

Н.Н. АЛЕКСЕЕВА, А.И. БАНЧЕВА, Ю.С. ГРИНФЕЛЬДТ, Л.А. ПЕТРОВ, Д.А. ТРЕТЬЯЧЕНКО

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, nalex01@mail.ru, ban-sai@mail.ru,  
y.greenfeldt@gmail.com, leonid\_petrov\_1997@mail.ru, daria.trt@gmail.com

## ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА ВСЛЕДСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ГЛОБАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЯХ В ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

*Представлено обобщение подходов и методов, применяемых за рубежом для оценки выбросов углерода в результате изменений землепользования в глобальном и региональном масштабах. Для понимания места этой тематики в современной геоэкологии проведен анализ наукометрических показателей на основе реферативной базы данных Scopus. Отмечено существенное увеличение публикаций по результатам исследований выбросов поглощения и абсорбции углерода под влиянием землепользования в мире с начала 2000-х гг. В настоящее время их число составляет более 200 статей ежегодно. К странам-лидерам по публикационной активности относятся Китай, США, Германия, Великобритания и Бразилия, к организациям — Китайская академия наук. Современные исследования изменения баланса углерода в результате трансформации землепользования основаны на отслеживании изменений земельного покрова в пространственно-временном аспекте с применением передовых геоинформационных технологий и на моделировании потоков углерода с помощью точных данных, соответствующих подходам 2–3 методологии Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Установлено, что большинство исследований ведущих научных центров имеют общий алгоритм и этапы; в статье дана характеристика данных этапов, а именно применяемых методов и конкретных инструментов, определены их преимущества и недостатки. Общий алгоритм исследований включает на первом этапе оценку динамики землепользования/земельного покрова за разные временные диапазоны, затем — моделирование баланса углерода в результате изменений землепользования, разработку на этой основе мер региональной политики. Выявлены особенности применения методов и исходных данных (на примере исследований, проведенных в Китае, Бразилии и др.). Сделан вывод о необходимости дальнейшего совершенствования методик в сфере точности классификаций землепользования/земельного покрова и своевременности отражения его динамики, а также определения запасов углерода. От этого зависят конкретные практические действия в области регионального планирования и разработки компенсационных мер в рамках климатической политики.*

**Ключевые слова:** изменение земельного покрова, наземная биомасса, баланс углерода, запасы углерода, библиометрический анализ, обзор региональных исследований.

N.N. ALEKSEEVA, A.I. BANCHEVA, YU.S. GRINFELDT, L.A. PETROV, D.A. TRETYACHENKO

Lomonosov Moscow State University,  
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, nalex01@mail.ru, ban-sai@mail.ru,  
y.greenfeldt@gmail.com, leonid\_petrov\_1997@mail.ru, daria.trt@gmail.com

## ESTIMATING CARBON EMISSIONS RESULTING FROM LAND USE CHANGES AT GLOBAL AND REGIONAL LEVELS IN FOREIGN RESEARCH

*The purpose of the article is to summarize approaches and methods used abroad for estimating carbon emissions resulting from land use changes on global and regional levels. To understand the place of this topic in modern geoecology, an analysis of bibliometric indicators was carried out based on the Scopus abstract and citation database. There has been a significant increase in publications on the research results of carbon emissions and removals under the influence of land use in the world since the early 2000s with over 200 articles published per year currently. The leading countries in terms of publication activity include China, the USA, Germany, Great Britain and Brazil, with the Chinese Academy of Sciences being the leader among organizations. The present-day research of carbon balance changes under the impact of land use change is based on the land cover change detection in the spatiotemporal aspect using advanced geoinformation technologies, and on modeling of carbon fluxes through the use of precise data consistent with the approaches 2–3 of the Intergovernmental Panel on Climate Change methodology. It has been established that most of the studies by leading scientific centers have common algorithm and stages. The article provides a description of these stages, namely the methods and specific tools used, as well as identifies their advantages and disadvantages. The general research algorithm includes, at the first stage, an assessment of the dynamics of land use/land cover change for different time spans, then carbon balance modeling as a result of land use changes, and development of regional policy measures*

*on this basis. National peculiarities in application of methods and initial data are also revealed (cases of China, Brazil, etc.). It is concluded that it is necessary to further improve methods in the field of accuracy of land use/land cover classifications and timeliness of detecting its dynamics, as well as carbon stocks assessment. These factors determine the specific practical actions in the field of regional planning and the offset measures development under the climate policy.*

**Keywords:** *land cover change, above-ground biomass, carbon balance, carbon stocks, bibliometric analysis, review of regional studies.*

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ динамики структуры землепользования представляет собой важную составляющую в оценке баланса углерода для экосистем суши. Земельный покров — характеристика «измеряемых биофизических свойств земной суши, отражающих растительность или антропогенные элементы» [1, с. 19] в виде генерализованных категорий (классов). Категории земельного покрова применяются в Оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) для определения потенциала поглощения углерода в результате изменения управления землепользованием (например, его интенсификации или экстенсификации) или при переходе из одной категории землепользования в другую. Число категорий варьирует от 4–6 до более 40 (база данных европейской программы CORINE [2]). Иногда в публикациях используют понятия «наземный» или «ландшафтный покров», последнее, по нашему мнению, шире, чем содержание, вкладываемое в общепризнанное определение. По оценке МГЭИК, изменениями землепользования и земельного покрова в 2010–2019 гг. было обусловлено порядка  $1,6 \pm 0,7$  Гт С/год, или около 14 % глобальных выбросов углекислого газа [3].

В Российской Федерации основной вклад в выбросы диоксида углерода от землепользования вносят в основном пахотные земли, лесозаготовки и лесные пожары, относительно меньший — постоянные сенокосы и пастбища, перевод пахотных земель в поселения и прочие земли, осушение органических почв и торфоразработки. По данным [4], в 2020 г. в секторе «Землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство» происходило нетто-поглощение парниковых газов (–570 млн т CO<sub>2</sub>-экв. с неопределенностью оценки 29 % при 95 %-м доверительном интервале), обусловленное в целом большим объемом поглощения лесами. Количественные оценки изменений потоков и запасов углерода в этом секторе в значительной степени менее достоверны, чем оценки выбросов от стационарных источников углекислого газа (энергетика, промышленные процессы и использование продукции, отходы) и транспорта [5, 6].

