения выбросов ПГ, пока не включенные в рассмотрение, и возможные пути их учета в дальнейшем.

Ключевые слова: изменение климата, смягчение, торфяные болота, мультиспектральные спутниковые снимки, добыча торфа, Парижское соглашение по климату, Национальный кадастр

DOI: 10.31857/S258755662304012X, EDN: BFZXYJ

ВВЕДЕНИЕ

Болота играют особую роль в формировании газового состава атмосферы. Их запас углерода (С) больше углерода биомассы лесов, и во всех природных зонах болота многократно опережают зональные экосистемы по запасу углерода на единицу площади (Joosten et al., 2016). Они лидируют на суше как долговременные накопители углерода, уступая первенство на планете только океаническим осадкам (Assessment ..., 2008). В то же время болота — основной природный источник метана (CH₄) на суше, а некоторые выделяют и закись азота (N₂O) — парниковые газы (ПГ) с более высоким, чем у диоксида углерода (CO₂), потенциалом глобального потепления (ПГП)¹. Время пре-

бывания CH₄ в атмосфере существенно короче, чем CO₂, и в сто- и тысячелетнем масштабе торфяные болота оказывают охлаждающее влияние на глобальный климат (Frolking and Roulet, 2007). В периоды межледниковий они, возможно, способствуют наступлению оледенений (Joosten et al., 2016). Если рассматривать короткие временные интервалы (десятки лет), в том числе влияние хозяйственной деятельности на климат и меры по смягчению его изменений (mitigation), необходим учет метана, как и других ПГ, связанных с ан-

¹ Составляет за 100-летний период для CH₄ и N₂O 25 и 298 соответственно (<https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>), периодически корректируется в сторону увеличения.

тропогенно-измененными болотами [торфяниками – (Минаева, Сирин, 2011; Сирин, 2022)]. В зависимости от категории осушенных торфяников Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) предполагают учет CO_2 , CH_4 , N_2O и растворенного углерода (dissolved organic carbon – DOC) как климатических агентов, не регулируемых Монреальским протоколом (IPCC, 2014).

Осушение болот для любых целей изменяет водный режим болот и соотношение периодически аэробного (так называемого активного) и постоянно анаэробного (инертного) горизонтов торфа. Меняются потоки ПГ, степень трансформации которых, а также потери углерода зависят от интенсивности дренажа, цели и характера использования (Laine et al., 1996; Laine and Sirin, 2008). Наиболее сильное воздействие оказывает добыча торфа, особенно самым распространенным фрезерным способом. Он предполагает создание каналов по контуру торфяника, его разделение магистральными и валовыми каналами глубиной до 3 м и эксплуатационное осушение картовыми глубиной до 1.5 м, углубляемыми по мере поверхностно-послойной сработки нафрезерованного и высохшего естественным путем торфа. При подготовке к добыче торфяники очищаются от растительности (Сирин, 2022).

Заброшенные без рекультивации нормативно или частично выработанные поля фрезерной добычи торфа годами не зарастают растительностью, выделяя CO_2 , CH_4 , иногда N_2O , теряя углерод при водной и ветровой эрозии. При отсутствии пользователя, заинтересованного и обеспечивавшего обязательные противопожарные мероприятия, они становятся объектами торфяных пожаров, как и заброшенные площади, осушенные для сельского хозяйства (Сирин и др., 2011). Эмиссия CO_2 из осушенных торфяников, используемых в сельском хозяйстве, обычно выше, что связано с подготовкой и обработкой почвы и зависит от характера использования – пашня, сенокосы или пастбища. Удобрение, а также обогащение почвы при выпасе стимулируют разложение органического вещества почвы, появление или усиление эмиссии N_2O . Наибольшие потери С характерны для пахотных земель, где он дополнительно теряется при ветровой и водной эрозии. При этом осушение не прекращает эмиссию CH_4 , которая происходит интенсивно из осушительной сети и в некотором количестве при временном увлажнении почвы (Суворов и др., 2010; Чистотин и др., 2006, 2016). Меньшие потери С и эмиссия ПГ происходят при лесосушении. Сказывается ограниченная интенсивность осушения, отсутствие целенаправленного уничтожения естественного древостоя и увеличение

его продуктивности после осушения. Поэтому выводы о влиянии лесосушения на общий баланс ПГ разнятся, даже по знаку (Escobar et al., 2022; Päivänen and Hanell, 2012; Peatlands ..., 2008; Rydin and Jeglum, 2013).

Значительные потери С и, соответственно, выбросы CO_2 происходят при торфяных пожарах. Они могут происходить в сухие годы и на естественных болотах, однако чаще на осушенных и заброшенных торфяниках (Сирин и др., 2011). При почвенных (торфяных) лесных пожарах происходит массовая гибель древостоя из-за повреждения сосущих корней (Вомперский и др., 2007), а также значительная потеря почвенного С, величина которой растет с интенсивностью осушения (Глухова, Сирин, 2018). Осушенные торфяники выделяются количеством горючих материалов на единицу площади (Huang and Rein, 2017; Sirin et al., 2021a). Из-за сгорания торфа единовременные выбросы CO_2 при лесоторфяном пожаре могут достигать $400 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$ и выше, а с учетом потерь фитомассы древостоя – более $600 \text{ т } \text{CO}_2 \text{ га}^{-1}$ (Сирин и др., 2019; Sirin et al., 2021a).

Национальные кадастры антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, учитывают несколько категорий земель, которые могут включать осушенные торфяники: лесные, пахотные, пастбища, сенокосы; в разделе водно-болотные угодья (wetlands) – торфяники, осушенные для добычи торфа – подготовленные, разрабатываемые и неиспользуемые (IPCC, 2006). Дополнение по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК (IPCC, 2006) уточнило методики учета осушенных торфяников и добавило рекомендации по учету выбросов из вторично обводненных торфяников (rewetted peatlands). Уточнение 2019 г. к Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. (IPCC, 2019a) внесло дополнения для затопленных земель (flooded lands), которые относятся к категории водно-болотные угодья и могут возникать при обводнении торфяников.

Осушено примерно 10% мировых болот. Занимая ~0.4% поверхности суши, осушенные торфяники выбрасывают в результате микробного окисления торфа и торфяных пожаров ~2 Гт CO_2 . Это ~5% всех антропогенных выбросов ПГ (Joosten et al., 2016), или более 1/4 выбросов, связанных с сектором “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство” (ЗИЗЛХ) (Tubiello et al., 2016). Есть мнение, что в результате осушения и освоения торфяники планеты уже на рубеже 1960 г. сменили статус глобального поглотителя на источник ПГ. Без принятия соответствующих мер в отношении осушенных торфяников связанная с ними эмиссия ПГ в 2020–2100 гг.

может составить 12–41% объема выбросов ПГ, который необходимо сократить для достижения целей Парижского соглашения по климату (Leifeld et al., 2019).

Наиболее эффективный способ снижения выбросов ПГ из осушенных торфяников – их вторичное обводнение (rewetting) (Leifeld and Menichetti, 2018). В Специальном докладе МГЭИК “Изменение климата и земля” (IPCC, 2019b) отмечено, что восстановление торфяных болот направлено на наиболее богатые углеродом земли. Поэтому требуются меньшие площади, что, соответственно, имеет меньшие последствия для землепользования. Восстановление болот требует в 3 раза меньше азота по сравнению с мерами по сохранению аналогичного количества С в минеральных почвах (Leifeld and Menichetti, 2018). Вторичное обводнение торфяников может значительно сократить выбросы ПГ (Wilson et al., 2016), даже несмотря на увеличение эмиссии CH_4 (Günther et al., 2020), предотвращает торфяные пожары (Granath et al., 2016; Sirin et al., 2020), способствует восстановлению биоразнообразия (Minaeva et al., 2017), гидрологических (Ahmad et al., 2020) и других экосистемных услуг (Bonn et al., 2014). Однако сравнительная различная мера по смягчению изменений климата, МГЭИК (IPCC, 2019b) отметило восстановление болот только средним уровнем достоверности. Позитивный эффект вторичного обводнения а priori очевиден, однако для его подтверждения пока недостаточно научно подтвержденных данных.

Целью работы было рассмотреть вторичное обводнение торфяников в Российской Федерации, разработать подходы к оценке его эффективности с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов, представить их применимость на примере конкретного объекта обводнения и показать возможные пути уточнения этой оценки.

ВТОРИЧНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ТОРФЯНИКОВ

Россия лидирует в мире по площади торфяных болот (Global ..., 2023)². Они занимают более 8%, а вместе с мелкоотторфованными землями (торф <30 см) – более 1/5 территории страны (Вомперский и др., 2005). Большинство болот сохранилось в естественном состоянии, однако не менее 8 млн га было осушено для сельского и лесного хозяйства, а также для добычи торфа (A Quick ..., 2009). Осушенные торфяники расположены преимущественно на Европейской территории страны (ЕТР) (Sirin et al., 2017; Tanneberger et al., 2017; 2021), на юге Западной Сибири, юге Дальнего Востока (A Quick ..., 2009). На ЕТР доля осушенных

и освоенных торфяников составляет ~5%, что лишь в 2 раза меньше среднего показателя по Европе (Tanneberger et al., 2021), а в центре и других регионах может достигать и превышать 50% (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). Добычей торфа было изменено по одним оценкам 0.85–1.5 млн га (A Quick ..., 2009), а по другим – 0.9 млн га торфяников, 70% из которых приходится на добычу торфа фрезерным способом (Перспективное ..., 2013). Разброс оценок связан с отсутствием упорядоченной статистики, нахождением и переводом в разные категории земель после рекультивации или оставления их пользователем.

В советский период выработанные торфяники подлежали рекультивации, обычно для сельского хозяйства, реже – других целей. Это касалось преимущественно фрезерной добычи. Карьеры и другие объекты, не требующие интенсивного осушения и имевшие чаще небольшую площадь, заболачивались сами, принимая в дальнейшем болотный облик (Vozbrannaya et al., 2023). После развала торфяной промышленности в начале 1990-х годов рекультивация практически прекратилась (Сирин и др., 2011; A Quick ..., 2009). На 01.01.2000 г. площадь торфоразработок в России составила 242.3 тыс. га (Торфяные ..., 2001). Национальный кадастр антропогенных источников и поглотителей парниковых газов основывается на площадях торфоразработок за 2000–2007 гг., которые сокращались с 261 до 219 тыс. га (Романовская и др., 2014). Эти площади относятся преимущественно к фрезерной добыче. Другие способы имеют ограниченный масштаб, используются преимущественно на местном уровне и с большой долей вероятности не попадают в учет. Поэтому из-за недостатка статистических данных приведенные выше оценки ориентировочны. Следует учитывать, что МГЭИК (IPCC, 2014) рассматривает совместно торфоразработки, подготавливаемые к добыче, действующие и заброшенные. В нашей стране многие торфоразработки были переведены без рекультивации в другие категории земель, например, “вернулись” после прекращения аренды в лесной фонд. Поэтому реальная площадь торфоразработок, подлежащих учету согласно РКИК ООН, может быть выше. Зброшенны фрезерныя поля плохo зарастают растительностью, подвержены пожарам. В результате микробного окисления (без учета водной и ветровой эрозии, эмиссии CH_4 и N_2O , а также пожаров) они ежегодно теряют С, сопоставимый по величине с 10%, изымаемой при интенсивной добыче торфа (Суворов и др., 2015). Торфоразработки, включая заброшенные, могут выявляться по спутниковым данным, что может быть использовано для актуализации их площадей (Сирин и др., 2014), а также оценки текущего состояния (Медведева и др., 2017; Sirin et al., 2020).

² Global Peatland Database. Greifswald Mire Centre, 2023. <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html> (дата обращения 01.02.2023).

Российская Федерация отмечается как один из крупнейших после Индонезии и Европейского Союза источников парниковых газов из осушенных торфяников (Global ..., 2022). Методика расчета и обоснованность оценок вызывает вопросы, но масштаб проблемы не вызывает сомнения. При этом значительные площади осушенных и заброшенных торфяников обладают очевидным потенциалом вторичного обводнения для сокращения выбросов парниковых газов. Кроме этого, снижается пожарная опасность, повышается экологическая безопасность и потенциал адаптации к изменению климата.

Как и во многих странах, вторичное обводнение торфяников в России начиналось по инициативе экологических неправительственных организаций и других заинтересованных сторон для восстановления болотных экосистем, в первую очередь для восстановления биоразнообразия (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). Согласно Водному кодексу Российской Федерации (2006) (Водный ..., 2006) болота являются “водными объектами”, и “после окончания использования болота или его части проводится их рекультивация преимущественно путем обводнения и искусственного заболачивания” (п. 4, Ст. 57, ВК РФ 73-ФЗ). Однако эта норма обязательна только в отношении болот, включенных в реестр водных объектов, а многие из них продолжают находиться в других категориях земель, что усложняет юридическое согласование мероприятий по вторичному обводнению.

В последние два десятилетия основным движущим фактором вторичного обводнения неиспользуемых торфяников в стране стало предотвращение торфяных пожаров (Сирин и др., 2011). Они отличаются от других природных пожаров длительностью, выбросом опасных для человека продуктов горения и потерей углерода (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). Пионером масштабных работ по обводнению торфяников стал Национальный парк “Мещера” (Владимирская область). При его образовании в 1992 г. в его территорию было включено 14,9 тыс. га осушенных торфяников, в том числе 7,6 тыс. га нарушенных фрезерной добычей торфа (Vozbrannaya et al., 2023). За 2002–2022 гг. было обводнено более 9 тыс. га торфяников (Vozbrannaya et al., 2023), что практически прекратило пожары на их площадях (Сирин и др., 2011).

После катастрофических пожаров 2010 г. в центре ЕТР с осени 2010 по 2013 г. включительно было обводнено 77 осушенных, пожароопасных торфяников площадью 73 049,84 га (рис. 1). С конца 19 столетия торфяники в центральной части ЕТР использовались для добычи торфа, осушения для сельского и лесного хозяйства (A Quick ..., 2009; Sirin et al., 2017). После 1917 г., когда другие топливные ресурсы стали недоступны, торф по-

лучил первостепенное значение, в том числе для реализации плана электрификации ГОЭЛРО. Наиболее масштабная добыча развернулась в восточной части Московской области (Sirin et al., 2017). Во второй половине 20-го столетия стал преобладать фрезерный способ добычи торфа, а заброшенные нерекультивированные торфоразработки, по которым лидирует Московская область, стали впоследствии наиболее пожароопасными объектами также во Владимирской, Нижегородской, Рязанской, Тверской и других областях. Их дополнили неиспользуемые торфяники, осушенные для сельского хозяйства (Сирин и др., 2011). Масштабными торфяными пожарами были отмечены 1972, 2002 и, особенно, 2010 гг. (Sirin et al., 2020), когда сочетание аномальной жары и смога имело катастрофические последствия для здоровья и жизни людей, увеличив избыточную смертность на десятки тысяч человек (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020).

Программа обводнения пожароопасных торфяников Московской области стала самым масштабным вторичным обводнением осушенных торфяников в Северном полушарии (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). Работы проводились в несколько этапов, что касалось и отдельных объектов. В случае заброшенных торфоразработок планировалось преимущественно восстановление водно-болотных угодий. Для сельскохозяйственных земель была создана или восстановлена инфраструктура двустороннего регулирования водного режима как для предотвращения пожаров, так и для сохранения возможности возвращения этих земель в хозяйственный оборот. Строительство дамб, водосбросных плотин с затворами разной конструкции, водосливных плотин, дорожных переездов и других сооружений финансировалось из федерального бюджета, проектирование – Московской областью. В 2014 г. гидротехнические объекты были переданы специальной организации Московской области (Сирин и др., 2020). Статистика пожаров показала сокращение их числа и пройденной площади после обводнения, в том числе по сравнению с соседними регионами с близкой гидрометеорологической обстановкой (Sirin et al., 2020). Обводнение пожароопасных торфяников начало проводиться в Тверской, Нижегородской, Рязанской и других областях.

МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ОБВОДНЕНИЯ

Для оценки эффективности обводнения пожароопасных торфяников необходим их мониторинг. С учетом сложной проходимости и необходимости проведения минимум ежегодной оценки эффективно использование дистанционных данных. Мультиспектральные спутниковые данные хорошо зарекомендовали себя для анализа состояния торфяников [см. (Сирин и др., 2020)]. При

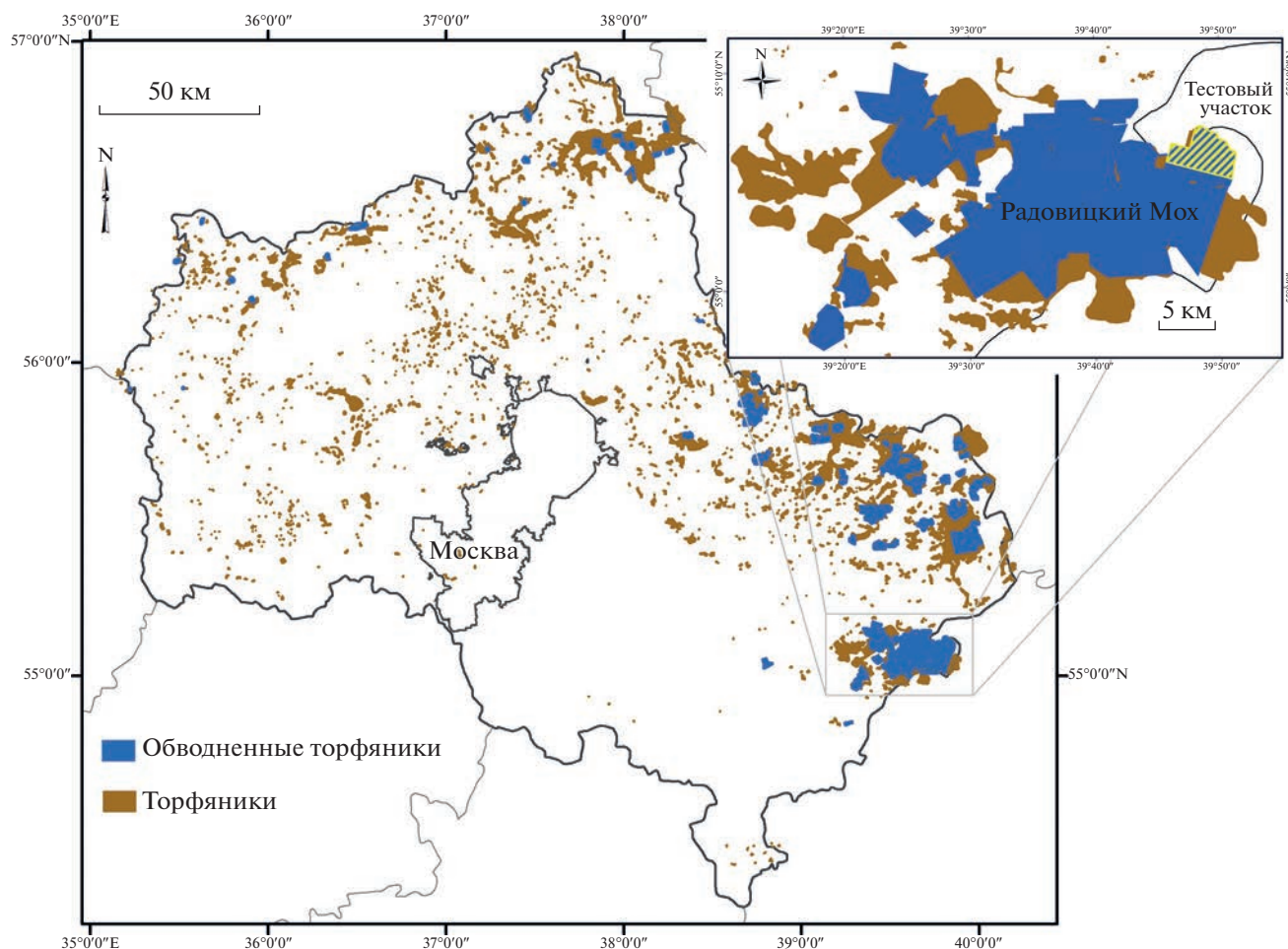


Рис. 1. Торфяники (неосушенные и осушенные) Московской области и вторично обводненные в рамках региональной программы 2010–2013 гг. Показан торфяник Радовицкий Мох с участком тестового расчета сокращения выбросов парниковых газов (заштрихован).

одновременном рассмотрении большого числа объектов со значительной площадью и для минимизации субъективности исследователя предпочтительна автоматизация анализа данных.

Была разработана методика оценки состояния торфяников с выделением 6 классов почвенно-растительного покрова по многоспектральным спутниковым снимкам (изначально Landsat-TM и ETM+) с использованием полос красного, ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов (Медведева и др., 2011). Выделяются классы: 1) открытый торф, включая участки с разреженной растительностью; 2) кипрейные, вейниковые и березово-вейниковые сообщества; 3) сообщества с преобладанием сосны различной степени угнетенности; 4) сообщества с преобладанием ивы и березы; 5) гидрофильные сообщества на обводненных участках; 6) водные поверхности. Этот набор классов является компромиссом между возможностями полуавтоматической интерпретации мультиспектральных спутниковых

данных и решаемыми задачами по оценке состояния пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения.

Наземная проверка методики на примере разных объектов с построением матриц ошибок (Медведева и др., 2017, 2019; Сирин и др., 2020; Sigin et al., 2018) показала достаточно высокую (80% и более) точность классификации. Она была улучшена (до 90% и более) дополнительным использованием зимних снимков для уточнения участков с древесной растительностью (Сирин и др., 2020). Апробация показала, что данных одного аппарата недостаточно для анализа больших территорий и длинных временных рядов. Было проведено сравнение результатов использования спутниковых данных Spot-5, Spot-6, Landsat-7, Landsat-8 и Sentinel-2. Установлена критичность наличия коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазона, поэтому данные Spot-6 были признаны неприемлемыми из-за его отсутствия, несмотря на более высокое пространственное разрешение. Вы-

сокая точность результатов классификации данных других аппаратов определила возможность их совместного использования с близкими показателями конечных результатов классификации. Была установлена сходная высокая точность классификации данных методами минимального расстояния Erdas Imagine и объектно-ориентированного ScanEx Image Processor. Поэтому возможен переход от одного метода к другому без потери качества. Сравнимость точности результатов классификации данных разных аппаратов позволяет комбинировать классифицированные изображения и создает дополнительные возможности для анализа временных рядов (Медведева и др., 2017, 2019; Sirin et al., 2018).

Методика была апробирована и используется для оценки состояния пожароопасных осушенных торфяников разных субъектов ЕТР и выявления объектов, требующих вторичного обводнения. Были установлены основные тренды изменения растительного покрова как на отдельных объектах, так и на их совокупности в регионах. Мониторинг обводненных торфяников Московской области показал сокращение площадей открытого торфа и сухолюбивой травяной растительности, некоторые изменения площадей, занятых древесной хвойной растительностью, поступательное расширение площади, занятой лиственной растительностью, увеличение после обводнения площади, занятой гидрофильными сообществами и открытой водой (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020). На основе указанной методики мониторинга был предложен подход по установлению эффективно обводненных участков торфяников.

ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Методическую основу количественной оценки выбросов парниковых газов во всех учитываемых секторах экономики, включая ЗИЗЛХ, определяют руководства МГЭИК, утверждаемые РКИК ООН наряду с порядком учета источников и поглотителей ПГ и формой отчетности о связанных с ними выбросах и стоках ПГ. РКИК ООН принят единый порядок подготовки национальной отчетности, который включает табличные формы Общего формата данных (ОФД или Common reporting format, CRF) и текстовую часть – Национальный доклад о кадастре (НДК или National Inventory Report, NIR). ОФД представляет собой унифицированный пакет таблиц, в который вносятся данные расчетов выбросов по каждому сектору, включая ЗИЗЛХ. В НДК описаны исходные данные, примененная методика, выбор параметров расчетов, оценка их достоверности (неопределенности), обсуждение результатов, усовершенствования и меры по повышению качества расчетов, предпринятые в ответ на замечания при проверке кадастров группами независи-

мых экспертов РКИК ООН. Совокупность ОФД и НДК представляет собой базу данных о выбросах каждой страны, начиная с 1990 и по год, предшествующий предыдущему, которая подается и обновляется ежегодно. Единый и унифицированный формат данных обеспечивает их сопоставимость и сравнительную оценку.

Утвержденные РКИК ООН методологии формируют Руководящие принципы представления информации о годовых кадастрах Сторон, включенных в приложение I к Конвенции (список стран, который включает Российскую Федерацию). Принятая РКИК ООН в 1999 г. система учета и отчетности о выбросах пересматривалась по мере разработки МГЭИК новых методологий количественной оценки выбросов и поглощения парниковых газов. В настоящее время в секторе ЗИЗЛХ учитываются 6 категорий земель: (1) лесные земли (forest lands); (2) земли, предназначенные для выращивания сельскохозяйственных культур (croplands); (3) земли с постоянным травянистым покровом – луга и пастбища (grasslands); (4) водно-болотные угодья (wetlands); (5) земли поселений (settlements) и (6) другие земли (other lands) (IPCC, 2003). Учитываются также их переходы из одной категории в другую – так называемая конверсия земель.

Согласно РКИК ООН, Национальная отчетность о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ, не регулируемых Монреальским протоколом, включает несколько категорий земель с осушенными торфяниками. Это лесные земли, пахотные, пастбища и сенокосы и в разделе водно-болотные угодья (wetlands) – торфяники, осушенные для добычи торфа (подготовленные, разрабатываемые и неиспользуемые) (IPCC, 2006). Дополнение по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам по национальной инвентаризациям парниковых газов МГЭИК 2006 (IPCC, 2006) уточнило методики учета осушенных торфяников и добавило рекомендации по учету выбросов ПГ вторично обводненными торфяниками. В Уточнении 2019 г. к Руководящим принципам МГЭИК 2006 г. по национальной инвентаризациям парниковых газов (IPCC, 2019a) были внесены дополнения для затопленных земель (flooded lands), которые, как и торфоразработки, входят в главу “водно-болотные угодья” (wetlands) и могут возникать при обводнении торфяников.

Для торфяников, рассматриваемых МГЭИК как источники и поглотители ПГ (IPCC, 2006, 2014, 2019a), оценка проводится на основании данных о занимаемой ими площади и так называемых коэффициентов эмиссии КЭ (emission factors – EF). КЭ – это удельные потоки ПГ с единицы площади за год. Учитываются 4 климатических агента: CO₂, CH₄, N₂O и DOC. Отдельно рассматри-

вается эмиссия CH_4 из осушительных каналов. Предлагается также (IPCC, 2014) учет выбросов парниковых газов при торфяных пожарах в результате сгорания биомассы и торфа.

