

Оценка эмиссии и поглощения диоксида углерода и метана поверхностью суши и океана в XXI веке

А.В. Ольчев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова.
Географический факультет. Кафедра метеорологии и климатологии,
119991, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1.

Адрес для переписки: *aoltche@yandex.ru*

Реферат. В данной обзорной статье представлен развернутый анализ эмиссии и поглощения диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4) наземными и океаническими экосистемами в XXI веке. Рассмотрены современные методы оценки региональных и глобальных потоков парниковых газов, включая национальные инвентаризации, моделирование биогеохимических циклов, инверсионное моделирование и машинное обучение, с критическим анализом их преимуществ и ограничений. Особое внимание уделяется динамике потоков CO_2 и CH_4 между сушей, океаном и атмосферой, а также роли различных природных экосистем (тропических и бореальных лесов, водно-болотных угодий) в глобальном углеродном цикле. Анализируется влияние климатических изменений, деградации многолетней мерзлоты, увеличения повторяемости и интенсивности лесных пожаров, закисления вод океана на баланс парниковых газов. Отдельно рассматриваются расхождения между оценками, полученными разными методами, и ключевые источники неопределенностей, связанные с недостатком экспериментальных данных. На основе анализа данных наблюдений и прогнозных модельных оценок обсуждаются сценарии будущих изменений эмиссии и поглощения парниковых газов в природных экосистемах под влиянием климатических и антропогенных факторов. Подчеркивается необходимость развития глобальных систем мониторинга и укрепления международного сотрудничества для повышения точности прогнозов и реализации задач современной климатической повестки.

Ключевые слова. Углеродный цикл, природные экосистемы, климатические изменения, мониторинг, эмиссия, поглощение, парниковые газы, инверсионное моделирование, биогеохимические модели, Парижское соглашение.

Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century

A.V. Olchev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Department of Meteorology and Climatology,
Russian Federation, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1

Correspondence address: *aoltche@yandex.ru*

Abstract. This review article provides a comprehensive analysis of changes in the estimates of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions and uptake by terrestrial and ocean ecosystems in the 21st century. The article examines key methods for estimating greenhouse gas fluxes, including national inventories, biogeochemical models, inversion modeling, and machine learning. The article also discusses the advantages and limitations of these methods. Particular attention is given to the dynamics of CO₂ and CH₄ emission and uptake by land and ocean ecosystems, as well as the role of various ecosystems, including tropical and boreal forests, and wetlands, in this process. Additionally, the article discusses how climate change impacts CO₂ and CH₄ fluxes, including the effects of permafrost thaw, forest fires, and ocean acidification. The article addresses discrepancies between estimates derived from various methods and uncertainties arising from limited observational data. Finally, the article considers future scenarios of greenhouse gas flux changes depending on climatic and anthropogenic factors. Overall, the article emphasizes the need for monitoring systems and international cooperation to improve forecasts and implement climate strategies.

Keywords. Carbon cycle, natural ecosystems, climate change, monitoring, emissions, absorption, greenhouse gases, inversion modeling, biogeochemical models, Paris Agreement.

Введение

Природные экосистемы Земли играют ключевую роль в регулировании атмосферной концентрации диоксида углерода (CO₂) и метана (CH₄), а также закиси азота (N₂O) – трёх наиболее значимых долгоживущих парниковых газов. Рост их содержания в атмосфере рассматривается большинством экспертов по изменению климата как основной фактор современных климатических изменений (IPCC, 2023). При этом главным парниковым газом, безусловно, является водяной пар. Однако его концентрация зависит от температуры (то есть его можно рассматривать в качестве «внутреннего» фактора климатической системы), тогда как изменения температуры, в свою очередь, связаны с «внешним» воздействием CO₂, CH₄ и N₂O. Содержание парниковых газов в атмосфере формируется как за счет антропогенных выбросов, так и за счет их эмиссии и поглощения природными экосистемами. При этом вклад природных экосистем в баланс парниковых газов в атмосфере находится в постоянном изменении, под влиянием многочисленных климатических, биотических и антропогенных факторов. Хотя в настоящее время антропогенные выбросы CO₂ и CH₄ от сжигания ископаемого топлива, промышленной деятельности и сельского хозяйства считаются основным фактором наблюдаемого быстрого роста их концентраций в атмосфере, природные потоки CO₂ и CH₄ между сушей, океаном и атмосферой по абсолютной величине значительно превышают объемы антропогенных выбросов (Saunio et al., 2020; Романовская, 2023; Friedlingstein et al., 2022, 2023, 2025). Тем не менее, несмотря на относительно малый вклад антропогенных эмиссий в общий баланс парниковых газов в атмосфере, можно утверждать, что наблю-

даемый рост их атмосферных концентраций обусловлен именно антропогенными выбросами (об этом свидетельствует, например, эффект Зюсса), которые, в конечном итоге, связаны со сжиганием ископаемого топлива [Keeling, 1979]. Это подтверждается, в частности, и синхронным снижением концентрации кислорода в атмосфере [Keeling, Manning, 2014]. Именно динамика этих природных потоков, их пространственно-временная изменчивость и чувствительность к внешним воздействиям, модулируют скорость роста содержания парниковых газов в атмосфере и, в конечном итоге, определяют траекторию климатического воздействия (форсинга) на биосферу.

Успех реализации Парижского соглашения по климату (COP21), направленного на ограничение глобального потепления (удержание роста средней температуры на уровне ниже 2°C относительно доиндустриального периода (1850-1900 гг.) и стремление к снижению этого порога до 1.5°C), напрямую зависит от точного расчета остаточного углеродного бюджета. Однако, как показывают данные наблюдений, уже в 2024 году аномалия глобальной температуры достигла предела +1.5°C, что ставит под сомнение выполнимость поставленных целей. Если текущие тенденции сохранятся, этот показатель в будущем будет стабильно превышать. Углеродный бюджет в значительной степени определяется балансом между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением океанами и наземными экосистемами. Таким образом, без точных количественных оценок текущей и прогнозируемой способности природных систем поглощать и выделять парниковые газы невозможно определить допустимые уровни антропогенных выбросов (Canadell et al., 2021; Friedlingstein et al., 2022, 2023, 2025). При этом погрешности в оценке вклада наземных и океанических экосистем в интегральные потоки парниковых газов между поверхностью Земли и атмосферой остаются ключевым источником неопределенности в глобальном углеродном балансе (Friedlingstein et al., 2025).

Стоит учитывать, что природные экосистемы динамичны и находятся в процессе постоянного развития. Однако антропогенное воздействие может привести к их деградации с беспрецедентной скоростью. Согласно оценочному докладу IPBES (2019), деятельность человека уже существенно изменила состояние и функционирование природных экосистем на 75% суши и 66% акватории Мирового океана. Данные WWF (WWF, 2022) свидетельствуют о том, что за последние 50 лет популяции позвоночных животных сократились в среднем на 69%, а по информации FAO (FAO, 2020), ежегодные потери тропических лесов достигли 10 млн га, что значительно превышает естественные колебания площади лесов в прошлые эпохи. Особую тревогу вызывает гибель почти половины коралловых рифов за последние 30 лет вследствие потепления океана и его загрязнения. Глобальное потепление, изменение режима осадков, увеличение повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений (волны жары и холода, засухи, пожары, наводнения) и прямые антропогенные воздействия (вырубка лесов, осушение болот) могут оказать существенное влияние на природные экосистемы и привести к тому, что они из поглотителей парниковых газов превратятся в их

источники. Количественная оценка чувствительности ключевых типов природных экосистем (зона многолетней мерзлоты, тропические леса, водно-болотные угодья, прибрежные зоны) к климатическим воздействиям критически важна для прогнозирования риска катастрофических положительных обратных связей:

- Деградация многолетней мерзлоты приводит к высвобождению накопленных вековых запасов углерода, который поступает в атмосферу в виде CO_2 и CH_4 с поверхности суши и шельфа морей (Schuur et al., 2015; Turetsky et al., 2020; Natali et al., 2021).
- Учащение и интенсификация лесных пожаров приводит к мгновенному высвобождению и выбросу в атмосферу больших объемов парниковых газов и черного углерода (Jones et al., 2022).
- Осушение болот ведет к их превращению из поглотителя в мощные источники CO_2 (Leifeld, Menichetti, 2018; Evans et al., 2021).
- Потепление и закисление вод мирового океан ведет к снижению эффективности поглощения CO_2 океаном (DeVries et al., 2017; Gruber et al., 2019).

На протяжении первых двух десятилетий XXI века количественная оценка природных стоков и источников парниковых газов в природных экосистемах суши и мирового океана претерпевали значительные изменения. Исторически оценка глобального углеродного цикла в значительной степени опиралась на данные измерений, поступающих с относительно разреженной наблюдательной сети (например, атмосферные мониторинговые станции за потоками парниковых газов, судовые измерения потоков в океане, локальные исследования углеродного баланса экосистем, и др.). Для расчетов использовались относительно простые атмосферные, биосферные и океанические модели. Ранние обобщения, например, подготовленные для Второго и Третьего оценочного доклада МГЭИК (TAR), признавали большие неопределенности в разделении потоков парниковых газов от антропогенных и естественных источников, особенно для остаточного "стокового потенциала суши" и поглощения океаном (Prentice et al., 2001). Потоки CH_4 часто определялись на основе локальных измерений и инвентаризации потоков методом «bottom-up» или «снизу-вверх» (подробного анализа пространственно-временной изменчивости потоков на локальном уровне и дальнейшего перехода на основе методов пространственной экстраполяции к региональным потокам), а также со значительной погрешностью при использовании подхода «top-down» или «сверху-вниз» (восстановление приземных региональных и локальных потоков по измерениям атмосферных характеристик и концентраций парниковых газов, например, методами инверсионного моделирования) (Hein et al., 1997).

