



УПРАВЛЕНИЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

DOI 10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438

УДК 630.162.5

Научный обзор / Scientific review

Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла

А.И. Курбатова

*Российский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6*

✉ kurbatova-ai@rudn.ru

Аннотация. Анализируются существующие исследования по изменениям пространственно-временной динамики углерода в природных экосистемах суши. Приведены работы российских и зарубежных авторов по оценке углероддепонирующей способности лесного покрова и углеродного бюджета. Описаны работы по запасам биомассы и первичной продукции биогеоценозов, исследования в области математического моделирования углеродного цикла в экосистемах суши с использованием данных дистанционного зондирования. Рассмотрены современные подходы в математическом моделировании продукционных процессов и биологических циклов элементов в растительных экосистемах. Проанализирован вклад российских и зарубежных авторов в изучение пространственно-временной динамики углерода. Показана его роль в определении секвестрационной способности растительных экосистем как важной экосистемной функции, регулирующей состояние климатического ансамбля атмосферы. Приведены исследования, касающиеся роли управляемых лесов России в смягчении изменений климата, и прогноз их углероддепонирующего потенциала на период до 2050 г. при разных сценариях лесопользования, а также основанные на моделировании различные методы оценки и прогноза запаса углерода в лесах, получившие международное признание, в их числе ИЗИС ПАСА (Австрия), EFIMOD + ROMUL (Россия), РОБУЛ (Россия), Информационная система определения и картирования депонирования лесами углерода (Россия, УГЛТУ), СВМ-CFS3 (Лесная служба Канады), FORCARB2 (Лесная служба США). Описаны работы, основанные на пространственной модели углеродного цикла в системе «атмосфера – растение – почва» (А.М. Тарко) ВЦ РАН имени А.А. Дородницына, применяемые для оценки поглотительного потенциала в различных регионах мира.

Ключевые слова: секвестрация CO₂, пространственно-временная динамика углерода, оценка фитомассы, математическое моделирование

История статьи: поступила в редакцию 15.02.2021; принята к публикации 20.02.2021.



Для цитирования: Курбатова А.И. Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотических составляющих углеродного цикла // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 4. С. 428–438. <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438>

Analytical review of modern studies of changes in the biotic components of the carbon cycle

Anna I. Kurbatova

*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation*

✉ kurbatova-ai@rudn.ru

Abstract. The research on changes in the spatial-temporal dynamics of carbon in natural ecosystems on land is explored. The works of Russian and foreign authors on the analysis of the depositing ability of the cover are presented. Works on biomass reserves and primary production of biogeocenoses, research in the field of mathematical modeling of the carbon cycle in terrestrial ecosystems using remote sensing data are described. The article discusses modern approaches to mathematical modeling of productive processes and biological cycles of elements in plant ecosystems. The contribution of Russian and foreign authors to the spatial-temporal dynamics of carbon is analyzed. The research data in the assessment of the sequestration capacity of plant ecosystems, as the role of an ecosystem function, performing the function of a climatic ensemble of the state of the atmosphere is given. The various modeling-based methods for assessing and forecasting carbon stocks in forests, which have received international recognition, are presented, and the role of climate in managed forests in mitigating changes and predicting their carbon storage potential for the period up to 2050 under different forest management scenarios is examined. Among them: ISIS IIASA (Austria), EFIMOD + ROMUL (Russia), ROBUL (Russia), Information System for Determination and Mapping of Carbon Deposition by Forests (Russia, UGFTU), CBM-CFS3 (Canadian Forest Service), FORCARB2 (US Forest Service). The works based on the spatial model of the carbon cycle in the “atmosphere – plant – soil” system (A.M. Tarko) of the Computing Center of the Russian Academy of Sciences, used to assess the absorption potential in various regions of the world, are outlined.

Keywords: sequestration of CO₂, spatiotemporal dynamics of carbon, estimation of phytomass, mathematical modeling

Article history: received 15.02.2021; revised 20.02.2021.

For citation: Kurbatova AI. Analytical review of modern studies of changes in the biotic components of the carbon cycle. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(4):428–438. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-4-428-438>

Введение

Наземные экосистемы при рассмотрении их общей непосредственной роли углерода, находящегося в динамике пространства и времени, являются основным участником при создании и удержании органического вещества внутри биологической массы растения. При этом после окончания жизни растительной массы углерод остается внутри на всех этапах деструкции, будь это сухостой, опад, гумус в почве или торф.