РКИК ООН предусмотрена система повышения качества, точности и достоверности представляемых данных на основе принципов, предлагаемых МГЭИК (IPCC, 2006). МГЭИК предусматривает систему 3-х уровней (Tier) количественной оценки выбросов ПГ. При наиболее простом (1) достаточно использовать данные из международных не детализированных источников информации (статистика ООН, ФАО и др.) и КЭ по умолчанию (default emission factors), предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a). Для осушенных и обводняемых торфяников они в большинстве случаев дифференцируются в соответствии с климатическим зонированием МГЭИК (IPCC Climatic Zones). Согласно ему вся ЕТР (кроме крайнего северо-востока), как и большая часть восточной и центральной Европы, юг Западной Сибири и Дальнего востока относятся к зоне холодного умеренного влажного климата (Cool Temperate Moist) (IPCC, 2019). Дополнительно КЭ различаются для так называемых “богатых” (rich) и “бедных” (poor) торфяников, разделяемых МГЭИК (IPCC, 2014) по электропроводности почвенной влаги $\geq 50 \text{ мкСм}^{-1}$ и $\leq 40\text{--}50 \text{ мкСм}^{-1}$ соответственно (Rydin and Jeglum, 2013).

Расчеты по наиболее сложному уровню (3) должны проводиться с использованием данных национальной статистики или других официальных источников, детализированных до уровня отдельных групп объектов, а также национальных КЭ и других параметров, которые были получены непосредственно для этих групп объектов. Промежуточный уровень (2) предусматривает использование национальных данных и параметрической информации, не столь детализированной, как в случае (3). Наиболее точными будут оценки выбросов, полученные при помощи 3-го уровня, однако оценки по 2-му уровню также имеют достаточно высокую степень точности и достоверности, а их получение может быть не столь трудоемким и дорогостоящим, что может быть предпочтительно с точки зрения соотношения затрат и качества оценок. Оригинальные подходы и методы должны быть верифицированы и апробированы посредством раскрытия информации о расчетных алгоритмах и используемых данных путем представления на научных конференциях и симпозиумах, а также публикации в рецензируемых научных журналах (IPCC, 2006).

Для оценки качества и достоверности полученных расчетов МГЭИК разработаны системы контроля и оценки неопределенности (IPCC, 2000). Оценка неопределенности проводится для отдельных категорий, климатических агентов,

инвентаризации в целом. Обеспечение и контроль качества инвентаризации, а также представление оценок неопределенности выбросов и поглощения ПГ обязательно (IPCC, 2006).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНО ОБВОДНЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Официальной статистики вторично обводненных торфяников в России нет (Национальный ..., 2022), поэтому для их учета и включения в Национальный кадастр было необходимо определить площади торфяников, которые можно относить к вторично обводненным. В основу была положена представленная выше методика мониторинга (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). К обводненным торфяникам было предложено относить площади двух классов почвенно-растительного покрова: 1) “гидрофильные сообщества” с хвощом, осокой, тростником и другими водно-болотными видами и 2) “водные поверхности”, т.е. площади, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья. Они успешно отделяются от других классов по спектральной яркости (рис. 2).

Этот подход используется для определения обводненных площадей на национальном (Национальный ..., 2022) и региональном уровнях (Сирин и др., 2021). Он применим и для конкретных объектов обводнения, например, для участка торфяника Радовицкий Мох площадью 1535 га в Московской области (см. рис. 1). Мероприятия по обводнению начались здесь практически сразу после пожаров осенью 2010 г. Имевшиеся гидротехнические сооружения не требовали значительной реконструкции, а обильные дожди и талые воды способствовали быстрому подъему уровня воды. По мере задержания воды в первые годы происходило увеличение площадей, занятых “водными поверхностями”, а также поступательное распространение “гидрофильной растительности” (рис. 3).

Для анализа временной динамики обводненных площадей может возникать необходимость использования данных разных спутников (см. рис. 3). Это связано не только с их заменой. Даже для одного периода могут возникать сложности подбора данных из-за облачности, технических сбоев и других ограничений. Например, для оценки состояния торфяников Московской области за 2020 г. объединялись данные Sentinel-2, Landsat-7 и Landsat-8 за разные даты в июне, июле и сентябре 2020 г. и Sentinel-2 за январь 2021 г.

О точности результатов классификации (Olofsson et al., 2014) можно судить по наземной проверке объектов обводнения Московской области, проведенной по данным 2017 г. Для проверки классов “гидрофильная растительность” и “водные поверхности” был использован набор из

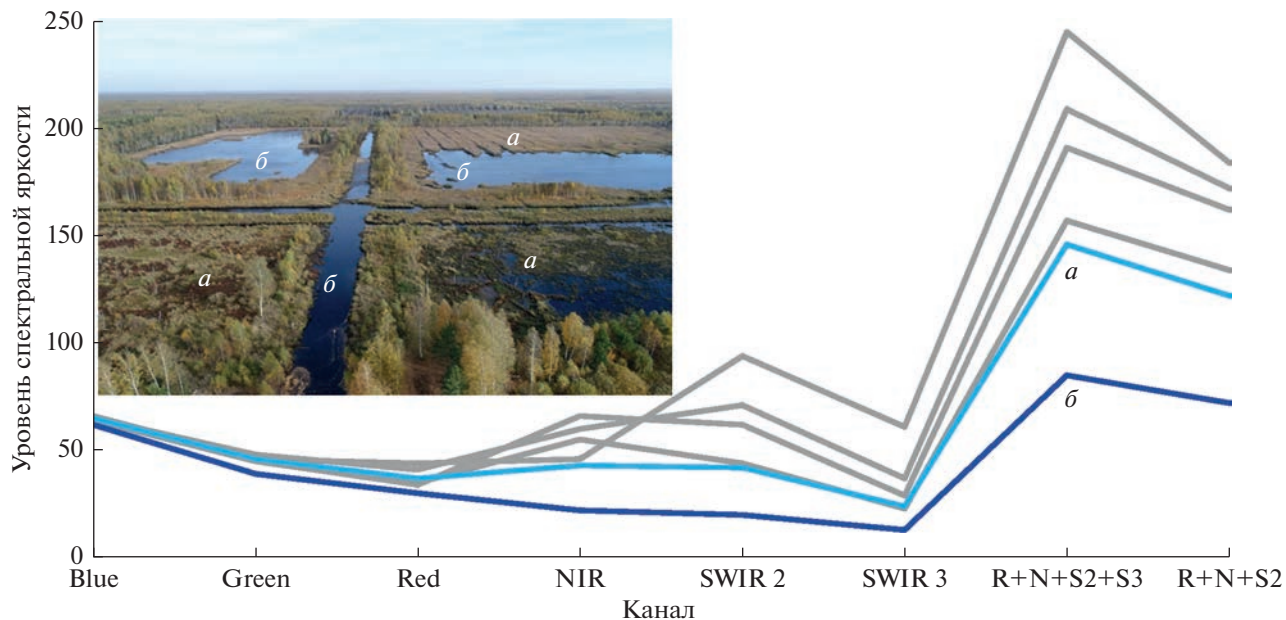


Рис. 2. Средние значения спектральной яркости классов “гидрофильная растительность” (а) и “водные поверхности” (б) на фоне других классов земного покрова. Показаны каналы, доступные от разных аппаратов. На врезке: вид части торфяника Радовицкий Мох, вторично обводненного начиная с конца 2010 г. Съемка 7.10.2020 г., высота 70 м (предоставлена К. Шахматовым).

54 однородных проверочных участков средней площадью $50 \times 50 \text{ м}^2$ с последующим построением полных матриц ошибок (Сирин и др., 2020; Sirin et al., 2020), в которых кросс-табуляцией устанавливаются соответствия между значениями одних и тех же классов, полученных по спутниковым и наземным данным. В табл. 1 приведены результаты классов, относимых к эффективно обводненным, вероятность ошибки для которых составила менее 2% (Sirin et al., 2020).

Спутниковые снимки имеют ограниченное разрешение, поэтому была сделана попытка определить точность расчета площади по общей площади пограничных пикселей для каждого рассматриваемого класса. Если предположить, что более 50% площади пикселя принадлежит рассматриваемому классу, то ошибка составит не более 1/2 площади пикселей, расположенных на гра-

нице класса. Для получения 95% доверительного интервала (уровень неопределенности, принятый МГЭИК (IPCC, 2000)), площадь рассматривалась как случайная величина с симметричным треугольным распределением. Доверительными границами площади являются квантили уровней 2.5 и 97.5% соответственно. Проверка для участка торфяника Радовицкий Мох показала, что неопределенность площади класса “водные поверхности” составила около 6% при разрешении 10 м (Sentinel-2) и 17% при 30 м (Landsat-7,8), а “гидрофильная растительность” 20 и 32% соответственно (Sirin et al., 2021b). Несмотря на относительно высокие значения неопределенности, она не оказывает существенного влияния на неопределенность объема выброса ПГ: как будет видно в дальнейшем, неопределенность КЭ принципиально выше.

Таблица 1. Полные матрицы ошибок и точность результатов классификации относительно наземных данных

Данные ДЗЗ/Наземные данные	Гидрофильная растительность	Водные поверхности	Σ	Точность		
				пользователя	производителя	общая
Гидрофильная растительность	26	1	27	96.3	100	
Водные поверхности	0	27	27	100.0	96.4	
Σ	26	28	54			98.15

Примечание. Точность пользователя – вероятность совпадения реального класса с результатами классификации, точность производителя – точность определения расчетных классов.

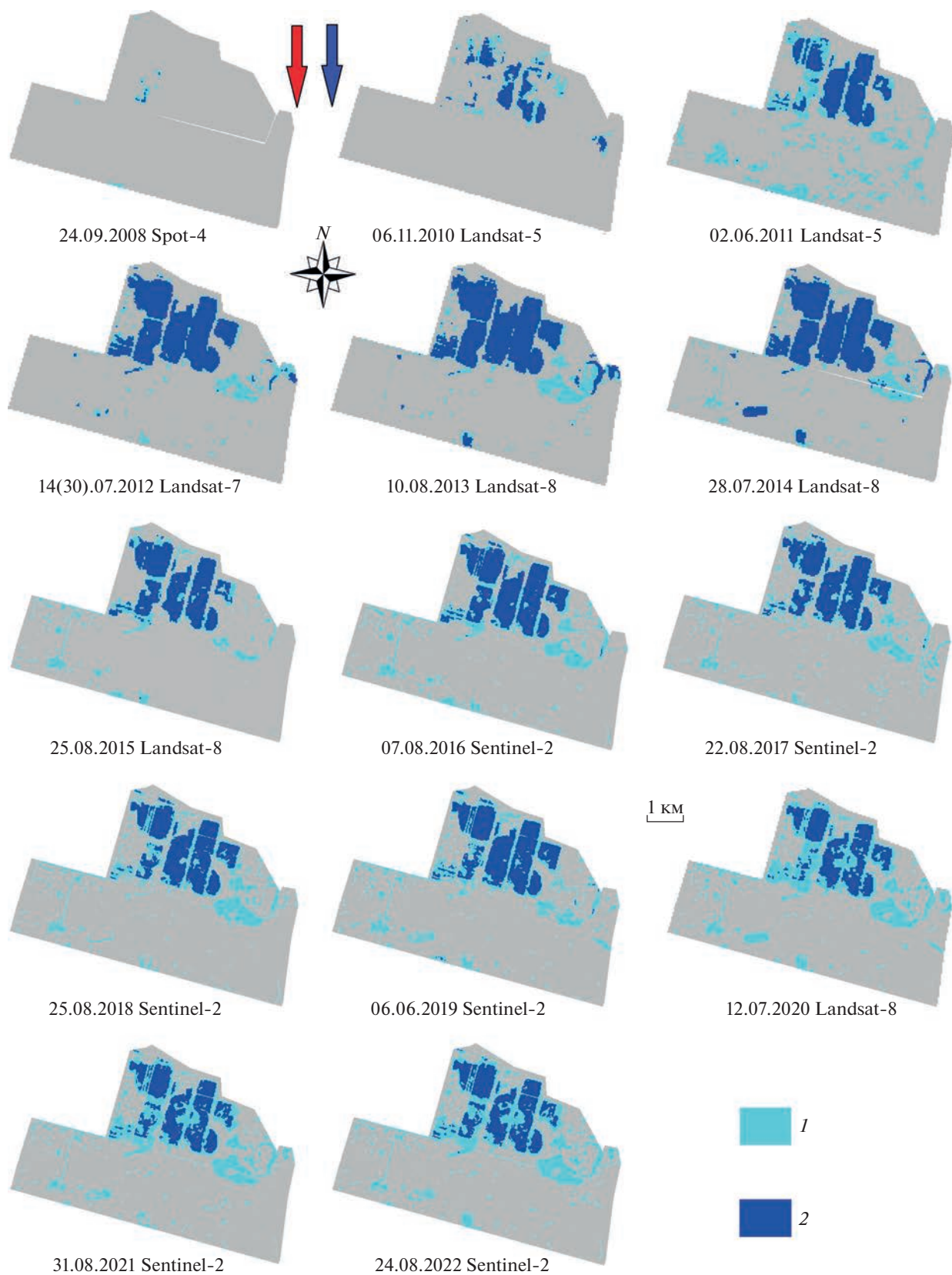


Рис. 3. Площади, занятые “гидрофильной растительностью” (1) и “водными поверхностями” (2), до (2008 г.) и после (2010–2022 гг.) вторичного обводнения на модельном участке площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область). Красная и синяя стрелки – время пожаров и начала вторичного обводнения соответственно.

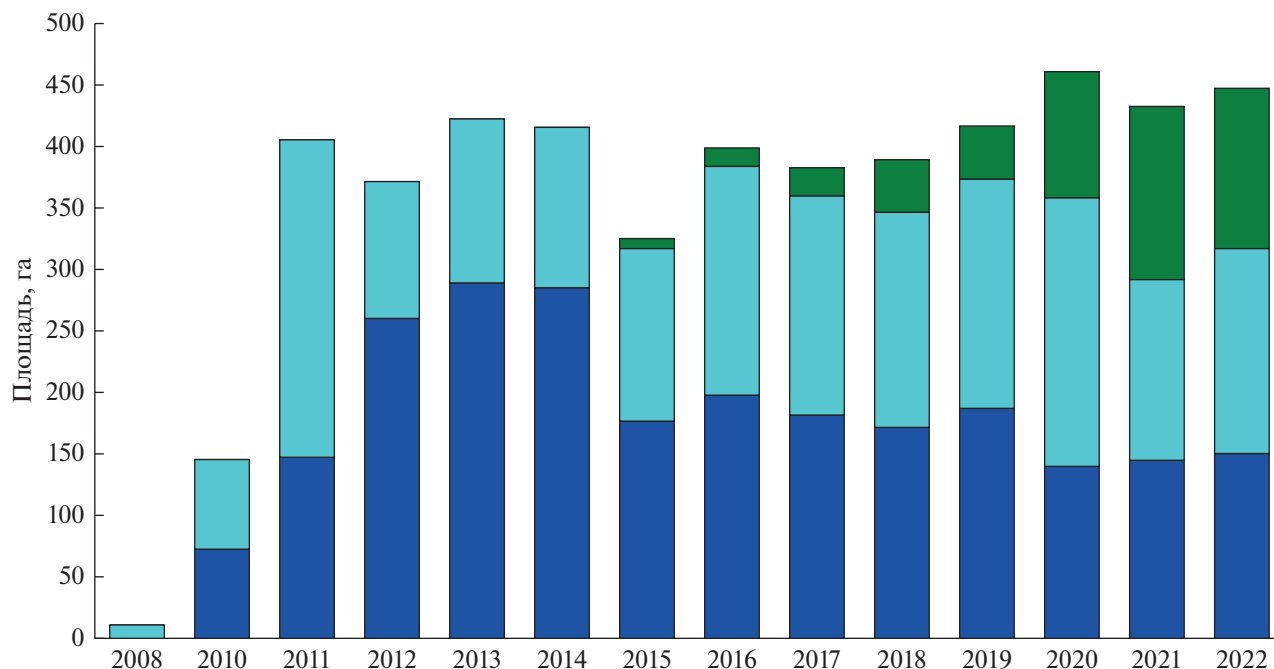


Рис. 4. Изменение площадей, занятых “водными поверхностями” (синий) и “гидрофильной растительностью” (голубой), в том числе заросших древесно-кустарниковой растительностью (зеленый), до (2008 г.) и после (2010–2022 гг.) вторичного обводнения модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

Часть площадей, занятых водой и гидрофильной растительностью, может со временем зарастать деревьями и кустарниками, в первую очередь – ивняком. Частично к нему могут “добавляться” участки с тростником, рогозом и другими видами, которые сложно отделяются от кустарников и небольших деревьев даже с использованием данных зимней съемки. Для рассматриваемого участка торфяника Радовицкий Мох эффективно обводненные площади, которые предположительно заросли древесно-кустарниковой растительностью и, соответственно, “падают” в другой класс растительного/земельного покрова, были определены на основании анализа данных съемки за разные годы (рис. 4). На рис. 3 участки “гидрофильной растительности” включают также площади, которые со временем заросли древесно-кустарниковой растительностью.

Площадь “водных поверхностей” и “гидрофильной растительности” не является фиксированной. После строительства или реконструкции гидротехнических сооружений происходит постепенное накопление талых и дождевых вод. В маловодные годы этот процесс замедляется, возможны потери накопленной влаги, поэтому текущее состояние объектов обводнения может зависеть от гидрометеорологической обстановки конкретного вегетационного периода. Для обводненных торфяников Московской области была выявлена корреляция между площадями “водной поверхности” с количеством осадков за 30 сут, предшествующих

дате съемки (Sirin et al., 2020). На рис. 5 показана зависимость площади, занятой “гидрофильной растительностью” и совокупности “водные поверхности” и “гидрофильная растительность”, от суммы осадков за 60 дней. Используются данные близкорасположенной метеостанции г. Гусь-Хрустальный. Суммировались значения за часть текущего месяца, предшествующий месяц и части перед ним. Влияние осадков на площадь, занятую гидрофильной растительностью, оказалось незначительным по сравнению с ошибками измерений (значимость $p = 0.1$), однако влияние на суммарную площадь (“водные поверхности” и “гидрофильная растительность”) было более существенным (значимость $p = 0.01$); если $p < 0.05$, влиянием этого фактора пренебречь нельзя.

ОЦЕНКА СОКРАЩЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Занятые “гидрофильной растительностью” и “водными поверхностями” участки могут быть отнесены к категориям, определяемым Дополнением по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014) к Руководящим принципам по национальным инвентаризациям парниковых газов МГЭИК 2006 (IPCC, 2006) как увлажненные органические почвы (rewetted organic soils) и затопленные земли (flooded lands) соответственно. Для расчета эмиссии ПГ с таких площадей можно применить КЭ, предлагаемые МГЭИК по умолчанию (default fac-

tors) для указанных выше категорий, а для базиса расчета – КЭ исходных (например, торфоразработок). Такой подход был использован для методики оценки сокращения выбросов парниковых газов в результате вторичного обводнения торфяников и включения последних впервые в 2020 г. для РФ в Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). Методика может быть использована для оценки сокращения выбросов парниковых газов при вторичном обводнении торфяников на национальном, региональном и объектном уровнях.

Для рассматриваемого в качестве примера участка торфяника Радовицкий Мох мы исходили из того, что он представляет собой бывшие торфоразработки. МГЭИК (IPCC, 2006, 2014) не разделяет торфоразработки на подготовленные к добыче (т.е. осушенные и очищенные от растительности), действующие и заброшенные. Допущение о принадлежности к торфоразработкам было применено для всех эффективно обводненных площадей Московской области (Сирин и др., 2021; Sirin et al., 2021a). Здесь объекты вторичного обводнения включали и пожароопасные участки сельскохозяйственного осушения. Однако на них проводилось преимущественно восстановление систем регулирования водного режима для предотвращения пожаров при сохранении возможности возвращения в хозяйственный оборот. На спутниковых снимках большинства обводненных участков, сделанных до проведения мероприятий, идентифицируются участки открытого торфа, что указывает на проводившуюся ранее торфодобычу.

В этом случае для исходного состояния обводненных площадей можно использовать КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2014) для “торфяников, используемых для добычи торфа”. Далее можно получить изменение КЭ после обводнения (табл. 2). Использование КЭ для торфоразработок в качестве “базовой линии” не завышает оценку, так как КЭ для торфоразработок в целом ниже чем для торфяников, осушенных для сельского хозяйства (IPCC, 2014). Для “увлажненных органомных почв” мы использовали КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2014) для “прохладной умеренной влажной” климатической зоны, для “затопленных земель” – КЭ для агрегированной “прохладной умеренной” зоны (IPCC, 2019a). С учетом имеющихся данных (Чистотин и др., 2006) все обводненные площади были условно отнесены к “богатым” (IPCC, 2014).

При расчете эмиссии CH_4 из осушительных каналов использовали предлагаемое МГЭИК (IPCC, 2014) и соответствующее нашим оценкам (Чистотин и др., 2006) значение доли площади, занятой

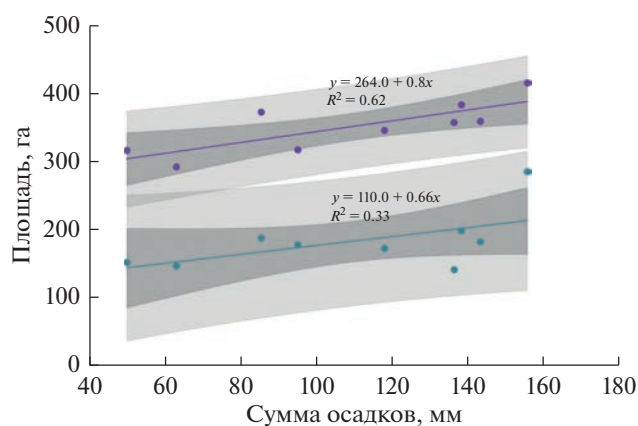


Рис. 5. Изменение площади, занятой “гидрофильной растительностью” (голубой) и “гидрофильной растительностью” вместе с “водными поверхностями” (фиолетовый), за годы после проведения вторичного обводнения модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область), в зависимости от суммы осадков за 2 месяца, предшествующих дате съемки. Темно-серый фон – 95%-й доверительный интервал для линии средних значений, светло-серый фон – 95%-й доверительный интервал для измеренных значений, R^2 – коэффициент детерминации регрессионной модели.

дренажной сетью, равное 5%. Предполагаем, что после обводнения эмиссия CH_4 с площадей, занятых осушительными канавами, становится близкой эмиссии с затопленной площади. Это относится и к “водным поверхностям”, и к площадям с “гидрофильной растительностью”. Эмиссии CH_4 из дренажной сети способствует турбулентное перемешивание (Сирин и др., 2012). После обводнения сток прекращается, сокращается поступление в канавы свежей органики, необходимой для метаногенеза, а также латеральный принос растворенного и газообразного CH_4 . Были приняты нулевыми вынос DOC с обводненных площадей и, согласно МГЭИК (IPCC, 2014), эмиссия N_2O .

Было рассчитано изменение выбросов ПГ после обводнения участка торфяника Радовицкий Мох до 2022 г., а также сделан прогноз накопительным итогом на период до 2050 г. (рис. 6). Возможные дополнительные изменения состояния торфяника не учитывали. Неопределенности были оценены в соответствии с рекомендациями МГЭИК (IPCC, 2000) с учетом большой асимметричной неопределенности КЭ. Предположили треугольное распределение входных величин (приближенное к нормальному распределению) и использовали метод распространения ошибок. Неопределенности определения площади в конечных расчетах не учитывали. Анализ чувствительности показал, что неопределенность выбросов CO_2 в решающей степени определяется неопределенностью

Таблица 2. Изменение коэффициентов эмиссии, предлагаемых МГЭИК (IPCC, 2014), для торфоразработок после их вторичного обводнения и перехода в другое состояние

Агент	Единица	Коэффициент эмиссии* среднее (95% доверительный интервал)
Увлажненные органогенные почвы “Rewetted organic soils” (IPCC, 2014)		
CO ₂	tCO ₂ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	-2.3 (-4.4...-0.4)
DOC		-0.07 (-0.25...0.11)
CH ₄ soil	kgCH ₄ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	210 (1...434)
CH ₄ ditch		-457 (-837...172)
N ₂ O	kgN ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹	-0.3 (-0.64...0.03)
Затопленные земли “Flooded lands” (IPCC, 2019a)		
CO ₂	tCO ₂ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	-1.78 (-3.43...-0.41)
DOC		-0.31 (-0.50...0.15)
CH ₄ soil	kgCH ₄ -C ha ⁻¹ yr ⁻¹	78.6 (70.7...86.2)
CH ₄ ditch		-457 (-887.2...-27.4)
N ₂ O	kgN ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹	-0.3 (-0.64...0.03)

Примечание: * – рассчитанное значение; CH₄ soil and CH₄ ditch: эмиссия CH₄ с поверхности торфоразработок и из канав соответственно.

КЭ (особенно для гидрофильной растительности), а влияние неопределенности площади незначительно (Sirin et al., 2021b).

Основное сокращение выбросов ПГ происходит за счет снижения эмиссии CO₂. Наибольший вклад внесли участки, занятые гидрофильной растительностью, как за счет большей площади, так и большего изменения КЭ. Здесь более активно идет фотосинтез, образуется больше биомассы, часть отпада которой, в конечном счете, может формировать торф. Можно предполагать дальнейшее снижение эмиссии CO₂. Площади, занятые гидрофильной растительностью, будут увеличиваться как за счет распространения подтопления, так и за счет зарастания затопленных участков. Снизились потери с выносом DOC. Возросла эмиссия CH₄, особенно за счет участков с гидрофильной растительностью, однако она сократилась из дренажной сети. Небольшой вклад внесло снижение или прекращение эмиссии N₂O. В итоге сокращение выбросов углерода для участка торфяника Радовицкий Мох площадью 1535 га достигло 33.4 тыс. т CO₂ к 2022 г. и может составить почти 113.4 тыс. т CO₂ к 2050. С учетом всех климатических агентов и, прежде всего, увеличения эмиссии CH₄, сокращение выбросов ПГ составило 20.2 тыс. т CO₂-экв. к 2020 г. и может составить почти 67.6 тыс. т CO₂-экв. к 2050. В среднем сокращение выбросов углерода составляло ~2 т CO₂-экв. га⁻¹ год⁻¹, а с учетом всех климатических агентов – немногим более 1 т CO₂-экв. га⁻¹ год⁻¹.

ПУТИ УТОЧНЕНИЯ ОЦЕНКИ

Представленный подход и полученные оценки сокращения выбросов ПГ после обводнения максимально консервативны. Учитывается вклад только площадей, которые стали участками, покрытыми водой или представленными “гидрофильной растительностью”. Причем возможное изменение их площади при прогнозных оценках не учитывается. На большинстве объектов вторичного обводнения не предусмотрено двустороннее регулирование водного режима и, несмотря на наличие переливных плотин, сбрасывающих избыток воды в период половодья и дождевых паводков, объем накопленной влаги будет расти, распространяя эффект обводнения на большие площади.