Изучение структуры и динамики изменений выбросов и поглощения углерода в результате изменений землепользования необходимо для формирования адекватной политики для достижения углеродной нейтральности, которая объявлена целью многих стран в рамках Парижского соглашения по климату [7]. В соответствии с Руководящими принципами МГЭИК [8], страны ежегодно проводят национальные инвентаризации парниковых газов, включая CO<sub>2</sub>, кадастр которых является подотчетным документом. Методологические подходы МГЭИК, согласованные на международном уровне для стран Рамочной конвенции ООН по изменению климата, в том числе России, предусматривают оценку для четырех секторов экономики, включая отдельно выделяемый сектор сельского хозяйства, лесного хозяйства и других видов землепользования. В Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов 2006 г. [8], их доработке 2013 г. и обновленной версии 2019 г. в основу оценки выбросов и поглощений парниковых газов положены шесть ключевых категорий земель: лесные земли, возделываемые земли, пастбища, водно-болотные угодья, поселения и прочие.

Наряду с национальными инвентаризациями парниковых газов научными группами многих стран проводятся исследования выбросов и поглощения углерода по отдельным категориям землепользования (в терминологии МГЭИК) и разным типам экосистем. Иерархию геосистем принято разделять на три уровня — планетарный (глобальный), региональный и локальный. К геосистемам регионального уровня относятся крупные и достаточно сложные структурные подразделения, например, ландшафтные зоны, физико-географические страны, провинции. Под локальным уровнем подразумеваются более простые комплексы, из которых построены региональные геосистемы. Соответственно, к региональным относятся исследования в мелких масштабах (от 1:500 000 и мельче), к локальным — от масштаба стационаров (1:5000) и крупнее [9]. К региональному уровню относят административные единицы (государства и/или их административно-территориальные единицы). Исследования выбросов и поглощения углерода чаще всего проводятся на региональном уровне, которому соответствуют физико-географические области, речные бассейны, административно-территориальные единицы и др.

Многочисленны российские и зарубежные работы, в которых моделируются потоки выбросов и поглощения углерода по основным категориям земель: лесам [10, 11], водно-болотным угодьям [12, 13], возделываемым землям [14–16], пастбищам [17], поселениям [18, 19]. Для оптимизации моделей и повышения их точности часто используются полевые методы и полученные на их основе натурные данные по пространственно-временному распределению углерода [20]. Обзоры российских исследований потоков углерода представлены в работах [21, 22].

Цель статьи — систематизация подходов и методов, применяемых для оценки выбросов и поглощения углерода в результате изменений землепользования на глобальном и региональном уровнях в зарубежных исследованиях.

В задачи входили библиометрический анализ публикаций по данной тематике по реферативной базе Scopus, отбор наиболее релевантных статей, выявление и характеристика основных этапов исследований, источников данных и методических подходов, используемых в разработках зарубежных научных коллективов.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Данное исследование проводилось в два этапа. Первый включал в себя проведение библиометрического анализа и оценку публикационной активности мирового научного сообщества по заявленной тематике. Для выполнения поставленной задачи была выбрана реферативная база данных Scopus издательства Elsevier, которой было отдано преимущество перед другими базами данных ввиду широкого охвата публикаций по естественным наукам и удобного инструментария отбора и сравнения статей, визуализации результатов поиска.

Поиск статей осуществлялся по тематике динамики углеродного баланса в связи с изменениями землепользования и проходил по следующему запросу: TITLE-ABS-KEY («carbon stock» OR «carbon balance» OR «carbon sequestration» OR «carbon budget») AND («land use change» OR «land cover change»). По результатам поиска зафиксировано общее количество проиндексированных публикаций (за весь доступный период), ежегодное количество публикаций, лидирующие по их числу страны, а также учреждения, проведен количественный анализ полученных результатов.

Второй этап состоял из качественного анализа статей, отобранных из множества, полученного на первом этапе исследования. Отбор статей происходил по срокам издания (за последние 10 лет), масштабу (преимущество отдано региональным исследованиям), наличию инструментария моделирования земельного покрова и потоков/запасов углерода.

Отбирались исследования, выполненные в соответствии с методологией МГЭИК уровнями 2 и 3, которые считаются более точными и достоверными [8]. Как известно, в материалах МГЭИК выделяется три уровня методологической сложности. Уровень 1 опирается на базовые методы, коэффициенты выбросов по умолчанию и данные крупного пространственного разрешения, в том числе глобальные карты почвенного и растительного покровов. Значения по умолчанию даются по климатическим зонам (всего 9 — от полярной/бореальной до тропической). В рамках уровня 2 применяются те же методы, но коэффициенты выбросов и данные о землепользовании определяются конкретной страной, данные характеризуются более высоким разрешением, они детализированы по национальным климатическим зонам и другим рубежам; оценка позволяет отслеживать изменения в земельном покрове. Уровень 3 — наиболее продвинутый с точки зрения методов (применяется моделирование, ГИС-анализ), структуры данных (учет временной динамики, межгодовых изменений климата и пр.) и требований к ним (высокое разрешение, подобные и конкретные данные).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Библиометрический анализ.** В базе данных Scopus [23] проиндексировано более 3000 статей (1980–2021 гг.) (на август 2022 г.) по тематике динамики углеродного баланса в связи с изменениями земельного покрова с растущим трендом числа ежегодных публикаций, особенно начиная с 2000-х гг. (рис. 1). В 40-летнем временном периоде можно выделить три этапа: этап становления тематики (стабильное ежегодное число публикаций), постепенный рост числа публикаций (2000–2005 гг.) и активное развитие (с 2006 г. по настоящее время).

Если в 2000 г. этой теме было посвящено менее 20 публикаций, то сейчас ежегодно индексируется порядка 220 публикаций. Около трети всех статей относится к периоду 2017–2021 гг. За это же время лидирующие позиции по числу опубликованных научных трудов занял Китай (290 публикаций),

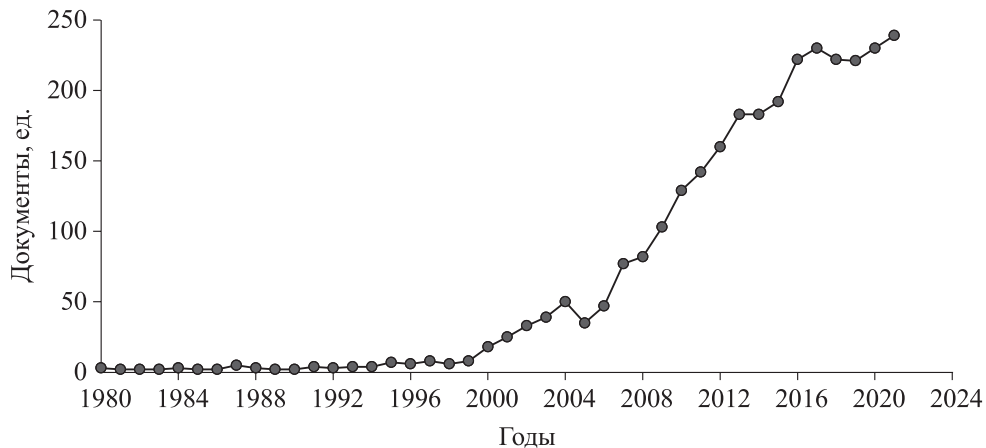


Рис. 1. Количество статей по динамике углеродного баланса в результате изменений землепользования, проиндексированных в базе данных Scopus, 1980–2021 гг.