Современные оценки потоков парниковых газов, представленные в последующих докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), все больше опираются на комплексный подход, интегрирующий:

- Данные о запасах углерода и их динамике в основных пулах (почва, растительность) на поверхности суши (Pan et al., 2011), данные о концентрации растворенного углерода (C) в водах мирового океана (Takahashi et al. 2009).
- Глобальные (FLUXNET) и региональные сети наблюдений за потоками парниковых газов, обеспечивающие прямой мониторинг потоков CO₂, CH₄, N₂O, водяного пара для различных типов природных экосистем методом турбулентных пульсаций (eddy covariance) (Baldocchi et al., 2001; Pastorello et al., 2020).
- Спутниковые наблюдения (GOSAT, OCO-2/3, Sentinel, CO2M), обеспечивающие наилучшее пространственное покрытие данных о содержании CO₂ и CH₄ в столбе атмосферы, хотя и с ограничениями по точности и чувствительности к приземным концентрациям (Eldering et al., 2017; Byrne et al., 2023; Lindqvist et al., 2024).
- Атмосферные инверсионные модели все более высокого пространственного разрешения, использующие данные с наземных станций и спутников для решения обратной задачи – оценки приземных потоков парниковых газов (Crowell et al., 2019; Schuh et al., 2019; Jin et al., 2024).
- Глобальные и региональные биогеохимические модели (Dynamic Global Vegetation Model-DGVM) (Fisher et al., 2017; Bonan et al., 2018).
- Высокоразрешающие системы мониторинга земной поверхности (лидары, мульти- и гиперспектральная съемка), позволяющие получать детализированные данные о свойствах земной поверхности (растительность, почва, рельеф) на уровне экосистемы (Verrelst et al. 2019).
- Методы машинного обучения и ассимиляции данных, помогающие интегрировать разнородные потоки информации и повышать точность оценок приземных концентраций и потоков парниковых газов (Reichstein et al., 2019; Jung et al., 2020).

Несмотря на значительный прогресс в развитии новых технологий и накоплении многочисленных экспериментальных данных о потоках парниковых газов, в настоящее время сохраняется острая необходимость увеличения объема и качества информации о потоках с более полным пространственным покрытием и временным разрешением (особенно в труднодоступных регионах и районах с очагами аномально-высоких выбросов CH₄). Необходим дальнейший прогресс в понимании ключевых биогеохимических процессов (метаногенеза в водно-болотных угодьях и на рисовых полях, азотного цикла, и др.) и развитие модельных алгоритмов для их описания. Важна интеграция данных разных масштабов и методов (bottom-up и top-down) для восполнения пробелов в существующих базах данных. Требуется дальнейшее совершенствование моделей земной системы с акцентом на снижение неопределенностей в прогнозах, особенно в условиях быстро меняющегося климата и усиливающейся антропогенной нагрузки (Schwalm et al., 2020).

Таким образом, проведение точных количественных оценок потоков является чрезвычайно важной задачей для: (1) правильного определения при-

чин наблюдаемых темпов роста атмосферной концентрации парниковых газов и их разделения между антропогенными и природными факторами; (2) оценки эффективности климатической политики по смягчению последствий изменения климата путем ограничения "остаточного углеродного бюджета"; (3) оценка стабильности естественных поглотителей углерода для разных сценариев будущих изменений климата; (4) выявления потенциальных "критических точек перелома" (tipping points) климатических обратных связей, связанных с таянием многолетней мерзлоты на суше и морском шельфе или выбросами парниковых газов от водно-болотных угодий. Ключевыми научными проблемами в этой области остаются: согласование разных методов определения потоков парниковых газов, включая атмосферные инверсионные технологии (top-down) и инвентаризационные и процесс-ориентированные (bottom-up) методы (Sitch et al., 2024); количественная оценка потоков парниковых газов в удаленных регионах (например, в тропиках, высоких широтах) и на территориях с высокой пространственной неоднородностью ландшафтной структуры (рельеф, растительный и почвенный покров); понимание микробиологических и биогеохимических процессов, контролирующих производство и поглощение CH_4 ; и прогнозирование реакции наземных и океанических экосистем на многофакторное и нелинейное воздействие климатических факторов. Недооценка роли и изменчивости потоков парниковых газов в природных экосистемах чревата фатальными ошибками в прогнозах климата и разработке эффективных стратегий смягчения последствий его изменения.

Целью данного исследования является комплексный анализ общих закономерностей изменения оценок потоков CO_2 и CH_4 в природных экосистемах суши и океана на протяжении первых двух десятилетий XXI века. Особое внимание в проведенном исследовании уделяется методам оценки глобальных потоков парниковых газов, анализу их возможных неопределенностей и погрешностей. Кроме того, рассматриваются возможные изменения глобального углеродного цикла и потоков парниковых газов при различных сценариях будущих климатических изменений. На основе полученных результатов предлагаются рекомендации по улучшению технологий и методологических подходов для глобального и регионального мониторинга потоков парниковых газов при решении задач, связанных с современными климатическими вызовами.

2. Методика оценки потоков парниковых газов в региональном и глобальном масштабе

Современные методологические подходы к оценке приземных потоков парниковых газов в глобальном и региональном масштабе можно условно разделить на четыре основные группы и их комбинации:

– Стандартные методики МГЭИК – руководства для национальных инвентаризаций, учитывающих антропогенные выбросы парниковых газов (IPCC, 2023).

– Биогеохимические модели (например, CESM/CESM2, LPJ, и др.) – моделирование взаимодействия между сушей, океаном и атмосферой (Bonan et al., 2018).

– Инверсионное моделирование – реконструкция потоков парниковых газов на основе данных дистанционных (OCO-2, GOSAT) и наземных наблюдений (Eldering et al., 2017).

– Машинное обучение (МО) – прогнозирование пространственной и временной изменчивости потоков парниковых газов через анализ «больших» объемов данных (Reichstein et al., 2019).

2.1. Методы МГЭИК по национальной инвентаризации выбросов парниковых газов

Методология МГЭИК (Paustian et al., 2006; IPCC, 2019) является в настоящее время основным подходом для оценки потоков парниковых газов между поверхностью суши, океана и атмосферой на глобальном и региональном уровнях. Она обеспечивает получение количественных оценок эмиссии и поглощения парниковых газов, анализ факторов, влияющих на глобальный углеродный цикл, и формирование национальных кадастров выбросов парниковых газов. Ключевыми принципами методологии служат стандартизация и научная обоснованность, гарантирующие согласованность и сопоставимость получаемых данных между разными странами для соответствующих периодов времени. Основу методологии составляет подход «снизу-вверх», при котором потоки парниковых газов рассчитываются путем обобщения локальных данных о структуре землепользования, видах человеческой деятельности (площади землепользования, урожайности культур, поголовье скота, объемах сжигания топлива, и др.) и применения к ним специфических коэффициентов эмиссии (эмиссионные коэффициенты). Дополнительно используется секторальный подход, требующий раздельной оценки потоков парниковых газов для ключевых секторов: сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования (AFOLU), охватывающего эмиссию и поглощение CO_2 (включая изменение запасов углерода в биомассе и почве), а также эмиссию CH_4 (при выращивании риса, энтерической ферментации животных, использовании навоза, и др.) и N_2O (от применения удобрений, навоза, дренирования почв, и др.); энергетику, где учитывается эмиссия CO_2 , CH_4 , N_2O от сжигания ископаемого топлива; промышленное производство, включающее эмиссию CO_2 при производстве цемента, металлов, химикатов и других парниковых газов (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃); и сектор отходов с эмиссией CH_4 со свалок, и N_2O , и CH_4 от очистки сточных вод. Антропогенные потоки парниковых газов оцениваются исключительно для управляемых земель, то есть территорий, подверженных систематическому антропогенному воздействию, где применяются практики, направленные на выполнение производственных, экологических или социальных функций (IPCC, 2006). Потоки парниковых газов на неуправляемых (ненарушенных) землях не учитываются, за исключением случаев, когда изменение структуры землепользования обусловлено антропогенной деятельностью.

Методология оценки выбросов парниковых газов опирается на иерархию методов (Tier 1, 2, 3), предусматривающую различные уровни сложности в зависимости от доступности необходимых данных и требуемой точности оценок. Базовый уровень (Tier 1) использует стандартные эмиссионные коэффициенты МГЭИК с пространственным разрешением на уровне страны или крупного региона, требуя использования минимального количества национальных данных. Промежуточный уровень (Tier 2) использует национальные или региональные коэффициенты эмиссии, что требует значительных объемов национальных данных и использования моделей для учета специфических условий (климат, растительность, почвы, сценарии развития животноводства). Высокий уровень (Tier 3) основан на использовании сложных моделей (например, моделей динамики экосистем и биогеохимических циклов) и/или системах инвентаризации на основе измерений (наземных, атмосферных, дистанционных), калиброванных и верифицированных с использованием национальных данных, что требует наиболее подробных данных и значительных вычислительных ресурсов. Дополнительными принципами методологии являются полнота учета разных источников и стоков парниковых газов, а также прозрачность и документирование методов, данных, допущений и источников неопределенностей.

Источники информации для оценок включают официальную статистику (Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), Международного энергетического агентства (МЭА), национальных служб) по площадям и урожайности сельскохозяйственных культур, поголовью скота, объемам сжигаемого топлива, промышленному производству, количеству отходов. Широко используются данные дистанционного зондирования для оценки структуры землепользования (LULC), состояния растительности (оцениваемой часто через вегетационные индексы, NDVI) и выявления изменений в растительном покрове (обезлесение, облесение, пожары), а также наземные наблюдения и мониторинг. Особое значение имеют исследования запасов углерода (включая изменение запасов углерода в биомассе, мортмассе и почве), так как прямые измерения их запасов служат основой для разработки и валидации национальных/региональных эмиссионных коэффициентов для уровней Tier 2 и 3, калибровки и верификации моделей на уровне Tier 3. Надежные данные о динамике почвенного углерода критически важны для оценки нетто потоков CO_2 во многих категориях землепользования в рамках сектора AFOLU, особенно на уровнях Tier 2 и 3. При таких исследованиях часто используются: прямые измерения потоков парниковых газов методами экспозиционных камер или турбулентных пульсаций (Baldocchi et al., 2001) (преимущественно для верификации моделей Tier 3); данные национальной инвентаризации лесов (НИЛ), предоставляющие детальную информацию о запасах углерода в надземной биомассе (Paustian et al., 2016); лабораторные исследования для определения эмиссионных коэффициентов N_2O и CH_4 ; и измерения концентраций парниковых газов глобальной сетью мониторинга для проверки согласованности национальных инвентаризаций методами инверсионного моделирования («сверху – вниз»).