Рассмотрение только площадей, занятых гидрофильной растительностью и водой, не учитывает эффект обводнения на частях торфяника, которые характеризуются другим растительным/земельным покровом. Повышение уровня болотных вод на всех площадях будет снижать линейно связанную с ними эмиссию CO₂ (Couwenberg et al., 2011) за счет препятствия аэробному микробному разложению торфа. Одновременно может происходить изменение потоков других ПГ, в том числе увеличение эмиссии CH₄, однако, как было показано ранее, сокращение эмиссии CO₂ будет перекрывать другие последствия обводнения. Включить в учет такие площади не просто: они могут характеризоваться пространственным разнообразием, требующим охвата данными измерений потоков ПГ. Это трудоемко и возникает вопрос о целесообразности и возможной эффективности.

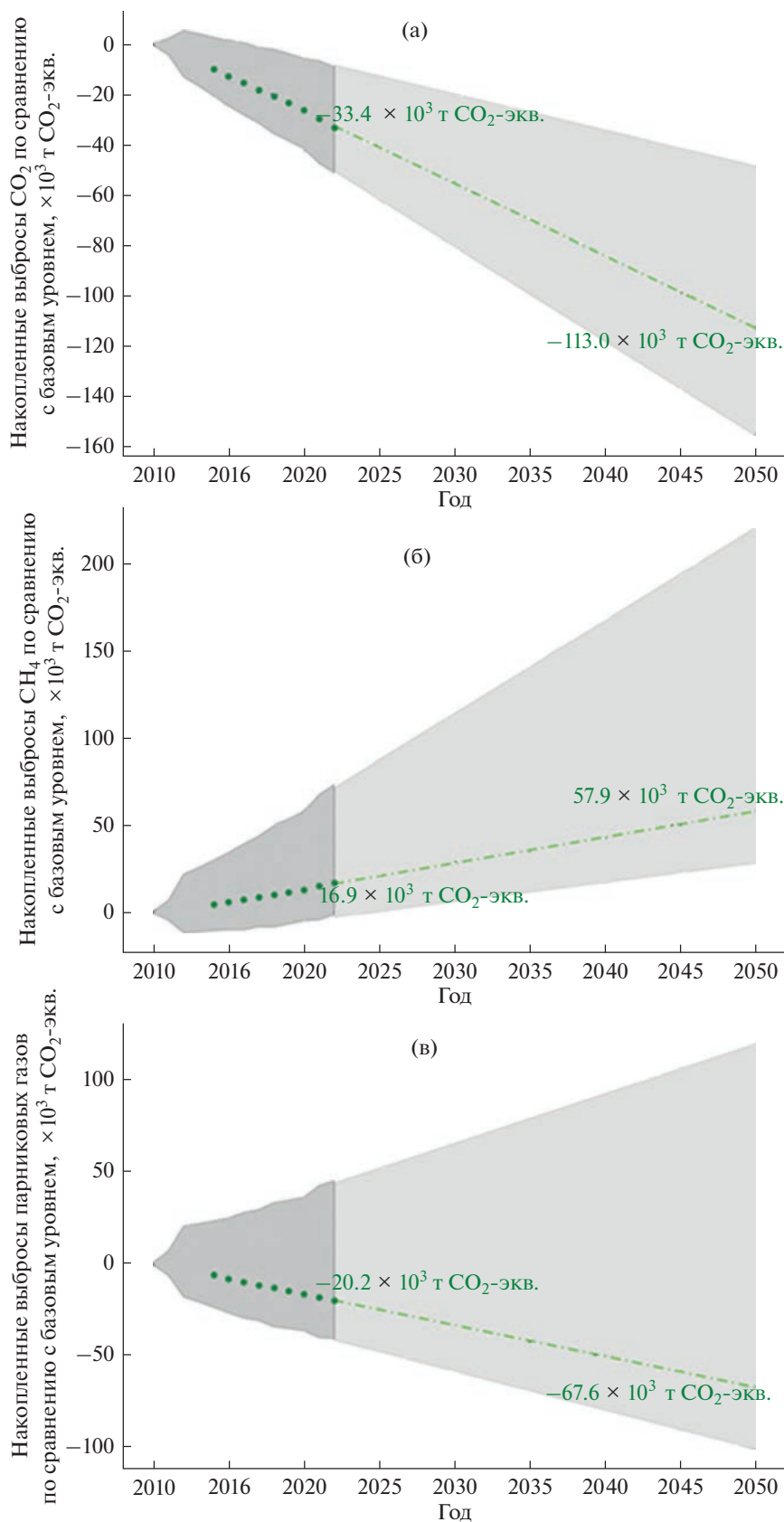


Рис. 6. Изменение выбросов накопительным итогом (а) CO₂, (б) CH₄ и (в) всех климатических агентов (CO₂, CH₄, N₂O, DOC) после вторичного обводнения за 2010–2022 гг. (точки) и прогноз на период до 2050 г. (пунктирная линия) для модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

Например, методика GEST (Greenhouse gas emission site type), наиболее известная для оценки проектов обводнения в рамках добровольного рынка “углеродных единиц”, например, для Verified Carbon Standard – VCS (www.v-c-s.org), основана на типизации участков растительного покрова для привязки значений потоков ПГ всего объекта обводнения (Couwenberg et al., 2011). Методика предполагает сбор подробных натурных данных о состоянии объекта обводнения (торфяная залежь, растительность, микрорельеф и пр.) и последующий его мониторинг после проведения мероприятий. Это сложно и затратно, однако не дает непосредственной информации для оценки сокращения выбросов ПГ. Для этого необходимо знать фактически два значения – баланс учитываемых ПГ до и после обводнения. Методика предполагает рассмотрение более 30 классов типов участков (GEST), из которых лишь часть обеспечена оценками потоков ПГ (Углеродные ..., 2011).

В Дополнении по водным угодьям (IPCC, 2014) были обобщены имеющиеся на тот момент данные об эмиссии ПГ из осушенных и обводняемых торфяников. В дальнейшем были обновлены и скорректированы данные для обводненных торфяников (Wilson et al., 2016). Расширение работ по обводнению и их научному обеспечению способствовало проведению измерений, получению и уточнению региональных оценок потоков ПГ с осушенных и обводняемых торфяников (Jurgašius et al., 2022). Однако данные о потоках ПГ, полученные в рамках ограниченных временем проектов, характеризуют баланс ПГ за периоды с конкретной гидрометеорологической обстановкой. В то же время на потоки ПГ в болотах влияет широкий спектр сложно взаимосвязанных биологических, физических и химических процессов (Assessment ..., 2008) и их баланс может меняться в зависимости от погодно-климатических условий. Болото, являющееся стоком CO₂ в нормальный год, становится источником CO₂ не только в жаркий и сухой, но и во влажный и прохладный год (Alekseychik et al., 2021). Почти 10-летние измерения потоков ПГ на торфоразработках (Сирин, Суворов, 2022) показали кратное варьирование значений потоков в разные годы. При этом, речь идет о наиболее “простом” объекте: растительность и фотосинтез отсутствуют, основные потоки связаны с разложением торфа.

КЭ, предлагаемые МГЭИК (IPCC, 2006, 2014, 2019a), определяются экспертным путем группой специалистов на основании учета всех актуальных на момент анализа данных о потоках ПГ с учетом происходящих процессов и явлений. Такой подход, а также объединение в большие группы объектов при их рассмотрении обеспечивает определенную достоверность оценки. Анализ данных измерений потоков ПГ на торфоразра-

ботках показал их в целом согласованность с КЭ, предлагаемых МГЭИК (Сирин, Суворов, 2022). Получить обоснованные оценки КЭ для большого числа разнородных объектов и для регионов с отличными природными условиями представляется малореальным. Кроме трудоемкости это отвлекает от учета более значимых аспектов. В первую очередь, учета сокращения выбросов ПГ путем предотвращения природных пожаров – основной цели вторичного обводнения торфяников, по крайней мере, в нашей стране. Упомянутые выше разработки для добровольного рынка углеродных единиц, предполагающие проведение большого и не очень относящегося к предмету объема работ, не предполагают обязательного учета этого фактора.

Снижение или прекращение природных пожаров на торфяниках после проведения обводнения подтверждено для Национального парка “Мещера” (Сирин и др., 2011), для Московской области (Sirin et al., 2020). Это видно и на примере рассматриваемого участка торфяника Радовицкий Мох (рис. 7). Данные были получены путем анализа тепловых аномалий MODIS с уточнением площадей гарей путем сравнения спектральных характеристик поверхности до и после пожара по данным Landsat-5 TM (Медведева и др., 2020). Не все природные пожары на торфяниках переходят в торфяные пожары. Весной, когда торф насыщен водой после снеготаяния, огонь ограничивается растительностью, а заглубляется существенно реже, чем в летний период (Сирин и др., 2022). Детектирование собственно торфяных пожаров возможно на основании его длительности, температуры и индекса мощности пожара (Fire Radiation Power – FRP) (Сирин и др., 2022; Sirin and Medvedeva, 2022). Это может помочь определить характер пожара и выбросы ПГ, связанные только с горением биомассы или включающие также торфяную почву. Эффект от предотвращения пожаров в результате обводнения можно оценить, например, на основании анализа частоты пожаров до и после проведения обводнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осушенные торфяники являются значительным источником поступления ПГ в атмосферу, а в случае оставления пользователем, становятся также наиболее вероятными объектами торфяных пожаров. Эффективный путь сокращения эмиссии ПГ и предотвращения торфяных пожаров на неиспользуемых осушенных торфяниках – вторичное обводнение и заболачивание.

Был разработан подход к оценке сокращения выбросов ПГ после вторичного обводнения, применимый для учета на национальном и региональном уровнях, а также для конкретных проектов обводнения. Он включает методику определе-

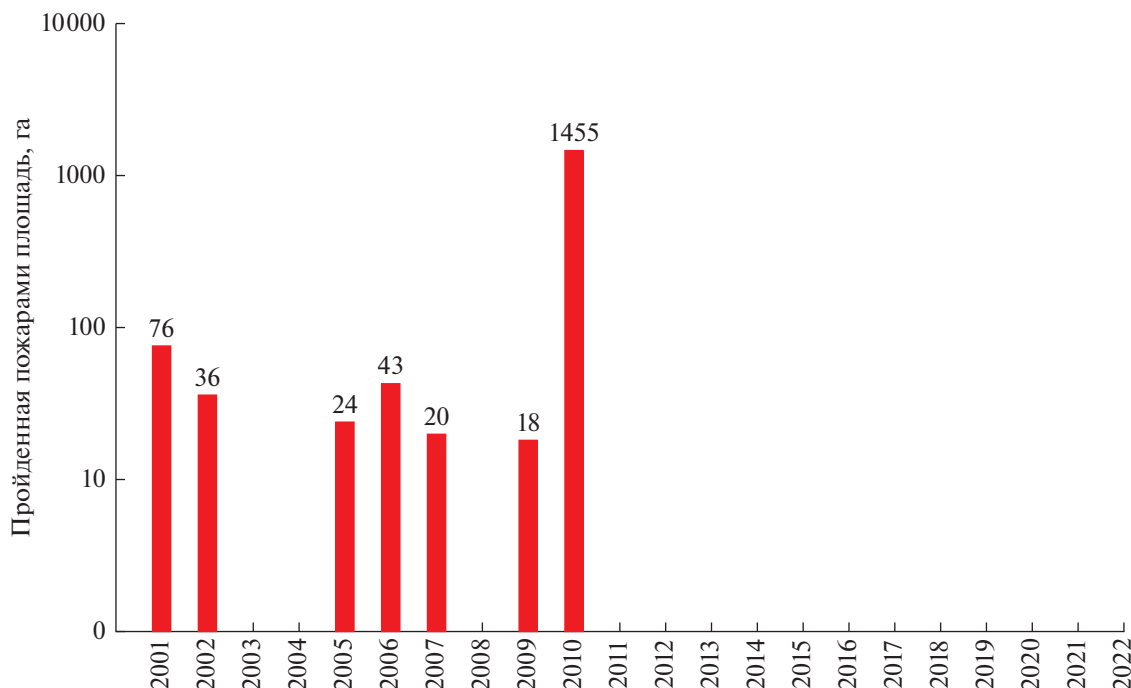


Рис. 7. Изменение площади, пройденной природными пожарами, в пределах модельного участка площадью 1535 га торфяника Радовицкий Мох (Московская область).

ния эффективно обводненных площадей, которые можно рассматривать как водно-болотные угодья (затопленные участки и покрытые гидрофильной растительностью), приложения к ним коэффициентов эмиссии ПГ, предлагаемых МГЭИК, а также оценку неопределенности. Подход был использован при включении с 2020 г. вторично обводненных торфяников в Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом.

Оценка на примере участка торфяника площадью 1,5 тыс. га программы обводнения пожароопасных торфяников в Московской области (2010–2013 гг.) показала сокращение выбросов углерода накопительным итогом к 2022 г. 33,4 тыс. т (с учетом потоков закиси азота, вынос растворенного углерода и увеличения эмиссии CH_4 – 20 тыс. т CO_2 -экв.). Согласно сделанному прогнозу, это сокращение может достигнуть к 2050 г. почти 113 (68) тыс. т соответственно. В среднем сокращение выбросов углерода составляло ~ 2 т CO_2 -экв. га^{-1} год^{-1} , а с учетом всех климатических агентов немногим более 1 т CO_2 -экв. га^{-1} год^{-1} .

Представленный подход и полученные оценки сокращения выбросов ПГ после обводнения консервативны и не учитывают целого ряда аспектов. В первую очередь это касается снижения числа и площади торфяных пожаров и, соответственно,

предотвращения значительных выбросов диоксида углерода в атмосферу и других климатических агентов. Эффект от предотвращения пожаров в результате обводнения можно оценить, например, на основании анализа частоты пожаров до и после проведения обводнения.

Имеющиеся данные показывают, что вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников может внести определенный вклад в снижение выбросов ПГ. Значение этих мероприятий для смягчения изменений климата (mitigation) будет расти по мере сокращения выбросов парниковых газов в других секторах экономики и иных разделах ЗИЗЛХ. Это может внести весомый вклад в реализацию Парижского соглашения по климату в рамках сектора “землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство”.

Вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников не имеет видимых отрицательных последствий. Улучшение среды, повышение экологической безопасности, восстановление водно-болотных угодий и связанных с ними экологических услуг и, конечно, предотвращение природных пожаров, включая торфяные, являются дополнительными, но, возможно, даже более весомыми аргументами в поддержку этих мероприятий. Они могут и должны стать важной составляющей в решении задач по смягчению изменений климата и адаптации к ним.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6) и на стадии доработки при поддержке Российского научного фонда (проект 23-74-00067).

FUNDING

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems” (registration no. 123030300031-6) and is being finalized with the support of the Russian Science Foundation (project no. 23-74-00067).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А.А. Романовской и В.Н. Короткову (Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля) за консультации и помощь по включению вторично обводненных торфяников в Национальный кадастр Российской Федерации. Благодарны К. Шахматову (Тверской государственный технологический университет) за предоставление снимков участка торфяника Радовицкий Мох.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to A.A. Romanovskaya and V.N. Korotkov (Israel Institute for Global Climate and Ecology) for their advice and assistance in incorporation of rewetted peatlands in the National Cadastre of the Russian Federation. We are grateful to K. Shakhmatov (Tver State Technological University) for Radovitski Mokh drone photography.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
- Волперский С.Э., Сири́н А.А., Цыганова О.П. и др. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 39–50.
- Волперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.
- Глухова Т.В., Сири́н А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте //

Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18050076>

- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Барталев С.А., Сири́н А.А. Оценка состояния заброшенных торфяных разработок по многоспектральным спутниковым изображениям // Иссл. Земли косм. 2011. № 5. С. 80–88.
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сири́н А.А., Маслов А.А. Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфяных разработок // Иссл. Земли косм. 2017. № 3. С. 76–84.
<https://doi.org/10.7868/S0205961417020051>
- Медведева М.А., Возбранная А.Е., Сири́н А.А., Маслов А.А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 150–159.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159>
- Медведева М.А., Макаров Д.А., Сири́н А.А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166>
- Минаева Т.Ю., Сири́н А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Усп. соврем. биол. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.
- Национальный докл. о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. М.: Росгидромет, 2022. Ч. 1. 468 с. <https://unfccc.int/documents/461970>
- Перспективное использование выработанных торфяных болот: Монография / под общ. ред. В.В. Панова. Тверь: Изд-во “Триада”, 2013. 280 с.
- Романовская А.А., Коротков В.Н., Смирнов Н.С. и др. Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000–2011 гг. // Метеорол. гидр. 2014. № 3. С. 5–18.
- Сири́н А.А. Болота и антропогенно-измененных торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. 2022. Т. 142. № 6. С. 560–577.
<https://doi.org/10.31857/S0042132422060096>
- Сири́н А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфяных разработках в центре Европейской России // Метеорол. гидр. 2022. № 3. С. 68–80.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>
- Сири́н А.А., Минаева Т.Ю., Возбранная А.Е., Барталев С.А. Как избежать торфяных пожаров? // Наука в Рос. 2011. № 2. С. 13–21.
- Сири́н А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динам. окр. среды глоб. измен. клим. 2012. Т. 3. № 2. С. 1–10.

- Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А. и др. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
- Сирин А.А., Макаров Д.А., Гуммерт И. и др. Глубина прогорания торфа и потери углерода при лесном подземном пожаре // Лесоведение. 2019. № 5. С. 410–422.
<https://doi.org/10.1134/S0024114819050097>
- Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю. и др. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорол. гидрол. 2022. № 10. С. 33–45.
- Сирин А.А., Медведева М.А., Макаров Д.А. и др. Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 2. С. 314–336.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>
- Сирин А.А., Медведева М.А., Ильясов Д.В. и др. Обводненные торфяники в климатической отчетности Российской Федерации // Фунд. прикл. климатол. 2021. Т. 7. № 3. С. 84–112.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-84-112>
- Сирин А.А., Суворов Г.Г. Эмиссия парниковых газов на торфоразработках в центре Европейской России // Метеорол. гидрол. 2022. № 3. С. 68–80.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-68-80>
- Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. 2010. № 12. С. 37–45.
- Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51–62.
- Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / ред. А.А. Сирин, Т.Ю. Минаева. М.: ГЕОС, 2001. 190 с.
- Углеродные кредиты и заболачивание деградированных торфяников. Климат–Биоразнообразие–Землепользование / ред. Ф. Таннебергер, В. Вихтманн. Stuttgart: Schweizerbart Science Publ., 2011. 221 с.
- Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е. Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрохимия. 2006. № 6. С. 54–62.
- Чистотин М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения (результаты вегетационного опыта) // Агрохимия. 2016. № 12. С. 20–33.
- A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe / Т. Minayeva, А. Sirin, О. Bragg (Eds.). Wageningen: Wetlands Int., 2009. 132 p.
- Ahmad S., Liu H., Günther A. et al. Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 749. P. 141571.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>
- Alekseychik P., Korrensalo A., Mammarella I. et al. Carbon balance of a Finnish bog: temporal variability and limiting factors based on 6 years of eddy-covariance data // Biogeosciences. 2021. № 18. P. 4681–4704.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-4681-2021>
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report / F. Parish, А. Sirin, D. Charman et al. (Eds.). Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008. 179 p.
- Bonn A., Reed M., Evans C.D. et al. Investing in nature: developing ecosystem service markets for peatland restoration // Ecosyst. Serv. 2014. Vol. 9. P. 54–65.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Couwenberg J., Michaelis D., Joosten H. et al. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy // Hydrobiologia. 2011. Vol. 674. P. 67–89.
- Escobar D., Belyazid S., Manzoni S. Back to the future: restoring northern drained forested peatlands for climate change mitigation // Front. Environ. Sci. 2022. Vol. 10. P. 834371.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
- Frolking S., Roulet N.T. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions // Glob. Change Biol. 2007. Vol. 13. № 5. P. 1079–1088.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report. Nairobi: Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, 2022. 418 p.
<https://www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022>
- Granath G., Moore P., Lukenbach M., Waddington J.M. Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration // Sci Rep. 2016. № 6. P. 28498.
<https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Günther A., Barthelmes A., Huth V. et al. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions // Nat. Commun. 2020. Vol. 11. P. 1644.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: The role of moisture, density and oxygen supply // Int. J. Wildland Fire. 2017. № 26. P. 907–918.
<https://doi.org/10.1071/WF16198>
- IPCC, 2000. IPCC 2000 Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Methodology Report / J. Penman, D. Kruger, I. Galbally, T. Hiraishi, B. Nyenzi, S. Emmanul, L. Buendia, R. Hoppaus, T. Martinsen, J. Meijer, K. Miwa, K. Tanabe (Eds.). Hayama: IGES Publ., 2000.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Methodology Report / J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kru-

- ger, P. Riitta, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, F. Wagner (Eds.). Hayama: IGES Publ., 2003.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use / H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa et al. (Eds.). Hayama: IPCC, 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- IPCC, 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe (Eds.). Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc (Eds.). Switzerland: IPCC, 2019a.
- IPCC, 2019. Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia et al. (Eds.). Switzerland: 2019b. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Jarašius L., Eitzold J., Truus L. et al. Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore. Vilnius: Lithuanian Fund for Nature, 2022. 201 p.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al. The role of peatlands in climate regulation // Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice / A. Bonn, T. Allott, M. Evans et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2016. P. 63–76. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Laine J., Silvola J., Tolonen K. et al. Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands // *Ambio*. 1996. Vol. 25. № 3. P. 179–184.
- Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. P. 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
- Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9. P. 945–947. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // *Mires and Peat*. 2017. Vol. 19. P. 1–7. <https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Olofsson P., Foody G.M., Herold M. et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // *Remote Sens. Environ.* 2014. № 148. P. 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Päivänen J., Hanell B. Peatland ecology and forestry – a sound approach. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2012. 267 p.
- Peatlands and climate change / M. Strack (Ed.). Saarijaarvi: Saarijarven Offset Oy, 2008. 223 p.
- Rydin H., Jeglum J. The biology of peatlands. 2nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 382 p.
- Sirin A., Laine J. Peatlands and Greenhouse Gases // Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change. Main Report / F. Parish, A. Sirin, D. Charman (Eds.). Wageningen: Global Environ. Centre, Kuala Lumpur and Wetlands Int., 2008. P. 118–138.
- Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part) // Mires and peatlands of Europe: status, distribution and conservation / H. Joosten, F. Tanneberger, A. Moen (Eds.). Stuttgart: Schweizerbart Sci. Publ., 2017. P. 589–616. <https://doi.org/10.1127/mireseurope/2017/0001-0049>
- Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A. Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data // *Land*. 2018. Vol. 7. № 2. P. 71. <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A. et al. Multispectral satellite-based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow region (Russia) // *Ecol. Engin.* 2020. Vol. 158. P. 106044. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>
- Sirin A., Maslov A., Makarov D. et al. Assessing Wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreonemoral zone // *Forests*. 2021a. Vol. 12. № 7. P. 880. <https://doi.org/10.3390/f12070880>
- Sirin A., Medvedeva M., Minayeva T. et al. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting // *Land*. 2021b. Vol. 10. P. 1200. <https://doi.org/10.3390/land10111200>
- Sirin A., Medvedeva M. Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: identification among other wildfires // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. P. 194. <https://doi.org/10.3390/rs14010194>
- Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al. The peatland map of Europe // *Mires and Peat*. 2017. Vol. 19. Art. 22. P. 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>
- Tanneberger F., Joosten H., Moen A. et al. Mires in Europe – regional diversity, condition and protection // *Diversity*. 2021. Vol. 13. № 8. P. 381. <https://doi.org/10.3390/d13080381>
- Tubiello F.N., Biancalani R., Salvatore M. et al. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils // *Sustainability*. 2016. № 8. Art. 371. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Wilson D., Blain D., Couwenberg J. et al. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils // *Mires and Peat*. 2016. Vol. 17. P. 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>
- Vozbrannaya A., Antipin V., Sirin A. After Wildfires and Rewetting: Results of 15+ Years' Monitoring of Vegetation and Environmental Factors in Cutover Peatland // *Diversity*. 2023. Vol. 15. P. 3. <https://doi.org/10.3390/d15010003>

Rewetting of Disused Drained Peatlands and Reduction of Greenhouse Gas Emissions

A. A. Sirin¹, M. A. Medvedeva¹ *, and V. Yu. Itkin^{1, 2}

¹Peatland Protection and Restoration Center, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Moscow oblast, Russia

²Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

*e-mail: eveeza@yandex.ru

Drained peatlands are a significant source of greenhouse gas emissions to the atmosphere. When abandoned, they become the most likely sites of peat fires. An effective way to reduce greenhouse gas emissions and prevent peatland fires in disused drained peatlands is through rewetting and wetland restoration. These can make significant contributions to the implementation of the Paris Climate Agreement within the Land Use, Land-Use Change and Forestry sector and, ultimately, to climate change mitigation. An approach for estimating greenhouse gas emission reductions following rewetting, applicable to national and regional accounting, as well as to specific rewetting projects, is presented. It includes a methodology for determining effectively rewetted areas that can be considered wetlands, the application of IPCC greenhouse gas emission factors to said sites, and an uncertainty assessment. Starting from 2020 the Russian Federation National Report of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gasses not controlled by the Montreal Protocol utilised this approach in its inclusion of rewetted peatlands. An assessment of greenhouse gas emission reductions is presented using the example of a 1500 ha section of a peatland within the Fire Hazardous Peatland Rewetting Programme in Moscow Oblast (2010–2013). CO₂ emission reductions were cumulatively 33.4 thous. t by 2022 (taking into account nitrous oxide fluxes, dissolved organic carbon removal and increased CH₄ emissions—20 thous. t CO₂-eq.) and are projected to reach almost 113 (68) thous. t by 2050. Greenhouse gas emission reductions not yet included as well as possible ways of accounting for them in the future are also noted.