Стоит всегда правильно использовать природные ресурсы. При нерациональном подходе любая ситуация, связанная с природно-экономическим потенциалом, может выйти в плюс или минус. Так, леса, луга и земли сельскохозяйственного назначения могут быть резервуаром для долговременного сохранения углерода либо очень сильным источником выброса CO₂ и других парниковых газов.

Углерод очень активно накапливается в почвах. Это напрямую связано с тем, что минерализация органических веществ идет намного медленнее, нежели само накопление углерода [1]. Как указано в [1], концепция Клементса – Разумовского является индикатором соотношения процессов накопления и деструкции органического вещества в лесной экосистеме. А возрастание органического вещества почвы свидетельствует о том, что лесная экосистема может считаться стоком атмосферного углерода.

Анализ предметной области

Мировой приоритет имеют проведенные исследования и учет составляющих глобального круговорота наземных растительных сообществ советскими (российскими) учеными Н.И. Базилевич, Л.Е. Родиным, Н.Н. Розовым, А.А. Титляновой, А.В. Дроздовым, А.Д. Арманом, О.Г. Чертовым, А.С. Комаровым. Подробнейшие исследования состояния и антропогенной динамики лесов России выполнены под руководством А.С. Исаева, А.З. Швиденко, В.А. Усольцева и В.И. Харука.

Оценка углерододепонирующей способности лесного покрова сегодня является одной из насущных проблем [2]. В [2] проводились работы по вычислению итоговых запасов фитомассы отдельно для каждой породы и итоговые запасы фитомассы на всей покрытой лесом площади лесхоза Пермской области РФ. Исходя из сведений, представленных в работе [3], можно сказать, что полученная на основе разработок, связанных напрямую с аллометрическими моделями, база данных содержит важную информацию о точном состоянии биологической массы и органического углерода, а также о любых колебаниях системы, касающихся пространства и времени.

В [4] подробно изложены основные методические подходы к оценке бюджета углерода. Авторы работы исследовали все типы лесных формаций в России. Особое внимание привлекли земли, находящиеся в отдалении от границ лесного фонда.

Результатами данных работ является систематизированное применение анализа и их сплетение с итогами по дистанционному зондированию планеты Земля. При этом авторы рассчитали и чистый экосистемный углеродный баланс (ЧЭУБ) покрытых лесом земель России за период 2007–2009 гг.

В [5] рассмотрены роль управляемых лесов России в смягчении изменений климата и прогноз их углерододепонирующего потенциала на период до 2050 г. при разных сценариях лесоправления. Проведена оценка стока диоксида углерода на основе модели CBM-CFS3 (Лесная служба Канады). В [6] изучены «основанные на моделировании различные методы оценки и прогноза запаса углерода в лесах, которые получили международное признание, в их числе: ИЗИС IIASA (Австрия), EFIMOD + ROMUL (Россия), РОБУЛ (Россия), Информационная система определения и картирования де-

понирования лесами углерода (Россия, УГЛТУ), CBM-CFS3 (Лесная служба Канады), FORCARB2 (Лесная служба США). Рассчитана и проиллюстрирована в картографической форме величина годичного депонирования углерода основными типами лесных экосистем зоны хвойно-широколиственных лесов Европейско-Уральской части России» [6]

В [6] приводится обзор математических моделей для изучения углеродного цикла в лесных экосистемах зоны хвойно-широколиственных лесов. Авторы отмечают значительную расходимость данных по углеродному балансу ввиду высокой степени неопределенностей, возникающих при математическом моделировании. О.Г. Чертов, М.А. Надпорожская [1] разработали и реализовали комплексную схему изучения скорости и характера трансформации поступающих органических остатков в почву и продуктов их гумификации с помощью модели ROMUL.

Сведения о запасах биомассы и первичной продукции биогеоценозов, обобщены в работах Н.И. Базилевич, Л.Е. Родина, Н.Н. Розова, А.И. Уткина.

В настоящее время разработана база данных по фитомассе лесов Северной Евразии, принадлежащая В.А. Усольцеву, содержащая около 5085 наблюдений. «На основе данных наблюдений рассчитаны многофакторные модели чистой первичной продукции (NPP) путем совмещения моделей фитомассы и NPP с банками данных лесоустройства по 150 лесхозам Уральского федерального округа на площади 127 млн га, рассчитаны запасы углерода (2679 млн т) и его годичное депонирование (165 млн т)» [6].