Преимущества подхода МГЭИК включают: обеспечение сравнимости оценок антропогенных потоков парниковых газов в пространстве (между

странами) и во времени; прозрачность и воспроизводимость благодаря четкой структуре и требованиям к документированию; всесторонний охват ключевых секторов экономики и разных парниковых газов; гибкость за счет иерархии методов, позволяющей адаптироваться к возможностям отдельных стран; научную обоснованность; и поддержку климатической политики как основы отчетности в рамках РКИК ООН.

К недостаткам и ограничениям методологии МГЭИК можно отнести проведение оценок потоков парниковых газов только для управляемых земель. В этом состоит ограниченность национальных инвентаризаций в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Неопределенность оценок потоков парниковых газов по методологии МГЭИК варьирует в широких пределах (Deng et al., 2025) и зависит от нескольких факторов. Во-первых, она определяется используемым для расчетов методологическим уровнем (Tier). Например, уровень Tier 1 обычно имеет наибольшую неопределенность, особенно для оценок почвенного углерода, эмиссии N_2O из почв, эмиссии CH_4 от животноводства и производства риса – часто >50%, а в некоторых случаях может превышать 100%. Уровни Tier 2 и 3 в большинстве случаев обеспечивают более высокую точность оценок эмиссии и поглощения парниковых газов. Во-вторых, неопределенность оценок зависит от категории источника или стока. Так, эмиссия CO_2 от сжигания ископаемого топлива обычно оценивается с низкой неопределенностью (<5-10%). Напротив, потоки CO_2 в секторе AFOLU и эмиссия N_2O из почв могут иметь неопределенность >100% при использовании Tier 1. Также значительной неопределенностью отличается эмиссия CH_4 от энтерической ферментации. Кроме того, на точность оценок влияют: погрешности в определении коэффициентов эмиссии, особенно для биологических процессов; сложность моделирования на уровне Tier 3; ошибки при агрегировании данных, возникающие при масштабировании точечных измерений на большие территории.

2.2. Биогеохимические модели

Биогеохимические модели служат важным инструментом для количественной оценки потоков парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) между поверхностью суши (Sitch et al., 2003; Bonan, Doney, 2018; Lawrence et al., 2019; Friedlingstein et al., 2025) и океана (Gruber et al., 2019; Orr et al., 2017) с атмосферой. Данные модели основаны на математическом описании сложных биогеохимических и биогеофизических процессов, регулирующих циклы углерода и азота в природных экосистемах, и могут быть интегрированы в модели общей циркуляции атмосферы. Модели описывают ключевые физические, биологические и химические процессы, контролирующие потоки парниковых газов, включая процессы фотосинтеза и дыхания растительности и почвы, метаногенеза, денитрификации, нитрификации, и др. – для наземных экосистем, и растворения/высвобождения CO_2 на границе вода-атмосфера, фиксации CO_2 фитопланктоном, метаногенеза, круговорота органического и неорганического углерода в водной толще, и др. – для океанических экосистем. Все процессы рассматриваются в тесном взаимодействии между собой через сложную систему прямых и обратных связей. Процессы фотосинтеза,

дыхания растений, эвапотранспирации и фенологии тесно зависят от атмосферных условий (солнечная радиация, температура, осадки, концентрация CO_2 и др.) и характеристик почвенного покрова (температура и влажность почвы, содержание органического углерода и азота, микробная активность). Биохимический состав океанских вод (питательные вещества – N, P, Fe, биомасса фитопланктона и зоопланктона) зависит от температуры и солености вод, температуры воздуха, солнечной радиации, ветрового волнения и скорости вертикального перемешивания, содержания CO_2 в воздухе. Модели рассматривают наземную экосистему (растительность и почва) как сложную, динамическую систему, где ее компоненты (надземные и подземные части растений, органическое вещество почвы, микроорганизмы, минеральные вещества) взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой (климат, почва, рельеф).

Нетто поток парниковых газов на границе суша-атмосфера и океан-атмосфера оценивается на основе параметризации ключевых биотических и абиотических процессов в экосистемах и процессов газообмена в атмосферном пограничном слое. Совокупное действие этих процессов определяет баланс углерода и сопряжённого с ним цикла азота между основными пулами природных экосистем (например, надземная и подземная биомасса, почвенный органический углерод, органический и неорганический углерод в океане) и атмосферой и отражается в их динамике. Модели реализуются на глобальной или региональной сетке (часто привязанной к климатическим моделям или данным наблюдений), что позволяет количественно оценивать пространственную и временную изменчивость потоков.

Начальные условия моделей по метеорологическим параметрам (температура, осадки, солнечная радиация, влажность, скорость ветра, и др.) задаются из данных реанализов (ERA5, JRA-55, MERRA-2) или расчетов климатических моделей (CMIP). Модели также требуют задания полей концентрации CO_2 в атмосфере, описания рельефа, структуры землепользования и растительности, а также характеристик почвенного покрова (текстуры, мощности органического горизонта, pH и др.) для наземных экосистем. Для океанов моделям необходимы поля температуры и солёности воды, коэффициенты диффузии и концентрации питательных веществ в водной толще, получаемые из данных океанических реанализов или моделирования.

В качестве начальных условий в моделях задаются начальные запасы углерода и азота в основных пулах (например, запасы почвенного углерода, биомасса растительности, концентрации растворенного неорганического и органического углерода, и питательных веществ в океане). Для старта моделей используются длительные прогоны модели до достижения "равновесного" состояния или данные наземных и спутниковых наблюдений.

Модели требуют параметризации многочисленных входных параметров, описывающих физиологические свойства растений (например, устьичная проводимость, максимальная скорость карбоксилирования, квантовая эффективность, темновое дыхание), почвенные характеристики (скорость разложения органики,

параметры автотрофного и гетеротрофного дыхания), океанические процессы (удельная скорость роста фитопланктона, параметры реминерализации, и др.).

Для улучшения согласованности модельных расчетов с результатами измерений (например, с данными наблюдений за потоками парниковых газов глобальной сети FLUXNET, инвентаризационными оценками запасов углерода в почве и растительности, данными по урожайности сельскохозяйственных культур, судовыми измерениями $p\text{CO}_2$ в океане) проводится дополнительная калибровка входных параметров моделей.

Для моделирования приземных потоков парниковых газов в настоящее время наиболее широкое распространение получили следующие биогеохимические модели: CESM/CESM2, LPJ, ORCHIDEE, JULES, TerM, VISIT для суши и PISCES, OBGCs, MITgcm – для океана.

Семейство моделей CESM / CESM2 (Community Earth System Model) с компонентами CLM (Community Land Model)

CESM/CESM2 является одной из самых распространенных семейств моделей для описания биогеохимических процессов в экосистемах суши (Lawrence et al., 2019; Bonan et al., 2018). CLM является важной составляющей модели суши в рамках CESM, детально описывающий гидрологию, энерго- и массообмен, биогеофизику и биогеохимию (углеродный и азотный циклы). Модели широко используются для оценки потоков CO_2 , CH_4 и N_2O в глобальном масштабе, включая сценарные прогнозы МГЭИК.

Семейство моделей LPJ (Lund-Potsdam-Jena)

Семейство LPJ включает две группы моделей: LPJ-GUESS (LPJ – General Ecosystem Simulator) и LPJmL (LPJ with managed Land).

LPJ-GUESS – это динамическая глобальная модель растительности (DGVM), способная описать динамику, состав и структуру растительных сообществ, потоки CO_2 и CH_4 (Smith et al., 2001; Lindeskog et al., 2013). Модель широко используется для изучения влияния изменения климата и структуры землепользования на растительность, расчета потоков парниковых газов. Эффективна для прогнозирования рисков природных пожаров.

LPJmL – это динамическая глобальная модель для описания биогеохимических процессов в управляемых экосистемах (сельское хозяйство, лесное хозяйство) (Bondeau et al., 2007; Schaphoff et al., 2018)]. Модель эффективна для оценки потоков парниковых газов (особенно CO_2 и N_2O) при разных сценариях землепользования (внесении удобрений, орошении, и др.).

ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems)

Глобальная модель биогеохимических циклов экосистем суши ORCHIDEE состоит из множества подмоделей, описывающих круговорот углерода и азота, потоки CO_2 , CH_4 и N_2O в лесных, травяных, сельскохозяйственных экосистемах, в зоне многолетней мерзлоты, в водно-болотных угод-

дях (Krinner et al., 2005; Guimberteau et al., 2018; Salmon et al., 2022). Модель имеет дополнительный модуль, описывающий потоки и химические взаимодействия биогенных летучих органических соединений. ORCHIDEE интегрирована в климатическую модель IPSL-CM. Она широко используется для прогнозирования изменения углеродного баланса и потоков парниковых газов при климатических изменениях.

JULES (Joint UK Land Environment Simulator)

Модель суши метеорологической службы Великобритании (Met Office) является составной частью модели суши в климатической модели UKESM1 (Clark et al., 2011; Wiltshire et al., 2021). Она включает хорошо разработанные модули углеродного и азотного цикла, динамики растительности (как автономно настраиваемой, так и интегрированной с DGVM – JULES-DGVM), модули для расчета потоков CH_4 (водно-болотные угодья, многолетняя мерзлота) и N_2O (Comyn-Platt et al., 2018).

TerM (Terrestrial model)

Модель TerM является одной из наиболее перспективных российских моделей деятельного слоя суши (Stepanenko et al., 2024). В модели реализован оригинальный блок тепловлагопереноса в почве, растительности и снежном покрове с учётом фазовых переходов, модули термогидродинамики и биогеохимии озёр и речных систем, модули для описания циклов углерода, азота и CH_4 , модули пожаров и баланса органической массы болот. Модель может использоваться как отдельный комплекс, с предписанным атмосферным воздействием (например, при исследовании гидрологического цикла), так и в составе национальной модели Земной системы INM-CM6 (Володин, 2023).

VISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace gases)

Биогеохимическая модель VISIT, предназначенная для комплексного моделирования потоков парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) на суше (Ito, Inatomi, 2012, Inatomi et al., 2010). При описании процессов эмиссии, поглощения и переноса парниковых газов учитывает процессы фотосинтеза, дыхания, разложения органического вещества, денитрификации, метаногенеза и метанотрофии. Широко используется для национальных инвентаризаций выбросов и поглощения парниковых газов, и оценки вклада различных экосистем в глобальный углеродный баланс.

Семейство моделей MITgcm (MIT General Circulation Model)

MITgcm является достаточно мощной и гибкой моделью циркуляции океана и атмосферы, к которой подключены дополнительные биогеохимические модули разной сложности для моделирования циклов биогенных элементов и потоков парниковых газов (Marshall et al., 1997; Follows et al., 2007; Dutkiewicz et al., 2015). Уникальность модели заключается в использовании неструктурированной сетки, полностью негидростатического ядра и модуль-

ной архитектуры, что делает ее применимой для моделирования процессов в разных пространственных и временных масштабах. Потоки CO_2 у поверхности океана оцениваются по разности концентрации растворенного CO_2 в воде и концентрации CO_2 в воздухе. В качестве ключевых параметров модели используются: запасы растворенного неорганического углерода (DIC), щелочность воды, содержание фосфатов и силикатов, запасы растворенного органического углерода и фосфора. Возможен учет количества фито- и зоопланктона. При моделировании потоков CH_4 модель учитывает анаэробное разложение органики в донных отложениях, и аэробное/анаэробное окисление в толще воды. Для описания потоков N_2O в модели учитываются процессы нитрификации (в аэробных условиях) и денитрификации (в аноксидных зонах).

OBGCs (Ocean Biogeochemical Models)

Океаническая биогеохимическая модель OBGCs, имеет модульную структуру и описывает биологические (фитопланктон, зоопланктон), химические (растворенный неорганический углерод, щелочность, питательные вещества) и физические (адвекцию, диффузию, перемешивание) процессы в океане, определяющие поглощение CO_2 океаном и потоки других парниковых газов (N_2O , CH_4) (Fennel et al., 2022).

Семейство моделей PISCES (Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies / PARIS)

PISCES является одной из самых распространенных и развитых моделей океанической биогеохимии среднего уровня сложности (Aumont et al., 2015). Она позволяет проводить модельные оценки в явном виде нескольких функциональных групп фито- и зоопланктона, содержания биогенных элементов (N, P, Si, Fe), структуры углеродного цикла (включая карбонатную систему и потоки CO_2 и CH_4), эмиссию N_2O . Модель интегрирована во многие физические океанические модели (NEMO, MOM, MITgcm) и используется в крупных климатических моделях (CNRM-CM, IPSL-CM).

Как уже отмечалось, большинство современных биогеохимических моделей являются компонентами более крупных моделей земной системы (Earth System Models, ESMs) (CESM, IPSL-CM, UKESM), где они объединяются в единое целое для описания прямых и обратных связей между поверхностью суши, океана и атмосферы.

Эффективность моделей часто оценивается и подтверждается их участием в крупных проектах по сравнению моделей (Model Intercomparison Projects – MIPs), таких как LUCID, TRENDY, GSWP3 (для суши) и OCMIP (для океана), координируемых в рамках CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) для МГЭИК.

Основным преимуществом применения биогеохимических моделей для оценки приземных потоков парниковых газов является их способность не только прогнозировать изменения самих потоков, но и выявлять причины

наблюдаемых изменений. Использование моделей позволяет экспериментально тестировать гипотезы о ключевых процессах, протекающих в природных экосистемах, и анализировать возникающие нелинейные обратные связи. В настоящее время модельный подход остается незаменимым инструментом для прогнозирования будущей динамики потоков парниковых газов в условиях изменяющегося климата, растущих атмосферных концентраций парниковых газов и трансформации структуры землепользования. Кроме того, метод обеспечивает получение физически и биогеохимически согласованных количественных оценок глобальных потоков углерода и других биогенных элементов (N, P) с высоким пространственным разрешением, восполняя тем самым пробелы в данных наблюдений (особенно для океана и в труднодоступных регионах суши). Эти оценки учитывают зависимость потоков от структуры растительности, состояния почв, химических процессов в океане. Важно отметить, что современные биогеохимические модели являются неотъемлемыми компонентами моделей земной системы, обеспечивая тем самым интеграцию циклов углерода и биогенных элементов на суше и в океане с атмосферными процессами.

К недостаткам и ограничениям методологии, использующей глобальные и региональные биогеохимические модели, относится применение множества упрощенных параметризаций сложных процессов, таких как биофизические и биохимические процессы в растительности, природные пожары, метаногенез, и др. Значения задаваемых входных параметров моделей часто плохо соответствуют реальным данным или обладают высокой пространственной изменчивостью. Существенную проблему вносит неопределенность входных данных, включая качество и разрешение климатических данных, данных о структуре землепользования, почвах, растительности и океанической циркуляции. Большинство современных моделей используют ограниченное число функциональных типов растительности или фитопланктонных групп, что существенно упрощает реальное биоразнообразие суши и океана. Некоторые важные процессы, такие как глубинные почвенные процессы, процессы в многолетнемерзлых грунтах, цикл фосфора (особенно в тропиках), динамика питательных веществ в океане (например, соединений железа), влияние вредителей и болезней, а также детальное антропогенное влияние (загрязнение воздуха и вод, орошение, внесение удобрений – за исключением специализированных моделей агроэкосистем), могут быть недостаточно представлены или вовсе отсутствовать в моделях. Параметры, полученные на локальном уровне (например, на станциях мониторинга потоков парниковых газов, FLUXNET), часто плохо аппроксимируются на размер элементарной ячейки модели из-за пространственной неоднородности и мозаичной структуры ландшафтов. Кроме того, детальные биогеохимические модели (особенно CLM в высоком разрешении) требуют огромных вычислительных ресурсов, что серьезно ограничивает возможность проведения длительных прогонов или создания больших ансамблей для оценки неопределенности расчетов.

2.3. Инверсионное моделирование потоков парниковых газов на основе данных дистанционных и наземных наблюдений

Оценка поверхностных потоков парниковых газов с использованием инверсионного моделирования на основе данных дистанционного зондирования и наземных измерений их концентраций представляет собой чрезвычайно перспективный и активно развивающийся подход, позволяющий получить региональные и глобальные оценки приземных потоков, включая территории с очень редкой или полностью отсутствующей сетью наземных наблюдений (Bousquet et al., 2000; Ciais et al., 2010; Chevallier et al., 2010; Basu et al., 2013; Crowell et al., 2019; Jin et al., 2024).

Данный метод, основанный на общих законах физики атмосферы, теории оптимизации и количественной оценки неопределенностей, является классической реализацией подхода «сверху-вниз» (top-down) для определения приземных потоков. Его ключевой принцип заключается в соблюдении закона сохранения массы, согласно которому наблюдаемая концентрация парникового газа в конкретном месте и момент времени является результатом влияния поверхностных источников и стоков парникового газа, атмосферного переноса и химических процессов при заданных граничных условиях. Инверсионные алгоритмы используют данные о полях концентраций парниковых газов в нижней тропосфере (полученных методами дистанционного зондирования, например, с использованием оборудования на спутниках OCO-2/OCO-3 (CO_2), GOSAT/GOSAT-2 (CO_2 , CH_4), TROPOMI/Sentinel-5P (CH_4), а также в будущем CO2M (Copernicus), GEDI, или станциях наземных измерений, оборудованных высотными мачтами) и решает задачу нахождения неизвестных приземных потоков в пространстве и времени, которые наилучшим образом объясняют эти наблюдения при заданных условиях атмосферного переноса и химических преобразований (Chevallier et al., 2010; Peters et al., 2010; Basu et al., 2013; Lorente et al., 2021). Поиск неизвестных поверхностных потоков проводится методами оптимизации, направленными на минимизацию разницы между концентрациями, смоделированными с использованием этих потоков, и фактически наблюдаемыми концентрациями, что требует учета существующих неопределенностей и погрешностей как измерений, так и используемых моделей.

На первом этапе для реализации прямой задачи используется начальное "наилучшее приближение" о поверхностных потоках (априорные потоки), полученное из внешних источников. С их помощью моделируются концентрации, которые могли бы наблюдаться при этих потоках. Разница между реальными измеренными и смоделированными концентрациями, полученными с использованием априорных данных, определяет невязку. Задача минимизации этой невязки решается с помощью методов матричной алгебры, вероятностных подходов (таких, как методы Монте-Карло) и других оптимизационных методов. На заключительной стадии проводится верификация полученных потоков с использованием независимых данных измерений. При оценке вклада антропогенных источников в интегральные потоки в расчетах используются существующие базы данных по антропогенным выбросам парниковых газов.

Возможные ошибки при восстановлении приземных потоков могут быть связаны как с погрешностями спутниковых измерений концентраций парни-

ковых газов и их интерполяцией, так и с погрешностями используемых инверсионных алгоритмов и моделей:

- Точность данных дистанционного зондирования варьирует в зависимости от площади покрытия, влияния облачности и аэрозолей, широты, пространственного и временного разрешения спутниковой съемки. Систематические погрешности измерений и вертикальная неоднородность распределения парниковых газов в атмосферном столбе приводят к различиям между измеренной колоночной концентрацией парникового газа и его концентрацией в приземном слое.

- Ошибки в моделировании полей ветра, турбулентности, конвекции и высоты пограничного слоя напрямую влияют на точность восстановления приземных потоков.

- Различия в пространственном разрешении моделей и спутниковых измерений создают дополнительный источник погрешности.

- Надежное разделение вклада природных (лесные и травяные экосистемы, водно-болотные угодья) и антропогенных источников (сжигание ископаемого топлива, промышленность, транспорт, сельское хозяйство) часто требует привлечения дополнительной надежной априорной информации.