Keywords: climate change, mitigation, peatlands, multispectral space images, peat extraction, Paris Agreement on Climate, National Cadaster

REFERENCES

- A Quick Scan of Peatlands in Central and Eastern Europe.* Minayeva T., Sirin A., Bragg O., Eds. Wageningen: Wetlands Int., 2009. 132 p.
- Ahmad S., Liu H., Günther A., Couwenberg J., Lennartz B. Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function. *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 749, p. 141571. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141571>
- Alekseychik P., Korrensalo A., Mammarella I., Launiainen S., Tuittila E.-S., Korpela I., Vesala T. Carbon balance of a Finnish bog: temporal variability and limiting factors based on 6 years of eddy-covariance data. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, no. 16, pp. 4681–4704. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4681-2021>
- Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Main report.* Parish F., Sirin A., Charman D. et al., Eds. Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008. 179 p.
- Bonn A., Reed M., Evans C.D., Joosten H., Bain C., Farmer J., Emmer I., Couwenberg J., Moxey A., Artz R., Tanneberger F., von Unger M., Smyth M.-A., Birnie D. Investing in nature: developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosyst. Serv.* 2014, vol. 9, pp. 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
- Carbon Credits from Peatland Rewetting. Climate—Biodiversity—Land Use.* Tanneberger F., Wichtmann W., Eds. Stuttgart: E. Schweizerbart Science Publ., 2011. 221 p.
- Chistotin M.V., Sirin A.A., Dulov L.E. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane emission from a peatland in Moscow region drained for peat extraction and agricultural use. *Agrokhimiya*, 2006, no. 6, pp. 54–62. (In Russ.).
- Chistotin M.V., Suvorov G.G., Sirin A.A. The temporal pattern of methane emission from drained peat soil at pot experiment as depended on vegetation and soil moisture. *Agrokhimiya*, 2016, no. 12, pp. 20–33. (In Russ.).
- Couwenberg J., Michaelis D., Joosten H., Augustin J., Bärtsch S., Dubovik D., Liashchynskaya N., Michaelis D., Minke M., Skuratovich A., Joosten H. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 2011, no. 674, pp. 67–89. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Escobar D., Belyazid S., Manzoni S. Back to the future: restoring northern drained forested peatlands for climate change mitigation. *Front. Environ. Sci.*, 2022, vol. 10, p. 834371. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.834371>
- Frolking S., Roulet N.T. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Glob. Change Biol.*, 2007, vol. 13, no. 5, pp. 1079–1088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Global Peatlands Assessment – The State of the World’s Peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands. Main Report.* Nairobi: Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, 2022. 418 p.
- Glukhova T.V., Sirin A.A. Losses of soil carbon upon a fire on a drained forested raised bog. *Eurasian Soil Sci.*,

- 2018, no. 51, pp. 542–549.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318050034>
- Granath G., Moore P., Lukenbach M., Waddington J.M. Mitigating wildfire carbon loss in managed northern peatlands through restoration. *Sci Rep.*, 2016, no. 6, p. 28498.
<https://doi.org/10.1038/srep28498>
- Günther A., Barthelmes A., Huth V., Joosten H., Jurasinski G., Koebsch F., Couwenberg J. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, p. 1644.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>
- Huang X., Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: The role of moisture, density and oxygen supply. *Int. J. Wildland Fire.*, 2017, no. 26 (11), pp. 907–918.
<https://doi.org/10.1071/WF16198>
- IPCC, 2000. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Methodology Report*. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanul S., Buendia L., Hop-paus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K., Eds. Hayama: IGES Publ., 2000.
- IPCC, 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Methodology Report*. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Riitta P., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F., Eds. Hayama: IGES Publ., 2003.
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Vol. 4. Agriculture, forestry and other land use*. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. et al., Eds. Hayama: IGES Publ., 2006.
- IPCC, 2014. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Hiraishi T., Krug T., Tanabe K. et al., Eds. Switzerland: IPCC, 2014.
- IPCC 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A. et al., Eds. Switzerland: IPCC, 2019a.
- IPCC 2019. *Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E. et al., Eds. Switzerland, 2019b.
- Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore*. Jarašius L., Etzold J., Truus L., Purre A.-H., Sendžikaitė J., Strazdiņa L., Zableckis N., Pakalne M., Bociąg K., Ilomets M., Herrmann A., Kirschev T., Pajula R., Pawlaczyk P., Chlost I., Ciešliński R., Gos K., Libauers K., Sinkevicius Ž., Jurema L., Eds. Vilnius: Lithuanian Fund for Nature Publ., 2022. 201 p.
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation. In *Peatland Restoration and Ecosystem Services. Science, Policy and Practice*. Bonn A., Allott T., Evans M. et al., Eds. Cambridge: CUP, 2016, pp. 63–76.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.005>
- Laine J., Silvola J., Tolonen K., Alm J., Nykänen H., Vasander H., Sallantausta T., Savolainen I., Sinisalo J., Martikainen P.J. Effect of water-level drawdown on global climatic warming: northern peatlands. *Ambio*, 1996, vol. 25, no. 3, pp. 179–184.
- Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nat. Commun.*, 2018, no. 9, p. 1071.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
- Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100. *Nat. Clim. Change*, 2019, no. 9, pp. 945–947.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0615-5>
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A., Sirin A.A. Multispectral remote sensing for assessing changes on abandoned peat extraction lands. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2011, no. 5, pp. 80–88. (In Russ.).
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. Capabilities of multispectral remote sensing data in an assessment of the status of abandoned fire hazardous and rewetting peat extraction lands. *Izv., Atmosf. Ocean. Phys.*, 2017, no. 53, pp. 1072–1080.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817090201>
- Medvedeva M.A., Vozbrannaya A.E., Sirin A.A., Maslov A.A. Possibilities of different multispectral satellite data for monitoring of abandoned fire hazardous peatlands and effectiveness of their rewetting. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 150–159. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159>
- Medvedeva M.A., Makarov D.A., Sirin A.A. Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 157–166. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166>
- Minayeva T.Y., Sirin A.A. Peatland biodiversity and climate change. *Biol. Bull. Rev.*, 2012, no. 2, pp. 164–175.
<https://doi.org/10.1134/S207908641202003X>
- Minayeva T.Y., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity. *Mires Peat*, 2017, no. 19, pp. 1–7.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2013.OMB.150>
- Natsional'nyi doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorptsii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2020 gg. Chast' I* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions from Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020. Part I]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 468 p.
- Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.*, 2014, vol. 148, pp. 42–57.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Peatland ecology and forestry – a sound approach*. Päivänen J., Hännell B., Eds. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos, 2012. 267 p.
- Peatlands and climate change*. Strack M., Ed. Saarijarvi: Saarijarven Offset Oy, 2008. 223 p.

- Perspektivnoe ispol'zovanie vyrobotannykh torfyanykh bolot: monografiya* [Perspective Use of Depleted Peat Bogs: Monograph]. Panova V.V., Ed. Tver': Triad Publ., 2013. 280 p.
- Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Smirnov N.S., Karaban' R.T., Trunov A.A. Land use contribution to the anthropogenic emission of greenhouse gases in Russia in 2000–2011. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, no. 3 (39), pp. 137–145.
<https://doi.org/10.3103/S1068373914030017>
- Rydin H., Jeglum J. The biology of peatlands. 2nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 382 p.
- Sirin A., Laine J. Peatlands and Greenhouse Gases. In *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change. Main Report*. Parish F., Sirin A., Charman D. et al., Eds. Kuala Lumpur: Global Environment Centre; Wageningen: Wetlands Int., 2008, pp. 118–138.
- Sirin A.A., Minaeva T.Yu., Vozbrannaya A.E., Bartalev S.A. How to avoid peat fires? *Nauka v Rossii*, 2011, no. 2, pp. 13–21. (In Russ.)
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. Values of methane emission from drainage ditches. *Dinamika Okruzh. Sredy i Glob. Izm. Klimata*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 1–10. (In Russ.)
- Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V. Mapping of peatlands in the Moscow oblast based on high-resolution remote sensing data. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2014, no. 7, pp. 808–814.
<https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
- Sirin A., Minayeva T., Yurkovskaya T. et al. Russian Federation (European Part). In *Mires and peatlands of Europe: status, distribution and conservation*. Joosten H., Tanneberger F., Moen A., Eds. Stuttgart: Schweizerbart Sci. Publ., 2017, pp. 589–616.
- Sirin A., Medvedeva M., Maslov A., Vozbrannaya A. Assessing the land and vegetation cover of abandoned fire hazardous and rewetted peatlands: comparing different multispectral satellite data. *Land*, 2018, no. 7 (2), 71 p.
<https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Sirin A.A., Makarov D.A., Gummert I., Maslov A.A., Gul'be Ya.I. Depth of peat burning and carbon loss during an underground forest fire. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2020, no. 13, pp. 769–779.
<https://doi.org/10.1134/S1995425520070112>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H. Multispectral satellite-based monitoring of land cover change and associated fire reduction after large-scale peatland rewetting following the 2010 peat fires in Moscow region (Russia). *Ecol. Engin.*, 2020, vol. 158, p. 106044.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106044>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Makarov D.A., Maslov A.A., Joosten H. Monitoring of vegetation cover of rewetted peatlands in Moscow oblast. *Vestn. St. Peterb. Gos. Univ., Nauki o Zemle*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 314–336. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.206>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Il'yasov D.V., Korotkov V.N., Minaeva T.Yu., Suvorov G.G. Rewetted peatlands in the climate reporting of the Russian Federation. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 84–112. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-84-112>
- Sirin A., Maslov A., Makarov D., Gulbe Y., Joosten H. Assessing Wood and soil carbon losses from a forest-peat fire in the boreo-nemoral zone. *Forests*, 2021a, no. 12 (7), 880 p.
<https://doi.org/10.3390/f12070880>
- Sirin A., Medvedeva M., Korotkov V., Itkin V., Minayeva T., Ilyasov D., Suvorov G., Joosten H. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting. *Land*, 2021b, no. 10, 1200 p.
<https://doi.org/10.3390/land10111200>
- Sirin A.A. Peatbogs and anthropogenically modified peatlands: carbon, greenhouse gases and climate change. *Biol. Bull. Rev.*, 2022, no. 12 (Suppl. 2), pp. S123–S139.
<https://doi.org/10.1134/S2079086422080096>
- Sirin A., Medvedeva M. Remote sensing mapping of peat-fire-burnt areas: identification among other wildfires. *Remote Sens.*, 2022, no. 14, 194 p.
<https://doi.org/10.3390/rs14010194>
- Sirin A.A., Medvedeva M.A., Itkin V.Yu., Makarov D.A., Korotkov V.N. Peat fire detection to estimate greenhouse gas emissions. *Meteorolog. i Gidrolog.*, 2022, no. 10, pp. 33–45. (In Russ.)
- Sirin A.A., Suvorov G.G. Greenhouse gas emissions from peat extraction in the center of the European part of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, no. 3, pp. 207–216.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922030062>
- Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. Effect of vegetation and moisture conditions on the emission of methane from drained peat soil. *Agrokhimiya*, 2010, no. 12, pp. 37–45. (In Russ.)
- Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture. *Agrokhimiya*, 2015, no. 11, pp. 51–62. (In Russ.)
- Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S., Barthelmes A., Shumka S., Mariné A.M., Jenderedjian K., Steiner G.M., Essl F., Etzold J., Mendes C., Kozulin A., Frankard P., Milanović D., Ganeva A., Apostolova I., Alegro A., Delipetrou P., Navrátilová J., Risager M., Leivits A., Fosaa A.M., Tuominen S., Muller F., Bakuradze T., Sommer M., Christianis K., Szurdoki E., Oskarsson H., Brink S.H., Connolly J., Bragazza L., Martinelli G., Aleksans O., Priede A., Sungaila D., Melovski L., Belous T., Saveljić D., de Vries F., Moen A., Dembek W., Mateus J., Hanganu J., Sirin A., Markina A., Napreenko M., Lazarević P., Šefferoá-Stanová V., Skoberne P., Pérez P.H., Pontevedra-Pombal X., Lonnstad J., Küchler M., Wüst-Galley C., Kirca S., Mykytiuk O., Lindsay R., Joosten H. The peatland map of Europe. *Mires Peat*, 2017, no. 19, article 22, pp. 1–17.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>
- Tanneberger F., Joosten H., Moen A., Lewis E., Miles L., Sirin A., Tegetmeyer C., Joosten H. Mires in Europe – regional diversity, condition and protection. *Diversity*, 2021, vol. 13, no. 8, 381 p.
<https://doi.org/10.3390/d13080381>
- Torfyanye bolota Rossii: k analizu otraslevoi informatsii* [Peatlands of Russia: to the Analysis of Sectorial Information]. Sirin A.A., Minaeva T.Yu., Eds. Moscow: GEOS Publ., 2001. 190 p.

- Tubiello F.N., Biancalani R., Salvatore M., Rossi S., Conchedda G. A worldwide assessment of greenhouse gas emissions from drained organic soils. *Sustain.*, 2016, vol. 8, no. 4, no. 371, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8040371>
- Vomperskii S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2005, no. 5, pp. 39–50. (In Russ.).
- Vomperskii S.E., Glukhova T.V., Smagina M.V., Kovaliev A.G. The conditions and consequences of fires in pine forests on drained bogs. *Lesoved.*, 2007, no. 6, pp. 35–44. (In Russ.).
- Vozbrannaya A., Antipin V., Sirin A. After Wildfires and Rewetting: Results of 15+ Years' Monitoring of Vegetation and Environmental Factors in Cutover Peatland. *Diversity*, 2023, no. 15, 3 p. <https://doi.org/10.3390/d15010003>
- Water Code of the Russian Federation*. The Federal Law no. 74 of June 03, 2006. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102107048> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).
- Wilson D., Blain D., Couwenberg J., Evans C.D., Murdiyarso D., Page S.E., Renou-Wilson F., Rieley J.O., Sirin A., Strack M., Tuittila E.-S. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires Peat*, 2016, no. 17, pp. 1–28. <https://doi.org/10.19189/Map.2016.OMB.222>

ЭКОНОМИКА И РЫНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ

УДК 504.062.4

ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ В РОССИИ: КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ И УСЛОВИЯ УСПЕХА

© 2023 г. Н. К. Куричев^{a, b, *}, А. В. Птичников^{a, b}, Е. А. Шварц^{a, b}, А. Н. Кренке^{a, b}

^aНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

^bИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: nkurichev@hse.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

В статье рассматриваются ключевые проблемы и условия успешного развития отрасли природно-климатических проектов (ПКП) в России. С учетом состояния и перспектив развития внешних рынков углеродных единиц, получаемых в рамках ПКП (добровольные углеродные рынки, национальные углеродные рынки, реализация проектов в рамках статей 6.2 и 6.4 Парижского соглашения) определены условия успешного выхода углеродных единиц от российских ПКП на мировой рынок. Представлены ключевые ограничения для внутреннего рынка углеродных единиц российских ПКП: отсутствие внутренних экономических стимулов для компаний к приобретению углеродных единиц и к инвестициям в российские ПКП, отсутствие национальных методологий реализации ПКП, правовые ограничения, отсутствие доступных инструментов оценки потенциала территорий для реализации ПКП, недостатки регулирования углеродного рынка на примере Сахалинского эксперимента. Показаны ограничения ведомственного подхода к развитию сферы ПКП, который приводит к несогласованным и непоследовательным решениям, не соответствующим реальным условиям на мировых рынках. Для снятия указанных ограничений необходимо создание центра компетенций по всему спектру вопросов, связанных с реализацией ПКП – от конкретных методологий отдельных проектов до научно обоснованных оценок их потенциала на уровне России. Рассмотрены два сценария использования ПКП для декарбонизации российской экономики: 1) преимущественно продажа российских углеродных единиц ПКП на внешних рынках с максимизацией экспортных доходов в среднесрочной перспективе; 2) развитие сферы ПКП преимущественно для внутреннего рынка для достижения углеродной нейтральности к 2060 г. Реалистичная и сбалансированная стратегия предполагает, что ключевыми покупателями углеродных единиц от российских ПКП на первом этапе должны стать экспортно-ориентированные российские компании, которые смогут использовать эти единицы для снижения углеродного следа своей продукции и выполнения корпоративных климатических стратегий.

Ключевые слова: природно-климатический проект, углеродные рынки, стратегия низкоуглеродного развития

DOI: 10.31857/S2587556623040040, EDN: UJEAGE

ВВЕДЕНИЕ

Глобальная климатическая политика ставит перед Россией новые вызовы и одновременно открывает новые возможности. Крупнейшим вызовом является необходимость достижения к 2060 г. заявленной цели по углеродной нейтральности. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. предполагает ключевую роль управляемых экосистем (в первую очередь лесного сектора). Действительно, Россия располагает глобально значимым экологическим потенциалом [в первую очередь 20% мировой площади лесов с крупнейшим и ранее недооцененным потенциалом нетто-поглощения углерода (Schepaschenko et al., 2021), а также 8% площади пахотных

земель], который может быть использован для реализации мероприятий по увеличению нетто-поглощения парниковых газов. Такие мероприятия могут быть упакованы по определенным стандартам и методологиям в природно-климатические проекты (ПКП), а полученные углеродные единицы поглощения – проданы на углеродных рынках.

Существующие оценки¹ показывают, что для достижения целей Парижского соглашения и удержания роста глобальной температуры к до-

¹ UNEP Emissions Gap Report 2022: The Closing Window: Climate crisis calls for rapid transformation of societies. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/40874> (дата обращения 26.11.2022).

индустриальному уровню в пределах 2°C (и тем более 1.5°C) текущих мер по снижению прямых выбросов парниковых газов далеко не достаточно. Поэтому настоятельной необходимостью является реализация потенциала поглощения парниковых газов управляемыми экосистемами, в первую очередь лесами и сельскохозяйственным землями. Для этого необходимо создание крупной отрасли природно-климатических проектов, которая обеспечила бы привлечение инвестиций с выходом к 2050 г. на дополнительное нетто-поглощение парниковых газов на уровне не менее 5 млрд т CO₂-экв., или до 12% текущего мирового объема выбросов (Blaufelder et al., 2021). Согласно ряду исследований (Girardin et al., 2021; Griscom, 2018; Walker et al., 2022). ПКП могут обеспечить до 37% глобального снижения нетто-выбросов. Наряду с другими мерами, другими видами офсет-проектов (например, по улавливанию и захоронению углерода в геологических структурах, в том числе на выработанных нефтегазовых месторождениях — Carbon Capture, Utilization & Storage) и в первую очередь с крупномасштабными мерами по снижению прямых выбросов парниковых газов это позволит приблизиться к глобальным климатическим целям.

В настоящее время отрасль ПКП находится на стадии становления и быстрого роста. Формируются межправительственные (диалог по статьям 6.2 и 6.4 Парижского соглашения в рамках COP-26 и COP-27) и негосударственные регуляторные рамки, созданы необходимые стандарты и методологии, быстро растут добровольные углеродные рынки, в ряде стран развиваются регулируемые национальные и субнациональные рынки. Это новая быстро растущая отрасль мировой экономики, в которой Россия может занять значимое место.

В России интерес к ПКП начал активно проявляться с 2020–2021 гг.² в ходе разработки корпоративных планов декарбонизации, а также в связи с принятием Стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.³, в которой большое внимание уделено увеличению нетто-поглощения парниковых газов управляемыми экосистемами. Однако на пути развития природно-климатических проектов в России сохраняются многочисленные препятствия, связанные с неготовностью нормативно-правовой базы и нехваткой компетенций, а в особенности с отсутствием

целостной стратегии развития отрасли. С целью выработки такой стратегии в статье рассмотрены основные сегменты внешних углеродных рынков для углеродных единиц от ПКП, проблемы развития внутреннего углеродного рынка, основные стратегические развилки и условия успеха отрасли со стороны внешнего и внутреннего спроса и со стороны предложения.

МЕТОДОЛОГИИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ И БАЗОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Природно-климатические проекты — это инициативы по повышению углерод-депонирующей функции экосистем и ее монетизации на углеродных рынках в форме углеродных единиц (Юлкин и др., 2013; Scott et al., 2021). Основой природно-климатического проекта являются стандарты ПКП и разработанные в их рамках методологии, на основе которых готовится документация по проекту (project design documentation, PDD). Продажа углеродных единиц на мировых рынках (или учет в корпоративной климатической отчетности) возможна только после проведения независимой валидации ПКП и верификации полученных УЕ на предмет соответствия выбранному стандарту. Эта процедура призвана гарантировать достоверность факта нетто-поглощения углерода в рамках проекта. В рамках стандарта VCS для единиц, прошедших данную процедуру, используется термин “верифицированные углеродные единицы” (*Verified Carbon Units*); далее мы будем использовать данный термин для аналогичных единиц и в рамках других стандартов.

Ключевыми элементами методологий ПКП являются следующие:

- дополнительность — увеличение нетто-поглощения углерода по сравнению с базовой линией (business as usual) и выполнением требований законодательства;

- финансовая дополнительность — оплачиваются только дополнительные усилия по увеличению нетто-поглощения, которые не могли быть реализованы без дополнительного финансирования, привлекаемого в рамках проекта;

- принятые методики и технологии mrv (measurement, reporting, verification; иногда также используется формулировка monitoring, reporting, verification);

- постоянство — поглощение углерода на длительный срок (по меньшей мере несколько десятилетий⁴) и гарантии поддерживающих мероприятий на это время;

² В первый период реализации Киотского протокола (2008–2012 гг.) было реализовано только 3 проекта (“Терней Лес”, Бикинский проект и Алтайский ПКП), причем только в рамках Бикинского проекта были проданы углеродные единицы.

³ Утв. Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р.

⁴ В рамках COP-26 была согласована продолжительность ПКП в пределах 45 лет, максимум три 15-летних периода.

– учет рисков “утечки углерода” (leakage – возможности перераспределения выбросов, предотвращенных в рамках проекта, на соседние территории), рисков “непостоянства” (потери накопленного пула углерода, например, в результате лесного пожара), требования по резервированию части углеродных единиц для компенсации этих рисков.

Таким образом, климатическим проектом могут быть только целенаправленные усилия по увеличению поглощения или снижений эмиссий парниковых газов. Невозможно в рамках ПКП извлекать доход просто на основе наличия прав собственности или аренды на землю, где располагается поглощающая экосистема, или в результате обычной деятельности, нацеленной на извлечение прибыли.

К настоящему времени на мировом климатическом рынке сложились признанные стандарты ПКП [Verified Carbon Standard (VCS), Gold Standard, CDM и др.; обзор стандартов и методологий см. в (Arcusa and Sprenkle-Huppel, 2022)], разработаны многочисленные методологии для разных типов проектов, правила валидации и верификации. Около 80% добровольного рынка занимает VCS ассоциации Verra⁵. Из-за опасений относительно возможности реализации некачественных проектов [критику ряда проектов см. в (Guizar-Coutiño et al., 2022; Pan et al., 2022; West et al., 2020; West et al., 2023)⁶] существует значительная оппозиция по отношению к отрасли ПКП. Однако в последние пять лет лидирующие природоохранные организации (IUCN, WWF, The Nature Conservancy, WRI) в партнерстве с научным и экспертным сообществами определили пути повышения устойчивости ПКП, разработали новые стандарты и рекомендации по ПКП, включая новую серию стандартов декарбонизации Science Based Target initiative (SBTi) Corporate Net Zero⁷, VCM Integrity initiative⁸, ICVCM Core Carbon Principles⁹ и ряд других. При этом SBTi, эксперты и

НКО считают необходимым ориентироваться на долю ПКП в корпоративных стратегиях декарбонизации в пределах 10–20%, в зависимости от отрасли. Качественные ПКП на основе прозрачных методологий являются ключевым условием доверия к данному типу проектов и их успеха на мировом рынке, что отражено и в рекомендациях ООН¹⁰.

ПКП включают лесоклиматические проекты (сохранение лесов, предотвращение эмиссий от лесных пожаров, облесение и лесовосстановление, устойчивое лесопользование и интенсификация лесного хозяйства и т.д.), агроклиматические проекты (технологии нулевой (no till) или минимальной вспашки (mini till), сокращение потерь углерода от эрозии и т.д.), прочие типы ПКП (восстановление нарушенных и деградированных земель, обводнение осушенных водноболотных угодий и т.д.). В России основную роль в потенциале ПКП, безусловно, играют лесоклиматические проекты.

ПКП – это частный случай более широкого понятия природно-климатических решений (ПКР). ПКП должны учитывать не только цели по максимизации нетто-поглощения углерода, но и смежные задачи устойчивого развития: поддержание биоразнообразия, поддержка местных сообществ в рамках стандартов IUCN Global Standard for Nature Based Solutions (IUCN ..., 2020), а также Climate, Community and Biodiversity Standards (Pitman, 2011; Richards, 2011; Richards and Panfil, 2011). Возникшие в ряде регионов России инициативы по реализации ПКП с использованием быстрорастущих интродуцентов (например, паулонии) и инвазивных видов растений не соответствуют указанным мировым стандартам, а поэтому не будут востребованы на внешних рынках.

КЛЮЧЕВЫЕ ВНЕШНИЕ РЫНКИ ДЛЯ УГЛЕРОДНЫХ ЕДИНИЦ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РАМКАХ ПКП

К настоящему времени сложилось несколько сегментов рынка углеродных единиц, полученных в рамках природно-климатических проектов (УЕ ПКП) и иных офсет-проектов: добровольные углеродные рынки; (Парижское соглашение, ст. 6); ряд национальных и субнациональных регулируемых рынков. Каждый из данных сегментов рынка обладает значительным потенциалом, но одновременно имеет свои особенности и сложности с точки зрения реализации российских УЕ ПКП.

⁵ The Art of Integrity: Ecosystem Marketplace’s State of the Voluntary Carbon Markets 2022 Q3. Forest Trends, 2022. <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/> (дата обращения 26.11.2022).

⁶ См. также: International Organization of Securities Commissions. Voluntary Carbon Markets Discussion Paper, 2022. <https://www.iosco.org/library/pubdocs/pdf/IOSCOPD718.pdf> (дата обращения 19.01.2023).

⁷ SBTi Corporate Net-Zero Standard, Version 1.0, October 2021. <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard.pdf> (дата обращения 23.11.2022).

⁸ Voluntary carbon markets Integrity initiative. VCM Integrity Code of Practice, 2022. <https://vcmintegrity.org/wp-content/uploads/2022/06/VCM-Integrity-Code-of-Practice.pdf> (дата обращения 19.01.2023).

⁹ Integrity Council for Voluntary Carbon Market (ICVCM). Core Carbon Principles, 2022. <https://icvcm.org/the-core-carbon-principles/> (дата обращения 19.01.2023).

¹⁰ Integrity matters: Net Zero commitments by businesses, financial institutions, cities and regions. United Nations’ High-Level Expert Group on the Net Zero Emissions Commitments of Non-State Entities, 2022. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/high-level-expert_group_n7b.pdf (дата обращения 14.10.2022).

Добровольные углеродные рынки

Наиболее развитым сегментом являются добровольные углеродные рынки. Суть добровольных рынков состоит в том, что компании приобретают углеродные единицы не для выполнения обязательных требований регуляторов, а для демонстрации заинтересованным сторонам (инвесторам, потребителям и др.) приверженности климатическим целям и готовности инвестировать в их достижение¹¹. Экономическая отдача от таких вложений носит не прямой, а косвенный характер — приобретенные углеродные единицы, с учетом требований глобальных стандартов достижения углеродной нейтральности (например, SBTi Corporate Net Zero, BSI PAS 2060 и др.), могут учитываться в корпоративной климатической отчетности и включаться в стратегиях декарбонизации. Это влияет на климатические и ESG-рейтинги компаний, а через них — на стоимость привлечения заемного капитала, привлекательность компании для инвесторов и на ее капитализацию (Buchner et al., 2019). Именно поэтому почти всегда приобретаются верифицированные углеродные единицы, а их “качество”, репутация и уровень доверия к ним являются принципиальным вопросом.