опередивший США (260), Германию (130) и Великобританию (125). Далее с небольшим отставанием следуют Австралия, Бразилия, Канада, Нидерланды и Франция. Россия по этой тематике существенно отстает от стран-лидеров, занимая 24-ю позицию в рейтинге. Это связано, в первую очередь, с преобладанием публикаций в русскоязычных журналах, не всегда учитываемых в международных реферативных базах данных.

Как правило, публикационная активность в странах распределяется между учреждениями равномерно (около 30–50 публикаций за 2017–2021 гг. у каждой из 3–5 лидирующих организаций в каждой стране: в США это USDA Forest Service, Colorado State University, United States Geological Service; в Германии — University of Göttingen, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung и др.). Исключение составляет Китай, где явное лидерство имеет Китайская академия наук (более 250 статей за пять лет).

**Используемые подходы и методы изучения. Глобальный уровень.** В научной литературе выбросы и абсорбция углекислого газа в результате изменений землепользования оцениваются в разных масштабах. Начиная с 2010-х гг., на мировом уровне такие оценки проводятся крупными международными коллективами, ежегодно публикующими «Глобальный углеродный бюджет» [24, 25]. Для оценки общемирового баланса углерода в результате трансформации землепользования за определенные исторические периоды использованы расчетные методы для оценки выбросов (bookkeeping approaches) (модели BLUE [26], H&N2017 [27] и др.) и ансамбли (от 12 до 17) динамических глобальных моделей растительности (ДГМР) для расчета поглощения углерода. Оценки сопряжены с серьезными трудностями, поскольку они основаны на двух типах моделей, которые по сути противоречат друг другу [28]. Расчетные суммарные выбросы от изменений в землепользовании за 1850–2020 гг. составили  $200 \pm 65$  Гт углерода (с большим разбросом между тремя используемыми моделями: 140 Гт (H&N2017), 270 Гт (BLUE) и 195 Гт (OSCAR)) и широким диапазоном оценки в  $190 \pm 60$  Гт для ДГМР [25].

Нетто-эмиссии от землепользования за декаду 2012–2021 гг. оценены в объеме  $1,1 \pm 0,7$  Гт С/год [24]. Отмеченное небольшое снижение за последние два десятилетия не является устойчивым, учитывая большую неопределенность модели. Выбросы от обезлесения — основного фактора глобальных валовых источников углекислого газа — остаются высокими:  $1,8 \pm 0,4$  Гт С/год за тот же период.

Сходная величина глобальных выбросов  $1,11 \pm 0,35$  Гт С/год получена за десятилетие 2006–2015 гг. [27]. В этом исследовании использована модель OSCSAR, объединяющая указанные выше подходы. Эта расчетная модель включает в себя процессы и параметры, откалиброванные на основе динамических глобальных моделей растительности с учетом эмпирических ограничений. Общий нетто-поток углерода, связанный с землепользованием за период 1850–2015 гг., достиг  $145 \pm 16$  Гт. При этом большая часть выбросов была приурочена к тропикам ( $1,41 \pm 0,17$  Гт С/год), а поглощение — к бореальным ландшафтам ( $-0,28 \pm 0,21$  Гт/год) [26].

Примерно такие же данные по выбросам углерода получены С. Тианом с соавторами —  $1,15$  Гт/год с тенденцией к снижению до  $0,15$  Гт/год за период 1992–2015 гг. [5]. Методика этого исследования основана на оценках прямых (т. е. изменения запасов углерода в резервуарах биомассы и почвы в связи со сменой землепользования) и косвенных (от потребления энергии на застроенных землях) выбросов. Используются данные по плотности углерода на единицу площади, полученные на основе



мировых карт углерода биомассы (The Global Biomass Carbon Map) [29] и органического углерода почвы (база данных Harmonized World Soil Database 1.21) [30].

Таким образом, оценки годовых глобальных выбросов углерода от изменения землепользования в 2000-е гг. имеют близкие значения. Отмечено снижение выбросов CO<sub>2</sub> в этом секторе за последнее десятилетие. В то же время совокупные оценки за прошлые периоды дают гораздо больший разброс, создающий большую неопределенность в запасах углерода за историческое время.

**Региональный уровень.** Исследования баланса углерода в результате трансформации землепользования, сельского и лесного хозяйства, соответствующие уровням 2 и 3 методологии МГЭИК, в целом имеют общий алгоритм последовательно выполняемых действий.

1) Оценка динамики землепользования/земельного покрова за разные временные диапазоны, часто начиная с 1990-х гг. В ряде работ даются прогнозы изменений землепользования регионов с разным горизонтом (2030, 2040, 2050, 2100 гг.) на основе разнообразных сценариев социально-экономического развития мира и прогнозов изменений климата, приводимых в Оценочных докладах МГЭИК [31].

2) Моделирование баланса углерода (выбросов и поглощения) в результате изменений землепользования (включая оценку изменений запасов углерода, содержащихся в разных резервуарах — биомассе растительности, почвах и других пулах).

3) На основе полученных данных по оценке изменений баланса углерода предлагаются меры региональной политики, включающие в себя разработку стратегий устойчивого управления землепользованием/земельными ресурсами для усиления поглощения углерода и практических рекомендаций по территориальному планированию.

Каждый из трех этапов в разных исследованиях реализуется на основе собственных исходных данных, методических подходов, с разной детальностью, способами статистической обработки и верификации, визуализацией результатов. Тем не менее схожий алгоритм прослеживается практически во всех проанализированных статьях, его общая методологическая схема приведена на рис. 2.

Рассмотрим особенности подходов и методов, применяемых на глобальном и региональном уровнях по указанным на рис. 2 этапам.

**Исследования изменений землепользования/земельного покрова** нередко базируются на больших данных, доступных из открытых источников геопространственных данных: например, для глобального уровня — Global Land Cover 2000 Европейского космического агентства (с разрешением 300 м) [5], для стран и регионов Европы — программы EC CORINE за 1990–2018 гг. (с разрешением 100 м) [2]. В ряде работ используются разные версии базы данных по землепользованию HYDE (History Database of the Global Environment), в том числе HYDE 3.2 и 3.3, полученные в рамках Инициативы Европейского космического агентства по изменению климата [32] (с разрешением 5'). Анализ подобных источников проведен в работе [33].