Для решения задач инверсионного моделирования приземных потоков парниковых газов в настоящее время наиболее широко используются следующие модели: TM5, GEOS-Chem, PCTM, WRF-GHG, NAME.

TM5 (Tracer Model 5) / TM5-4DVAR

Модель широко используется для восстановления среднемесячных/среднегодовых приземных потоков CO₂ (Krol et al., 2005; Meirink et al., 2008; Basu et al., 2013). Использование вложенных сеток и масштабирования (nested zoom) позволяет получать данные более высокого разрешения над отдельными регионами (например, Европа, Северная Америка). Модель хорошо интегрирована с системами сбора и обработки спутниковых данных (например, Copernicus Atmosphere Monitoring Service – CAMS).

GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System-Chemistry) / GEOS-Chem Adjoint

Комплексная модель, используемая для описания переноса парниковых газов и приземных потоков в глобальном и региональном масштабе (Bey et al., 2001; Henze et al., 2007; Wecht et al., 2014; Maasakkers et al., 2019). Преимуществом модели является подробное описание атмосферной химии с детальным описанием процессов, влияющих на атмосферные концентрации CH₄ и N₂O.

PCTM (Parameterized Chemical Transport Model) / CarbonTracker

Комплексная модель, специально разработанная для описания переноса и определения потоков парниковых газов в глобальном масштабе (Peters et al., 2007, 2010; Jacobson et al., 2020). Она используется в системе CarbonTracker, разработанной NOAA для измерения и моделирования источников и стоков

CO₂ и CH₄. Она специально оптимизирована для эффективного усвоения данных, обеспечивая уточнение приземных потоков в квази-реальном времени. При расчетах модель использует усвоение разнообразных данных (наземные, авиационные, спутниковые). Модель хорошо верифицирована на независимых данных сети станций пульсационных измерений за потоками парниковых газов в Северной Америке (AmeriFlux).

WRF-GHG (Weather Research and Forecasting Model configured for GHGs)

Модель предназначена для мезомасштабного моделирования переноса и определения потоков парниковых газов с высоким пространственным разрешением (Beck et al., 2013; Zhao et al., 2023). Модель идеально подходит для региональных исследований (например, в городах или населенных пунктах, территориях со сложным рельефом и мозаичной структурой растительности), где необходимо учитывать сложный рельеф, структуру землепользования и разнообразие микроклиматических условий. Модель может быть дополнена дополнительными модулями, описывающими атмосферную химию.

NAME (Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment)

Восстановление приземных потоков парниковых газов и их переноса в NAME основано на Лагранжевой модели дисперсии частиц (LPDM) (Ryall, Maryon, 1998; Manning et al., 2011; Ganesan et al., 2015; Lunt et al., 2021). Модель особенно хорошо подходит для моделирования переноса примесей от точечных источников (например, электростанции, промышленные предприятия, города), выявленных по спутниковым данным (особенно TROPOMI CH₄) (Lorente et al., 2021).

Анализируя ключевые преимущества инверсионного подхода, важно отметить возможность его применения для прямой количественной оценки потоков (нетто обмена) парниковых газов. Метод также обеспечивает независимую проверку инвентаризационных подходов, используемых в методике МГЭИК, способствуя объективной оценке надежности национальной отчетности об эмиссии парниковых газов. Он позволяет выявлять регионы с высокой неопределенностью в определении потоков, такие как территории, плохо покрытые сетью наблюдений или характеризующиеся ненадежными априорными данными. Другим важным преимуществом метода является его способность интегрировать экспериментальные данные из разных источников (наземные, самолетные, морские, спутниковые) в единую базу данных с учетом особенностей атмосферного переноса. Кроме того, инверсионный подход, основанный на Байесовском подходе, предоставляет технологии для оценки неопределенности в расчетах.

Неопределенность восстановления приземных потоков связана с четырьмя основными группами факторов: ошибки и погрешности спутниковых и наземных наблюдений (особенно в Южном полушарии, полярных и тропических широтах Северного полушария); погрешности моделей атмос-

ферного переноса, возникающие из-за упрощения основных физических процессов (турбулентность, конвекция, осадки, и другие), упрощенных параметризаций подсеточных процессов, грубого пространственного разрешения (обычно >50 - 100 км) и неполного учета химических преобразований в атмосфере; ошибки в инвентаризационных данных по выбросам; а также упрощения, применяемые при аналитическом решении обратной задачи дистанционного зондирования.

В качестве основных направлений дальнейшего развития метода рассматривается комбинирование экспериментальных данных нескольких спутниковых систем (например, OCO-2, GOSAT-2, TROPOMI) и наземных станций для получения больших объемов данных, применимых к разным регионам планеты. Также перспективным является проведение расчетов потоков с использованием данных наблюдений и моделей более высокого разрешения, применение гибридных подходов, соединяющих инверсионное моделирование и моделей биогеохимических циклов, и внедрение методов машинного обучения. Существенный прогресс ожидается от запуска новых специализированных спутников с более совершенной аппаратурой, таких как CO2M (для получения данных по приземным потокам CO_2 с высоким разрешением и одновременным измерением NO_2 для диагностики выбросов от сжигания ископаемого топлива) и GeoCARB (геостационарные спутники для мониторинга CO_2/CH_4).

2.4. Методы машинного обучения

Ключевой принцип прогнозирования поверхностных потоков парниковых газов с помощью методов машинного обучения основан на анализе больших объёмов экспериментальных данных для моделирования сложных нелинейных взаимодействий в системе «почва-растительность-атмосфера» на разных пространственно-временных масштабах (Reichstein et al., 2019). В отличие от традиционных процесс-ориентированных моделей (как глобальных, так и региональных), этот подход делает акцент на статистическом выявлении зависимостей между потоками парниковых газов и внешними факторами, что позволяет улавливать сложные закономерности в изменении потоков, не требуя явного описания физических механизмов, регулирующих процессы CO_2 и CH_4 обмена.

Традиционные биогеохимические модели основаны на явном, зачастую упрощенном описании физических, химических и биологических процессов (таких, как фотосинтез и дыхание). Масштабирование этих процессов от локального уровня до регионального (континентального) сопряжено со значительными неопределенностями и высокими вычислительными затратами. В отличие от них, методология машинного обучения предполагает обучение модели сложным, часто нелинейным взаимосвязям между потоками парниковых газов и факторами окружающей среды непосредственно на основе обширных массивов экспериментальных данных, минуя явное описание ключевых механизмов функционирования экосистем.

Методология моделирования потоков парниковых газов основывается на комплексном использовании разнородных массивов данных. Ключевыми источниками информации выступают: метеорологические данные и прямые измерения потоков парниковых газов со станций мониторинга; данные дистанционного зондирования Земли; данные реанализа (такие, как ERA5, и др.); а также данные о пространственном распределении типов растительности, почв, рельефе и сведений об использовании и управлении территориями.

Для восстановления и прогнозирования потоков широко применяются такие методы машинного обучения, как случайный лес (Random Forest), алгоритмы градиентного бустинга (GBM, XGBoost, LightGBM) и глубокие нейронные сети (DNN). В процессе построения моделей происходит нахождение релевантных признаков и выявление сложных взаимосвязей между параметрами из доступных массивов данных. Обязательным этапом моделирования является разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую выборки для последующего обучения, настройки гиперпараметров, тестирования моделей и выполнения прогнозных расчетов.

Преимущество подходов, построенных на основе методов машинного обучения по сравнению с традиционными процессно-ориентированными моделями, заключается в их способности эффективно интегрировать разнородные массивы данных (наземные, спутниковые, модельные), улавливать нелинейные и трудно формализуемые взаимодействия, а также в их вычислительной эффективности, что критически важно для расчетов с высоким пространственно-временным разрешением. Кроме того, анализ значимости признаков в моделях машинного обучения может способствовать выявлению неочевидных драйверов потоков или проверки экологических гипотез.

При использовании методов машинного обучения, однако, необходимо учитывать их ограничения и тесную зависимость от качества входных данных: прогностическая способность модели определяется репрезентативностью обучающей выборки, и экстраполяция на условия, выходящие за пределы ее распределения (другие типы растительности, почв, экстремальные климатические сценарии и погодные условия), сопряжена с высокой неопределенностью. Модели машинного обучения выявляют статистические ассоциации, не всегда отражающие причинно-следственные связи, и могут слабо воспроизводить долгосрочные эффекты (например, отложенные последствия засухи для эмиссии и поглощения парниковых газов разных сельскохозяйственных культур), что приводит к погрешностям в оценках потоков. Для оценки неопределенности прогнозов применяются ансамблевые подходы (обучение множества моделей с оценкой дисперсии прогноза по ансамблю), байесовские методы и анализ способности моделей предсказывать различные квантили распределения потока (например, 5% или 95%). Крайне важным остается строгий этап валидации итоговых модельных расчетов с использованием независимых данных, полностью исключенных из процесса обучения, таких как измерения на станциях мониторинга за репрезентативные временные периоды.

3. Изменение оценок потоков парниковых газов в XXI веке в природных экосистемах суши и океана

3.1. Общие тенденции в изменении оценок потоков парниковых газов в глобальном и региональном масштабе

Начало XXI века совпало с периодом устойчивого расширения сети станций мониторинга за потоками парниковых газов, развитием систем спутникового зондирования и созданием глобальных и региональных моделей общей циркуляции атмосферы и моделей биогеохимических циклов для суши и океана. Развертывание сетей наблюдений за потоками парниковых газов, таких как FLUXNET для наземных потоков CO₂ (Baldocchi et al., 2001), создание атласа CO₂ поверхности океана (Surface Ocean CO₂ Atlas, SOCAT) (Bakker et al., 2016) и появление новых спутниковых миссий, специально предназначенных для мониторинга атмосферных концентраций парниковых газов (например, GOSAT, OCO-2, TROPOMI), обеспечило получение высокоточных данных о концентрациях и потоках парниковых газов с достаточно высоким пространственным и временным разрешением (Crisp et al., 2004; Veeckind et al., 2012; Eldering et al., 2017). Активно развивающиеся в это же время исследования в области атмосферного обратного моделирования, методов ассимиляции данных и сложных моделей земной системы позволили провести обобщение и интегрирование экспериментальных данных из разнообразных источников (Chevallier et al., 2010; Peylin et al., 2013).