Активное развитие добровольных углеродных рынков началось с 2015–2016 гг., когда были разработаны основные стандарты и методологии, обеспечена их связь с целями устойчивого развития (ЦУР) ООН, а развитие углеродного регулирования усилило интерес бизнеса к природным решениям в области декарбонизации. Только за 2021 г. объем продаж углеродных единиц ПКП на добровольных рынках вырос в 2 раза, достигнув 2 млрд долл., стоимость углеродных единиц достигла 4.0 долл./т CO₂-экв. (по сравнению с 2.5 долл./т в 2020 г.)¹². В 2022 г. рост приостановился из-за турбулентности в мировой экономике, однако рынок сохранил значительную активность¹³. Проекты в сфере лесного хозяйства и землепользования обеспечивают до 65% оборота рынка с премиальными ценами (5.8 долл./т). Согласно прогнозам, к 2030 г. рынок может вырасти

до 1 млрд т CO₂-экв. при многократном росте цен, а к 2050 г. объем рынка может составить 3–13 млрд т CO₂-экв. и до 550 млрд долл. (Blaufelder et al., 2021).

Сдерживающим механизмом для выхода UE от российских ПКП на добровольные углеродные рынки является ограничения доступа к существующим системам валидации и верификации (табл. 1). Они основаны на стандартах, держателями которых являются расположенные в США (Verra) или Европе (Gold Standard — Швейцария) некоммерческие ассоциации. Несмотря на то, что климатические проекты не подвергаются ограничениям в рамках действующих санкционных режимов, Verra с марта 2022 г. приостановил работу с проектами, которые реализуют российские юридические лица. Еще ранее, в 2021 г., в России прекратил работать Gold Standard (по причинам, связанным не с геополитической ситуацией, а с недостаточной амбициозностью климатических целей России). Применяемый в развивающихся странах стандарт CDM и его методологии (которые рекомендует применять АО “Контур” — оператор российского реестра углеродных единиц), может использоваться для добровольных углеродных рынков, но сравнительно слабо востребован на них.

Наиболее значимая альтернативная система валидации и верификации — Global Carbon Council, базирующаяся в Катаре и работающая как в развитых странах Запада, так странах Востока и Юга в широком смысле слова (Турция, Катар, Оман, Индия, Китай, Вьетнам, Индонезия, Перу и др.). Кроме проектов по собственным методологиям GCC принимает проекты, использующие методологии CDM и других международных стандартов. Стандарт Global Carbon Council пока существенно уступает по масштабу деятельности и срокам рассмотрения проектов лидерам систем валидации и верификации (VCS и Gold Standard).

Климатическая дипломатия должна включать не только участие в межправительственных переговорах по линии Парижского соглашения, но и переговоры с глобальными системами сертификации (в первую очередь, Verra) о возобновлении сертификации для российских производителей. В любом случае для развития отрасли ПКП в России необходима национальная система сертификации UE от ПКП, которая была бы гармонизирована с требованиями международных систем сертификации, таких как Verra, Gold Standard, GCC, будущими стандартами в рамках статей 6.2 и 6.4 Парижского соглашения.

Углеродные рынки в рамках международных климатических соглашений

Второй крупный потенциальный сегмент углеродных рынков для российских ПКП — рынки

¹¹World Business Council for Sustainable Development. Natural climate solutions: the business perspective, 2019. https://docs.wbcsd.org/2019/09/WBCSD-Natural_climate_solutions-the_business_perspective.pdf (дата обращения 28.10.2022).

¹²The Art of Integrity: Ecosystem Marketplace’s State of the Voluntary Carbon Markets 2022 Q3. Forest Trends, 2022. <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/> (дата обращения 26.11.2022).

¹³The Voluntary Carbon Market Dashboard. Climate Focus Update 2022 H1, 2023. <https://climatefocus.com/wp-content/uploads/2022/08/VCM-Dashboard-2022-H1.pdf> (дата обращения 19.01.2023). Voluntary Carbon Markets Chartbook Q2 2022. https://www.iif.com/portals/0/Files/content/220711_VCM_Q2_update.pdf (дата обращения 19.01.2023).

Таблица 1. Мировые рынки для углеродных единиц от природно-климатических проектов

Сегмент рынка	Стандарт	Объем и потенциал рынка	Цены, долл./т CO ₂ -экв.	Факторы роста и ограничения
Добровольные рынки	VCS (Verra), Gold Standard, ACR, CAR, Plan Vivo, GCC	2021 г.: 227 млн т CO ₂ -экв. и 1.3 млрд долл. К 2030 г. до 1 млрд т CO ₂ -экв. и 50 млрд долл. К 2050 г. до 3–13 млрд т CO ₂ -экв. и 550 млрд долл.	2021 г.: 5.8. К 2030 г. до 50. К 2050 г. до 100–120.	Риски ограничений для российских проектов со стороны верификаторов. Не используются в рамках EU ETS и SVAM. Доля офсетов в корпоративных целях по декарбонизации ограничена (SBTi – 10%, НКО – 20–30%)
Механизм чистого развития (CDM)	Стандарт CDM	Интерес развивающихся стран в сохранении рынка	Цены несколько ниже цен добровольного рынка	Сегмент недоступен для российских проектов
Проекты в рамках статьи 6.4 Парижского соглашения (SDM)	Будут разработаны на основе действующих стандартов	На данный момент отсутствуют Высокая неопределенность (зависят от параметров, которые будут определены в ходе переговорного процесса) По оценкам Керт, объем рынка и цены могут превосходить параметры добровольных рынков, но есть значительная неопределенность относительно сложности стандартов и процедур верификации		Минимальные риски ограничений для российских проектов. Необходимость учета переданных в другие углеродные страны в рамках Реестра, исключающего двойной счет, с исключением из показателей России
Национальные регулируемые рынки углеродных единиц	Опираются на глобальные стандарты (CDM, Verra, Gold Standard и др.)	Действуют в Китае, Казахстане, Испании, Австралии, Колумбии, Республике Корея, Швейцарии; субнациональные рынки – в США, Канаде, Китае, Японии. Разрабатываются в Канаде, Мексике, ЮАР, Бразилии, Индии	Варьируют в широком диапазоне в зависимости от рынка	Значительные политические ограничения для российских ПКП на многих рынках. Необходимость реализации ПКП в рамках глобальных стандартов. Перспектива координации развития национальных углеродных рынков в рамках БРИКС
Рынок Китая (China ETS, UE от офсет-проектов CCR)	CDM	Доля CCR на рынке ограничена 5% (1–10% в региональных системах)	Цены на CCR: 7–8 (оценочно)	Почти все офсетов в Китае – не ПКП, а ВИЭ и инфраструктура. Лесных проектов, получивших право на выпуск углеродных единиц, мало. Неясна заинтересованность Китая в допуске российских UE

в рамках международных климатических соглашений, а именно, механизма устойчивого развития SDM в соответствии со статьями 6.2 и 6.4 Парижского соглашения. Но нужно учитывать существенные ограничения для данных проектов. Во-первых, с учетом негативного опыта ряда проектов в рамках механизма чистого развития CDM (Paulsson, 2009; Conant, 2011) в соответствии с решениями COP-26 для реализации таких проектов SDM должны быть разработаны жесткие стандарты с целью обеспечения доверия к углеродным единицам¹⁴. По состоянию на ноябрь 2022 г. такие стандарты не разработаны, их рассмотрение перенесено на COP-28 в 2023 г., а введены в действие они могут быть не ранее 2025 г. В основу стандартов и методологий SDM в рамках Парижского соглашения будут положены улучшенные методологии CDM, возможно будет интегрирован опыт добровольных стандартов Gold Standard и Verra. Во-вторых, негативное отношение к России со стороны большей части стран с наиболее жесткими климатическими обязательствами снизит интерес к приобретению российских УЕ. Вместе с тем, для механизмов системы ООН риска запрета на сертификацию и оборот УЕ от российских ПКП минимальны.

Принципиальным аспектом решений COP-26 является исключение двойного зачета результатов реализации ПКП. Полученные углеродные единицы могут быть *или* зачтены в рамках национальных обязательств (конкретнее, механизма “определяемого на национальном уровне вклада”, ОНУВ, NDC), если данные углеродные единицы были погашены в той же стране, где проект был реализован; *или* реализованы на внешних рынках, но тогда данное снижение выбросов исключается из ОНУВ¹⁵ [см. также (Müller and Michaelowa, 2019; Schneider et al., 2020)]. Для исключения двойного счета будет создан единый реестр углеродных единиц в рамках РКИК ООН, который станет ключевым элементом инфраструктуры всего рынка УЕ от ПКП. Для добровольных углеродных рынков возникает большая неопределенность — неясно, как конкретно будет подтверждаться отсутствие двойного счета для добровольных ПКП и как добровольные системы верификации будут соотноситься с реестром углеродных единиц. Для России возникает вопрос об увязке углеродных единиц, зарегистрированных в российском реестре АО “Контур”, с международным ре-

естром углеродных единиц, поскольку без этого оборот российских углеродных единиц на внешних рынках, равно как и учет данных поглощений внутри страны для ОНУВ, будут невозможны.

Национальные и субнациональные углеродные рынки

Третий сегмент углеродных рынков для ПКП — национальные и субнациональные рынки¹⁶. Такие рынки, как правило, не включают напрямую выбросы в секторах лесного и сельского хозяйства. Лишь отдельные страны, например КНР, Новая Зеландия, Колумбия, включили возможность использования *офсетных* проектов для нейтрализации выбросов ПГ на своих национальных рынках. В перспективе крупнейшим национальным рынком углеродных единиц может стать Китай, где в 2021 г. после многих лет экспериментов на региональном уровне была запущена национальная система торговли выбросами (China ETS). Углеродный рынок в Китае пока находится на ранней стадии развития, но с точки зрения продвижения российских УЕ более существенными являются ограничения, наложенные на офсетные углеродные единицы на рынке Китая¹⁷. В отличие от углеродного рынка Европейского Союза EU ETS, офсетные единицы в принципе допускаются на рынок. Но доля офсетных единиц (Carbon Certified Emission Reduction, CCER) в рамках China ETS ограничена 5% (1–10% в региональных системах)¹⁸. Почти все офсетные единицы в Китае — не УЕ от ПКП, а результаты проектов в области ВИЭ и инфраструктуры. Лесных проектов, получивших право на выпуск углеродных единиц, мало. В Китае нет собственных стандартов и методологий для ПКП, используются методологии CDM, которые на мировых рынках слабо востребованы. Качество многих проектов вызывает обоснованные сомнения, поэтому Национальная комиссия по развитию и реформам (NDRC) с 2017 г. приостановила рассмотрение проектов CCER/VER¹⁹. На 2022 г. было анонсировано возобновление рассмотрения таких проектов, но этого не произошло. Китайский углеродный рынок весьма закрыт: по состоянию на

¹⁶Национальные рынки действуют в Китае, Казахстане, Испании, Австралии, Колумбии, Республике Корея, Швейцарии, разрабатываются в Канаде, Мексике и ЮАР; региональные рынки действуют в США, Канаде, Китае, Японии. В перспективе могут возникнуть рынки УЕ ПКП в Бразилии и Индии.

¹⁷The status of China’s voluntary carbon market. Environment Defence Fund. <https://www.edf.org/climate/status-chinas-voluntary-carbon-market> (дата обращения 10.11.2022).

¹⁸Analytical Report on the Status of the China GNG Voluntary Emission Reduction Program, Environment Defence Fund. https://www.edf.org/sites/default/files/documents/Analytical-Report_on_the_Status_of_the_China_GHG_Voluntary_Emission_Reduction_Program-ENG.pdf (дата обращения 21.09.2022).

¹⁴“FCCC, Standing Committee on Finance Forum of the Standing Committee on Finance for Nature-based Solutions, Synthesis paper by the secretariat. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Forum%20synthesis%20report.pdf> (дата обращения 11.10.2022).

¹⁵Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement. Draft decision-/CMA.4. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4_CMA_decision_1.pdf (дата обращения 20.11.2022).

осень 2022 г. была проведена только одна сделка с участием юрисдикции вне материкового Китая, но и ее нельзя называть по-настоящему международной (Гонконг—Китай). Наконец, Китай рассматривает ПКП как механизм привлечения инвестиций в модернизацию экономики; неясно, в чем может состоять заинтересованность Китая в выходе УЕ от российских ПКП на китайский рынок²⁰.

В 2022 г. российские официальные лица неоднократно заявляли о целесообразности создания общего углеродного рынка с участием России в рамках международных объединений (ЕАЭС, СНГ, БРИКС, ШОС), предлагая в качестве инфраструктуры основы российский рынок углеродных единиц, несмотря на то, что российская углеродная инфраструктура пока находится на ранней стадии развития. Не отрицая принципиальной возможности создания подобных межгосударственных механизмов, которые могли бы быть альтернативой западно-центричным подходам, необходимо сначала сформулировать ответы на ключевые вопросы для построения такого рынка. Во-первых, как будет сформирован платежеспособный спрос? Какие экономические агенты будут приобретать углеродные единицы и зачем? Во-вторых, в чем будут состоять конкурентные преимущества данного рынка (или рынков) по отношению к существующим — с одной стороны, к гибким добровольным углеродным рынкам, а с другой стороны, к пользующимся универсальным признанием механизмам в рамках РКИК ООН (SDM, ранее CDM)? В-третьих, кто будет создавать стандарты и методологии в рамках этого механизма, учитывая медлительность межгосударственных многосторонних структур и их подверженность национальному лоббированию?

Перспективы российских ПКП на внешних рынках

Обзор внешних рынков для УЕ от российских ПКП приводит к двум выводам. Во-первых, это сложная и динамично меняющаяся среда: углеродные рынки находятся на стадии становления, поэтому в условиях борьбы стандартов России настоятельно необходима собственная экспертиза в области анализа и прогнозирования этой отрасли. Во-вторых, во всех сегментах мировых уг-

леродных рынков будут востребованы только качественные углеродные единицы. Глобальная отрасль ПКП имеет большие перспективы роста. Но развитие углеродных рынков носит волнообразный характер. После бума 2000-х годов с 2012 г. наступила длительная депрессия, связанная с откатым Европейского Союза допустить углеродные единицы, созданные по стандарту CDM, на углеродный рынок EU ETS (Qui, 2018; Michaelowa et al., 2021). Несмотря на усиление глобальной климатической повестки, нельзя исключать повторения такой динамики и в будущем. Стратегическим риском для добровольных углеродных рынков является динамика международного климатического сотрудничества. Если будет создан уже анонсированный “Климатический клуб” из США и их союзников (Falkner et al., 2021; Overland and Huda, 2022), то целый ряд стран, включая Россию, будет изолирован от этих механизмов. Если же российские компании будут длительное время лишены доступа на рынки товаров и капитала ЕС и США, то сократятся экономические стимулы для инвестиций в ПКП.

Внутренний углеродный рынок для ПКП

В формировании внутреннего углеродного рынка в части УЕ ПКП к концу 2022 г. сложилась противоречивая ситуация. С одной стороны, за 2020–2022 гг. сформирована основная часть нормативно-правовой базы — принят 296-ФЗ “Об ограничении выбросов парниковых газов”, предполагающий создание рынка углеродных единиц, и ряд постановлений Правительства²¹, конкретизирующие его положения в части реализации климатических проектов. Запущен Сахалинский эксперимент²², назначен оператор углеродных единиц в лице АО “Контур”. В сентябре 2022 г. в реестре были зарегистрированы первые климатические проекты и их углеродные единицы, проведены первые сделки.

С другой стороны, ключевой проблемой является низкий уровень прозрачности: в публичном доступе отсутствует достаточная информация о климатических проектах, в которых были выпущены углеродные единицы, зарегистрированные в реестре. Без открытости в вопросах методологии проектов, исходных данных, границ проектов и т. д. невозможно обеспечить доверие к их качеству, а значит, и востребованность выработанных

¹⁹NDRC Announcement on Suspending Applications for GNG Voluntary Emission Reduction Methodologies, Projects, Emission Reduction Issuance, Verification Bodies, and Exchanges (14.03.2017).

²⁰В Китае реализовано значительное количество климатических проектов в рамках CDM, в том числе ПКП, а также ведется масштабная работа по применению ПКР для адаптации сельского хозяйства, городской инфраструктуры и так далее к изменениям климата, реализуются крупнейшие программы по облесению. Но эта деятельность не имеет целью генерацию углеродных единиц, которые могут продаваться на рынках.

²¹Правила верификации результатов реализации климатических проектов (утв. Постановлением Правительства от 24.03.2022 № 455), Приказ МЭР РФ от 11 мая 2022 г. № 248 “Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов..., к климатическим проектам, формы и порядка представления отчета о реализации климатического проекта” и др.

²²Федеральный закон № 34-ФЗ “О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации” от 06.03.2022.

в них углеродных единиц. Необходимо создание прозрачного каталога проектов и предоставление информации о них через реестр углеродных единиц. Схема российского углеродного рынка не в полной мере соответствует международно принятым подходам. В рамках Сахалинского экспериментального превышения квот на прямые технологические выбросы парниковых газов может или компенсироваться приобретением квот у компаний, которые их не выбрали, или компенсироваться углеродными единицами от климатических проектов любых типов, или оплачиваться в виде штрафа — последняя опция не допускается почти нигде в мире и противоречит смыслу работы углеродного рынка. В России нет лимита на долю офсетных единиц в компенсации превышения квоты (напомним, что в Китае она составляет 1–10%, а в ЕС офсетные единицы вообще не допускаются на EU ETS). Еще важнее, что не решены две ключевые проблемы, необходимые для успешного развития отрасли ПКП с ориентацией на внутренний рынок, — не созданы экономические стимулы для приобретения УЕ ПКП и регуляторные условия для предложения качественных углеродных единиц.

Спрос на углеродные единицы

На национальном уровне у компаний нет значимых экономических стимулов для приобретения УЕ и, соответственно, для реализации климатических проектов. Такие стимулы есть только у компаний, участвующих в Сахалинском эксперименте, поскольку превышение расчетной квоты по выбросам парниковых газов оплачивается по ставке 1000 руб./т CO₂-экв., что выше сложившихся в 2021 г. цен на углеродные единицы от ПКП на мировых добровольных рынках. Но это весьма небольшой объем спроса как в силу небольшого объема экономики Сахалина и выбросов парниковых газов (0.5% от России в целом), так и с учетом щедрого предоставления бесплатных квот. Углеродный рынок в России остается фактически добровольным, а в таких условиях можно рассчитывать только на сделки имиджевого характера. Спрос на углеродные единицы от ПКП станет стабильным только после того, как будет создан механизм формирования цены на выбросы парниковых газов на национальном уровне — в форме национального углеродного рынка по примеру EU ETS или в форме углеродного налога, в зачет которого принимаются углеродные единицы.

До февраля 2022 г. заинтересованность российских компаний в углеродной проблематике в целом и в ПКП, в частности, определялась, в первую очередь, внешними факторами — условиями доступа на экспортные рынки товаров (в первую очередь на европейский рынок) и капита-

ла, где стратегия декарбонизации стала иметь существенное значение по мере развития зеленого финансирования и климатической отчетности. Несмотря на то, что углеродные единицы от природно-климатических проектов не допускаются на европейский углеродный рынок EU ETS и, соответственно, не учитываются в рамках механизма трансграничного углеродного регулирования СВАМ (Шварц и др., 2022), российские компании, как и государство, рассматривали ПКП как одно из важных направлений климатической стратегии. Ряд компаний (En+/Русал, Металлоинвест, СИБУР и др.) опубликовали свои стратегии декарбонизации, где предполагается нейтрализация до 30–40% выбросов парниковых газов за счет природно-климатических решений. Ряд крупных компаний (En+/Русал, Сибур, Фосагро, Газпромнефть и ряд других) заявили о начале собственных ПКП. Некоторые российские компании планировали приобрести или приобретали УЕ от ПКП за рубежом (Роснефть, Газпром Маркетинг & Трейдинг).

В условиях введения Европейским Союзом и США масштабных санкций против России с февраля 2022 г. часть стимулов для вложений в ПКП у компаний исчезла. Во-первых, большая часть товаров, которые с 2023 г. будут попадать под трансграничное углеродное регулирование ЕС (СВАМ), были запрещены к поставке из России в ЕС (продукция черной металлургии, удобрения, продукция нефтехимии, почти вся продукция лесного сектора). В таких условиях ориентация на параметры СВАМ при развитии российского углеродного рынка утратила смысл (в то время как до 2022 г. можно было рассчитывать зачет в рамках СВАМ платежей на внутреннем углеродном рынке). Во-вторых, Россия оказалась в значительной степени изолирована от мировых рынков капитала, что для многих компаний лишило климатические мероприятия смысла с точки зрения доступа к зеленому финансированию и привлекательности для иностранных инвесторов. В-третьих, перед многими компаниями остро встали задачи поддержания финансовой устойчивости, перестройки логистических цепочек и адаптации к кризису, что отодвинуло климатические вопросы на второй план.

Тем не менее климатическая повестка в России как на государственном уровне, так и на уровне бизнеса переживает кризис 2022 г. заметно лучше, чем ожидалось. У многих компаний сохраняется интерес к реализации ПКП (Русал, Норникель, Северсталь, Сибур, Илим, Сегежа, Краслесинвест). Ряд из них сохраняет глобальные депозитарные расписки на международных биржах и стремится поддерживать свою привлекательность для международных инвесторов. Климатическое регулирование является долгосрочным глобальным трендом, и компании рассчитывают на

то, что этот задел даст отдачу после нормализации отношений России с европейскими странами и США, пусть и в долгосрочной перспективе.

Определенные стимулы для продолжения корпоративной климатической политики связаны также с работой на западные рынки. Большинство ключевых азиатских стран уже приняли национальные стратегии декарбонизации, что вынуждает импортеров учитывать углеродный фактор. В перспективе ожидается появление углеродных рынков в ключевых странах Азии (как это уже произошло в Китае), а после 2030 г. включение в расчет углеродного следа в рамках СВМ охвата Scope 3. Такой подход целиком охватывает цепочки создания стоимости, поэтому требования по формированию верифицированной углеродной отчетности и декарбонизации становятся актуальны не только при прямых поставках продукции на рынки развитых стран, но и при поставках промежуточной продукции на рынки третьих стран, если покупатели ориентированы на дальнейшие поставки конечной продукции на рынок ЕС или США. Наконец, на азиатском рынке капитала активно развивается зеленое финансирование²³, поэтому инвестиции в ПКП актуальны для компаний, выходящих на азиатские долговые рынки или биржи.

Таким образом, ведущих российских экспортеров высокоуглеродной продукции (металлы, удобрения, нефтегазовый сектор) в первую очередь интересует использование ПКП для снижения углеродного следа продукции в рамках экспорта в страны АТР. Поэтому российские компании заинтересованы в том, чтобы национальная система сертификации ПКП была бы максимально близка к ведущим международным стандартам. По нашей оценке, 20–30% текущих прямых эмиссий парниковых газов крупных компаний в РФ должно быть компенсировано через ПКП к 2050 г., что сформирует потребность в углеродных единицах на уровне 150–200 млн т CO₂-экв. в год.

Данный фактор в значительной степени определяет требования к конфигурации внутреннего углеродного рынка России, а также к стратегии развития отрасли ПКП. По мере практически неизбежного распространения в мире механизмов оплаты выбросов парниковых газов (углеродных налогов или углеродных рынков, которые уже охватили 68 стран и 25% мировых выбросов парниковых газов²⁴), неизбежно и распространение

механизмов трансграничного углеродного регулирования. Конкретный дизайн может отличаться от СВМ Европейского Союза, но принцип компенсации импортерами эквивалента внутренней цены на выбросы будет применяться. В рамках трансграничного углеродного регулирования базой для расчета платежей скорее всего станет разность между ценами на выбросы парниковых газов в стране-экспортере (в данном случае в России) и стране-импортере. Это означает, что избежать крупных платежей при экспорте можно будет при трех условиях: 1) цены на внутреннем углеродном рынке России будут сопоставимыми с ценами на ключевых экспортных рынках; 2) конфигурация российского углеродного рынка будет гармонизирована с ключевыми торговыми партнерами; 3) качество углеродных единиц, обращающихся на российском углеродном рынке, будет сопоставимо с международными стандартами. Без выполнения этих условий углеродный рынок России превратится в источник бессмысленной регуляторной нагрузки.

Предложение: стандарты и методологии

На данный момент в России нет значимых национальных стандартов и методологий реализации природно-климатических проектов²⁵. Все принятые документы в сфере углеродного регулирования носят рамочный характер. Например, Правила верификации результатов реализации климатических проектов²⁶ определяют только общие принципы работы с климатическими проектами. По сути, в стране нет “инструментов” реализации природно-климатических проектов — конкретных инструкций, как структурировать проект и определять его границы, как рассчитывать базовую линию и дополнительную в проектах различных типов, как подтверждать финансовую дополнительную, как оценивать риски и т.д. Без таких инструментов о массовой реализации ПКП не может быть и речи.

Как уже указывалось выше, в ближайшие годы на сотрудничество с держателями международных стандартов в сфере ПКП (Verra, Gold Standard) рассчитывать не приходится. Поэтому необходим национальный стандарт ПКП, гармонизированный с перспективными международными стандартами, и национальные методологии ПКП, а так-

²³World Bank; Institute of Finance and Sustainability. 2022. Unleashing Sustainable Finance in Southeast Asia (November 2022). Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/38341>. License: CC BY 3.0 IGO (дата обращения 27.10.2022).

²⁴World Bank. 2022. State and Trends of Carbon Pricing 2022. State and Trends of Carbon Pricing. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37455>. License: CC BY 3.0 IGO (дата обращения 14.10.2022).

²⁵Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) в инициативном порядке разработал стандарты “Организация охраны от пожаров неуправляемых лесных земель” и “Создание углерод-депонирующих насаждений на лесных землях”, однако они не имеют официального статуса или независимого одобрения. Кроме того, в феврале 2023 г. была анонсирована разработка ИГКЭ национальных методологий климатических проектов, включая ряд методологий по ПКП.

²⁶Утв. Постановлением Правительства от 24.03.2022 № 455.

же независимый экспертный орган (Технический комитет в терминологии ISO) при участии ведущих специалистов, который мог бы рассматривать разрабатываемые методологии ПКП. Росакредитация аккредитовала первые органы по валидации и верификации парниковых газов, но ее заключения неприменимы на внешних рынках (поскольку она является государственным органом, а не независимой организацией), а непрозрачность этого процесса и отсутствие независимой оценки работы верификаторов усугубляет недоверие к российским проектам.