Помимо открытых баз геопространственных данных по земельному покрову для мониторинга изменений землепользования применяются разновременные ряды космических снимков, полученные с помощью разных космических датчиков, в том числе Landsat (MSS, TM и ETM+), MODIS, VIIRS, China-HJ-1A/B и др. Это способствовало разработке разнообразных методов изучения изменений землепользования/земельного покрова (например, [34, 35] и др.). Перед классификацией данные ДДЗ предварительно обрабатываются, включая геометрическую, радиометрическую, топографическую коррекцию [16, 36].

Важные преимущества для изучения изменений земельного покрова имеют изображения, полученные с помощью спектрорадиометра среднего пространственного разрешения (MODIS): более широкий охват одной сцены и короткое время повторной съемки (1 день). Это увеличивает возможность получения свободных от облачности данных для картографирования земного покрова на больших территориях [37]. Продукт MODIS Land Cover (MCD12Q1) предоставляет также годовые карты земельного покрова с разрешением 500 м.

Для выделения более детальных земельных наделов (например, каучуковых плантаций, нарушенных лесных урочищ) используются снимки высокого разрешения: Sentinel-2 [38], IKONOS, QuickBird [39], RapidEye [40], SPOT-5 [36], SPOT-6 [41]. Отбор снимков производится в определенном временном интервале, который зависит от целей исследования: каждый год [42, 39], 5 лет [18], 10 лет [35] и т. д., при этом выбираются снимки с минимальной долей облачного покрытия (менее 10 %) и выполненные в течение вегетационного периода видов местной растительности. Полученные данные по земельному покрову иногда проходят верификацию путем полевых обследований и информации с беспилотных летательных аппаратов, как это было проведено в исследовании по Китаю, в результате чего их точность достигла 93 % [20].

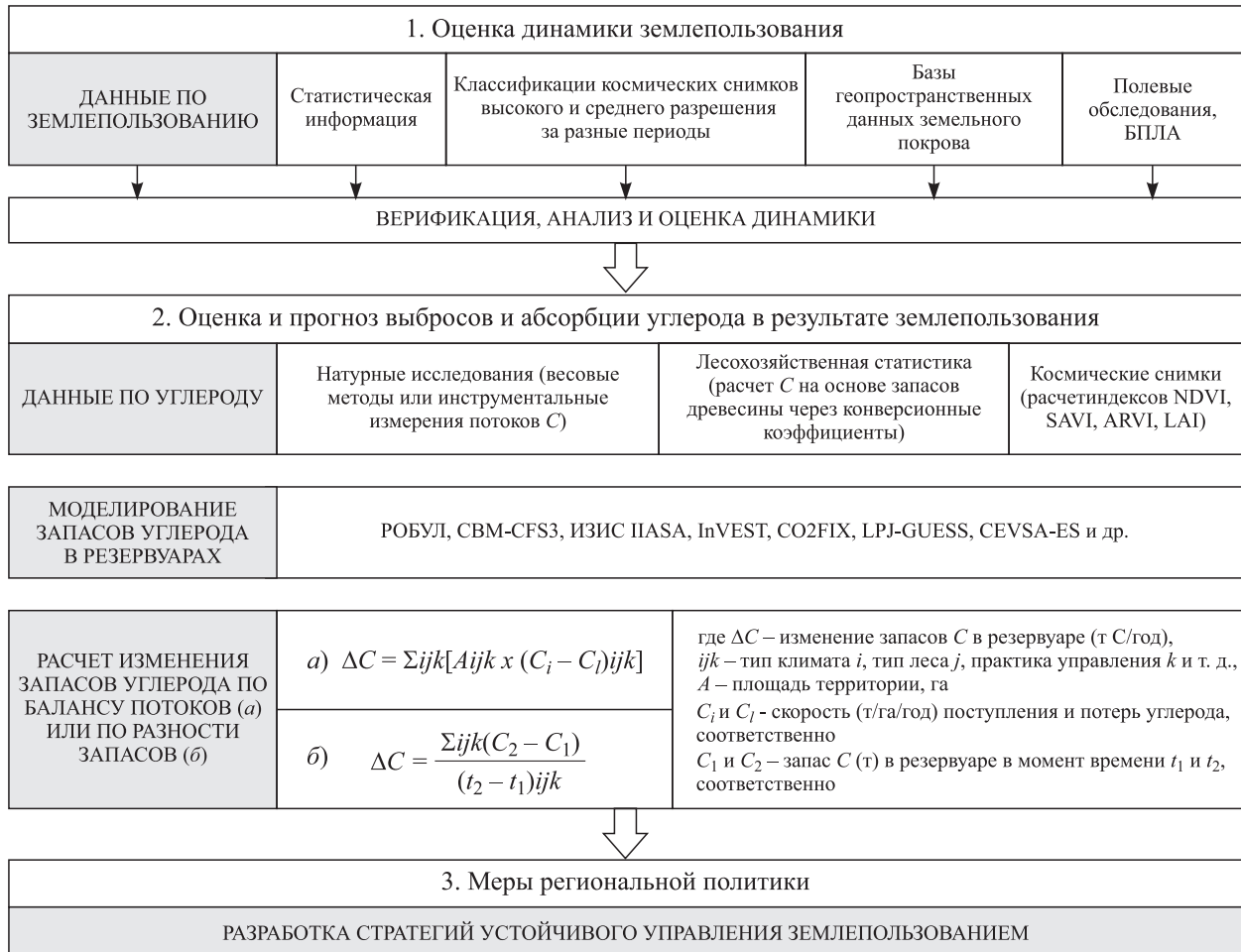


Рис. 2. Основные этапы исследования динамики выбросов и поглощения углерода (C) в результате изменений землепользования.

Появление в последние годы высокопроизводительных платформ облачных вычислений упростило доступ к большим объемам данных. Облачные платформы, как, например, Google Earth Engine (GEE), позволяют обрабатывать крупномасштабные геопространственные данные и создавать карты изменений наземного покрова в глобальном и региональном масштабах [43]. Тем не менее даже при наличии возможностей GEE запуск сложных моделей временных рядов на основе Landsat или более мелких масштабов на большой территории по-прежнему требует обширных вычислительных ресурсов и значительных усилий для сбора качественных обучающих данных с целью классификации, а также справочных данных для расчетов запасов углерода [44].

Наиболее распространенным способом классификации наземного покрова спутникового изображения является контролируемая классификация на основе алгоритма максимального правдоподобия с обучающими выборками [36]. Также используются и иные методы. Например, в исследовании региона Юго-Западного Китая применялась объектно-ориентированная классификация, реализуемая в программном обеспечении eCognition 8.0 [40]. Для создания базы данных по землепользованию и земельному покрову бразильского штата Баия применялась фильтрация коллекций спутниковых изображений Landsat 5, 7 и 8 для засушливого сезона (с апреля по сентябрь) для каждого года за период 1990–2018 гг., классификация проведена с помощью алгоритма машинного обучения Random Forest в GEE. Результаты классификации показывают расширение сельскохозяйственного использования в регионе во времени с точностью 90 % [42]. Алгоритм Random Forest хорошо зарекомендовал себя при классификации наземного покрова, например, Юго-Западной Гамбии [38], как наиболее точный метод в сравнении с алгоритмом максимального правдоподобия и методом опорных векторов (SVM), который использует линейно разделяемые классы для обучения данных.