Новые экспериментальные данные о пространственной и временной изменчивости потоков парниковых газов, полученные с использованием современных технологий измерений, стандартизированного оборудования и методов анализа экспериментальных данных, привели к существенному пересмотру представлений о вкладе экосистем суши и океана в баланс парниковых газов в атмосфере. В начале 90-х годов прошлого века среди исследователей была широко распространена парадигма о доминирующей роли океана в поглощении антропогенных выбросов CO₂. Однако, на фоне новых данных, прежде всего, информации о динамике соотношения концентраций кислорода (O₂) и азота (N₂) в атмосфере и улучшенным оценкам приземных потоков парниковых газов, научное сообщество стало всё больше склоняться к признанию существенной роли суши, сравнимой с ролью океана, в поглощении антропогенного CO₂ (Bender et al., 2005). Несмотря на то, что в тот период вклад океана в поглощение антропогенных выбросов CO₂ продолжал рассматриваться определяющим (по существующим оценкам, океан поглощал от 1/4 до 1/3 общего объема антропогенных выбросов CO₂), суша постепенно стала также рассматриваться как потенциально один из определяющих компонентов в поглощении антропогенных выбросов CO₂ (Sitch et al. 2024; Friedlingstein et al., 2025).

Серия исследований, проведенная в начале XXI века международными исследовательскими группами, позволила выявить и подтвердить более сильное и устойчивое поглощение CO₂ природными экосистемами суши, чем

предполагали ранние оценки, хотя и со значительной межгодовой изменчивостью, связанной с климатическими и погодными аномалиями (Le Quéré et al., 2009; Friedlingstein et al., 2022, 2025). Наиболее дискуссионными вопросами оставались особенности распределения стока CO_2 между тропическими, бореальными и умеренными широтами, а также оценки относительного вклада увеличения атмосферного CO_2 в рост продуктивности растительных сообществ, депонирование азота и изменение климата (Piao et al., 2009; Schimel et al., 2015; Wang et al., 2020). В то же время в научном сообществе в последние годы стала интенсивно прорабатываться проблема изучения уязвимости ключевых запасов (пулов) углерода в природных экосистемах. Так, оценки, выполненные с использованием разных методов, показали потенциальное ослабление поглощения CO_2 тропическими лесами из-за высоких темпов обезлесения и деградации лесов (Brienen et al., 2015), а также рост рисков крупных выбросов CO_2 в атмосферу при таянии многолетней мерзлоты (Schuur et al., 2015, 2022).

В начале XXI века было проведено также и уточнение оценок поглощения CO_2 поверхностью океана. Хотя океан и продолжал рассматриваться как основной поглотитель CO_2 из атмосферы, новые обобщающие исследования, основанные на более обширных данных наблюдений и использовании новых генераций моделей, выявили необходимость скорейшего пересмотра существующих представлений в сторону снижения глобальной средней скорости поглощения CO_2 океаном по сравнению с оценками конца XX века. Исследователями отмечалась высокая региональная изменчивость эмиссии и поглощения CO_2 поверхностью океана, а также и снижение эффективности поглощения CO_2 в некоторых его районах и, в частности, в Южном океане, при сохранении достаточно высокого уровня неопределенности в оценках потоков (Landschützer et al., 2015; Gruber et al., 2019; Watson et al., 2020). В качестве основных факторов временной изменчивости потоков CO_2 в мировом океане рассматривается влияние изменения океанической циркуляции, стратификации и закисления вод.

В табл. 1 представлена динамика оценок вклада поверхности суши и океана в поглощение антропогенных выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива, промышленного и сельскохозяйственного производства и изменения структуры землепользования, полученная на основании отчетов международного проекта Global Carbon Budget за период 2006 по 2023 годы. Оценки для определения стока CO_2 поверхностью суши выполнены по данным инвентаризации лесов (FAO, национальные отчеты), данным спутниковых наблюдений (MODIS, Sentinel), расчетов с применением глобальных моделей биосферы (CASA, LPJ, ORCHIDEE) и оценок с применением методов инверсионного моделирования (OCO-2, GOSAT с 2015 года). Расчеты поглощения CO_2 поверхностью океана оценивались с помощью моделей биогеохимии океана (OCMIP) и данных наблюдений (например, Surface Ocean CO_2 Atlas, SOCAT). При оценках использовались методы интерполяции и машинного обучения для заполнения пробелов в рядах данных.

Таблица 1. Изменение среднегодового вклада поверхности суши и океана в поглощение антропогенных выбросов углерода от сжигания ископаемого топлива, промышленного и сельскохозяйственного производства и изменения структуры землепользования за период с 2006 по 2023 год, по данным отчетов международного проекта Global Carbon Budget (в Гигатоннах С в год, ГтС/год) (<https://globalcarbonbudget.org/archive/>)

Table 1. Changes in the average annual contribution of land and ocean surfaces to the absorption of anthropogenic carbon emissions from fossil fuel combustion, industrial and agricultural activities, and changes in land use, from 2006 to 2023, according to reports from the Global Carbon Budget international project (in Gigatons of Carbon per year, GtC/year) (<https://globalcarbonbudget.org/archive/>)

Год	Поглощение С океаном (ГтС/год)	Поглощение С сушей (ГтС/год)
2006	2.2 ± 0.4	2.8 ± 0.9
2007	2.3 ± 0.4	3.0 ± 0.9
2008	2.4 ± 0.4	2.9 ± 0.9
2009	2.3 ± 0.4	2.6 ± 0.7
2010	2.4 ± 0.5	2.8 ± 0.6
2011	2.7 ± 0.5	4.1 ± 0.9
2012	2.9 ± 0.5	2.8 ± 0.8
2013	2.9 ± 0.5	2.5 ± 0.9
2014	2.9 ± 0.5	4.1 ± 0.9
2015	3.0 ± 0.5	1.9 ± 0.9
2016	2.6 ± 0.5	2.7 ± 1.0
2017	2.5 ± 0.5	3.8 ± 0.8
2018	2.6 ± 0.6	3.5 ± 0.7
2019	2.6 ± 0.6	3.1 ± 1.2
2020	3.0 ± 0.4	2.9 ± 1.0
2021	2.9 ± 0.4	3.5 ± 0.9
2022	2.8 ± 0.4	3.8 ± 0.8
2023	2.9 ± 0.4	2.3 ± 1.0

Согласно данным Global Carbon Budget (<https://globalcarbonbudget.org/archive/>), в период с 2006 по 2023 год наблюдались значительные колебания в поглощении антропогенных выбросов CO_2 океаном и сушей, связанных как с изменением количества сжигаемого ископаемого топлива, промышленным и сельскохозяйственным производством, так и с изменениями в структуре землепользования. В среднем за рассматриваемый период океан поглощал от 2.2 до 3.0 ГтС/год, показывая относительно стабильный рост с 2006 по 2015 год (с максимумом поглощения 3.0 ± 0.5 ГтС/год в 2015 году), после чего отмечались лишь незначительные межгодовые колебания поглощения С в диапазоне от 2.5 до 3.0 ГтС/год с минимумом в 2017 году. Увеличение поглощения С океаном в 2011-2015 гг., по мнению авторов отчетов, может быть связано с усилением циркуляционных процессов в океанических водах, а также ростом растворимости CO_2 из-за повышения парциального давления CO_2 в атмосфере. Кроме того, это может быть связано и с влиянием таких глобальных мод климатической изменчивости, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые

в отдельных случаях способствуют усилению переноса CO_2 от поверхности в глубинные слои океана. Незначительное снижение поглотительной способности CO_2 океаном после 2015 года может быть обусловлено постепенным насыщением поверхностных вод CO_2 , увеличением кислотности океана (снижающей эффективность карбонатной буферной системы) и изменением (ростом) температурного режима, влияющего на растворимость CO_2 в морской воде.

Поглощение CO_2 сушей варьировало в более широких пределах – от 1.9 ± 0.9 ГтС/год (минимум в 2015 году) до 4.1 ± 0.9 ГтС/год (максимумы в 2011 и 2014 году). Резкие всплески поглощения CO_2 в 2011 и 2014 годах могут объясняться увеличением фотосинтетической продуктивности растительности тропических и умеренных широт вследствие благоприятных климатических условий (увеличение осадков в зоне влажных тропических лесов, таких как Амазония и бассейн Конго, оптимальными температурно-влажностными условиями в умеренных широтах Северной Евразии и Северной Америки, и др.), а также временным эффектом регенерации лесов после предыдущих периодов засух в различных регионах земного шара. Напротив, резкое падение поглощения в 2015 году (1.9 ± 0.9 ГтС/год) совпало по времени с сильным Эль-Ниньо, вызвавшим масштабные засухи в тропиках, повышение частоты и интенсивности лесных пожаров и снижение продуктивности тропических экосистем. В последующие годы (2017-2022) наблюдался восстановительный тренд, достигнув локального максимума в 2022 году (3.8 ± 0.8 ГтС/год), что может быть связано с восстановлением растительности после нарушений, вызванных влиянием климатических аномалий, ростом их продуктивности, а также увеличением площади лесов благодаря природоохранным мерам. Однако в 2023 году отмечается резкое снижение поглощения CO_2 сушей (2.3 ± 1.0 ГтС/год), что может быть обусловлено экстремальными климатическими и погодными событиями, такими как засухи в Северном полушарии и усиление антропогенного форсинга на природные экосистемы.

Различия в динамике поглощения CO_2 между сушей и океаном подчеркивают сложную зависимость углеродного цикла от климатической изменчивости и влияния антропогенных факторов. Океан, обладая большей инерционностью, демонстрирует более плавные изменения поглощения CO_2 , тогда как суша реагирует резкими колебаниями на климатические аномалии и изменения в структуре землепользования. Снижение эффективности поглощения CO_2 как океаном (из-за acidификации вод), так и сушей (из-за деградации природных экосистем) в долгосрочной перспективе может привести к уменьшению доли антропогенных выбросов, компенсируемой естественными поглотителями, что усилит темпы роста CO_2 в атмосфере и ускорит глобальное потепление.