В лесах России круговорот углерода исследован полно в многочисленных работах [6–8].

Особую важность представляют работы, посвященные исследованию воздействия распада древостоя на углеродный баланс в таежных лесах России. Авторы [7] показали, что прогрессирующее ослабление и гибель елового древостоя в Российской Федерации, связанное с современным потеплением, приводит к трехкратному снижению стока С на значительных территориях, несмотря на сопровождающие этот процесс восстановительные сукцессии. Снижение стока связано с сохранением величины валового дыхания на фоне снижения продукции. Расчеты показывают, что увеличение площади полного распада древостоя до 27 % превращает экосистему бореального леса во вторичный источник CO₂ для атмосферы, что может быть использовано при дистанционных оценках влияния климатических или антропогенных воздействий на С-баланс лесов. Авторами [9] определено, что участки умирающего леса долгое время являются источниками углерода, а это сопряжено с увеличением интенсивности общего дыхания и снижением первичной продукции еловых насаждений, подтверждением чему служит значительное падение эвапотранспирации.

Воздействию на углеродный баланс лесных экосистем рубок и лесных пожаров посвящена работа [10]. В ней показано, что секвестрационная способность лесной экосистемы снижается в результате лесозаготовок и лесных пожаров, например лесные пожары явились причиной вариаций стока углерода от 53 (2003 г.) до 305 (2005 г.) Мт С/год. Результаты РОБУЛ дают следующую оценку: при сохранении низкого уровня лесопользования сток уг-

лерода в леса России будет уменьшаться, в то время как увеличение лесозаготовок неизбежно приведет к его ускорению.

Стоит заметить, что существование реабилитированных мест, сделанных на лесных вырубках и гарях, компенсирует концентрацию углерода посредством производства на своих территориях биологической массы. Если процесс использования земли некорректен, не происходит компенсации потерь [11].

Оценка эмиссии углерода в результате лесных пожаров рассматривается в работе [8]. «Результаты получены на основе спутниковых данных Института леса имени В.Н. Сукачева СО РАН, а также на оценках сгоревших материалов с учетом вариантов восстановления экосистем в зависимости от типа растительности и степени поражения пожаров» [8]. «Автором работы была разработана концептуальная методология и проведена комплексная эколого-экономическая оценка бюджета углерода насаждений с учетом влияния на них различных факторов негативного воздействия, включая рубки. На основе детального анализа данных выявлены закономерности и связи между количеством депонируемого углерода, интенсивностью воздействия неблагоприятных факторов и способом лесопользования» [12].

Поглощение углекислого газа лесными биогеоценозами, экосистемами стран мира проанализированы в работах [13–16].

Количественные оценки накопления биомассы после нарушений в лесах исследованы в [17]. Показано, что густая наземная растительность и низкая водная и питательная доступность почвы на исследуемом участке ограничивают восстановление пологообразующих деревьев и в итоге влияют на накопление биомассы. Биомасса и чистая первичная продуктивность являются важными факторами для изучения углеродного цикла [18]. Используя накопленные в литературе данные, в этом исследовании была синтезирована и проанализирована обширная база прямых полевых наблюдений лесной биомассы для Юго-Западного Китая. Комплексный региональный синтез и анализ данных, основанный на прямых полевых наблюдениях за лесной биомассой, имеют важное значение для сравнительного анализа глобальных и региональных моделей растительности и углерода, оценки регионального содержания углерода, восстановления растительности и смягчения последствий изменения климата.

В настоящее время в связи с исследованием биосферной роли лесов, их продуктивности и устойчивости на фоне глобального изменения климата возрос интерес к изучению процессов образования и поглощения парниковых газов [15]. В [19] автором «подробно исследованы основные источники поступления углерода в атмосферу в результате антропогенной деятельности и землепользования, а также процессы накопления углерода в природе и естественных резервуарах: атмосфере, биоте и океанах. Сделан прогноз углеродного баланса России в XXI веке с учетом ожидаемых изменений в выбросах углерода и их поглощения». В [20] сделан вывод о «современном балансе углерода на территории России на момент 2005–2006 гг. на основе непрерывных одиннадцатилетних мониторинговых наблюдений за эмиссией CO₂, впервые получены оценки сезонных и годовых потоков CO₂ из почв южно-таежной зоны и рассчитана их межгодовая вариабельность, разработаны эмпирические модели, описывающие взаимосвязь между величиной сум-

марной годовой эмиссии CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны и количеством осадков за весенне-летний период».