Алгоритм непрерывного обнаружения и классификации изменений (Continuous Change Detection and Classification) на основе временных рядов данных MODIS по земельному покрову применен для бассейна Меконга [44]. Конечный продукт представляет собой набор сегментов временных рядов для каждого пикселя с информацией о дате имевших место изменений землепользования/земельного покрова, а также о метках класса земельного покрова до и после изменения. Для визуализации получены ежегодные карты землепользования за период 2001–2019 гг. Для обнаружения текущих преобразований и нарушений землепользования на лесных землях бассейна Меконга использовались ежегодные карты древесного покрова за 2001–2017 гг., составленные на основе данных Landsat [45].

Таким образом, разнообразные методические подходы и источники данных ДЗЗ используются сейчас не только для построения классификаций и выявления динамики земельного покрова, но и для выявления экологически значимых трендов, обусловленных флуктуациями землепользования, и их влияния на баланс углерода. Разнообразие подходов, используемых данных и методов их обработки говорит об активном развитии этой тематики в последние годы и ее перспективности для оценок состояния экосистем под влиянием климатических изменений и социально-экономических факторов.

**Моделирование потоков углерода.** Оценки выбросов и абсорбции углерода в основном проводятся с использованием нескольких подходов: количественной оценки потоков с использованием математических моделей (например, Century, CO<sub>2</sub>Fix, CEVSA-ES, LPJ-GUESS, РОБУЛ и др.) и оценки изменения запасов по балансу потоков или разности запасов [46]. Согласно методологии МГЭИК, изменение запасов углерода оценивается путем умножения разности плотности (запасов) углерода (т С/га), содержащегося в разных пулах, в изменившихся классах землепользования за период обследования, на площадь этих изменений. Для расчетов содержания углерода в разных классах земельного покрова в качестве предикторов состояния наземной биомассы широко применяются разнообразные вегетационные индексы.

Модели позволяют имитировать биогеохимические и биофизические процессы, происходящие в изучаемом типе ландшафта. Например, модель Biome-BGC описывает зависимость ключевых процессов (фиксацию CO<sub>2</sub> растительностью, разложение органического вещества почвы и т. п.) от факторов окружающей среды на основе суточных метеорологических данных. С помощью модели LPJ-GUESS прогнозируют структуру, состав и биогеохимические реакции наземной растительности и экосистем на климатические тренды. Для снижения неопределенности и верификации подобных моделей используются замеры содержания углерода в фитомассе, подстилке и запасов органического углерода почв на пробных площадях [47].

Для учета поглощения и депонирования углерода разработаны видоспецифичные модели оценки пула наземной биомассы. Так, для выявления роли лесных плантаций Бразилии проведено моделирование запасов биомассы и углерода для насаждений эвкалипта, сосны, тика и акации в заданных природных условиях (с учетом характеристик климата и почв), основанное на распределении двумерных случайных величин Джонсона. Показано, что поглощение и депонирование углерода бразильскими лесными плантациями за 26 лет компенсировало практически все выбросы углекислого газа от сектора отходов за тот же период [48].

Для лесных земель оценку содержания углерода и его депонирования часто проводят на основе модели CO<sub>2</sub>FIX — многоэтапного инструмента, применяемого для оценки исходного уровня углерода в лесных экосистемах, а также потенциала связывания углерода при различных видах землепользования [16]. Модель позволяет определять запасы и потоки углерода в лесной биомассе, органическом веществе почвы и в цепочке продуктов из древесины. Версия CO<sub>2</sub>FIX V 3.1, разработанная в 2004 г., состоит из шести модулей, включая модуль биоэнергетики и модуль учета углерода [49]. Модель применима к проектам облесения, агролесного хозяйства и системам выборочных рубок. Она имеется в свободном доступе, наряду с многочисленными примерами использования.

Во многих работах для геопространственного моделирования воздействия изменений землепользования на биомассу используется комплекс биофизических моделей InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-Offs), разработанный Стэнфордским университетом (США) и Всемирным фондом дикой природы (WWF). Углеродный модуль модели InVEST оценивает пространственно-временные вариации общих запасов углерода и рассчитывает в каждой ячейке сетки изменения этих запасов по четырем пулам углерода за разные периоды [60]. Модель InVEST применялась для оценки депонирования углерода различными категориями земельного покрова в разных регионах.

С помощью модели InVEST были оценены запасы углерода в наземной биомассе материков с пространственным разрешением 1 км и 10-летним временным шагом с 2010 по 2100 г. Моделирование землепользования за этот период проводилось для каждого континента в рамках сценариев социаль-

но-экономического развития (Shared Socioeconomic Pathways) 6-го Оценочного доклада РКИК (2021) [31]. Ожидается, что из-за изменения землепользования/земельного покрова глобальные потери углерода в наземной биомассе достигнут примерно 3,4 Гт в 2100 г. по сценарию SSP3 («Региональное соперничество»), в то же время по сценарию SSP1 («Устойчивое развитие») глобальные запасы могут увеличиться на примерно 0,59 Гт [50].

Нередко учет запасов углерода в наземной биомассе проводится по вегетационным индексам NDVI, SAVI, ARVI, LAI и др., полученным на основе разновременных снимков среднего пространственного разрешения, верифицированных по полевым данным [17, 19, 51]. Интеграция нескольких вегетационных индексов посредством пошаговой множественной линейной регрессии вместо использования одного индекса обеспечивает лучшие результаты при пространственном моделировании наземной биомассы. Выбор подходящей модели осуществляется на основе анализа надежности, включающего информационный критерий Акаике (AIC) и байесовский информационный критерий (BIC) [16].

Высокую корреляцию с запасами углерода в почве (около 98 %) показал индекс листовой поверхности LAI [51], широко используемый для оценки продуктивности посевных культур. Это же было подтверждено на примере пастбищ в бразильском штате Сан-Паулу, где с помощью индекса LAI оценивались интенсивность фотосинтеза, эвапотранспирация, потоки углерода и др. Общий низкий уровень LAI от 0,15 до 1,1, установленный для деградированных пастбищ Серрадо, обусловлен песчаным составом почв и недостатками управления [17]. Для сравнения, в хвойных лесах он может достигать 28, на лугах — до 30, в степях умеренного пояса снижается до 2,5 [52]. Данные LAI, интегрированные в модель CEVSA-ES, позволили точнее оценить межгодовую и сезонную изменчивость чистой первичной продукции и поглощение углерода в экосистемах Китая, особенно летом и осенью [53].