Предложение: территории для реализации ПКП

Следующей проблемой для реализации ПКП является выбор территории. Выход углеродных единиц относительно вовлеченных площадей сравнительно невелик (в диапазоне 1–10 т CO₂-экв. на 1 га в год), поэтому для крупных ПКП необходимы большие территории (десятки и сотни тыс. га). Правильный выбор территории для реализации ПКП в увязке с выбором методологии – ключевое условие успеха проекта. Например, ПКП по добровольному сохранению лесов (методология VM0010) на территории Якутии принесет в 30–50 раз меньше углеродных единиц с единицы площади, чем в Иркутской области. При этом необходимо учитывать широкий круг факторов и параметров, а не только оценочный потенциал поглощения углерода. В настоящее время в России отсутствует детализированная и достоверная информация о конкретных территориях, на которых возможна и экономически эффективна реализация ПКП с учетом различных ограничений. Эти ограничения связаны 1) с особенностями методологий ПКП по международным стандартам, которые требуют определенного состояния территории перед началом проекта (например, отсутствия леса в течение определенного периода), 2) с требованиями российского законодательства (в первую очередь с точки зрения назначения земель и разрешенных видов использования), 3) с позицией собственников или арендаторов земель. Это приводит к значительным дополнительным рискам для инвесторов, необоснованным затратам и повышению себестоимости углеродных единиц, что сдерживает инвестиции в ПКП.

Разработка инструментов оценки выхода углеродных единиц с территории, оценки экономической эффективности ПКП с дифференциацией по типам ландшафтов, регионам России и типам проектов, а на этой основе – создание банка территорий для реализации ПКП являются одним из ключевых условий для успешного развития отрасли. Инструмент оценки потенциала поглощения территорий должен быть достаточно детальным (на уровне отдельных лесничеств), достоверным, оперативным и дешевым, применимым для

крупных территорий (в масштабах муниципальных районов и регионов). В пилотном режиме такая работа выполнена командой Института географии РАН по всей России на уровне субъектов РФ для одной методологии ПКП (VM0010). Развитие данного направления позволит получить данные о себестоимости различных ПКП на конкретных участках. Располагая такой информацией, инвестор может рассчитывать CAPEX и OPEX, себестоимость углеродных единиц и денежный поток, что позволит встраивать ПКП в стратегию декарбонизации компаний. Большой проблемой является отсутствие надежной базы пространственных данных (БД) для оценки потенциала ПКП. Различные виды данных (лесотаксационные данные ГЛР-ГИЛ, права собственности на землю и/или аренды, разрешенные виды использования земель, обременения и др.) расплывлены между многими БД, которые носят ведомственный или полукрытый характер. Для развития ПКП в России необходимо разработать БД, которая содержала бы все пространственные данные для реализации ПКП и в дальнейшем могла бы использоваться широким кругом пользователей бесплатно или за умеренную плату.

С выбором территорий тесно взаимосвязана проблема многочисленных нормативно-правовых барьеров, сдерживающих реализацию ПКП, в первую очередь в лесном и земельном законодательстве. На 2022 г. существует целый ряд нормативно-правовых барьеров: аренда для реализации ЛКП отсутствует в Лесном кодексе как вид лесопользования, не обеспечено право собственности инвестора на получаемые углеродные единицы. Отдельная коллизия связана с возможностью реализации лесоклиматических проектов (ЛКП) на неиспользуемых землях с/х назначения (ст. 78 Земельного кодекса). Принятые в 2022 г. решения²⁷ создают существенные барьеры для реализации лесоклиматических проектов на землях с/х назначения и блокируют ранее созданные условия²⁸ для таких проектов.

Перспективы российских ПКП на внутреннем рынке

Таким образом, в России созданы условия для оборота углеродных единиц от климатических проектов (в том числе и от ПКП), но не созданы условия ни для стабильного спроса на них, ни для

²⁷Постановление Правительства РФ от 08.06.2022 № 1043 “О внесении изменений в Положение об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения”.

²⁸Постановление Правительства РФ от 21.09.2020 № 1509 “Особенности использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения”.

предложения качественных углеродных единиц, соответствующих международным стандартам. В результате, существует риск того, что внутренний рынок углеродных единиц или так и останется ограниченным по масштабам экспериментом, или пойдет по пути массовой генерации дешевых, но низкокачественных углеродных единиц, созданных на основе весьма поверхностно проработанных “узковедомственных” стандартов. Такие углеродные единицы не будут пользоваться спросом не только со стороны иностранных покупателей, но и со стороны экспортно-ориентированных российских компаний. Это поставит спрос на такие углеродные единицы в полную зависимость от регуляторных решений по развитию национального углеродного рынка. Такой подход сделает углеродный рынок бесполезным как с точки зрения снижения нагрузки климатических платежей на экспорт и сохранения этих средств в пределах России, так и с точки зрения стимулирования низкоуглеродной трансформации российской экономики.

СТРАТЕГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА НЕТТО-ПОГЛОЩЕНИЯ УГЛЕРОДА РОССИЙСКИМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

За проблемой непоследовательных и внутренне противоречивых решений по развитию нормативно-правовой базы в сфере спроса и предложения углеродных единиц от ПКП и их оборота стоит, пожалуй, наиболее фундаментальная проблема — отсутствие комплексной и научно обоснованной стратегии развития углеродных рынков и природно-климатических проектов.

Реалистичная оценка потенциала ПКП

В дискуссии о потенциальном вкладе ПКП в достижение углеродной нейтральности важно учитывать принципиальное различие трех типов оценок. Первое — это сугубо исследовательские оценки общего нетто-поглощения углерода российскими экосистемами. Такие оценки строятся различными методами (от различных типов данных космической съемки до моделирования) и характеризуются значительной неопределенностью (Fan et al., 2022; Schepaschenko et al., 2021). В настоящее время создается система мониторинга потоков и запасов углерода в рамках ФНТП по климату²⁹ и других научных проектов. Второй тип оценок — это показатели Национального кадастра антропогенных выбросов парниковых газов, которые строятся на основе методологии МГЭИК, пре-

имущественно по данным официальной статистики, и охватывают только управляемые экосистемы. Именно эти показатели являются основой национальной климатической отчетности, СНУР-2050, и предметом международных климатических переговоров (ОНУВ — NDC). Наконец, третий тип оценок — это потенциал ПКП. Поскольку проектная документация формируется в рамках определенного стандарта, то предъявляется целый комплекс требований к исходному состоянию и правовому статусу территории проекта. Далеко не на каждой территории со значительным нетто-поглощением углерода может быть организован ПКП, соответствующий стандартам и генерирующий углеродные единицы с приемлемой себестоимостью (таких территорий меньшинство). Поэтому потенциал ПКП определяется не потенциалом поглощения углерода *как таковым*, но и целым комплексом правовых и финансовых факторов.

Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (СНУР-2050) предполагает рост нетто-поглощения парниковых газов управляемыми экосистемами с 535 до 1200 млн т CO₂-экв. в год к 2050 г. В публичном пространстве отсутствуют материалы, которые бы обосновывали данную величину, показывали распределение потенциала нетто-поглощения по регионам, по типам экосистем, и, главное, по мероприятиям, которые могли бы обеспечить достижение этой цели. Проект операционного плана СНУР-2050 (подготовлен к февралю 2022 г.) не дает на данные вопросы удовлетворительных ответов. Между тем, с 2010 г. нетто-поглощение парниковых газов в секторе землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) постепенно уменьшается³⁰, а расчеты показывают, что в инерционном сценарии этот тренд продолжится.

Экспертные оценки Института географии РАН и ИГКЭ показывают, что нетто-поглощение парниковых газов управляемыми экосистемами может быть увеличено к 2050 г. до уровня 550–950 млн т CO₂-экв. в год, что существенно ниже целей СНУР-2050. Для этого увеличения требуется переход к климатически ориентированному лесному хозяйству (Rautio et al., 2023; Verkerk et al., 2020; Weatherall et al., 2022) — фундаментальное преобразование сектора, а также целый комплекс мер в других отраслях экономики (“углеродное” земледелие, восстановление водно-болотных угодий и др.). По нашей оценке, потенциал по-

²⁹Постановление Правительства РФ от 08.02.2022 № 133 “Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021–2030 годы”.

³⁰Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1. ФГБУ “Институт глобального климата и экологии”. 2022. http://downloads.igce.ru/kadaster/RUS_NIR-2022_v1_rev.pdf (дата обращения 11.10.2022).

лучения углеродных единиц (с себестоимостью до 15 долл./т CO_2 -экв.) составляет в России до 200 млн т CO_2 -экв. в год. Возможный размер доходов отрасли при условии устранения указанных выше ограничений можно оценить в диапазоне 10–30 млрд долл. к 2050 г. (при цене углеродных единиц в 30–75 долл./т CO_2 -экв.). Но для реализации этого потенциала требуется решение рассмотренных выше стратегических проблем развития отрасли.

Баланс между приоритетами развития отрасли ПКП

Вторая ключевая проблема национальной климатической стратегии состоит в том, что открытым остается вопрос баланса между двумя целями национальной климатической политики: 1) выполнение международных обязательств (определяемый на национальном уровне вклад — ОНУВ); 2) получение дохода от природно-климатических проектов.

Как указано выше, согласно решениям COP-26, невозможно двойное использование углеродных единиц от климатических проектов — в рамках отчетности о выполнении национальных обязательств и в рамках экспорта углеродных единиц. На данный момент СНУР-2050 и государственная климатическая политика в целом никак не согласуют эти приоритеты. Между тем генерируемых в национальных ПКП УЕ может быть недостаточно для одновременного выполнения экспортных контрактов и национальных обязательств по декарбонизации.

Также стоит проблема определения оптимального значения, определяемого на национальном уровне вклада. Текущие параметры ОНУВ предполагают ограничение выбросов к 2030 г. 70% от уровня 1990 г. (в 2019 г. 67% без учета сектора ЗИЗЛХ и 51% — с учетом), то есть фактически продолжение роста эмиссии. Неамбициозные показатели ОНУВ России и чрезмерно высокая доля (Seddon et al., 2019) поглощения парниковых газов управляемыми экосистемами в СНУР-2050 подвергаются в международном сообществе критике и подрывают доверие к российской климатической политике. В результате в 2021 г. Gold Standard, вторая ведущая ассоциация по верификации, прекратил работу с российскими проектами. Вместе с тем при определении ОНУВ России в будущем необходимо учитывать, что излишне амбициозные показатели ОНУВ означают для ПКП увеличение базовой линии и ограничивают их потенциал.

Существует фундаментальная развилка в стратегии использования потенциала природных экосистем для декарбонизации российской экономики (табл. 2).

В рамках первого варианта приоритетом является монетизация потенциала российских экосистем и минимизация платежей в рамках механизмов трансграничного углеродного регулирования в ближайшие 10–15 лет. Российская отрасль ПКП развивается с ориентацией на внешние углеродные рынки. Внутренний углеродный рынок на национальном уровне формируется медленно, охватывает узкий круг отраслей и предприятий, учитывается только охват Score 1 (максимум, Score 2). Параметры квот выбираются регулятором так, что цены на выбросы сохраняются на низком уровне. Показатели ОНУВ остаются неамбициозными. Значительная часть УЕ экспортируется. Это приведет к продаже большей части УЕ от дешевых ПКП с последующей необходимостью финансировать более дорогие меры для выполнения обязательств по декарбонизации. В таком сценарии логично делать ставку на частные инвестиции. Основную роль в развитии климатической сферы будут играть внешние негосударственные регуляторы. При этом возникает большая вероятность недостижения целей углеродной нейтральности к 2060 г. и значительные экономические риски для российской экономики в целом.

Второй вариант в качестве основного приоритета предполагает выполнение международных обязательств России и низкоуглеродную трансформацию российской экономики, а также минимизацию затрат на весь период декарбонизации. Углеродный рынок на национальном уровне запускается достаточно быстро и затем расширяется в отношении охвата отраслей и цепочек создания стоимости (с перспективой перехода к Score 3, если такая практика сложится в мире). Параметры квотирования выбираются регулятором так, чтобы цены на выбросы были сопоставимы с крупнейшими внешнеторговыми партнерами России. Экспорт углеродных единиц от ПКП не играет существенной роли. Амбициозные показатели ОНУВ (углеродная нейтральность к 2060 г.) означают для ПКП увеличение базовой линии, но повышают доверие к российским ПКП в мире. По сравнению с первым сценарием складывается более высокая финансовая нагрузка на энергоемкие отрасли. Акцент делается не только на рыночно-ориентированные ПКП, но и на меры по адаптации, в которые вкладываются значительные государственные средства.

До 2022 г. российская климатическая политика во многих элементах ориентировалась на первый сценарий, но среди этих элементов не было главного — создания инструментов (в первую очередь методологий) для массовой реализации качественных ПКП. Российская климатическая политика фактически шла по пути формирования низких стандартов климатических проектов (в том числе ПКП), обеспечивающих минимальные затраты при неограниченном использовании по-

Таблица 2. Развилки в стратегии использования потенциала управляемых экосистем для декарбонизации российской экономики

Выбор основной цели	
Приоритет – монетизация потенциала российских экосистем и минимизация платежей в рамках будущих механизмов трансграничного углеродного регулирования	Приоритет – выполнение международных обязательств страны, низкоуглеродная трансформация российской экономики
Выбор временной перспективы	
Максимальная монетизация потенциала ПКП в ближайшие 10–15 лет, риски уступки прав на УЕ от низкозатратных мероприятий по низким ценам	Минимизация затрат по всей траектории декарбонизации российской экономики (2050–2060 гг.)
Приоритетный рынок	
Приоритет внешних рынков. При экспорте углеродных единиц они исключаются из ОНУВ через национальный реестр	Приоритет внутреннего рынка. Проекты вносят вклад в ОНУВ, только если УЕ погашаются в России
Выбор определяемого на национальном уровне вклада (ОНУВ – NDC)	
Неамбициозные показатели ОНУВ, близкие к текущим, ограничивают международное признание российских ПКП	Амбициозные показатели ОНУВ означают для ПКП увеличение базовой линии
Выбор уровня платы за выбросы	
Низкий (рыночные цены на основе модели cap-and-trade, регулятор определяет ключевые внешние параметры рынка)	Высокий (через углеродный налог или регулирование параметров углеродного рынка)
Выбор охвата отраслей экономики углеродным регулированием	
Узкий (только крупнейшие экспортно-ориентированные отрасли, электроэнергетика; охват Score 1 и 2)	Широкий (все отрасли со значительным объемом выбросов; охват Score 3)
Выбор основного механизма национальной климатической политики	
Акцент на природно-климатических проектах – монетизируемых мероприятиях по митигации, в основном не входящих в ОНУВ	Акцент на мерах по адаптации, которые напрямую не монетизируются, но входят в ОНУВ
Выбор основного агента развития	
Частные игроки и частные инвестиции	Государственные структуры, вложения государственных средств

лученных углеродных единиц на регулируемом рынке. Такая имитационная политика, порождая значительные регуляторные издержки, не решает никаких задач.

В текущих условиях перспективы массового экспорта углеродных единиц резко ухудшились, поскольку на неопределенно-длительное время стали недоступны как покупатели из развитых стран, так и верификация по международным стандартам, а перспективы развития альтернативных (незападных) сегментов рынка не ясны. Поэтому ключевыми покупателями углеродных единиц от российских ПКП должны стать экспортно-ориентированные российские компании, которые смогут использовать эти единицы для снижения углеродного следа своей продукции и выполнения корпоративных климатических стратегий. Такой подход обладает рядом преимуществ: 1) приобретение углеродных единиц российскими компаниями – намного более реалистичный сценарий, чем масштабный экспорт углеродных единиц; 2) углеродные единицы погашаются в России и,

соответственно, вносят вклад в ОНУВ; 3) можно поэтапно расширять охват экономики углеродным регулированием. Принципиальным условием успеха такой стратегии является соответствие российских ПКП передовым международным стандартам (в противном случае полученные углеродные единицы не получат признания) и соответствие организации российского углеродного рынка передовым мировым практикам (иначе результаты его работы также не будут признаваться для зачета углеродных платежей внешними партнерами ни в Европе, ни в Азии). При этом развитие отрасли ПКП должно рассматриваться *не как альтернатива по отношению к мерам по снижению прямых выбросов парниковых газов российской экономикой, а как дополнение к этим мерам.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциал природных экосистем – естественное преимущество России в условиях декарбонизации мировой экономики. Россия обладает

крупнейшим природным потенциалом для реализации природно-климатических проектов, но для вывода полученных углеродных единиц на мировые углеродные рынки и использования этих единиц для снижения углеродного следа продукции российских компаний необходимо проделать большую работу. Развитие ПКП не обещает легких денег; это сложная наукоемкая отрасль, требующая долгосрочных, целенаправленных и комплексных усилий.

Главная проблема сферы ПКП в России – это отсутствие целостной и последовательной стратегии ее развития. В настоящее время российская климатическая политика в целом и политика развития сферы ПКП, в частности, внутренне противоречивы, непоследовательны и плохо согласуются с условиями внешней среды. Ключевая причина такого положения в том, что развитие сектора ПКП отдано на откуп ведомственным интересам, вместо ориентации на национальные цели по достижению углеродной нейтральности. Адекватная стратегия требует реалистичной оценки потенциала российских ПКП с учетом методических, технологических, рыночных, правовых, политических и экономических условий. Такая оценка может быть основана только на детализированных научных данных о фактическом и прогнозном нетто-поглощении при различных климатических условиях, сценариях землепользования, адаптационных мероприятиях и т.д. Разработка моделей для таких прогнозов, консолидация необходимых данных и интеграция результатов моделирования в систему принятия решений и в стратегические документы является насущной необходимостью. Только на такой основе возможен научно обоснованный выбор оптимального баланса между разными приоритетами политики в сфере ПКП с учетом внешних и внутренних ограничений. На данный момент научно обоснованной политики в сфере ПКП в России нет, несмотря на то, что в Стратегии низкоуглеродного развития Российской Федерации (СНУР-2050) нетто-поглощение парниковых газов управляемыми экосистемами играет решающую роль (Шварц, Птичников, 2022).

В сфере ПКП необходимо решение системных проблем, сдерживающих развитие данной отрасли в России: 1) преобладание узкого ведомственного подхода к развитию сферы ПКП, что приводит к многочисленным барьерам в нормативно-правовой базе; 2) отсутствие национальных методологий и моделей ПКП, гармонизированных с международными; 3) непрозрачность национального углеродного рынка; 4) острый дефицит компетенций и специалистов в сфере ПКП; 5) отсутствие инструментов для оценки экономической эффективности ПКП и банка территорий, пригодных для ПКП с учетом нормативно-правовых ограничений; 6) отсутствие ясных перспектив

внутреннего спроса на углеродные единицы от ПКП.

Ключевыми условиями успеха индустрии ПКП в России являются: 1) правильный выбор целевых сегментов внешних рынков с точки зрения применяемых стандартов; 2) разработка национальных методологий по различным типам ПКП, гармонизированных с международными методологиями; 3) создание внутренних экономических стимулов для компаний к приобретению УЕ от ПКП; 4) создание технологичного инструмента выявления и оценки земель, пригодных для реализации ПКП; 5) обеспечение доверия к результатам работы российского углеродного рынка за счет повышения прозрачности и приближения к международным стандартам регулирования; 6) устранение существующих нормативно-правовых барьеров для реализации ПКП и недопущение создания новых; 7) координация развития ПКП с общей стратегией низкоуглеродного развития.

Реализация потенциала ПКП – масштабная и комплексная задача, требующая скоординированных усилий многих заинтересованных сторон: крупного бизнеса как потенциального покупателя, министерств и ведомств как регуляторов, регионов, научного и экспертного сообщества. Для снятия указанных ограничений необходимо создание центра компетенций по всему спектру вопросов, связанных с реализацией ПКП – от конкретных методологий отдельных проектов до научно обоснованных оценок их потенциала на уровне России. Только такой подход позволит использовать потенциал ПКП для достижения национальных целей по декарбонизации и масштабного выхода углеродных единиц от российских ПКП на мировые рынки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

В данной научной работе использованы результаты проекта “Разработка методов долгосрочного анализа взаимосвязи социально-экономического развития России, климатических изменений, мер государственной политики за рубежом и внутри страны”, выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2022 г.

FUNDING

This work/article is an output of a research project implemented as part of the Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE University).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шварц Е.А., Кокорин А.О., Птичников А.В., Кренке А.Н. Трансграничное углеродное регулирование и леса России: от ожиданий и мифов к реализации инте-

- ресов // Экономическая политика. 2022. Т. 17. № 5. С. 54–77.
<https://doi.org/10.18288/1994-5124-2022-5-54-77>
- Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. № 4. С. 399–426.
<https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Юлкин М.А., Дьячков В.А., Самородов А.В., Кокорин А.О. Добровольные системы и стандарты снижения выбросов парниковых газов. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2013. 100 с.
- Arcusa S., Sprengle-Hyppolite S. Snapshot of the Carbon Dioxide Removal certification and standards ecosystem (2021–2022) // Climate Policy. 2022. Vol. 22. № 9–10. P. 1319–1332.
- Blaufelder C., Levy C., Mannion P., Pinneret D. A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge // McKinsey Report, 2021.
- Buchner B., Clark A., Falconer A., Macquarie R., Meattle C., Tolentino R., Wetherbee C. Global Landscape of Climate Finance 2019. Climate Policy Initiative (CPI). 2019.
- Conant R.T. Sequestration through forestry and agriculture // Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. 2011. Vol. 2. № 2. P. 238–254.
- Fan L., Wigneron J.P., Ciais P. et al. Siberian carbon sink reduced by forest disturbances // Nature Geosci. 2023. Vol. 16. № 1. P. 56–62.
<https://doi.org/10.1038/s41561-022-01087-x>
- Falkner R., Nasiritousi N., Reischl G. Climate clubs: politically feasible and desirable? // Climate Policy. 2022. Vol. 22. № 4. P. 480–487.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1967717>
- Girardin C.A., Jenkins S., Seddon N., Allen M., Lewis S.L., Wheeler C.E., Griscom B.W., Malhi V. Nature based solutions can help cool the planet – if we act now // Nature. 2021. Vol. 593. № 5878. P. 191–194.
<https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>
- Griscom B. Natural Climate Solutions. What are the natural sinks, what capacity they offer, how they can be maximized? // ECCB2018: 5th European Congress of Conservation Biology. 12th–15th of June 2018, Jyväskylä, Finland.
<https://doi.org/10.17011/conference/eccb2018/108188>
- Guizar-Coutiño A., Jone J.P., Balmford A., Carmenta R., Coomes D.A. A global evaluation of the effectiveness of voluntary REDD+ projects at reducing deforestation and degradation in the moist tropics // Conservation Biology. 2022. Vol. 36. № 6. P. e13970.
- IUCN. Global Standard for Nature-Based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS // IUCN: Gland, Switzerland. 2020.
- Michaelowa A., Censkowsky P., Espelage A., Singh A., Betz R., Kotsch R., Dzikowski T. Volumes and types of unused Certified Emission Reductions (CERs): lessons learned from CDM transactions under the Kyoto Protocol, transparency gaps and implications for post-2020 international carbon markets. 2021.
- Müller B., Michaelowa A. How to operationalize accounting under Article 6 market mechanisms of the Paris Agreement // Climate Policy. 2019. Vol. 19. № 7. P. 812–819.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1599803>
- Overland I., Huda M.S. Climate clubs and carbon border adjustments: a review // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. № 9. P. 093005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8da8>
- Pan C., Shrestha A., Innes J.L. et al. Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects // J. of Forestry Research. 2022. Vol. 33. № 4. P. 1109–1122.
<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01488-z>
- Paulsson E. A review of the CDM literature: from fine-tuning to critical scrutiny? // Int. Environmental Agreements: Politics, Law and Economics. 2009. Vol. 9. № 1. P. 63–80.
- Pitman N. Social and Biodiversity Impact Assessment Manual for REDD+ Projects: Part 3 – Biodiversity Impact Assessment Toolbox // Forest Trends, Climate, Community & Biodiversity Alliance, Rainforest Alliance and Fauna & Flora Int. USA, Washington, DC. 2011.
- Qui K. The future of the Clean Development Mechanism under a new regime of higher climate ambition // Environmental Defense Fund. 2018.
- Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry—A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests // Forest Ecology and Management. 2023. Vol. 530. P. 120766.
- Richards M. Social and Biodiversity Impact Assessment (SBIA) Manual for REDD+ Projects: P. 2 – Social Impact Assessment Toolbox // Climate, Community & Biodiversity Alliance and Forest Trends with Rainforest Alliance and Fauna & Flora Int. Washington, DC. 2011.
- Richards M., Panfil S.N. Social and Biodiversity Impact Assessment (SBIA) Manual for REDD+ Projects: Part 1 – Core Guidance for Project Proponents // Climate, Community & Biodiversity Alliance, Forest Trends, Fauna & Flora Int., and Rainforest Alliance. Washington, DC. 2011.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 1. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Schneider L., La Hoz Theuer S., Howard A., Kizzier K., Cames M. Outside in? Using international carbon markets for mitigation not covered by nationally determined contributions (NDCs) under the Paris Agreement // Climate Policy. 2020. Vol. 20. № 1. P. 18–29.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1674628>
- Scott N., Fitzgerald S., Keshav S. Cambridge Zero Policy Forum Discussion Paper: Carbon Offsetting and Nature-based Solutions to Climate Change // Cambridge Open Engage. WP. 2021.
<https://doi.org/10.33774/coe-2021-gwq9w>
- Seddon N., Sengupta S., García-Espinosa M., Hauler I., Herr D., Rizvi A.R. Nature-based Solutions in Nationally Determined Contributions: Synthesis and recommendations for enhancing climate ambition and action

- by 2020. Gland, Switzerland and Oxford, UK: IUCN and Univ. of Oxford, 2019.
- Verkerk P.J., Costanza R., Hetemäki L., Kubiszewski I., Leskinen P., Nabuurs G.J., Potočník J., Palahí M. Climate-smart forestry: the missing link // *Forest Policy and Economics*. 2020. Vol. 115. P. 102164.
- Walker W.S., Gorelik S.R., Cook-Patton S.C., Baccini A., Farina M.K., Solvik K.K., Ellis P.W., Sanderman J., Houghton R.A., Leavitt S.M., Schwalm C.R., Griscom B.W. The global potential for increased storage of carbon on land // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. Vol. 119. № 23. P. e2111312119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111312119>
- Weatherall A., Nabuurs G.J., Velikova V. et al. Defining Climate-Smart Forestry. In: *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*. 2022. P. 35–58. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_2
- West T.A., Börner J., Sills E.O., Kontoleon A. Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. № 39. P. 24T188–24T194.
- West T.A., Wunder S., Sills E.O., Börner J., Rifai S.W., Neidermeier A.N., Kontoleon A. Action needed to make carbon offsets from tropical forest conservation work for climate change mitigation. arXiv preprint arXiv:2301.03354. 2023.