«Многочисленные исследования углеродного цикла в биосфере в наземных экосистемах выявили необходимость повышения точности оценок фитомассы растительности, совершенствования методов сбора и обработки эмпирических данных» [21]. Математическое моделирование [14; 15] сводит разные сведения в рамках большой модели для соответствия концепциям и теориям. Производя эксперименты с вычислениями, можно найти соотношение к глобальным моделям, также учитывая и прогнозы. «В работе подробно систематизированы математические модели и системы оценки и прогноза запасов углерода в лесах. На основе сравнительного анализа выявлено, что несмотря на сопоставимость расчетов в модельном эксперименте, результаты, полученные разными научными коллективами, значительно расходятся в силу высокой степени неопределенности» [14].

Изменения количества углерода в гумусе и фитомассе в результате обезлесения и эрозии почвы рассчитаны для стран Центральной и Южной Америки в период с 2000 по 2060 г. с помощью пространственной математической модели глобального цикла углекислого газа в биосфере ВЦ РАН [15]. Этот анализ полезен для планирования экологических практик с целью увеличения накопления углерода в лесных пулах.

Глубинное знание глобального и регионального углеродного бюджета требуется для эффективной политики, направленной на борьбу с глобальным изменением климата. Авторами [16] создана региональная модель качества воздуха (WRF-CO₂) для моделирования атмосферных вариаций CO₂ в регионе Большой Азии за период 2010–2012 гг.

С развитием методов спутниковых наблюдений и повышением доступности их данных стали интенсивно развиваться методы количественной оценки сезонной биомассы и ее динамики, основанные на анализе дистанционно измеряемых оптических характеристик.

Дистанционное зондирование Земли является основой для изучения ее биологического разнообразия. Стоит заметить, что ни одно изучение экологической системы не проходит без него. Основным момент, который необходимо учитывать на всех этапах, это оценка системы не только с помощью отслеживания динамики времени, но и с непосредственным учетом пространственных уровней [22]. Важно проводить оценку в деталях. Для этого прибегают к помощи статистических данных и краудсорсинга [23]. Авторы [23] «агрегировали карту лесов ФАО 2010 разрешением в 250 м, карту наземных экосистем Северной Евразии – GLC-2000, 1 км, глобальные карты земельного покрова GlobCover 2009, 300 м и MODIS 2010, 500 м, карту сомкнутости древесного полога MODIS VCF 2010, 250 м, карту лесов на основе Landsat 2010, 30 м, карты, созданные на основе радарных инструментов: маску лесов Palsar 2010, 50 м и запас лесов GSV 2010, 1 км». Созданная карта позволила оценить деградацию лесных сообществ, выявить динамику лесного покрова на территориях стран мира.

«В исследовании при картографировании лесных экосистем были использованы поверхности разрешения 90 м, полученные в ходе выполнения

международного проекта SRTM „США – Италия – Германия“ (Shuttle Radar Topography Mission – проект радарной съемки рельефа спутником Шаттл). Применение космических данных позволило провести процедуры интерполяции и экстраполяции измеренных и рассчитанных данных в точках по матрицам факторов среды» [24]. В работе выявлены тенденции исследуемых экосистем в смене адаптивных стратегий в меняющейся окружающей среде.

В [25] авторы проводят оценку накопления углерода лесами России с помощью инструментария ГИС.

Значительный вклад в оценку биомассы тропических лесов внесли авторы [26]. Они отмечают, что существует сильный синергизм между наземными и дистанционными измерениями для количественной оценки наземной биомассы. Наземные данные являются более полными в локальном масштабе, чем данные дистанционного зондирования. Наоборот, данные дистанционного зондирования обширнее, включая миллионы измерений в региональном или континентальном масштабе по сравнению с участками и обеспечивая более пространственно всеобъемлющую меру вариаций лесной биомассы.

В [27] на основе классификационных данных дистанционного зондирования лесных ресурсов использована модель интегрированного углеродного цикла земной экосистемы (InTEC) для моделирования пространственно-временной динамики лесного углерода в провинции Чжэцзян в 1985–2015 гг. и анализа его реакции на метеорологические факторы, такие как температура, осадки, относительная влажность и радиация.