**Меры региональной политики.** Во многих исследованиях делается вывод, что застройка на землях, где ранее накапливался углерод — в лесах [16], некоторых категориях пастбищных [20] и возделываемых земель [37], является наиболее распространенным типом трансформации земель, приводящим к увеличению выбросов  $\text{CO}_2$ . Подобные исследования особенно актуальны для азиатских городов, в которых происходит бурное расширение застройки на месте пашни и естественной растительности [19]. Такие исследования позволяют получать геопространственные данные по балансу углерода и выделять на их основе зоны, с которыми связаны явные выбросы, что позволяет принимать решения в сфере планирования и территориального развития. Частично компенсировать потерю углерода может улучшение планировки городских зеленых насаждений и внедрение более разумной политики землепользования, как это показано на примере Шанхая [18].

В ряде случаев установлена связь изменений баланса углерода с состоянием экономики. Так, результаты исследования в Греции показали, что экономическое благополучие, по-видимому, способствует расширению углерод-аккумулирующих типов земельного покрова (смешанные леса и постоянно орошаемые земли), а также сохранению запасов углерода в растительности [2]. В то же время в кризисные периоды запасы углерода снижаются за счет увеличения потребления растительных ресурсов и менее рационального землепользования. В Бразилии при моделировании выбросов за 2000–2019 гг. зафиксировано снижение выбросов  $\text{CO}_2$  после 2004 г., которое стало результатом замедления темпов обезлесения в связи с осуществлением правительственных мер, включая совершенствование систем мониторинга, программ обнаружения обезлесения в реальном времени и создания лесных насаждений [48]. Три набора данных синхронно выявили максимальные трансформации землепользования за период 2003–2005 гг., соответствующие пику обезлесения в Амазонии. Доказано, что лесные плантации играют важную роль в компенсации выбросов парниковых газов в Бразилии за счет поглощения ими  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза. Таким образом, исследования динамики землепользования и углеродного баланса интегрируются в систему управления в соответствии с логикой «движущие силы — изменение землепользования — углеродный баланс — социально-экономическая система — политика и стратегия» [35]. При этом под термином «движущие силы» понимаются факторы, определяющие пути развития территорий, включающие социально-экономические и геополитические факторы и процессы, а также изменения климата и экстремальные природные явления [54]. Эти факторы влияют на характер и интенсивность землепользования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой вопрос, который обсуждается в большинстве рассмотренных работ, связан с точностью и достоверностью оценок потоков углерода, обусловленных следующими факторами: неопределенностью моделей, недостатками первичных данных по запасам углерода в пулах по категориям земле-



пользования, качеством геопространственных данных по земельному покрову. Наиболее известный пример расхождения оценок — объем поглощения углерода российскими лесами. Показатели колеблются от 150–200 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (приняты на международном уровне) до 610 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (согласно Национальному докладу о кадастре парниковых газов [4]), по данным Минприроды они доходят до 1000 млн т CO<sub>2</sub>-экв. (последнее не ратифицировано на международном уровне).

Для преодоления неопределенности результатов моделирования предлагается переход к пространственно-ориентированным моделям, откалиброванным с учетом конкретных параметров. К достоинствам моделирования относится возможность модернизации моделей по мере накопления новых научных данных с увеличением их точности и расширением областей применения [55].

Для оценок потоков углерода особенно важны точность классификации землепользования, а также учет развития экосистем во времени. Последнее необходимо, так как текущие нарушения, например, в категории «лесные земли» (сукцессионные стадии лесной растительности после пожаров, древесные насаждения различного возраста, вырубки в разной стадии зарастания), часто не отражаются в изменениях классов земельного покрова, что приводит к погрешностям в оценках потоков углерода. В перспективе улучшенные геопространственные данные по земельному покрову с меньшим временным и пространственным разрешением будут способствовать более совершенной оценке запасов углерода в наземной растительности.

Использование уникальных значений плотности (коэффициента запаса) углерода для разных категорий земельного покрова в конкретном регионе — еще один источник погрешностей оценок. Обычно эти данные берутся из прошлых исследований, основанных на различных методиках и временных интервалах, поэтому их точность требует дальнейшей проверки. Кроме того, плотность углерода для каждого класса земельного покрова постоянно меняется, что не всегда учитывается в расчетах.

В целом же использование разновременных данных по земельному покрову (спутниковых, открытых геопространственных и статистических) дает возможность проследить динамику трансформации земель и оценить те изменения, которые приводят к нетто-выбросам углерода. Это необходимо для регионального планирования и разработки компенсационных мер, а также для отчетности и мониторинга выбросов и абсорбции углекислого газа. Проведенный обзор актуальных региональных исследований баланса выбросов и абсорбции углерода показал, что все они являются оценочными. Необходимо дальнейшее совершенствование входных данных, алгоритмов моделирования баланса углерода и определенности моделей с учетом природно-зональных условий, динамики социально-экономических факторов и сценариев климатических изменений. Очевидно, что это направление исследований и дальше будет активно развиваться в мире.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (121040100322-8) и Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Land Use, Land-Use Change and Forestry.** IPCC Special Report. Summary for Policymakers. — UK, Cambridge: IPCC, Cambridge University Press, 2000. — 20 p.
2. **Gemitzi A., Albarakat R., Kratouna F., Lakshmi V.** Land cover and vegetation carbon stock changes in Greece: A 29-year assessment based on CORINE and Landsat land cover data // *Science of Total Environment*. — 2021. — Vol. 786. — P. 147408.
3. **Climate Change 2014.** Synthesis Report. Contribution of Working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of IPCC / R.K. Pachauri, L. Meyer. — Geneva: World Meteorological Organization, 2015. — 155 p.
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.: Росгидромет, 2022. — 468 с.
5. **Tian S., Wang S., Bai X., Luo G., Li Q., Yang Y., Hu Z., Li C., Deng Y.** Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992–2015 // *Environmental Science and Ecotechnology*. — 2021. — Vol. 7. — P. 100108.
6. **Le Quere C., Korsbakken J.I., Wilson C., Tosun J., Andrew R., Andres R.J., Canadell J.G., Jordan A., Peters G.P., van Vuuren D.P.** Drivers of declining CO<sub>2</sub> emissions in 18 developed economies // *Nat. Clim. Change*. — Vol. 2019 (9). — P. 213–217.
7. **Парижское соглашение.** РКИК ООН — [Электронный ресурс]. [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_russian\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf) (дата обращения 14.11.2023).

