

АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕНОК НЕТТО-СТОКА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

¹О.А. Локтионов, ¹О.Е. Кондратьева, ¹Д.О. Максимов,
¹К.М. Хмелев

¹Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва

Проведен сравнительный анализ фактического нетто-стока парниковых газов российским сектором землепользования, который показал, что в зависимости от используемых методик и подходов, а также типа исходных данных информация о поглотительной способности может быть агрегирована в три группы: 1) исследования, основанные на процессном (инверсном) моделировании и методике ВНИИЛМ; 2) исследования со статистическим моделированием нетто-стока, а также подходы, регламентированные МГЭИК на базе государственного лесного реестра; 3) исследования, основанные на динамических глобальных моделях растительности (DGVM) и методике РОБУЛ, верифицированной МГЭИК, но с использованием в качестве исходных данных сведения государственного лесного реестра. Сформировано предположение, что существующая официальная российская методика РОБУЛ, совпадающая методологией МГЭИК, в настоящее время отражает консервативную оценку поглощающей способности российского сектора землепользования и может быть скорректирована с потенциальным увеличением до 35–45 % текущих значений за счет дополнительного учета в расчетах резервных лесов, а также результатов государственной инвентаризации лесов и нового государственного лесного реестра с высокой степенью пространственного разрешения.

Ключевые слова: поглощение парниковых газов, нетто-сток, углеродная нейтральность, декарбонизация, землепользование, бюджет углерода

Статья поступила в редакцию 01.08.2024, доработана 30.08.2024, принята к публикации 10.09.2024

Analysis of Quantitative Estimates of the Greenhouse Gases Net Flow in the Russian Land Use Sector

¹O.A. Loktionov, ¹O.E. Kondrateva, ¹D.O. Maksimov, ¹K.M. Khmelev

¹National Research University "MPEI", 11 1250 Moscow, Russia

A comparative analysis of the actual greenhouse gas net runoff by the Russian land use sector has been carried out, which showed that depending on the methodologies and approaches used, as well as the type of initial data, information on the absorptive capacity can be aggregated into three groups: 1) studies based on process (inverse) modeling and VNIILM methodology; 2) studies with statistical net runoff modeling and approaches regulated by the IPCC on the basis of the state forest registry; 3) studies based on dynamic global vegetation models (DGVM) and ROBUL methodology, verified by the IPCC, but using as input data information from the state forest registry. An assumption is made that the existing official Russian ROBUL methodology, which coincides with the IPCC methodology, currently reflects a conservative estimate of the absorption capacity of the Russian land use sector and can be adjusted with a potential increase to 35-45% of the current values due to additional accounting of reserve forests in the calculations, as well as the results of the state forest inventory and a new state forest registry with a high degree of spatial resolution.

Keywords: Greenhouse gas uptake, net runoff, carbon neutrality, decarbonization, land use, carbon budget

Received 01.08.2024, revised 30.08.2024, accepted for publication 10.09.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-54-59

Вопросы, связанные с углеродным регулированием и снижением антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ), в два последних десятилетия являются высокозначимыми в контексте реализации инициативных мер и положений, изначально принятых в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата

(РКИК). Однако такие механизмы, которые предполагал Киотский протокол как попытку контроля за процессами изменения климата и управления ими посредством внедрения экономических и технических мер ограничения выбросов ПГ, не привели к успешному выполнению обязательств, закрепленных в РКИК [1]. Планомерным раз-

витием Киотского протокола, завершившегося в 2012 г., стало принятие в 2016 г. нового международного соглашения, направленного на регулирование вопросов климатической политики на глобальном уровне — Парижского соглашения, ключевой целью которого является удержание прироста глобальной средней температуры ниже

2 °С сверх доиндустриальных уровней и приложении усилий для ограничения роста температуры до уровня 1,5 °С. В целях реализации нашим государством Парижского соглашения и во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 "О сокращении выбросов парниковых газов" была разработана и утверждена Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р "Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года" (СНУР).