Сохранение и устойчивое развитие лесов являются механизмами смягчения последствий изменения климата благодаря способности лесов поглощать углерод [28]. Таким образом, оценка биомассы позволяет оценить продуктивность лесов и контролировать углеродные бюджеты. В [28] проведена оценка и прогноз изменения биомассы экваторских лесов с помощью пространственной модели глобального углеродного цикла и нормированного дифференциального индекса растительности. Математическая модель описывает процессы роста и распада растительности в условиях углеродного обмена между атмосферой, растениями и почвой при антропогенных воздействиях.

Заключение

В заключение можно сделать вывод, что современные исследования биотической составляющей углеродного цикла все больше используют интегрирование данных дистанционного зондирования Земли и расчетных данных математических моделей. Реализация заблаговременного прогноза по адекватной математической модели с использованием космических данных является на сегодняшний день перспективным направлением в оценке пространственно-временной динамики углеродного цикла в системе «атмосфера – растение – почва».

Список литературы

- [1] Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / отв. ред. В.Н. Кудеяров ; Ин-т физ.-хим. и биолог. проблем почвоведения РАН. М. : Наука, 2007. 380 с.
- [2] Усольцев В.А. Депонирование углерода лесами Уральского региона России (по состоянию Государственного учета лесного фонда на 2007 год) : монография. Екатеринбург, 2018. 265 с.
- [3] Усольцев В.А., Колчин К.В., Маленко А.А. О необходимости построения и анализа аллометрических моделей фитомассы лесных деревьев как основы корректной оценки углерододепонирующей функции лесов : аналитический обзор // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (149). С. 78–87.
- [4] Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
- [5] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Куриц В.А. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг. : ретроспективная оценка и прогноз // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 73–92.
- [6] Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филиппчук А.Н., Золина Т.А. 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. <http://dx.doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- [7] 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 // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 89–93.
- [8] Ваганов В.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. 2005. № 4. С. 631–649.
- [9] Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Kumanyaev A.S., Popov S.Yu., Telnova N.O., Gitariskiy M.L. The long-term effect of ongoing spruce decay on carbon exchange in Taiga forests // Doklady Earth Sciences. 2020. Vol. 493. No. 1. Pp. 558–561.
- [10] Замолодчиков Д.Г. Баланс углерода лесов России : ретроспективный анализ и прогнозные оценки // Научные основы устойчивого управления лесами : доклады конференции. М., 2014.
- [11] Замолодчиков Д.Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4 (29). С. 15–22.
- [12] Шимон Т.Н. Оценка влияния биотических и антропогенных факторов лесов России на бюджет углерода : дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 171 с.
- [13] Kurbatova A.I., Tarko A.M., Kozlova E.V. Impact of global climate change on ecosystem functions of African countries // Arid Ecosystems. 2017. Vol. 7. Pp. 217–223. <https://doi.org/10.1134/S2079096117040047>
- [14] Tarko A., Kurbatova A., Llerena S. Effect of CO₂ increase on ecological parameters of plant ecosystems of Central and South America countries // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 116. Article 00090.
- [15] Курбатова А.И., Тарко А.М. Пространственно-временная динамика углерода в нативных и нарушенных экосистемах мира. М. : РУДН, 2017. 224 с.
- [16] Ballav S., Naja M., Patra P.K. et al. Assessment of spatio-temporal distribution of CO₂ over greater Asia using the WRF–CO₂ model // J. Earth Syst. Sci. 2020. Vol. 129. Article 80. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1352-x>
- [17] Yazaki T., Hirano T., Sano T. Biomass accumulation and net primary production during the early stage of secondary succession after a severe forest disturbance in Northern Japan // Forests. 2016. Vol. 7. Issue 11. P. 287. <https://doi.org/10.3390/f7110287>