Nature-Based Offsets in Russia: Key Challenges and Conditions for Success

N. K. Kurichev^{1, 2, *}, A. V. Ptichnikov^{1, 2}, E. A. Shvarts^{1, 2}, and A. N. Krenke^{1, 2}

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

*e-mail: nkurichev@hse.ru

The article discusses the key problems and conditions for the successful development of the nature-based offset projects (NBOPs) in Russia. The conditions for the successful entry of verified carbon units from Russian nature-based offset projects into the global market were determined considering the state and prospects for development of global carbon markets. The key limitations for the national carbon market for offsets are presented: the lack of internal economic incentives for companies to buy carbon units and to invest in Russian NBOPs; the lack of national methodologies for the NBOPs; legal restrictions for land-use; lack of available tools for assessing costs and profitability of NBOPs on given land plots; failures of carbon market regulation under the Sakhalin experiment. The limitations of the narrow agency-based approach to the development of NBOPs are shown. These limitations result in inconsistent decisions that do not fit real conditions in the global market. It is necessary to create a competence center to solve the issues of the NBOPs from specific methodologies of individual projects to science-based assessments of their total potential in Russia. Two scenarios of the use of NBOPs for decarbonization of the Russian economy are analyzed. Scenario 1 assumes large-scale sale of carbon units generated in Russian in foreign markets in order to maximize mid-term profit. Scenario 2 assumes the use of carbon units generated in Russian NBOPs mainly by Russian companies to achieve net zero by 2060. A realistic and balanced strategy assumes that the key buyers of carbon credits from Russian NBOPs in the first stage should be export-oriented Russian companies that can use these credits to reduce the carbon footprint of their products and implement corporate climate strategies.

Keywords: natural climate project, carbon markets, low-carbon development strategy

REFERENCES

- Arcusa S., Sprengle-Hyppolite S. Snapshot of the Carbon Dioxide Removal certification and standards ecosystem (2021–2022). *Clim. Policy*, 2022, vol. 22, no. 9–10, pp. 1319–1332.
- Blaufelder C., Levy C., Mannion P., Pinneret D. A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. *McKinsey Rep.*, 2021.
- Buchner B., Clark A., Falconer A., Macquarie R., Meattle C., Tolentino R., Wetherbee C. Global Landscape of Climate Finance 2019. *CPI*, 2019.
- Conant R.T. Sequestration through forestry and agriculture. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 238–254.
- Fan L., Wigneron J.P., Ciaï P., Chave J., Brandt M., Sitch S., Yue Ch., Bastos A., Li X., Qin Yu., Yuan W., Schepaschenko D., Mukhortova L., Li X., Liu X., Wang M., Frappart F., Xiao X., Chen J., Ma M., Wen J., Chen X., Yang H., van Wees D., Fensholt R. Siberian carbon sink reduced by forest disturbances. *Nat. Geosci.*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01087-x>
- Falkner R., Nasiritousi N., Reischl G. Climate clubs: politically feasible and desirable? *Clim. Policy*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 480–487. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1967717>
- Girardin C.A., Jenkins S., Seddon N., Allen M., Lewis S.L., Wheeler C.E., Griscom B.W., Malhi V. Nature based solutions can help cool the planet – if we act now. *Nature*, 2021, vol. 593, no. 7858, pp. 191–194. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>
- Griscom B. Natural Climate Solutions. What are the natural sinks, what capacity they offer, how they can be

- maximized? In *ECCB2018: 5th European Congress of Conservation Biology*. Jyväskylä: Open Science Centre Publ., 2018.
<https://doi.org/10.17011/conference/eccb2018/108188>
- Guizar-Coutiño A., Jones J.P., Balmford A., Carmenta R., Coomes D.A. A global evaluation of the effectiveness of voluntary REDD+ projects at reducing deforestation and degradation in the moist tropics. *Conserv. Biol.*, 2022, vol. 36, no. 6, p. e13970.
- IUCN. *Global Standard for Nature-Based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*. Gland, Switzerland: IUCN Publ., 2020.
- Julkin M.A., D'jachkov V.A., Samorodov A.V., Kokorin A.O. *Dobrovol'nye sistemy i standarty snizheniya vybrosov parnikovykh gazov* [Voluntary Systems and Standards for Reducing Greenhouse Gas Emissions]. Moscow: WWF Publ., 2013. 100 p.
- Michaelowa A., Censkowsky P., Espelage A., Singh A., Betz R., Kotsch R., Dzukowski T. *Volumes and types of unused Certified Emission Reductions (CERs): lessons learned from CDM transactions under the Kyoto Protocol, transparency gaps and implications for post-2020 international carbon markets*. Freiburg: Perspectives Climate Group Publ., 2021.
- Müller B., Michaelowa A. How to operationalize accounting under Article 6 market mechanisms of the Paris Agreement. *Clim. Policy*, 2019, vol. 19, no. 7, pp. 812–819.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1599803>
- Overland I., Huda M.S. Climate clubs and carbon border adjustments: a review. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 9, p. 093T005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8da8>
- Pan C., Shrestha A., Innes J.L., Zhou G., Li N., Li J., He Y., Sheng Ch., Niles J.-O., Wang G. Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects. *J. For. Res.*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 1109–1122.
<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01488-z>
- Paulsson E. A review of the CDM literature: from fine-tuning to critical scrutiny? *Int. Environ. Agreem.: Politics Law Econ.*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 63–80.
- Pitman N. *Social and Biodiversity Impact Assessment Manual for REDD+ Projects: Part 3 – Biodiversity Impact Assessment Toolbox*. Washington, DC: Forest Trends, Climate, Community & Biodiversity Alliance, Rainforest Alliance and Fauna & Flora International, 2011. 50 p.
- Qui K. *The future of the Clean Development Mechanism under a new regime of higher climate ambition*. New York: EDF, 2018. 27 p.
- Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry – A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *For. Ecol. Manag.*, 2023, vol. 530, p. 120766.
- Richards M. *Social and Biodiversity Impact Assessment (SBIA) Manual for REDD+ Projects: Part 2 – Social Impact Assessment Toolbox*. Washington, DC: Climate, Community & Biodiversity Alliance and Forest Trends with Rainforest Alliance and Fauna & Flora International, 2011. 71 p.
- Richards M., Panfil S.N. *Social and Biodiversity Impact Assessment (SBIA) Manual for REDD+ Projects: Part 1 Version 2 – Core Guidance for Project Proponents*. Washington, DC: Climate, Community & Biodiversity Alliance, Forest Trends, Fauna & Flora International, and Rainforest Alliance, 2011. 89 p.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Schneider L., La Hoz Theuer S., Howard A., Kizzier K., Cames M. Outside in? Using international carbon markets for mitigation not covered by nationally determined contributions (NDCs) under the Paris Agreement. *Clim. Policy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 18–29.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1674628>
- Scott N., Fitzgerald S., Keshav S. Cambridge Zero Policy Forum Discussion Paper: Carbon Offsetting and Nature-based Solutions to Climate Change. *Cambridge Open Engage*, 2021.
<https://doi.org/10.33774/coe-2021-gwq9w>
- Seddon N., Sengupta S., García-Espinosa M., Hauler I., Herr D., Rizvi A.R. *Nature-based Solutions in Nationally Determined Contributions: Synthesis and recommendations for enhancing climate ambition and action by 2020*. Gland, Switzerland: IUCN Publ.; Oxford, UK: OUP, 2019.
- Shvarts E.A., Kokorin A.O., Ptichnikov A.V., Krenke A.N. Cross-Border Carbon Regulation and Forests in Russia: From Expectations and Myth to Realization of Interests. *Ekonom. Politika*, 2022, vol. 17, no. 5, pp. 54–77. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18288/1994-5124-2022-5-54-77>
- Shvarts E.A., Ptichnikov A.V. Low-carbon development strategy of Russia and the role of forests in its implementation. *Nauch. Tr. Vol'n. Ekonom. Obshch. Rossii*, 2022, vol. 236, no. 4, pp. 399–426. (In Russ.).
<https://doi.org/10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426>
- Verkerk P.J., Costanza R., Hetemäki L., Kubiszewski I., Leskinen P., Nabuurs G.J., Potočnik J., Palahí M. Climate-smart forestry: the missing link. *For. Policy Econ.*, 2020, vol. 115, p. 102164.
- Walker W.S., Gorelik S.R., Cook-Patton S.C., Baccini A., Farina M.K., Solvik K.K., Ellis P.W., Sanderman J., Houghton R.A., Leavitt S.M., Schwalm C.R., Griscom B.W. The global potential for increased storage of carbon on land. *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 23, p. e2111312119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2111312119>
- Weatherall A., Nabuurs G.J., Velikova V., Santopuoli G., Neroj B., Bowditch E., Temperli Ch., Binder F., Dit-

- marová L., Jamnická G., Lesinski J., La Porta N., Pach M., Panzacchi P., Sarginci M., Serengil Yu., Tognetti R. Defining Climate-Smart Forestry. In *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*. Tognetti R., Smith M., Panzacchi P., Eds. New York, Cham: Springer, 2022, pp. 35–58.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-80767-2_2
- West T.A., Börner J., Sills E.O., Kontoleon A. Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon. *PNAS*, 2020, vol. 117, no. 39, pp. 24188–24194.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2004334117>
- West T.A., Wunder S., Sills E.O., Börner J., Rifai S.W., Neidermeier A.N., Kontoleon A. Action needed to make carbon offsets from tropical forest conservation work for climate change mitigation. *arXiv preprint arXiv:2301.03354*, 2023.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.03354>

ЭКОНОМИКА И РЫНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИРОДНЫХ РЕШЕНИЙ

УДК 332.142.4

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРИРОДНЫЕ ФАКТОРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
НЕОДНОРОДНОСТИ ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА
В ЛЕСАХ РОССИИ В 2010-х ГОДАХ

© 2023 г. А. И. Пыжев^{a, b, c, *}

^aСибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

^bЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

^cИнститут экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Увеличение нетто-поглощения углерода лесами является единственным способом достижения Россией углеродной нейтральности к 2060 г. В этом контексте наряду с мерами по увеличению площадей и качества древостоев важное значение приобретают способы сокращения эмиссии углерода вследствие деятельности человека и природных нарушений. В статье с помощью регрессионных моделей панельных данных анализируется пространственная неоднородность выбросов углерода в лесах России в 2009–2021 гг., измеренных инструментами проекта Global Forest Watch, в зависимости от экономических (объемы лесозаготовки, государственные расходы на проведение лесохозяйственных, лесозащитных и лесопожарных мероприятий) и природных (масштаб лесных пожаров и вспышек массового размножения насекомых-вредителей) факторов. Наибольшее влияние на потери углерода лесами ожидаемо оказывают лесозаготовка и лесные пожары, в то время как расходы на выполнение государственных функций в сфере лесных отношений практически не находят отклика в сокращении углеродных эмиссий. Таким образом, на деле цель по сохранению лесов путем государственных инвестиций в соответствующие мероприятия пока не достигается. Полученный набор регрессионных моделей может быть использован для прогноза динамики региональных эффектов потерь углерода лесами при изменении объемов лесозаготовки и различных траекториях динамики лесопожарной активности. Такой анализ будет критически необходим для формирования региональных планов по сокращению выбросов парниковых газов с учетом максимального использования потенциала наращивания нетто-поглощения углерода лесами.

Ключевые слова: экономика климатических изменений, экономика углеродного регулирования, бюджет углерода лесов, эмиссия углерода, статистическое моделирование, регрессионный анализ панельных данных, Global Forest Watch

DOI: 10.31857/S258755662304009X, **EDN:** CDFDWP

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В рамках Парижского климатического соглашения 2015 г. страны-участницы Рамочной конвенции ООН по изменению климата приняли обязательства по добровольному формулированию национальных целей по сокращению выбросов парниковых газов. В случае большинства развитых стран такие цели подразумевают достижение на определенном горизонте времени так называемой углеродной нейтральности – состояния, когда выбросы парниковых газов полностью компенсируются их поглощением (Rogelj et al., 2021). Несмотря на то, что цели установлены на достаточно длинную перспективу 2050–2060 гг., достижение нулевого углеродного баланса требует политики, направленной как на снижение ан-

тропогенных выбросов, так и на увеличение поглощения углерода природными экосистемами, прежде всего – лесами, которые являются основным естественным поглотителем углерода с депонирующей способностью в 1.1 ± 0.8 Пг углерода в год (Pan et al., 2011). По последним официальным данным¹, углерод-поглощающая способность управляемых лесных экосистем России оценивается в 569.2 млн т CO₂-экв. и условно компенсирует свыше 26% антропогенной эмиссии парниковых газов, что существенно выше, чем для про-

¹ Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1. М., 2022.

чих стран мира (Ваганов и др., 2021). Кроме того, исходные данные Государственного лесного реестра существенно устарели и занижают фактические данные по наличию лесных ресурсов, фактическая оценка поглощающей способности углерода лесами России выше указанной не менее чем на 30% (Filipchuk et al., 2018; Schepaschenko et al., 2021).

Несмотря на существенно усложнившиеся международные отношения, экономика страны находится на пути интеграции в мировую повестку декарбонизации (Порфирьев и др., 2020; Пыжев, 2022). Поскольку потенциал значительного сокращения антропогенных выбросов парниковых газов ограничен высокой долей сырьевых отраслей в структуре промышленного производства, важнейшим ресурсом в этом смысле является именно наращивание поглощающей способности российских лесов (Шварц, Птичников, 2022). Достижение этой цели сталкивается с не самой очевидной проблемой — достаточно высокой интенсивностью потерь углерода российскими лесами, которые возникают в результате растущей интенсивности лесных пожаров, высоких темпов лесозаготовки, активности насекомых-дендрофагов. На отмеченные факторы динамики углеродного бюджета практически не обращают внимание, несмотря на то, что по некоторым оценкам в годы пиков лесопожарной активности российские леса могут становиться не стоком, а чистым источником углерода (Барталев, Стыценко, 2021; Khaik et al., 2021), нивелируя таким образом свой потенциал как важнейшего естественного резервуара по накоплению парниковых газов и, возможно, одного из наиболее ценных экономических активов будущих десятилетий. Таким образом, данная проблема имеет не только научное, но и сугубо практическое значение, которое будет только усиливаться в ближайшие годы².

Снижение темпов обезлесения и изменение возрастной структуры лесных насаждений может внести значительный вклад в смягчение последствий глобального изменения климата. При этом важнейшее значение при управлении бюджетом углерода лесов имеет пространственный аспект, особенно для таких больших по площади стран, как Россия. Существенные различия природно-климатических условий на различных территориях крупнейшей в мире страны неизбежно требуют планировать отдельные элементы стратегии низкоуглеродного развития с учетом пространственного фактора. Такая работа должна вестись, в том числе, с целью приоритезации расходов в зависимости от поставленных целей и потенциа-

ла конкретных территорий по их достижению (Романовская, 2022).

Между тем, вопросы экономического анализа проблем климатических изменений все еще мало поднимаются в российской литературе. В особенности это замечание касается практически отсутствующего класса работ по моделированию различных аспектов экономики углеродного регулирования, проблемам которой посвящены многие тысячи статей в высокорейтинговых международных изданиях. Возникший разрыв в объеме и качестве исследований по сравнению со многими зарубежными странами не должен служить препятствием для существенно наращивания интенсивности таких работ в нашей стране. Настоящая работа продолжает цикл исследований, направленных на решение задач научного обоснования подходов к достижению национальных целей по достижению существенного сокращения объема выбросов парниковых газов в России.

В исследовании дается количественная оценка факторов, определяющих динамику потерь углерода лесами регионов России. Отличительной особенностью подхода к работе с информационными источниками является использование по-прежнему редко востребованного в России ресурса Global Forest Watch³ — популярного открытого источника агрегированных данных дистанционного зондирования Земли из космоса в качестве источника оценок потерь лесов и возникающих в их результате эмиссий углерода. В качестве факторных переменных рассмотрены переменные, определяющие два важнейших фактора антропогенной динамики лесов (лесозаготовки и пожары), а также блок экономических параметров, включающий различные виды расходов государственного бюджета на различные мероприятия, связанные с организацией лесного хозяйства, лесозащитой и охраной лесов от пожаров. Информация о площадях локализации очагов распространения насекомых-вредителей используется как прокси-переменная для оценки самих потерь лесов в результате воздействия инвазивных видов.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве инструмента оценки потерь углерода лесами используются не данные Национального доклада о кадастре⁴, а информация, опубликованная проектом Global Forest Watch, основанная на

³ Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends. Global Forest Watch. https://www.globalforestwatch.org/map/?modal-Meta=tree_cover_loss (дата обращения 12.11.2022).

⁴ Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Ч. 1. М., 2022.

² Не выполняют, так согреются // Коммерсантъ. 2022. 1 ноя. <https://www.kommersant.ru/doc/5060885> (дата обращения 05.11.2022).

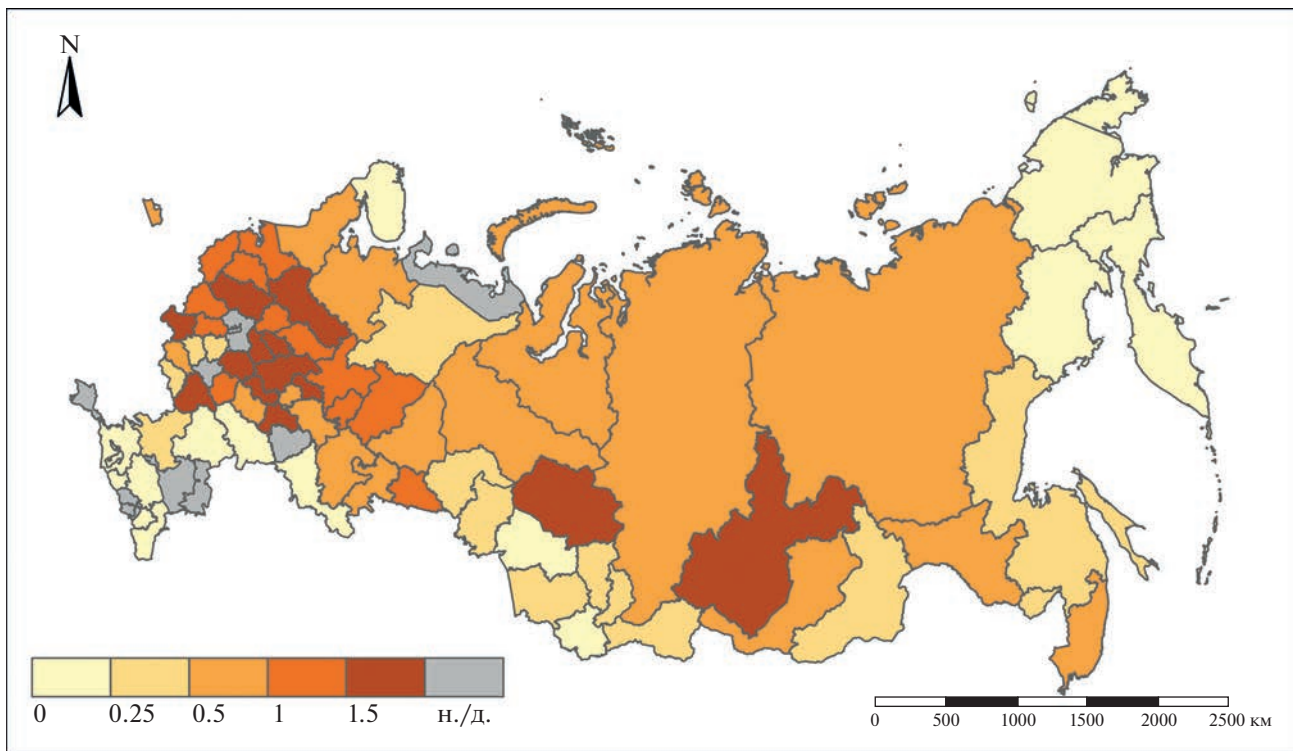


Рис. 1. Распределение средней эмиссии углерода в лесах России в 2009–2021 гг. по отношению к площади лесов субъекта Федерации, т CO₂-экв./га.
 Составлено автором на основе данных Global Forest Watch и слоя административно-территориальных границ Global Administrative Areas Database, ver. 3.6. <http://gadm.org/> (дата обращения 13.11.2022).

исследованиях коллектива Мэрилендского университета (Hansen et al., 2013; Harris et al., 2021), что обосновывается несколькими доводами. Во-первых, спутниковые данные безальтернативны для оперативного мониторинга лесных рубок и пожаров во временном горизонте от дней до нескольких лет. Напротив, регулярные и полноценные наземные измерения, охватывающие большие территории, требуют запретительно высоких расходов, что предопределяет постоянное отставание таких данных от фактической ситуации. Во-вторых, ресурс обеспечивает универсальное агрегирование данных о потерях лесопокрытых площадей и оценок возникающих как их результат эмиссий углерода в разрезе стран и их административно-территориальных единиц вплоть до уровня муниципалитетов за период с 2001 г. В-третьих, эти данные обладают достаточно высокой точностью дешифрирования спутниковых данных, подтвержденной многочисленными исследованиями (Shimizu et al., 2020; Zhang et al., 2020). Полученные данные приводят к следующему пространственному распределению потерь углерода лесами в отношении к их площадям (рис. 1). Очевидна зависимость: наибольшие удельные потери углерода наблюдаются в трех центральных регионах: Рязанской (2.9 т CO₂-экв./га), Влади-

мирской (2.5 т CO₂-экв./га) и Ивановской областях (2.4 т CO₂-экв./га), имеющих примерно одинаковые небольшие площади лесов (от 1.1 до 1.6 млн га), но при этом заготавливающих достаточно большой в сравнении с аналогичными соседями объем древесины (от 1.1 до 1.7 млн м³). При этом лидеры перечня регионов-лесозаготовителей: Иркутская область, Красноярский край и Вологодская область, в этом рейтинге занимают лишь 12, 28 и 6 позиции, поскольку помимо на порядок больших объемов лесопользования характеризуются еще большим разрывом в площади лесов.

Следует подчеркнуть, что представленные данные не должны напрямую сравниваться с оценками Национального доклада о кадастре, поскольку распространяются на всю территорию страны, в то время как Национальный доклад о кадастре учитывает только управляемые лесные земли (Замолодчиков и др., 2017; Романовская и др., 2018; Филипчук и др., 2017; Швиденко, Щепашенко, 2014). Таким образом, оценки, основанные на спутниковых данных, будут всегда существенно выше данных, которые учитываются в целях официальной отчетности в Секретариат Рамочной конвенции по изменению климата ООН (Romanov et al., 2022; Schepaschenko et al., 2021). В то же

время рассмотрение исключительно лесов, располагающихся на управляемых землях, без учета всей территории лесов страны существенно ограничивает аналитические возможности и может влиять на качество принятия государственных решений.

В настоящей работе пространственную неоднородность анализируемых показателей предлагается рассматривать на уровне субъектов Федерации. Такой подход отвечает целям будущей реализации политики управления выбросами и поглощением парниковых газов, поскольку эти механизмы в любом случае должны исходить из сложившейся иерархии государственного управления и максимально эффективно использовать ее ресурсы.

Для анализа влияния факторных переменных сформирован массив данных, охватывающий доступный период наблюдений с 2009 по 2021 г., использующий официальную статистическую информацию Рослесхоза и Росстата, доступную на портале ЕМИСС⁵. Возможности анализа более широкого перечня факторов потерь углерода в лесах существенно ограничены доступностью и качеством исходной статистической информации по лесохозяйственным вопросам (Pyzhev et al., 2021). Первоначально рассматривались все регионы страны, по которым имелся достаточный период наблюдений, однако из окончательной версии были исключены регионы, в которых не доставало большого количества данных (Санкт-Петербург и Москва, Липецкая область, Ненецкий автономный округ) или наблюдались практически нулевые значения потерь углерода лесами (республики Ингушетия, Кабардино-Балкария, Калмыкия, Северная Осетия-Алания, Астраханская и Самарская области). Все экономические показатели для сопоставимости приводились к постоянным ценам 2015 г. с помощью дисконтирования через индекс потребительских цен. В целях формирования сбалансированных панелей данных пропуски наблюдений замещались либо интерполяцией значений по трендам, либо нулями, когда это было обусловлено природой самого показателя (например, в случае расходов на лесозащитные или лесопожарные мероприятия в исходных данных часто встречались пропуски, которые, судя по сопоставлению с другими показателями, фактически означали нулевые значения). Результат привел к базе данных, характеризующейся следующей описательной статистикой (табл. 1).

Моделирование опирается на традиционный для современного анализа экономических проблем инструментарий математической статистики, применяемый для работы с панельными данными, то есть рядами наблюдений над изменени-

ем значений показателей определенного объекта во времени и в пространстве одновременно.

Оценивается следующая регрессионная модель:

$$\ln y_{it} = \beta_0 + \sum_j \beta_j X_{i,j,t} + \eta_i + v_{i,t},$$

где i является индексом региона ($i = 1, 2, \dots, I$), t – индекс года ($t = 1, 2, \dots, T$), y_{it} – зависимая переменная (оценка эмиссии углерода от потерь лесов), коэффициенты регрессии $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j$ выступают эластичностями влияния константы уравнения и факторных переменных X_1, X_2, \dots, X_j , а через $v_{i,t}$ определяется ошибка модели. В уравнении η_i представляет фиксированный индивидуальный эффект конкретного региона, который учитывает ненаблюдаемую, не зависящую от времени и не контролируемую с помощью факторов уникальную характеристику региона (в том числе, например, географические и климатические особенности, специфические культурные и социально-экономические факторы, которые могут оказывать влияние на сведение лесов). Количественные факторные переменные экономического толка, как правило, распределены экспоненциально, поэтому в модель они включаются под знаком натурального логарифма. Предполагается, что ошибка $v_{i,t}$ и фиксированные эффекты η_i распределены одинаково и независимо с нулевым математическим ожиданием и постоянными дисперсиями. В целях устранения эффектов гетероскедастичности и автокорреляции стандартные ошибки вычисляются с помощью подхода Ареллано–Бонда (Arellano and Bond, 1991).

Поскольку объем использованной выборки достаточно велик, разумно помимо модели для всего набора данных рассмотреть также кластеризованный вариант. С учетом вышеописанного наблюдения о существенности различий выбросов углерода для многолесных регионов севера страны и более южных и меньших по площади краев, областей и республик юга, предлагается выделить отдельные модели для субъектов Федерации, площадь лесов в которых в 2020 г. превышала 10 млн га, и прочих регионов. Данная граница позволяет разделить субъекты в соотношении примерно 1 : 2, при этом собрать в один кластер те субъекты, которые больше всего испытывают влияние потерь лесов, отделив их от регионов, где эта проблема не столь выражена в силу относительно малых запасов данного ресурса.

В целях нивелирования возможного смещения оценок в модель помимо количественных переменных из сформированного набора данных включались бинарные переменные, фиксировавшие отдельные известные события, которые могли существенно влиять на вариацию зависимого при-

⁵ Единая межведомственная информационно-справочная система. <https://www.fedstat.ru> (дата обращения 30.09.2022).