8. **Руководящие** принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. — Хаяма: Изд-во Межправит. группы экспертов по изменению климата, 2006. — 258 с.
9. **Николаев В.А.** Ландшафтоведение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. — 94 с.
10. **Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г.** Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесной журнал. — 2014. — № 1. — С. 69–92.
11. **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 вестн. — 2017. — № 21 (1). — С. 4–13.
12. **Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г.** Оценка динамики углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 1–18. — DOI: 10.31251/pos.v5i4.194.
13. **Carnell P.E., Windecker S.M., Brenker M., Baldock J., Masque P., Brunt K., Macreadie P.I.** Carbon stocks, sequestration, and emissions of wetlands in South Eastern Australia // *Global Change Biology*. — 2018. — Vol. 24, Iss. 9. — P. 4173–4184.
14. **Суховеева О.Э.** Проблемы моделирования биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах // Уч. записки Казанского ун-та. Сер. «Естественные науки». — 2020. — Т. 162, кн. 3. — С. 473–501.
15. **Курганова И.Н., Семенов В.М., Кудеяров В.Н.** Климат и землепользование как ключевые факторы стабильности органического вещества в почвах // Докл. Академии наук. — 2019. — Т. 489, № 6. — С. 646–650.
16. **Bordoloi R., Das B., Tripathi O.P., Sahoo U.K., Nath A.J., Deb S., Das D.J., Gupta A., Devi N.B., Charturvedi S.S., Tiwari B.K., Paul A., Tajo L.** Satellite based integrated approaches to modelling spatial carbon stock and carbon sequestration potential of different land uses of Northeast India // *Environmental and Sustainability Indicators*. — 2022. — Vol. 13. — P. 100166.
17. **Szakacs G.J., Cerri C.C., Herpin U., Bernoux M.** Assessing soil carbon stocks under pastures through orbital remote sensing // *Scientia Agricola*. — 2011. — Vol. 68. — P. 574–581.
18. **Zhang F., Xu N., Wang C., Wu F., Chu X.** Effects of land use and land cover change on carbon sequestration and adaptive management in Shanghai, China // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A, B, C*. — 2020. — Vol. 120. — P. 102948.
19. **Ghosh S., Dinda S., Chatterjee N.D., Dutta S., Bera D.** Spatial-explicit carbon emission-sequestration balance estimation and evaluation of emission susceptible zones in an Eastern Himalayan city using Pressure-Sensitivity-Resilience framework: An approach towards achieving low carbon cities // *Journ. of Cleaner Production*. — 2022. — Vol. 336. — P. 130417.
20. **Li J., Guo X., Chuai X., Xie F., Yang F., Gao R., Ji X.** China's terrestrial ecosystem carbon balance under land-use type and climate change // *Land Use Policy*. — 2021. — Vol. 102. — P. 105275.
21. **Курбатова А.И.** Аналитический обзор по современным исследованиям изменений биотической составляющей углеродного цикла // Вестн. Росс. ун-та дружбы народов. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности». — 2020. — Т. 28, № 4. — С. 428–438.
22. **Суховеева О.Э.** Моделирование потоков парниковых газов и циклов азота и углерода в почвах (обзор) // Журнал естественнонаучных исследований. — 2017. — № 4. — С. 61–76.
23. **Библиографическая** и реферативная база данных Scopus [Электронный ресурс]. — <https://www.scopus.com> (дата обращения 30.07.2022).
24. **Le Quere C., Peters G.P., Andres R.J., Andrew R.M., Boden T.A., Ciais P., Friedlingstein P., Houghton R.A., Marland G., Moriarty R., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Arvanitis A., Bakker D.C.E., Bopp L., Canadell J.G., Chini L.P., Doney S.C., Harper A., Harris I., House J.I., Jain A.K., Jones S.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Körtzinger A., Koven C., Lefèvre N., Maignan F., Omar A., Ono T., Park G.-H., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Schwinger J., Segsneider J., Stocker B.D., Takahashi T., Tilbrook B., van Heuven S., Viovy N., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zaehle S.** Global carbon budget 2013 // *Earth Syst.* — 2014. — Vol. 6. — P. 235–263. — DOI: 10.5194/essd-6-235-2014
25. **Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Le Quere C., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S.R., Anthoni P., Bates N.R., Becker M., Bellouin N., Bopp L., Trang Chau T.T., Chevallier F., Chini L.P., Cronin M., Currie K.I., Decharme B., Djeutchouang L.M., Dou X., Evans W., Feely R.A., Feng L., Gasser T., Gilfillan D., Gkritzalis T., Grassi G., Gregor L., Gruber N., Gurses O., Harris I., Houghton R.A., Hurr G.C., Iida Y., Ilyina T., Luijckx I.T., Jain A., Jones S.D., Kato E., Kennedy D., Goldewijk K.K., Knauer J., Korshakken J.I., Kurtzinger A., Landschutzer P., Lauvset J.K., Lefèvre, Lienert S., Liu J., Gregg Marland, McGuire P.C., Melton J.R.N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakao S., Niwa Y., Tsuneo Ono, Pierrot D., Poulter B., Rehder, Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Rosan T.M.G., Schwinger J., Schwingshackl C., Seferian R., Sutton A.J., Sweeney C., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F., van der Werf G.R., Vuichard N., Wada C., Wanninkhof R., Watson A.J., Willis D., Wiltshire A.J., Yuan W., Yue C., Yue X., Zaehle S., Zeng J.** Global Carbon Budget 2021 // *Earth Syst.* — 2022. — Vol. 14. — P. 1917–2005. — DOI:10.5194/essd-14-1917-2022
26. **Hansis E., Davis S.J., Pongratz J.** Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes // *Global Biogeochem. Cycles*. — 2015. — Vol. 29. — P. 1230–1246. — DOI:10.1002/2014GB004997