На рис. 1 представлена диаграмма распределения запасов углерода в атмосфере, гидросфере, биосфере и литосфере, а также среднее (за период с 2014 по 2023 годы) изменение поглощения CO_2 сушей и океаном и накопление CO_2 в атмосфере вследствие их выбросов в атмосферу от антропогенных источников (Friedlingstein et al., 2025).

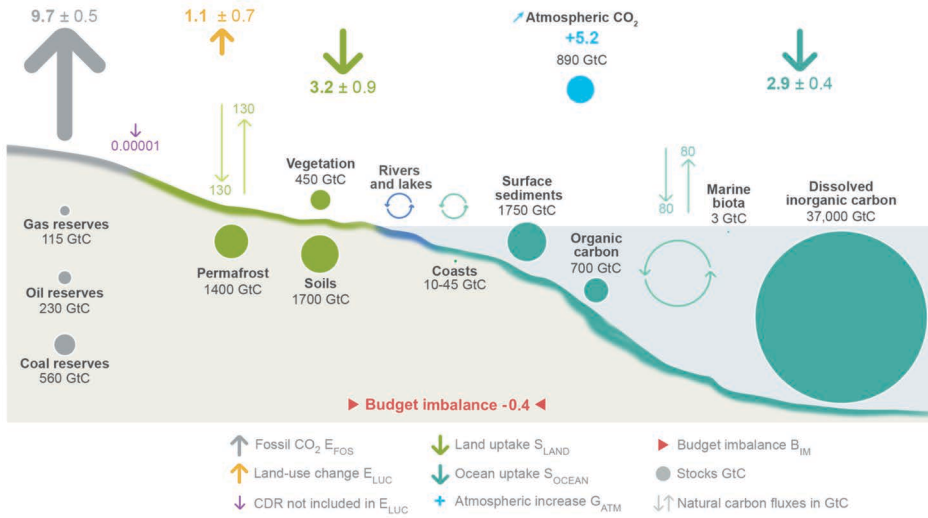


Рисунок 1. Диаграмма распределения запасов углерода в атмосфере, гидросфере, биосфере и литосфере, а также средних (за период с 2014 по 2023 годы) изменений поглощения CO_2 сушей и океаном (зеленые и голубые стрелки, соответственно) и накопление CO_2 в атмосфере вследствие выбросов CO_2 в атмосферу от антропогенных источников (серая стрелка). Потоки CO_2 обозначены стрелками. Компоненты бюджета CO_2 включают независимые оценки антропогенных выбросов CO_2 в результате (1) сжигания и окисления ископаемого топлива в процессе энергетических и промышленных процессов, включая производство цемента и карбонизацию (E_{FOS} ; $\text{GtC}/\text{год}$), и (2) антропогенной деятельности, приводящей к изменению структуры землепользования (E_{LUC} ; $\text{GtC}/\text{год}$), а также их распределение между накоплением CO_2 в атмосфере (G_{ATM} ; $\text{GtC}/\text{год}$) и поглощением CO_2 в (4) океане (S_{OCEAN} ; $\text{GtC}/\text{год}$) и (5) на суше (S_{LAND} ; $\text{GtC}/\text{год}$). Поглотители CO_2 , представленные на рисунке, концептуально включают реакцию суши (с учётом внутренних вод и эстуариев) и океана (включая окраинные моря) на повышенный уровень CO_2 , изменения климата и других условий окружающей среды. Потоки выражены в $\text{GtC}/\text{год}$, а резервуары углерода – в GtC (Friedlingstein et al., 2025)

Figure 1. Schematic representation illustrating the distribution of carbon stocks in the atmosphere, hydrosphere, biosphere, and lithosphere. It also shows the average changes in CO_2 absorption by land and ocean (green and blue arrows, respectively) from 2014 to 2023, as well as the accumulation of CO_2 in the atmosphere due to anthropogenic emissions (gray arrow)

CO_2 fluxes are indicated by arrows. The components of the CO_2 budget include independent estimates of anthropogenic CO_2 emissions resulting (1) from fossil fuel combustion and oxidation in all energy and industrial processes, including cement production and carbonation (E_{FOS} ; GtC/year) and (2) anthropogenic activities leading to changes in land use (E_{LUC} ; GtC/year). These components are distributed between CO_2 accumulation in the atmosphere (G_{ATM} ; GtC/year), CO_2 uptake by the ocean (S_{OCEAN} ; GtC/year), and CO_2 uptake by land (S_{LAND} ; GtC/year). The CO_2 sinks shown in the figure include the land's response (including inland waters and estuaries) and the ocean's response (including marginal seas) to elevated concentrations of CO_2 and other environmental conditions. Fluxes are expressed in GtC/year and carbon pools are shown in GtC (Friedlingstein et al., 2025)

В рамках проекта TRENDY (Trends and drivers of the regional scale terrestrial sources and sinks of carbon dioxide) было установлено, что разные биомы суши вносят неодинаковый вклад в результирующий глобальный поток CO_2 (Sitch et al., 2024). Исследования показали, что леса и полусасушливые земли играют сопоставимую роль в формировании среднего поглощения CO_2 из атмосферы и его долгосрочных изменений. При этом полусасушливые регионы по-прежнему остаются основным фактором межго-

довой изменчивости потоков CO_2 (Ahlström et al., 2015). Интересно, что, несмотря на максимальные значения валовой первичной продукции (Gross Primary Production – GPP) в тропиках, наибольшие показатели чистого экосистемного обмена (Net Ecosystem Exchange – NEE) между сушей и атмосферой наблюдаются во внетропических широтах. Межгодовые колебания углеродного цикла в значительной степени обусловлены внутренней климатической изменчивостью, включая влияние таких мод климатической изменчивости, как Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК, ENSO).

Для потоков CH_4 картина, иллюстрирующая изменение вклада различных природных экосистем в глобальный баланс CH_4 , выглядит еще более динамичной. В большинстве проведенных в последние десятилетия исследований отмечается значительный вклад природных источников, особенно водно-болотные угодий, в глобальный бюджет CH_4 . Динамика потоков CH_4 в природных экосистемах отличается крайне высокой чувствительностью к изменению климатических условий, что добавляет некоторую неопределенность в интегральные оценки. На протяжении последних десятилетий произошел серьезный пересмотр оценок общих глобальных потоков CH_4 , полученных с применением дистанционных методов и инверсионного моделирования, которые часто превышают оценки, сделанные ранними инвентаризационными подходами с применением наземных данных (Saunois et al., 2016, 2020). В частности, все больше экспериментальных данных свидетельствует о том, что тропические водно-болотные угодья являются более крупным источником CH_4 , чем считалось ранее, и их выбросы сильно реагируют на изменения температуры и осадков (Poulter et al., 2017; Zhang et al., 2017). Оценки с использованием биогеохимических моделей и инверсионного моделирования показывают, что водно-болотные угодья поглощают в среднем 160–200 Тг/год при средней скорости роста $\sim 0.5\text{--}1.5$ Тг/год (Saunois et al., 2020). Более того, все чаще признается потенциал выбросов CH_4 от ранее недостаточно изученных источников, таких как таяние многолетней мерзлоты в Арктике (термокарстовые озера, едомы, и др.) и прибрежные экосистемы, хотя их количественная оценка остается сложной задачей (Walter Anthony et al., 2012; Thornton et al., 2016; Rosentreter et al., 2021). Медленный рост эмиссии CH_4 отмечается и на поверхности океана при средних оценках выбросов около 10–20 Тг/год (Weber et al., 2019).

Недавние исследования темпов роста атмосферного CH_4 , начиная с 2007 года, с особенно резким скачком после 2019 года, стимулировали интенсивные исследования возможных природных источников выбросов CH_4 . Были выдвинуты несколько гипотез, связывающих это увеличение, например, с ростом его эмиссии от природных источников (как естественных водно-болотных угодий, так и сельского хозяйства/отходов) в тропиках, потенциально обусловленных климатическими обратными связями, наряду с выбросами ископаемого топлива (Nisbet et al., 2019; Feng et al., 2022; Lan et al., 2019, 2021).

На рис. 2 представлены примеры восстановления современных приземных потоков CO_2 и CH_4 для поверхности суши Земли методами инверсионного моделирования с использованием спутниковых данных для 2024 года, пред-

ставленных на платформе Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS. Полученные оценки потоков CO_2 включают эмиссию и поглощения CO_2 природными экосистемами, а также вклад в потоки CO_2 природных пожаров, без учета вклада в эмиссию выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива. Для потоков CH_4 оценки включают потоки CH_4 в природных экосистемах, пожары, сельскохозяйственное производство (выращивание риса) без учета вклада в общую эмиссию выбросов CH_4 от сжигания ископаемого топлива.