Согласно СНУР, основная цель которой направлена на снижение выбросов ПГ, климатическое регулирование является одновременно стимулом для модернизации основных отраслей промышленности и повышения их энергоэффективности, а также инструментов для повышения конкурентоспособности российской продукции на мировом рынке. Тем не менее, последние несколько лет весьма остро стоит проблема, касающаяся оценки поглощающей способности сектора землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ), вклад которого в абсорбцию CO₂ является одним из основных [2]. В соответствии со СНУР ключевая роль по достижению углеродной нейтральности отведена не столько ключевым эмитентам в лице энергетики и промышленности за счет секвестрационных технологий [3], сколько сектору ЗИЗЛХ. Согласно целевому (интенсивному) сценарию, к 2050 г. предполагается увеличение стока углерода в экосистеме (рост поглощающей способности зелеными насаждениями) с текущих 535 млн т до 1,2 млрд т CO₂ в лесном хозяйстве.

Однако в настоящее время существующее множество различных количественных оце-

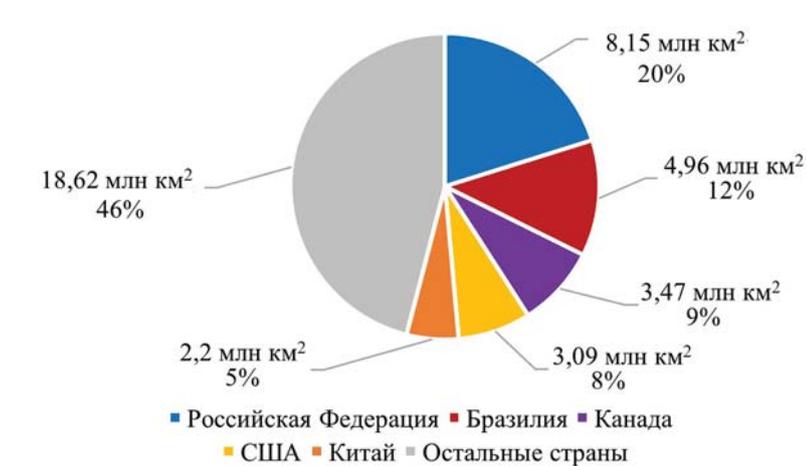


Рис. 1. Структура лесных земель различных стран с наибольшей площадью лесов по данным Всемирного банка

Fig. 1. Forest land structure of different countries with the largest forest area according to the World Bank data

нок о балансе (бюджета) углерода, характеризующихся высокой неопределенностью изменения нетто-стока, серьезно различаются и не дают конкретного представления о том, какая на самом деле поглотительная способность российского сектора ЗИЗЛХ и за счет каких мер и механизмов будет обеспечен дополнительный рост захвата углерода зелеными насаждениями в кратко- и среднесрочной перспективе в условиях изменения климатических факторов. Цель работы — сравнительный анализ фактической поглотительной способности (нетто-стока) парниковых газов российским сектором землепользования, а также оценка перспектив достижения углеродной нейтральности.

Обсуждение результатов

Сравнительный анализ удельных показателей поглощающей способности управляемых лесных земель на 1 км² по данным Национальных кадастров РКИК на 2021 г. демонстрирует высокие значения для РФ — 88,9 т CO₂/км² в сравнении с другими странами, обладающими сравнительно схожей структурой лесов: для Канады — 57,8 т CO₂/км², для Финляндии — 38,1 т CO₂/км². В совокупности с тем, что по оценкам

Всемирного банка порядка 20 % лесных территорий мира составляют леса России, являющиеся одним из основных экологических доноров с точки зрения поглощения ПГ, суммарные значения абсорбции ПГ лесными землями потенциально могут быть выше консервативных оценок, представленных в статистике международных агентств (рис. 1).

С точки зрения углеродного регулирования на национальном уровне и комплексного снижения эмиссии ПГ, согласно положениям СНУР, важными являются корректная оценка баланса углерода в лесах России и оценка его динамики в ближайшие десятилетия. На текущий момент существует достаточно много методологических исследований, математических моделей и подходов, направленных на определение поглощающей способности зеленых насаждений и лесных массивов.