27. **Houghton R.A., Nassikas A.A.** Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015 // *Global Biogeochemical Cycle*. — 2017. — Vol. 31. — P. 456–472.
28. **Gasser T., Crepin L., Quilcaille Y., Houghton R.A., Ciais P., Obersteiner M.** Historical CO<sub>2</sub> emissions from land use and land cover change and their uncertainty // *Biogeosciences*. — 2020. — Vol. 17, N 15. — P. 4075–4101.
29. **New biomass map to take stock of the World's carbon** [Электронный ресурс]. — [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Space\\_for\\_our\\_climate/New\\_biomass\\_map\\_to\\_take\\_stock\\_of\\_the\\_world\\_s\\_carbon](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/New_biomass_map_to_take_stock_of_the_world_s_carbon) (дата обращения 15.04.2023).
30. **Harmonized World Soil Database v 1.2.** [Электронный ресурс]. — <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/> (дата обращения 15.04.2023).
31. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Technical Summary.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge; NY: Cambridge University Press, 2021. — P. 33–144. — DOI: 10.1017/9781009157896.002
32. **Rosan T.M., Goldewijk K.K., Ganzenmüller R., O'Sullivan M., Pongratz J., Mercado L.M., Aragao L., Heinrich V., Von Randow C., Wiltshire A.** A multi-data assessment of land use and land cover emissions from Brazil during 2000–2019 // *Environmental Research Letters*. — 2021. — Vol. 16, N 7. P. 074004.
33. **Алексеева Н.Н., Климанова О.А., Хазиева Е.С.** Глобальные базы данных земельного покрова и перспективы их использования для картографирования современных ландшафтов // *Изв. РАН. Сер. геогр.* — 2017. — № 1. — С. 110–123.
34. **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. — P. 850–853.
35. **Jiang C., Li D., Wang D., Zhang L.** Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change // *Ecological Indicators*. — 2016. — Vol. 66. — P. 199–211.
36. **Fernandes M.M., Fernandes M.R.M., Garcia J.R., Matricardi E.A., de Almeida A.Q., Pinto A.S., Menezes R.** Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030 // *Land Use Policy*. — 2020. — Vol. 99. — P. 104795.
37. **Chen Y., Li X., Liu X., Ai B.** Analyzing land-cover change and corresponding impacts on carbon budget in a fast developing sub-tropical region by integrating MODIS and Landsat TM/ETM+ images // *Applied Geography*. — 2013. — Vol. 45. — P. 10–21.
38. **Dampha N.K.** Change detection (1985–2020): Projections on land-use land cover, carbon storage, sequestration, and valuation in Southwestern Gambia // *Sustainable Environment*. — 2021. — Vol. 7, N 1. — P. 1875556.
39. **Inoue Y.** Ecosystem carbon stock, atmosphere, and food security in slash-and-burn land use: a geospatial study in mountainous region of Laos // *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia*. — Cham: Springer, 2018. — P. 641–665.
40. **Sarathchandra C., Abebe Y.A., Worthy F.R., Wijerathne I.L., Ma H., Yingfeng B., Jiayu G., Chen H., Yan Q., Geng Y., Weragoda D.S., Li L., Fengchun Y., Wickramasinghe S., Xu J.** Impact of land use and land cover changes on carbon storage in rubber dominated tropical Xishuangbanna, South West China // *Ecosystem Health and Sustainability*. — 2021. — Vol. 7, N 1. — P. 1915183.
41. **Lakyda P., Shvidenko A., Bilous A., Myroniuk V., Matsala M., Zibtsev S., Schepaschenko D., Holiaka D., Vasylyshyn R., Lakyda I., Diachuk P., Kraxner F.** Impact of disturbances on the carbon cycle of forest ecosystems in Ukrainian Polissya // *Forests*. — 2019. — Vol. 10. — P. 337.
42. **Pimenta F.M., Speroto A.T., Costa M.H., Dionizio E.A.** Historical changes in land use and suitability for future agriculture expansion in Western Bahia, Brazil // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, N 6. — P. 1088.
43. **Zhu Z., Woodcock C.E.** Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. — 2014. — Vol. 144. — P. 152–171.
44. **Tang X., Woodcock C.E., Olofsson P., Hutya L.R.** Spatiotemporal assessment of land use/land cover change and associated carbon emissions and uptake in the Mekong River Basin // *Remote Sensing of Environment*. — 2021. — Vol. 256. — P. 112336.
45. **Potapov P., Tyukavina A., Turubanova S., Talero Y., Hernandez-Serna A., Hansen M.C., Saah D., Tenneson K., Poortinga A., Aekakkararungroj A., Chishtie F., Towashiraporn P., Bhandari B., Aung K.S., Nguyen Q.H.** Annual continuous fields of woody vegetation structure in the lower Mekong region from 2000–2017 Landsat time-series // *Remote Sensing of Environment*. — 2019. — Vol. 232. — P. 111278.
46. **Quesada B., Arneth A., Robertson E., de Noblet-Ducoudre N.** Potential strong contribution of future anthropogenic land-use and land-cover change to the terrestrial carbon cycle // *Environmental Research Letters*. — 2018. — Vol. 13, N 6. — P. 064023.
47. **Prestele R., Alexander P., Rounsevell M.D., Arneth A., Calvin K., Doelman J., Eitelberg D.A., Engström K., Fujimori S., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Jain A.K., Krisztin T., Kyle P., Meiyappan P., Popp A., Sands R.D., Schaldach R., Schungel J., Stehfest E., Tabeau A., Van Meijl H., Van Vliet J., Verburg P.H.** Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison // *Global Change Biology*. — 2016. — Vol. 22, N 12. — P. 3967–3983.

48. **Sanquetta C.R., Dalla Corte A.P., Pelissari A.L., Tome M., Maas G., Sanquetta M.** Dynamics of carbon and CO<sub>2</sub> removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016 // Carbon balance and management. — 2018. — Vol. 13, N 1. — P. 1–12.
49. **CO2FIX V 3.1.** Manual [Электронный ресурс]. — <https://www.cifor.org/-knowledge/publication/4766> (дата обращения 12.04.2023).
50. **Zeng L., Liu X., Li W.** Global simulation of fine resolution land use/cover change and estimation of above ground biomass carbon under the shared socioeconomic pathways // Journ. of Environmental Management. — 2022. — Vol. 312. — P. 114943.
51. **Zheng G., Moskal L.M.** Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors // Sensors. — 2009. — Vol. 9, N 4. — P. 2719–2745.
52. **Бондаренко В.В., Кормилицина О.В., Коолен Д.** Определение индекса листовой поверхности на основе анализа цифровых изображений кроны и его использование для оценки категорий состояния деревьев // Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной вестник. — 2016. — № 1. — С. 94–98.
53. **Niu Z., He H., Peng S., Ren X., Zhang L., Gu F., Zhu G., Peng C., Li P., Wang J., Ge R., Zeng N., Zhu X., Lv Y., Chang Q., Xu Q., Zhang M., Liu W.** A process-based model integrating remote sensing data for evaluating ecosystem services // Journ. of Advances in Modelling Earth Systems. — 2021. — Vol. 13. — P. e2020MS002451. — DOI:10.1029/2020MS002451
54. **Глобальная экологическая перспектива.** ЮНЕП. — М.: ЗАО Интердиалект+, 2002. — 501 с.
55. **Чертов О.Г., Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Быховец С.С., Петропавловский Б.С., Припутина И.В., Фролов П.В., Зубкова Е.В.** Динамические модели наземных экосистем для количественной оценки продуктивности растительности // Растительность. — 2019. — Т. 5, № 2. — С. 151–169.

*Поступила в редакцию 13.12.2022*

*После доработки 04.05.2023*

*Принята к публикации 23.11.2023*