- [18] Liu L.B., Yang H.M., Xu Y., Guo Y.M., Ni J. Forest biomass and net primary productivity in Southwestern China : a meta-analysis focusing on environmental driving factors // *Forests*. 2016. Vol. 7. Issue 8. P. 173. <https://doi.org/10.3390/f7080173>
- [19] Федоров Б.Г. Российский углеродный баланс : монография. М. : Научный консультант, 2017. 82 с.
- [20] Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России : дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2010. 401 с.
- [21] Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филиппук А.Н., Золина Т.А. 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. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- [22] Еришов Д.В., Лукина Н.В., Барталев С.А., Лулян Е.А. Роль дистанционных данных в системе мониторинга биологического разнообразия, оценки экосистемных функций и услуг лесов : пленарный доклад // *Научные основы управления лесами*. М. : ЦЭПЛ РАН, 2014.
- [23] Щепашченко Д.Г., Швиденко А.З., Лесив М.Ю., Онтиков П.В., Щепашченко М.В., Краксер Ф. Площадь лесов России и ее динамика на основе синтеза продуктов дистанционного зондирования // *Лесоведение*. 2015. № 3. С. 163–171.
- [24] Коломыйц Э.Г., Керженцев А.С., Шарая Л.С. Аналитические и картографические модели устойчивости лесных экосистем // *Теоретические и практические аспекты функциональной экологии : доклады конференции (27–29 октября 2016 г., Пушино)*. Пушино, 2016.
- [25] Malysheva N., Zolina T., Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests : geospatial issue // *InterCarto. InterGIS*. 2017. Vol. 23. Pp. 373–382. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382>
- [26] Saatchi S.S. et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011. Vol. 108. No. 24. Pp. 9899–9904. URL : <http://www.pnas.org/content/108/24/9899> (accessed : 01.02.2021).
- [27] Zheng J., Mao F., Du H., Li X., Zhou G., Dong L., Zhang M., Han N., Liu T., Xing L. Spatiotemporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests // *Forests*. 2019. Vol. 10. No. 8. P. 708. <https://doi.org/10.3390/f10080708>
- [28] Llerena S., Tarko A., Kurbatova A., Kozhevnikova P. Assessment of carbon dynamics in Ecuadorian forests through the Mathematical Spatial Model of Global Carbon Cycle and the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 96. Article 02002.

References

- [1] Kudayarov VN. (ed.) *Modeling the dynamics of organic matter in forest ecosystems*. Moscow: Nauka Publ.; 2007. (In Russ.)
- [2] Usoltsev VA. *Carbon sequestration by forests of the Ural region of Russia (on the base of Forest State Inventory data 2007)*. Yekaterinburg; 2018. (In Russ.)
- [3] Usoltsev VA, Kolchin KV, Malenko AA. On the need to construct and analyze allometric models of forest tree phytomass as the basis for a correct assessment of the carbon-containing function of forests: analytical review. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2017;3(149):78–87. (In Russ.)
- [4] Shvidenko AZ, Shchepashchenko DG. Carbon budget of Russian forests. *Siberian Forest Journal*. 2014;(1):69–92. (In Russ.)
- [5] Zamolodchikov DG, Grabovsky VI, Korovin GN, Gitarsky ML, Blinov VG, Dmitriev VV, Kurts VA. Carbon budget of managed forests of the Russian Federation in 1990–2050: retrospective assessment and forecast. *Meteorology and Hydrology*. 2013;(10):73–92. (In Russ.)