На текущий момент традиционной методологией оценки национальных антропогенных поглощений парниковых газов для сектора ЗИЗЛХ являются Руководящие принципы национальных инвентаризаций ПГ Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Перечень пулов углерода и категорий землепользования является класси-

ческим и, не претерпевая серьезных изменений, рассматривается всеми исследователями при оценке бюджета углерода. Математический подход к оценке абсорбции CO₂-экв. основан на двух различных методах. Метод поступлений-потерь биомассы включает в себя определение годового изменения запаса углерода как разность между годовыми поступлением и потерями углерода в т С, т.е. является функцией изменений и потерь углерода. Поступления могут быть связаны с ростом (увеличением биомассы) и переносом углерода из одного биопула (например, древостой, мертвая древесина, подстилка, почва и т.п.) в другой. Потери могут быть связаны с переносами углерода из биопулов в результате лесозаготовки, сбора древесного топлива и потери от природных нарушений на управляемых землях, таких как пожары, ураганы и др. Наиболее предпочтительным подходом, в связи с более высокой точностью и достоверностью результатов, считается метод разности запасов, который может быть охарактеризован разностью запаса углерода в резервуарах в два конкретных момента времени. Однако вне зависимости от применяемых подходов одной из сложностей является идентификация возраста, запаса и породного состава лесных площадей, используемых в качестве основных источников исходных данных для проведения расчетов.

В Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (Росгидромет, ИГКЭ, 2023), обозначено, что в 2021 г. российские лесные земли поглотили 507 млн т CO₂. Официальная российская методика, утвержденная Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р и верифици-

рованная РКИК ООН, — методика Региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ), разработанная ИГКЭ им. акад. Ю.А. Израэля и Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Ее подходы к оценке поглощающей способности полностью совпадают с методологией Руководства МГЭИК, опираются на метод поступлений-потерь и основаны на данных государственного лесного реестра (ГЛР), в том числе с применением расчетных национальных конверсионных коэффициентов. Однако ее прямое использование без модификаций обладает определенной погрешностью в ±10–15 % из-за неточностей в структуре ГЛР относительно результатов государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), а также заниженной на 20 % оценки стока углерода вследствие отсутствия учета при оценке резервных лесов (с 2022 г. внесены изменения по их учету, согласно Распоряжению Минприроды России от 20.01.2021 № 3-р). Количественные оценки бюджета (стока) углерода по методике РОБУЛ [4] варьируются от 0,44 до 0,98 с неопределенностью ±0,2 млрд т CO₂/год.

Достаточно близкой по методологическому подходу и характеру реализации к методике РОБУЛ является канадская методика CBM-CFS3, основанная на методе оценки баланса по разности запасов углерода, полученных в рамках периодических (последовательных, ежегодных) инвентаризацией лесных земель при условии постоянства площадей оцениваемого объекта. Поэтому количественные оценки бюджета (стока) углерода после применения данных методик на пробных площадях показывают соответствующий высокий уровень сходимости при использовании одинаковых исходных данных [4].

Также, получившая в последние годы наибольшую по-

пулярность, методика оценки стоков ПГ от ВНИИЛМ [5], основанная на имеющихся моделях хода роста основных лесообразующих пород, средних таксационных показателей и конверсионных коэффициентов из Методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов, утвержденных Приказом Минприроды России от 27.05.2022 № 371, регламентирует консервативную оценку баланса углерода по данным ГИЛ первого цикла, в 2,3 раза превосходящую ту, что приведена в Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ. Особенностью данной методики является:

- использование метода разности запасов углерода, как в CBM-CFS3;
- отсутствие двойного учета эмиссий углерода в результате заготовки древесины и/или пожаров;
- учет насаждений на землях сельскохозяйственного назначения;
- увеличенная до 1 м толщина поглощения почвой углерода (на текущий момент в России данное значение принимается равным 0,3 м).

Количественные оценки бюджета углерода по методике ВНИИЛМ варьируются от 1,45 до 1,92 млрд т CO₂/год [6]. Однако важным недостатком данного подхода является то, что он основан на среднем приросте биомассы, что однозначно завышает количественные оценки изменения ее запаса в течение периода роста зеленых насаждений, при том что в структуре управляемых лесов находится до 55 % приспевающих, спелых и перестойных лесов, средний возраст которых составляет порядка 100 лет. Важным методологическим аспектом руководства МГЭИК является оценка прироста по возрастным группам/классам и недопустимость использо-

вания средних значений, предложенных во ВНИИЛМ, которые серьезно завышают результаты оценки поглощения углерода.