Таблица 1. Описательные статистики для используемого набора переменных

Переменная	Обозначение	Среднее	Ст. откл.	Мин.	25-перц.	75-перц.	Макс.
Потери углерода лесами, тыс. т CO ₂ -экв.	Углерод	11233.2	34131.2	0.3	345.9	7779.8	426278.4
Площадь земель, на которых расположены леса, тыс. га	Площадь	16379.9	37405.6	129.2	930.2	12645.8	256108.7
Объем лесозаготовки, тыс. м ³	Лесозаготовка	2807.3	4864.1	0.5	207.4	3007.2	35668.8
Площадь лесовосстановления, га	Лесовосстановление	12908.8	20962.3	0.000	1249.3	14754.2	157247.4
Протяженность обустроенных минерализованных полос, км	Минполосы	2676.4	3307.4	0.000	522.0	3540.6	25346.4
Протяженность построенных, реконструированных и обслуженных дорог противопожарного назначения, км	Пожарные дороги	849.8	3220.8	0.000	81.0	408.5	37261.7
Площадь локализации очагов вредных организмов авиационным методом, га	Локализация: авиа	1760.8	12609.9	0.000	0.000	0.000	216165.0
Площадь локализации очагов вредных организмов наземным методом, га	Локализация: наземная	1239.9	8184.2	0.000	0.000	40.1	158068.0
ВРП на душу населения, млн руб.	ВРП на душу	447.0	504.3	81.7	241.8	436.0	5017.0
Площадь лесных земель, пройденная пожарами, га	Пожары	55651.2	340954.5	0.000	26.0	4431.0	6724011.0
Расходы на защиту лесов, тыс. руб.	Расходы: лесозащита	8519.9	27276.7	0.000	509.2	6421.8	513185.4
Расходы на лесовосстановление, тыс. руб.	Расходы: лесовосстановление	11488.8	20923.9	0.000	2599.1	15560.4	518179.1
Фонд оплаты труда работников органа исполнительной власти в области лесных отношений, тыс. руб.	Расходы: зарплата	25323.3	22923.3	1011.6	12551.1	28729.6	198336.7
Расходы на осуществление переданных полномочий Российской Федерации в области лесных отношений, тыс. руб.	Расходы: полномочия	342027.1	283976.3	62459.8	163782.3	429013.8	2678332.0
Расходы на охрану лесов от пожаров, тыс. руб.	Расходы: пожары	89455.8	153438.3	0.000	12065.3	105678.7	1828736.0

Составлено автором на основе данных проекта Global Forest Watch, Росстата и Рослесхоза.

знака (например, превышение объема лесозаготовки в регионе пороговой величины в 3 млн м³, годы наиболее высокой лесопожарной активности и пр.).

Все расчеты и визуализации выполнены в среде R с пакетами расширения *plm* (Croissant and Millo, 2008), *svglite* (Wickham et al., 2022)⁶, *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *tmap* (Tennekes, 2018), *stargazer*⁷.

⁶ Wickham H., Henry L., Pedersen T.L., Jake Luciani T., Decorde M., Lise V. *svglite: An “SVG” Graphics Device*. R package version 2.1.0. 2022. <https://CRAN.R-project.org/package=svglite> (дата обращения 30.11.2022).

⁷ Hlavac M. *stargazer: Well-Formatted Regression and Summary Statistics Tables*. R package version 5.2.1. 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=stargazer> (дата обращения 30.11.2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Любопытно сопоставить выбросы углерода от потерь лесов и размеры экономики регионов России с учетом их разделения на малолесные (до 10 млн га лесопокрытой площади) и многолесные (рис. 2). Для наглядности данные представлены в логарифмических шкалах по обоим показателям. Наиболее экономически развитые регионы страны в терминах ВРП на душу населения, как правило, расположены на больших территориях и имеют достаточно обширные запасы лесов. В результате, для таких регионов наблюдается эффект масштаба, отражающийся в высоких в абсолютном выражении потерях углерода. Сама по себе обильность лесных ресурсов в большинстве случаев является предпосылкой для наращивания рубок, а их

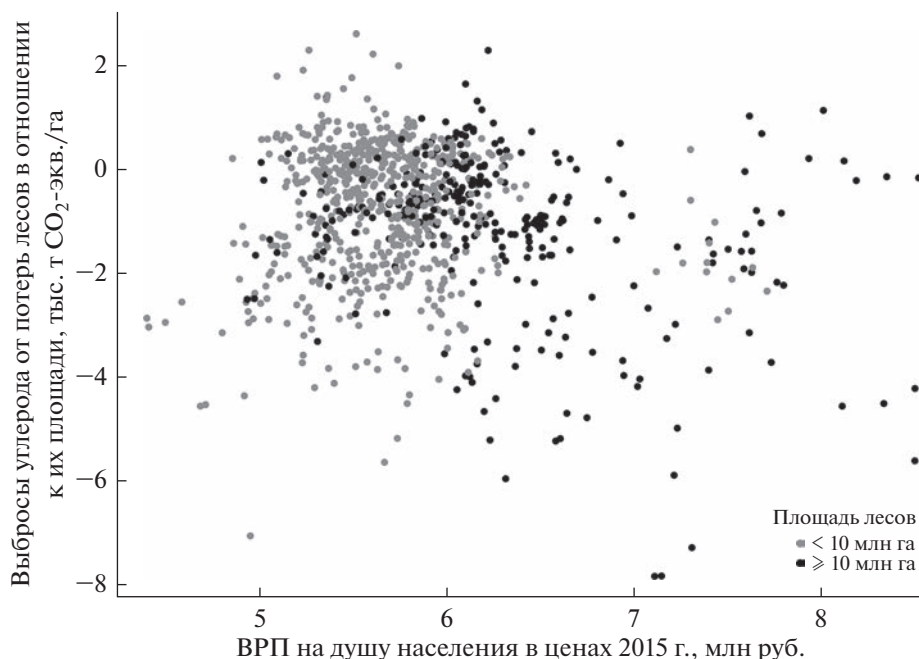


Рис. 2. Соотношение выбросов углерода от потерь лесов на единицу их площади и ВРП на душу населения в постоянных ценах 2015 г. в регионах России в 2009–2021 гг. (логарифмические шкалы). Составлено автором на основе данных Global Forest Watch и данных Росстата.

высокая интенсивность является сопутствующей антропогенной причиной лесных пожаров, которая дополняет эффекты глобального потепления.

Моделирование позволило получить следующие оценки параметров коэффициентов сформулированных регрессионных моделей для используемого набора данных и двух его подвыборок (табл. 2). В целом модели достаточно адекватно оценивают влияние отдельных показателей на зависимый признак. Невысокие значения показателя коэффициента детерминации (от 0.124 до 0.304) свидетельствуют о наличии дополнительных факторов, которые не могли быть учтены в исследовании в силу отсутствия необходимой информации. Также возможным источником смещения является невысокое качество исходных данных, вызванное как манипулятивным характером наблюдения над отдельными статистическими показателями, так и отсутствием фактического контроля за достоверностью публикуемой статистической информации, которое приводит к малообъяснимым артефактам в рядах наблюдений. Кроме того, существенность различий между регионами также далеко не во всех случаях может объясняться даже используемым, достаточно широким набором факторных переменных.

Результаты оценок по моделям демонстрируют устойчивость влияния двух основных факторов потерь лесов: лесозаготовок и лесных пожа-

ров. Оценки для обеих этих переменных имеют ожидаемо положительный знак и объяснимые характеристики значимости. Значимые и высокие эластичности наблюдаются для лесозаготовки: коэффициенты составляют 0.43 и 0.45 для всех регионов и многолесных соответственно, при этом для малолесных регионов коэффициент ощутимо ниже (0.344). Для пожаров результаты также предсказуемы и логичны: коэффициент очень мал для всех регионов (0.034), при этом практически на порядок выше для многолесных регионов (0.267) икратно меньше и статистически незначим — для малолесных (0.007). Этот результат согласуется с известными многочисленными исследованиями по данному вопросу. При этом контрольные переменные для периодов высокой лесопожарной активности проявились только для 2012 г. (эластичность 0.596 для многолесных регионов).

Влияние обустройства минерализованных полос и развития сети противопожарных дорог противоречиво: полученные статистические оценки незначимы как раз для многолесных районов, где проблема низкой плотности транспортной инфраструктуры и больших потерь лесов из-за физической невозможности тушить пожары наземными способами стоит наиболее остро. При этом значимые оценки получились для малолесных регионов и — за счет этого — для совокупности ре-

Таблица 2. Результаты регрессионного моделирования факторов потери углерода лесами регионов России в 2009–2021 гг.

Фактор	Все регионы	Площадь лесов >10 млн га	Площадь лесов ≤10 млн га
Экономические факторы			
Ln (Заготовка)	0.430*** (0.080)	0.450** (0.186)	0.344*** (0.074)
Заготовка >3000	0.297 (0.200)	1.030* (0.559)	0.127 (0.177)
Ln (Минполосы) × (Минполосы >0)	-0.099** (0.045)	-0.042 (0.099)	-0.141*** (0.043)
Ln (Пожарные дороги) × (Пожарные дороги >0)	0.075*** (0.022)	0.079 (0.064)	0.066*** (0.020)
Ln (Расходы: лесозащита)	-0.005 (0.020)	0.084 (0.051)	-0.030* (0.018)
Расходы: лесозащита >0	0.028 (0.426)	-1.985* (1.090)	0.495 (0.389)
Ln (Расходы: лесовосстановление) × (Расходы: лесовосстановление >0)	-0.014 (0.015)	-0.001 (0.033)	-0.019 (0.015)
Ln (Расходы: зарплата)	0.088 (0.098)	0.369* (0.198)	-0.020 (0.099)
Ln (Расходы: полномочия)	0.474*** (0.140)	0.151 (0.391)	0.184 (0.141)
Ln (Расходы: пожары) × (Расходы: пожары >0)	0.012 (0.036)	0.023 (0.232)	0.007 (0.029)
Природные факторы			
Ln (Пожары)	0.034*** (0.009)	0.267*** (0.040)	0.007 (0.007)
Пожары >0	-0.281** (0.110)	-0.422 (1.015)	-0.132 (0.088)
Ln (Локализация: авиа)	0.106** (0.051)	0.101 (0.121)	0.060 (0.051)
Локализация: авиа >0	-2.274** (1.154)	-2.090 (2.865)	-1.363 (1.114)
Ln (Локализация: наземная) × (Локализация: наземная >0)	-0.026*** (0.009)	0.003 (0.029)	-0.031*** (0.008)
Год: 2010	-0.007 (0.102)	-0.080 (0.224)	0.022 (0.098)
Год: 2012	0.216** (0.094)	0.596*** (0.210)	0.068 (0.088)
Год: 2018	0.099 (0.097)	0.090 (0.213)	0.018 (0.092)
Контрольные переменные			
Ln (Площадь)	2.617 (1.716)	21.796 (28.500)	2.690 (1.328)
Ln (ВРП на душу)	-0.210 (0.195)	-0.108 (0.395)	-0.624*** (0.200)
Наблюдений	936	299	637
R ²	0.124	0.304	0.146
Скорректированный R ²	0.031	0.193	0.045
F статистика	6.303*** (df = 19; 845)	5.911*** (df = 19; 257)	5.115*** (df = 19; 569)

Примечание. * $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.05$.

Рассчитано автором на основе сформированного набора данных.

гионов в целом. Тем не менее, если знак при переменной для минерализованных полос отрицательный (их обустройство должно снижать риски поражения дополнительных площадей лесов), то для противопожарных дорог наблюдается обратная ситуация, что может объясняться только неочевидными ложными корреляциями данного показателя с ненаблюдаемыми переменными. Описанное выше отсутствие надежной статистической связи между количественными показателями сети минерализованных полос и противопожарных дорог с зависимым признаком в целом объясняется существенным недостатком этой инфраструктуры в стране в целом и особенно в тех регионах, для которых проблема лесных пожаров особенно важна (например, в Красноярском крае, Республике Саха (Якутия) и пр.).

Нет статистически наблюдаемого и надежного показателя поражения лесов насекомыми-вредителями, поэтому для оценки данного явления привлекаются данные по затратам на локализацию очагов вспышек массового размножения авиационным и наземным методом. Учет данных показателей позволил получить несколько значимых оценок для представленных моделей, причем более выраженным ожидаемо оказался эффект от лесозащитных мероприятий, проводимых наземными методами. Тем не менее, поскольку поражение древостоя насекомыми опосредованно влияет на эмиссию углерода в основном через ослабление древостоя и повышение вероятности его гибели от пожаров, результат оценки по данному блоку переменных является куда более слабым, чем для вышеобозначенных факторов.

Более чем красноречивы результаты моделирования по блоку экономических показателей, связанных с государственным расходами на различные лесохозяйственные, лесозащитные и лесопожарные мероприятия. Практически во всех случаях не удалось получить значимые оценки для соответствующих эффектов, что может свидетельствовать об отсутствии прямых причинно-следственных связей между инвестициями в соответствующие лесохозяйственные мероприятия и результатом их реализации. Косвенно это может объясняться тем, что политика расходов на борьбу с пожарами и активностью инвазивных видов насекомых носит не проактивный, а реактивный характер. Дополнительные средства на борьбу с пожарами выделяются сразу после соответствующих пиков лесопожарной активности, приходящихся на весну и лето соответствующего года, при этом средства попадают в бюджетную роспись следующего года, в котором пожаров будет гораздо меньше. В результате, очевидная необходимость в затратах отходит на второй план, уступая место другим приоритетам бюджетных расходов. Затем расходы постепенно сокращаются вплоть до нового пика. Такой цикл является

регулярным и схож с ситуацией в лесозащите, которая также характеризуется контрциклическостью естественной динамики явления и реакции бюджетного планирования.

Единственная выраженная по статистической значимости связь расходов и эмиссии углерода от пожаров получена для расходов на переданные субъектам Федерации полномочия в области лесных отношений (0.474 для всех регионов, но отсутствие значимости для групп малолесных и многолесных регионов). Положительный знак связи указывает скорее на эффект масштаба, чем подтверждает какую бы то ни было причинность, поскольку объем данной субсидии вычисляется нормативно и жестко зависит от площадей эксплуатационных лесов в регионе и иных показателей качества и количества лесных ресурсов, на управление которыми выделяется строго определенный удельный объем финансирования.

Этот результат косвенно может указывать на несовершенство действующего механизма распределения средств на осуществление лесохозяйственных, лесозащитных и лесопожарных мероприятий. Если их истинная цель заключается в сокращении потерь лесов, то представленные выше результаты моделирования свидетельствуют в пользу того, что она не достигается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достижение целей Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов невозможно без существенного наращивания нетто-поглощающей способности лесов. Для этого требуется детальный анализ факторов, которые определяют динамику данного показателя с учетом пространственной неоднородности.

Результаты моделирования показывают, что на эмиссию углерода в лесах регионов России существенное влияние оказывают только объемы лесозаготовки и лесопожарная активность. Вместе с тем расходы на осуществление лесозащитных, лесоохранных и лесохозяйственных мероприятий практически не оказывают влияния на ожидаемое от них сокращение потерь углерода в результате сохранения лесов. Следовательно, развитие государственной лесной политики следует увязывать с необходимостью пересмотра действующего порядка финансирования региональных полномочий в сфере лесных отношений в пользу повышения эффективности выделяемых средств на борьбу с лесными пожарами и лесозащитные мероприятия. Важно отметить, что подобного рода работа будет неэффективной и бессмысленной без перестройки всей институциональной среды лесных отношений в стране. В рамках действующих правил в системе отсутствуют акторы, стиму-

лы которых были бы напрямую увязаны с сохранностью лесов, а не осуществлением бюджетных затрат и составлением по этому поводу соответствующих бюрократических отчетов. Здесь необходимо создание специальных форм конкурентных рынков хозяйствующих субъектов, мотивацией которых является вознаграждение за осуществление государственной задачи по сохранению лесов, причем измерение эффективности такой работы должно проходить не по факту выполненных работ, а именно по ее результату.

Отдельно следует рассмотреть вопрос об оптимизации лесозаготовки в стране, поскольку ее относительно высокие темпы сами по себе являются причиной высоких эмиссий углерода. Это не означает, что лесозаготовку нужно искусственно ограничивать, однако необходимо обсуждать способы повышения ее относительной эффективности с учетом оптимизации выбросов парниковых газов.

В настоящий момент идет активная дискуссия о возможности реализации лесоклиматических инициатив при условии полноценного разворачивания национальной системы углеродного регулирования. В таком случае уже в среднесрочной перспективе может актуализироваться вопрос о том, что выгоднее: рубить древесину или сохранять ее с целью получения углеродных единиц. Однако сама по себе возможность полноценной верификации и организации признанного экономического оборота результатов таких проектов пока ясна не до конца, особенно в свете выявленных в последнее время фактов манипуляций данными об эффективности проектов добровольного углеродного рынка.

Набор статистических моделей, разработанный в рамках настоящего исследования, может быть использован в дальнейшем для прогнозирования оптимальных с точки зрения получения заданной углеродной эффективности объемов лесозаготовки при различных траекториях развития лесопожарной активности. Не исключено, что дальнейшее развитие данного подхода приведет к научно обоснованному ответу на вопрос о возможностях развития лесоклиматического сектора и необходимых для этого экономических условий, и институционального обеспечения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда (грант № 19-77-30015). Набор данных, используемый для моделирования, был разработан при поддержке Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Сибирскому федеральному университету (проект № FSRZ-2021-0011). Картографическая визуализация была выполнена при частичном финансировании

Государственного задания Центру экологии и продуктивности леса РАН (проект № АААА-А18-118052400130-7).

FUNDING

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-77-30015). The data set used for modeling was developed with the support of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to Siberian Federal University (project no. FSRZ-2021-0011). Cartographic visualization was carried out with partial funding from the State Assignment to the Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (project no. АААА-А18-118052400130-7).

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен Д.Г. Замолодчикову и А.А. Романовской за внимание к исследованию и ценные замечания на первом его этапе. Подробные отзывы двух анонимных рецензентов на исходную рукопись помогли существенно улучшить статью. Отличные условия работы были обеспечены Е.А. Вагановым и Е.В. Зандер.

ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful to D.G. Zamolodchikov and A.A. Romanovskaya for their attention to the study and their valuable comments in its first stage. Detailed feedback from two anonymous reviewers on the original manuscript helped to significantly improve the article. Excellent working conditions were provided by E.A. Vaganov and E.V. Zander.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Спутниковая оценка габели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122. <https://doi.org/10.31857/S0024114821020029>
- Ваганов Е.А. и др.* Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1096–1109. <https://doi.org/10.17059/EKON.REG.2021-4-4>
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Каганов В.В.* Эко-системные услуги и пространственное распределение защитных лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2021. № 6. С. 581–592.
- Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Семикашев В.В., Колпаков А.Ю.* Экономические риски в контексте разработки политики с низким уровнем эмиссий парниковых газов в России // Энергетическая политика. 2020. № 5 (147). С. 92–103.
- Пыжжев А.И.* Климатическую повестку никто не отменял: почему это важно для российской экономики // ЭКО. 2022. № 7 (577). С. 31–50. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-7-31-50>

- Романовская А.А., Трунов А.А., Коротков В.Н., Карabanь Р.Т. Проблема учета поглощающей способности лесов России в Парижском соглашении // Лесоведение. 2018. № 5. С. 323–334.
- Филипчук А.Н., Моисеев Б.Н., Малышева Н.В. Новые аспекты оценки поглощения парниковых газов лесами России в контексте Парижского соглашения об изменении климата // Лесохозяйственная информация. 2017. № 1. С. 88–98.
- Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития и роль лесов в ее реализации // Науч. труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. С. 399–426.
- Швиденко А., Щепаченко Д. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.
- Arellano M., Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations // Review of Economic Studies. 1991. Vol. 58. № 2. 277 p. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Croissant Y., Millo G. Panel Data Econometrics in R: The plm Package // J. of Statistical Software. 2008. Vol. 27. № 2.
- Filipchuk A. et al. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity // Environmental Development. 2018. Vol. 26. P. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.002>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. № 6160. P. 850–853.
- Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes // Nature Climate Change. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A. et al. Wildfires in the Siberian taiga // Ambio. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests // Science. 2011. Vol. 333. № 6045. P. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Vaganov E.A. Reliability and Integrity of Forest Sector Statistics – A Major Constraint to Effective Forest Policy in Russia // Sustainability. 2021. Vol. 1. № 13. 86 p. <https://doi.org/10.3390/su13010086>
- Rogelj J., Geden O., Cowie A., Reisinger A. Net-Zero Emissions Targets Are Vague: Three Ways to Fix // Nature. 2021. Vol. 591. № 7850. P. 365–68. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>
- Romanov A.A. et al. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021 // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 846. № 157322.
- Schepaschenko D. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. № 1. P. 12825.
- Shimizu K., Ota T., Mizoue N. Accuracy Assessments of Local and Global Forest Change Data to Estimate Annual Disturbances in Temperate Forests // Remote Sensing. 2020. Vol. 15. № 12. P. 2438. <https://doi.org/10.3390/rs12152438>
- Tennekes M. tmap: Thematic Maps in R // J. of Statistical Software. 2018. Vol. 84. № 6.
- Wickham H. et al. Welcome to the Tidyverse // J. of Statistical Software. 2019. Vol. 4. № 43. P. 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Zhang D., Wang H., Wang X., Lü Z. Accuracy Assessment of the Global Forest Watch Tree Cover 2000 in China // Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2020. № 87. P. 102033. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102033>

Economic and Natural Factors of Spatial Heterogeneity of Forest Carbon Emissions in Russia in the 2010s

A. I. Pyzhev^{1, 2, 3, *}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS, Novosibirsk, Russia

*e-mail: apyzhev@sfu-kras.ru

Increasing the net carbon sequestration of forests is the only way for Russia to achieve carbon neutrality by 2060. In this context, along with measures to increase the area and quality of stands, ways to reduce carbon emissions due to human activities and natural disturbances are important. The article uses regression models of panel data to analyze the spatial heterogeneity of carbon emissions in the Russian forests in 2009–2021 as measured by Global Forest Watch project tools, depending on economic (volume of logging, government spending on forest management, forest protection and forest fire measures) and natural (scale of forest fires and outbreaks of mass reproduction of insect pests) factors. Logging and forest fires are expected to have the greatest impact on forest carbon losses, while spending on the performance of state functions in the sphere of forest relations has almost no response in the reduction of carbon emissions. Thus, in fact, the goal of preserving forests through public investment in appropriate measures has not yet been achieved. The resulting

set of regression models can be used to predict the dynamics of the regional effects of forest carbon losses under changes in logging volumes and various trajectories of the dynamics of forest fire activity. Such analysis will be critically necessary for the formation of regional plans for greenhouse gas emission reduction, taking into account the maximum use of the potential of forests' net carbon sequestration build-up.

Keywords: economics of climate change, economics of carbon regulation, forest carbon budget, carbon emissions, statistical modeling, regression analysis of panel data, Global Forest Watch

REFERENCES

- Arellano M., Bond S. Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *Rev. Econ. Stud.*, 1991, vol. 58, no. 2, pp. 277–297. <https://doi.org/10.2307/2297968>
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V. An assessment of the forest stands destruction by fires based on the remote sensing data on a seasonal distribution of burnt areas. *Lesoved.*, 2021, no. 2, pp. 115–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020029>
- Croissant Y., Millo G. Panel Data Econometrics in R: The plm Package. *J. Stat. Softw.*, 2008, vol. 27, no. 2.
- Filipchuk A., Moiseev B., Malysheva N., Strakhov V. Russian forests: A new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity. *Environ. Dev.*, 2018, vol. 26, pp. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.002>
- Filipchuk A.N., Moiseev B.N., Malysheva N.V. New aspects of assessment of greenhouse gases sequestration by Russian forests in context of Paris Agreement on Climate Change. *Lesokhoz. Inform.*, 2017, no. 1, pp. 88–98. (In Russ.).
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013, vol. 342, no. 6160, pp. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harris N.L., Gibbs D.A., Baccini A., Birdsey R.A., de Bruin S., Farina M., Fatoyinbo L., Hansen M.C., Herold M., Houghton R.A., Potapov P.V., Suarez D.R., Roman-Cuesta R.M., Saatchi S.S., Slay C.M., Turubanova S.A., Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change*, 2021, vol. 11, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C.P., Flannigan M.D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021, vol. 50, pp. 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 2011, vol. 333, iss. 6045, pp. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Porfiriev B.N., Shirov A.A., Semikashev V.V., Kolpakov A.Yu. Economic risks in the context of policy development with low greenhouse gas emissions in Russia. *Energet. Politika*, 2020, no. 5 (147), pp. 92–103. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_5147_92
- Pyzhev A.I. Nobody cancelled the climate agenda: why it's important for Russian economy. *ECO*, 2022, no. 7 (577), pp. 31–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2022-7-31-50>
- Pyzhev A.I., Gordeev R.V., Vaganov E.A. Reliability and Integrity of Forest Sector Statistics – A Major Constraint to Effective Forest Policy in Russia. *Sustain.*, 2021, vol. 1, no. 13, 86 p. <https://doi.org/10.3390/su13010086>
- Rogelj J., Geden O., Cowie A., Reisinger A. Net-Zero Emissions Targets Are Vague: Three Ways to Fix. *Nature*, 2021, vol. 591, no. 7850, pp. 365–368. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>
- Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gloor E., Brienen R., Gusev B.A., Leonenko E.V., Vasiliev A.S., Krikunov E.E. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021. *Sci. Total Environ.*, 2022, vol. 846, no. 157322. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157322>
- Romanovskaya A.A., Trunov A.A., Korotkov V.N., Karaban R.T. The problem of accounting for the absorptive capacity of Russian forests in the Paris Agreement. *Lesoved.*, 2018, no. 5, pp. 323–334. (In Russ.).
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Onitkov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepaschenko M., Kraxner F. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1, p. 12825. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Shwarts E.A., Ptichnikov A.V. Low-carbon development strategy and the role of forests in its implementation. *Nauch. Tr. Vol'n.Ekonom. Obshch.*, 2022, no. 236, pp. 399–426. (In Russ.).
- Shimizu K., Ota T., Mizoue N. Accuracy Assessments of Local and Global Forest Change Data to Estimate Annual Disturbances in Temperate Forests. *Remote Sens.*, 2020, vol. 15, no. 12, p. 2438. <https://doi.org/10.3390/rs12152438>
- Shvidenko A., Schepaschenko D. The carbon budget of Russia's forests. *Sibir. Lesnoi Zh.*, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).
- Tennekes M. tmap: Thematic Maps in R. *J. Stat. Softw.*, 2018, vol. 84, no. 6.
- Vaganov E.A., Porfiriev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Yu., Pyzhev A.I. Estimation of the contribution of Russian forests to the reduction of climate change risks. *Reg. Econ.*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 1096–1109. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/EKON.REG.2021-4-4>

- Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L.D'A., François R., Golemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H. Welcome to the Tidyverse. *J. Stat. Softw.*, 2019, vol. 4, no. 43. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kaganov V.V. Ecosystem services and spatial distribution of protective forests of the Russian Federation. *Lesoved.*, 2021, no. 6, pp. 581–592. (In Russ.).
- Zhang D., Wang H., Wang X., Lü Z. Accuracy Assessment of the Global Forest Watch Tree Cover 2000 in China. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2020, no. 87, p. 102033. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102033>