- [6] Malysheva NV, Moiseev BN, Filipchuk AN, Zolina TA. Methods for assessing the carbon balance in forest ecosystems and the possibility of their use for calculating annual carbon deposition. *Forestry Bulletin*. 2017;21(1):4–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- [7] Karelin DV, Zamolodchikov DG, Shilkin AV, Kumanyaev AS, Popov SYu, Telnova NO, Gitarsky ML. The influence of the progressive decay of the forest stand on the carbon exchange of spruce forests. *Doklady Earth Sciences*. 2020;493(1):89–93. (In Russ.)
- [8] Vaganov VA, Vedrova EF, Verkhovets SV, Efremov SP, Efremova TT, Kruglov VB, Onuchin AA, Sukhinin AI, Shibistova OB. Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle. *Siberian Ecological Journal*. 2005;(4):631–649. (In Russ.)
- [9] Karelin DV, Zamolodchikov DG, Shilkin AV, Kumanyaev AS, Popov SYu, Telnova NO, Gitarskiy ML. The long-term effect of ongoing spruce decay on carbon exchange in Taiga forests. *Doklady Earth Sciences*. 2020;493(1):558–561.
- [10] Zamolodchikov DG. Carbon balance of Russian forests: a retrospective analysis and forecast estimates. *Scientific Foundations of Sustainable Forest Management: Conference Reports*. Moscow; 2014. (In Russ.)
- [11] Zamolodchikov DG. Systems for assessing and forecasting carbon stocks in forest ecosystems. *Sustainable Forest Management*. 2011;4(29):15–22. (In Russ.)
- [12] Shimon TN. *Assessment of the impact of biotic and anthropogenic factors of Russian forests on the carbon budget*. Dissertation of the Candidate of Biological Sciences. Moscow; 2008. (In Russ.)
- [13] Kurbatova AI, Tarko AM, Kozlova EV. Impact of global climate change on ecosystem functions of African countries. *Arid Ecosystems*. 2017;7:217–223. <https://doi.org/10.1134/S2079096117040047>
- [14] Tarko A, Kurbatova A, Llerena S. Effect of CO₂ increase on ecological parameters of plant ecosystems of Central and South America countries. *E3S Web of Conferences*. 2019;116:00090.
- [15] Kurbatova AI, Tarko AM. *Spatiotemporal dynamics of carbon in native and disturbed ecosystems of the world*. Moscow: RUDN Publ.; 2017. (In Russ.)
- [16] Ballav S, Naja M, Patra PK, et al. Assessment of spatio-temporal distribution of CO₂ over greater Asia using the WRF–CO₂ model. *J. Earth Syst. Sci*. 2020;129:80. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1352-x>.
- [17] Yazaki T, Hirano T, Sano T. Biomass accumulation and net primary production during the early stage of secondary succession after a severe forest disturbance in Northern Japan. *Forests*. 2016;7(11):287. <https://doi.org/10.3390/f7110287>
- [18] Liu LB, Yang HM, Xu Y, Guo YM, Ni J. Forest biomass and net primary productivity in Southwestern China: a meta-analysis focusing on environmental driving factors. *Forests*. 2016;7(8):173. <https://doi.org/10.3390/f7080173>
- [19] Fedorov BG. *Russian carbon balance*. Moscow: Nauchnyi Konsultant Publ.; 2017. (In Russ.)
- [20] Kurganova IN. *Carbon dioxide emissions and balance in terrestrial ecosystems of Russia*. Dissertation of the Doctor of Biological Sciences. Pushchino; 2010. (In Russ.)
- [21] Malysheva NV, Moiseev BN, Filipchuk AN, Zolina TA. Methods for assessing the carbon balance in forest ecosystems and the possibility of their use for calculating annual carbon deposition. *Forestry Bulletin*. 2017;21(1):4–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-4-13>
- [22] Yershov DV, Lukina NV, Bartalev SA, Lupyan EA. The role of remote data in the system of biological diversity monitoring, assessment of ecosystem functions and forest services: plenary report. In: *Scientific Bases of Forest Management*. Moscow: CEPL RAS; 2014. (In Russ.)
- [23] Shchepashchenko DG, Shvidenko AZ, Lesiv MYu, Ontikov PV, Shchepashchenko MV, Kraksner F. The forest area of Russia and its dynamics based on the synthesis of remote sensing products. *Lesovedenie*. 2015;(3):163–171. (In Russ.)

- [24] Kolomyts EG, Kerzhentsev AS, Sharaya LS. Analytical and cartographic models of forest ecosystem sustainability. *Theoretical and Practical Aspects of Functional Ecology: Proceedings of the Conference (27–29 October 2016, Pushchino)*. Pushchino; 2016. (In Russ.)
- [25] Malysheva N, Zolina T, Dedova V. Estimation of carbon sequestration by Russian forests: geospatial issue. *InterCarto. InterGIS*. 2017;23:373–382. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2017-1-23-373-382>
- [26] Saatchi SS, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011;108(24):9899–9904. Available from: <http://www.pnas.org/content/108/24/9899> (accessed: 01.02.2021).
- [27] Zheng J, Mao F, Du H, Li X, Zhou G, Dong L, Zhang M, Han N, Liu T, Xing L. Spatio-temporal simulation of net ecosystem productivity and its response to climate change in subtropical forests. *Forests*. 2019;10(8):708. <https://doi.org/10.3390/f10080708>
- [28] Llerena S, Tarko A, Kurbatova A, Kozhevnikova P. Assessment of carbon dynamics in Ecuadorian forests through the Mathematical Spatial Model of Global Carbon Cycle and the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI). *E3S Web of Conferences*. 2019;96:02002.

Сведения об авторе:

Курбатова Анна Игоревна, кандидат биологических наук, доцент, кафедра экологического мониторинга и прогнозирования, экологический факультет, Российский университет дружбы народов. E-mail: kurbatova-ai@rudn.ru

Bio note:

Anna I. Kurbatova, PhD in Environmental Sciences, Associate Professor, Department of Environmental Monitoring and Forecasting, Faculty of Ecology, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). E-mail: kurbatova-ai@rudn.ru