Наибольший нетто-сток парниковых газов характерен для исследований с процессным (инверсным) моделированием [7] и также в совокупности с данными с пробных площадей [8], где значения в среднем варьируются около 2,1 млрд т CO₂/год, а основой подхода является параметризация атмосферных транспортных моделей CO₂. Одной из особенностей данного метода является измерение фактических концентраций CO₂ на метеорологических мачтах с получением средневзвешенных значений, исключая суточные колебания, на обширных территориях.

В последние годы наибольшее распространение приобрели динамические глобальные модели растительности — Dynamic Global Vegetation Models (DGVM), направленные на моделирование изменений в потенциальной растительности и связанных с ней биогеохимических и гидрологических циклах, в том числе при заданных вводных изменчивости климата. Так, например, на площадке Global Carbon Project ежегодно формируется отчет по исследованию [9] с описанием методологии и перечнем исходных данных, используемых для оценки антропогенных выбросов и абсорбции ПГ, в том числе их поглощение наземными экосистемами. Средневзвешенное значение наземного стока CO₂ для России [9–11] составляет от 0,68 до 1,1 млрд т CO₂/год.

Помимо использования методов моделирования воздействия изменения климата на естественную растительность и ее углеродный и водный циклы все больший уровень имплементации приходится на методологии оценки углеродного бюджета лесов стран на основе комплексного использования данных дистанционного зон-

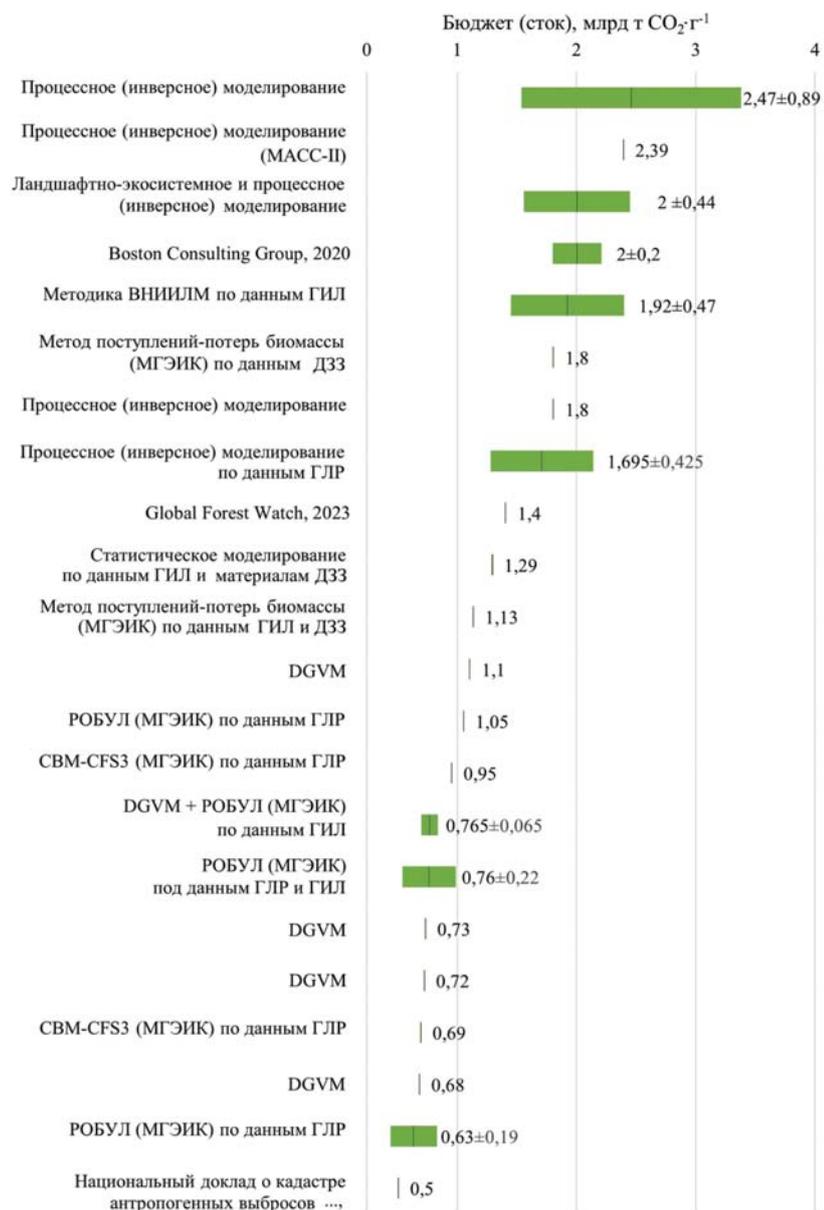


Рис. 2. Количественные оценки нетто-стока ПГ в российском секторе землепользования

Fig. 2. Quantitative estimates of GHG net runoff in the Russian land use sector

дирования земли из космоса в сочетании с информацией наземных наблюдений и моделями машинного обучения, компьютерного зрения. В результате масштабного проекта на основе информации о динамике запасов стволовой древесины и фитомассы по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли, с использованием модифицированной системы РОБУЛ, модели DGVM получены результаты [12], что за период 2001–2020 г. общая величина запаса углерода лесов России выросла на 7 %, а средний ежегодный баланс углеро-

да (в пересчете на углекислый газ) в лесах России варьировался от 0,7 до 0,83 млрд т CO₂/год. Полученные результаты показывают, что нетто-сток лесов России на 39 % выше, чем при использовании данных ГЛР. Другие масштабные проекты, основанные на сбалансированном использовании методики РОБУЛ на базе геоинформационного подхода, базы данных метеорологических характеристик, моделей динамики наземной фитомассы и потоков углерода [13], в том числе с учетом данных ГИЛ [14], показали, что средневзве-

шенный нетто-сток парниковых газов для России составляет до 1,13 млрд т CO₂/год.

В рамках исследования агрегированы результаты отечественных и зарубежных оценок по годовой поглотительной способности ПГ российским сектором ЗИЗЛХ, которые приведены на рис. 2.

Важно акцентировать внимание на том, что для корректной оценки возможностей повышения поглощения ПГ лесами необходима реализация не только научного, но и экономически доступного потенциала с учетом политических и правовых факторов. Так, в подавляющем большинстве вышерассмотренных исследований по оценке потенциала поглощения ПГ наземными экосистемами не учитываются технологические возможности и необходимая инфраструктура, а в исследовании Института географии РАН даны консервативные оценки [15] по повышению нетто-стока на 380 млн т CO₂ к 2060 г. за счет развития лесоклиматических проектов, изменений методологий учета поглощения ПГ лесами, снижения пожарной эмиссии и мер по адаптации ведения лесного хозяйства к изменениям климата. Но даже указанная оценка предположительно является оптимистической, так как не учитывает ряд особенностей, таких как планируемое возрастание объема рубок, в соответствии со Стра-

тегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р, и завышенные оценки сокращения лесопожарной эмиссии в масштабах, которые до сих пор не достигнуты ни в одной стране мира, располагающей обширными массивами бореальных лесов (Канаде, США). Ведь даже цель, регламентированная Указом Президента от 15.06.2022 № 382 "О мерах по предупреждению лесных пожаров в Российской Федерации" об обеспечении сокращения в 2022–2030 гг. площади лесных пожаров не менее, чем на 50 % относительно 2021 г., что ориентировочно эквивалентно снижению на 140 млн т CO₂-экв., является достаточно трудно реализуемой вследствие повышенной горимости лесного фонда России в последние годы.

Заключение

Таким образом, в связи с вышеобозначенным можно предположить, что существующая официальная российская методика РОБУЛ, совпадающая с методологией Руководства МГЭИК, в настоящее время отражает консервативную оценку поглощающей способности сектора ЗИЗЛХ РФ. Данная оценка в следующем национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ вероятно мо-

жет быть скорректирована с потенциальным увеличением до 35–45 % от текущих значений за счет дополнительного учета в расчетах резервных лесов, а также результатов первого цикла ГИЛ и нового ГЛР с высокой степенью пространственного разрешения. Для исключения данной неопределенности в количественных и качественных данных, характеризующих лесные земли РФ, с 1 января 2025 г. начнёт работу обновлённый государственный лесной реестр согласно Постановлению Правительства РФ от 25.08.2023 №1378 "Об утверждении Правил ведения государственного лесного реестра".

Рекомендуется проведение научно-обоснованной корректировки и гармонизации методических подходов к учету поглощающей способности лесов: системы РОБУЛ (метод поступлений-потерь биомассы) и методики ВНИИЛМ (метод разности запасов), а также их валидации и верификации при соблюдении строгих протоколов экспертами МГЭИК, с учетом использования корректных исходных данных (количественные и качественные характеристики лесных и прочих земель, структура и возрастные характеристики древостоя, показатели прироста биомассы и пр.) для получения представительных и конкурентных оценок нетто-стока парниковых газов российским сектором ЗИЗЛХ на международном уровне.

Работа выполнена в рамках проекта "Исследование потенциала декарбонизации и снижения негативного воздействия на окружающую среду объектов энергетики при внедрении НДТ" при поддержке гранта НИУ "МЭИ" на реализацию программы научных исследований "Приоритет 2030: Технологии будущего" в 2022-2024 гг.

The investigation has been carried out within the framework of the project "Investigation of decarbonisation potential and the negative environmental impact reduction of energy facilities during the introduction of BAT" with the support of a subvention from the National Research University "MPEI" for implementation of the internal research program "Priority 2030: Future Technologies" in 2022-2024.

Литература

1. Яковлев И.А., Кабир Л.С., Никулина С.И. Климатическая политика Российской Федерации: международное сотрудничество и национальный подход. Финансовый журнал. 2020. Т. 12. № 4. С. 26–36. DOI: 10.31107/2075-1990-2020-4-26-36.

References

1. Yakovlev I.A., Kabir L.S., Nikulina S.I. Klimaticheskaya politika Rossiiskoi Federatsii: mezh-dunarodnoe sotrudnichestvo i natsional'nyi podkhod. Finansovyi zhurnal. 2020. T. 12. № 4. S. 26–36. DOI: 10.31107/2075-1990-2020-4-26-36.

2. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики? Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 5–20. DOI: 10.56304/S0040363624010053.
3. Скобелев Д.О., Череповицына А.А., Гусева Т.В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат. Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
4. Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P. et al. Recent decrease in carbon sink to Russian forests. Doklady Biological Sciences. 2017. Vol. 476. P. 200–202.
5. Мальшева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н. и др. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода. Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13.
6. Филипчук А.Н., Мальшева Н.В., Золина Т.А. и др. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата. Лесохозяйственная информация. 2020. № 1. С. 92–113.
7. Deng Z., Ciais P., Tzompa-Sosa Z.A. et al. Comparing national greenhouse gas budgets reported in UN-FCCC inventories against atmospheric inversions. Earth System Science Data. 2022. Vol. 14(4). P. 1639–1675.
8. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России. Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
9. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2022. Earth Syst. Sci. Data. 2022. Vol. 14. P. 4811–4900. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.
10. Grassi G., Schwingshack C., Gassert T. et al. Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020. Earth Syst. Sci. Data. 2023. Vol. 15. P. 1093–1114. DOI: 10.5194/essd-15-1093-2023.
11. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccin, A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nat. Clim. Chang. 2021. Vol. 11. P. 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6.
12. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. Sci Rep. 2021. Vol. 11. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
13. Коротков В.Н., Романовская А.А., Карелин Д.В. и др. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. М., Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2023. С. 47–323.
14. Romanovskaya A., Korotkov V. Balance of Anthropogenic and Natural Greenhouse Gas Fluxes of All Inland Ecosystems of the Russian Federation and the Contribution of Sequestration in Forests. Forests. 2024. Vol. 15(4). 707. DOI: 10.3390/f15040707.
15. Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А. и др. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в её реализации. Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 1. С. 36–49. DOI: 10.31857/S0869587323010073.
2. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G. Na puti k klimaticheskoi neutral'nosti: vystoit li russkii les protiv energetiki? Teploenergetika. 2024. № 1. S. 5–20. DOI: 10.56304/S0040363624010053.
3. Skobelev D.O., Cherepovitsyna A.A., Guseva T.V. Tekhnologii sekvestratsii uglekislogo gaza: rol' v dostizhenii uglerodnoi neutral'nosti i podkhody k otsenke zatrat. Zapiski Gornogo instituta. 2023. T. 259. S. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
4. Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shulyak P.P. et al. Recent decrease in carbon sink to Russian forests. Doklady Biological Sciences. 2017. Vol. 476. P. 200–202.
5. Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N. i dr. Metody otsenki balansa ugleroda v lesnykh ekosistemakh i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya dlya raschetov godichno-go deponirovaniya ugleroda. Lesnoi vestnik. 2017. T. 21. № 1. S. 4–13.
6. Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Zolina T.A. i dr. Boreal'nye lesa Rossii: vozmozhnosti dlya smygcheniya izmeneniya klimata. Lesokhozyaistvennaya informatsiya. 2020. № 1. S. 92–113.
7. Deng Z., Ciais P., Tzompa-Sosa Z.A. et al. Comparing national greenhouse gas budgets reported in UN-FCCC inventories against atmospheric inversions. Earth System Science Data. 2022. Vol. 14(4). P. 1639–1675.
8. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Uglerodnyi byudzhel' lesov Rossii. Sibirskii lesnoi zhurnal. 2014. № 1. S. 69–92.
9. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2022. Earth Syst. Sci. Data. 2022. Vol. 14. P. 4811–4900. DOI: 10.5194/essd-14-4811-2022.
10. Grassi G., Schwingshack C., Gassert T. et al. Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020. Earth Syst. Sci. Data. 2023. Vol. 15. P. 1093–1114. DOI: 10.5194/essd-15-1093-2023.
11. Harris N.L., Gibbs D.A., Baccin, A. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nat. Clim. Chang. 2021. Vol. 11. P. 234–240. DOI: 10.1038/s41558-020-00976-6.
12. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. Sci Rep. 2021. Vol. 11. 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
13. Korotkov V.N., Romanovskaya A.A., Karelin D.V. i dr. Otsenka potokov parnikovyykh gazov v ekosistemakh regionov Rossiiskoi Federatsii. M., Institut global'nogo klimata i ekologii imeni akademika Yu.A. Izraelya, 2023. S. 47–323.
14. Romanovskaya A., Korotkov V. Balance of Anthropogenic and Natural Greenhouse Gas Fluxes of All Inland Ecosystems of the Russian Federation and the Contribution of Sequestration in Forests. Forests. 2024. Vol. 15(4). 707. DOI: 10.3390/f15040707.
15. Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Popova G.A. i dr. Strategiya nizkouglernogo razvitiya Rossii i rol' lesov v ee realizatsii. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2023. T. 93. № 1. S. 36–49. DOI: 10.31857/S0869587323010073.

О.А. Локтионов – канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский университет "МЭИ" (НИУ "МЭИ"), e-mail: LoktionovOA@mpei.ru • О.Е. Кондратьева – д-р техн. наук, зав. кафедрой, НИУ "МЭИ", e-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru • Д.О. Максимов – студент, НИУ "МЭИ", e-mail: MaximovDO@mpei.ru • К.М. Хмелев – студент, НИУ "МЭИ", e-mail: KhmelevKM@mpei.ru

O.A. Loktionov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research University "MPEI" (NRU "MPEI"), e-mail: LoktionovOA@mpei.ru • O.E. Kondrateva – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, NRU "MPEI", e-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru • D.O. Maksimov – NRU "MPEI", e-mail: MaximovDO@mpei.ru • K.M. Khmelev – Student, NRU "MPEI", e-mail: KhmelevKM@mpei.ru