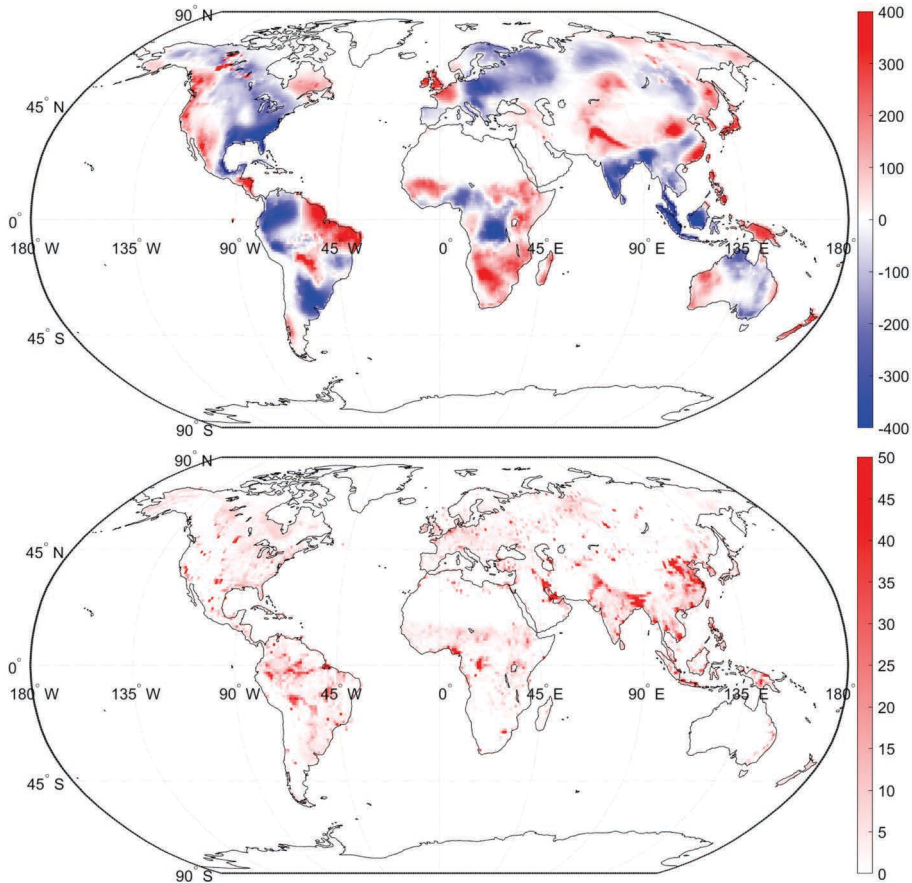


Рисунок 2. Оценка суммарных приземных потоков CO_2 ($\text{гC}/\text{м}^2/\text{год}$) и CH_4 ($\text{гCH}_4/\text{м}^2/\text{год}$) для поверхности суши в 2024 году, полученная методами инверсионного моделирования с использованием спутниковых данных на платформе Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS, [<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS+global+inversion-optimised+greenhouse+gas+fluxes+and+concentrations>]

Для потоков CO_2 оценки включают эмиссию и поглощение CO_2 природными экосистемами и вклад в потоки CO_2 природных пожаров. Потоки CH_4 оценивались как разность между общими потоками CH_4 у поверхности (природные и антропогенные) минус выбросы CH_4 от сжигания ископаемого топлива. Карты построены А.О. Масляшовой

Figure 2. The estimation of the total surface fluxes of CO_2 ($\text{g C}/\text{m}^2/\text{year}$) and CH_4 ($\text{g CH}_4/\text{m}^2/\text{year}$) for land surfaces in 2024 obtained by inversion modeling from satellite observations on the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) platform [<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS+global+inversion-optimised+greenhouse+gas+fluxes+and+concentrations>]
 CO_2 flux estimates include emissions and removals by natural ecosystems, as well as the contribution from wildfires. CH_4 fluxes were estimated as the difference between total CH_4 fluxes at the surface (natural and anthropogenic) and CH_4 emissions from fossil fuels. Maps were designed by A.O. Maslyashova

Пространственная изменчивость потоков CO_2 и CH_4 отличается крайней неоднородностью. Участками с наиболее устойчивым поглощением CO_2 в годовом балансе на протяжении последних лет остаются зоны распространения бореальных (без Восточной Сибири и юга Центральной Сибири), умеренных и тропических лесов (без востока Амазонии и восточных районов экваториальной Африки). Большая часть Западной Европы, Средняя Азия, юг Африки, запад Австралии имеют устойчивый положительный годовой баланс CO_2 (эмиссия CO_2 превышает его поглощение), выступая в качестве поглотителя CO_2 лишь на протяжении отдельных месяцев года.

Поверхность океана также отличается значительной пространственной неоднородностью потоков CO_2 . Расчеты, проведенные с использованием биогеохимических моделей, методов инверсионного моделирования и расчетных алгоритмов (Takahashi, et al., 2009; Iida, et al., 2021; Jin, et al., 2024), показывают, что поверхность океана вблизи экватора, а также в высоких широтах южного полушария является в годовом балансе достаточно устойчивым источником CO_2 для атмосферы, тогда как поверхность океана в средних широтах обоих полушарий и в высоких широтах северного полушария служит ярко выраженным стоком CO_2 из атмосферы (рис. 3).

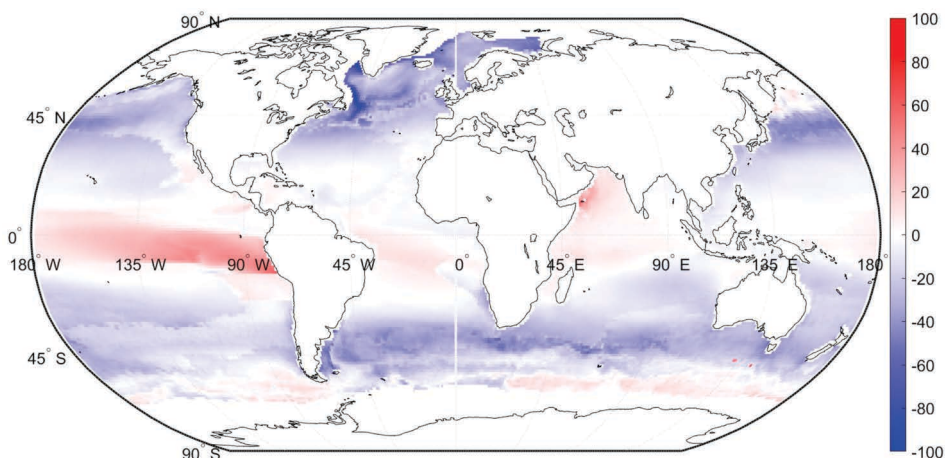


Рисунок 3. Оценка суммарного годового потока CO_2 ($\text{гC/м}^2\text{год}$) для поверхности мирового океана в 2023 году, полученная с использованием данных по концентрации растворенного CO_2 в воде (pCO_2), концентрации CO_2 в воздухе и скорости ветра у поверхности океана, для регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ (Iida, et al., 2021) и доступная на платформе Japan Meteorological Agency, JMA [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/english/co2_flux/co2_flux_data_en.html]. Карта построена А.О. Масляшовой

Figure 3. The estimation of the total annual CO_2 flux ($\text{g C/m}^2\text{/yr}$) for the global ocean surface in 2023 obtained using data on the concentration of dissolved CO_2 in water (pCO_2), the concentration of CO_2 in the air, and the wind speed at the ocean surface for a regular $1^\circ \times 1^\circ$ (Iida et al., 2021) grid, is available on the Japan Meteorological Agency (JMA) platform [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/english/co2_flux/co2_flux_data_en.html]. The map was designed by A.O. Maslyashova

3.2. Изменения оценок потоков парниковых газов для территории России

Обладая обширными территориями бореальных лесов, тундры и значительными запасами почвенного углерода в зоне многолетней мерзлоты, Рос-

сия играет ключевую роль в глобальном углеродном цикле. Исследования последних десятилетий показывают, что российские экосистемы демонстрируют значительную пространственно-временную изменчивость потоков CO_2 , обусловленную региональными климатическими условиями, антропогенным воздействием и особенностями землепользования. Бореальные леса, которые занимают около 70% лесного фонда России, служат устойчивым стоком CO_2 из атмосферы, однако их поглотительная способность варьирует в зависимости от возраста древостоев, наличия очагов пожаров и интенсивности лесохозяйственной деятельности, включая рубки (Швиденко и др., 2011; Schepaschenko et al., 2021).

Согласно данным Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990-2023 гг. (Романовская и др., 2025), поглощение CO_2 управляемыми лесами России превышало выбросы парниковых газов, то есть наблюдалось нетто-поглощение в диапазоне от 734.5 Мт CO_2 -экв. год⁻¹ (200.3 млн т С в год) в 1990 году до 1717 Мт CO_2 -экв. год⁻¹ (468.3 млн т С в год) в 2007 году. Одной из основных причин увеличения нетто-поглощения в этот период авторы доклада рассматривают двукратное снижение уровня лесопользования, имевшее место в 1990-х годах. После 2009 года наблюдается постепенное снижение нетто-поглощения CO_2 управляемыми лесами, что связано с увеличением объема лесопользования и площадей природных пожаров. В 2023 году чистое поглощение CO_2 управляемыми лесами составило 1074.9 Мт CO_2 -экв. год⁻¹ (293.2 Мт С в год). Эмиссия CO_2 от лесных пожаров составила 41.1 млн. т CO_2 (11.2 млн. т С в год). За тот же период при лесных пожарах в атмосферу попало и около 6.2 млн. т CH_4 (в CO_2 экв.). Эмиссия парниковых газов с водно-болотных угодий (торфоразработки) составила 3.65 млн. т CO_2 и 10.5 тыс. т CH_4 . Таким образом, в целом сектор ЗИЗЛХ (землепользование, изменения землепользования и лесное хозяйство) в 2023 году компенсировал 56.3% суммарных антропогенных выбросов от секторов «Энергетика», «Промышленные процессы», «Сельское хозяйство» и «Отходы».

По данным инверсионного моделирования и наземных измерений, средний сток CO_2 в лесах России оценивается в диапазоне 0.5-1.0 ГтС/год, но в отдельные годы (например, после масштабных пожаров или засух) он может снижаться или даже сменяться эмиссией (Барталев и др. 2017; Dolman et al., 2012). Особое внимание в последние годы уделяется Сибири и Дальнему Востоку, где сочетание интенсивной лесохозяйственной деятельности, пожаров и таяния мерзлоты создает сложную пространственную и временную изменчивость углеродного баланса (Koven et al., 2011; Schuur et al., 2015; Jin, Ma, 2021) (рис. 4). В зоне многолетней мерзлоты, занимающей около 65% территории России, наблюдаются активные процессы ее деградации, приводящие к выбросам CO_2 и CH_4 , что может существенно повлиять на национальный и глобальный углеродный бюджет в долгосрочной перспективе (Schuur et al., 2015). Заболоченные области Западной Сибири, являясь крупнейшим в мире источником природного CH_4 (до 20-30 Тг/год), демонстрируют значительную

сезонную и межгодовую изменчивость, связанную, главным образом, с особенностями гидрологического режима (Glagolev et al., 2011; Janardanan et al., 2020) (рис. 4).

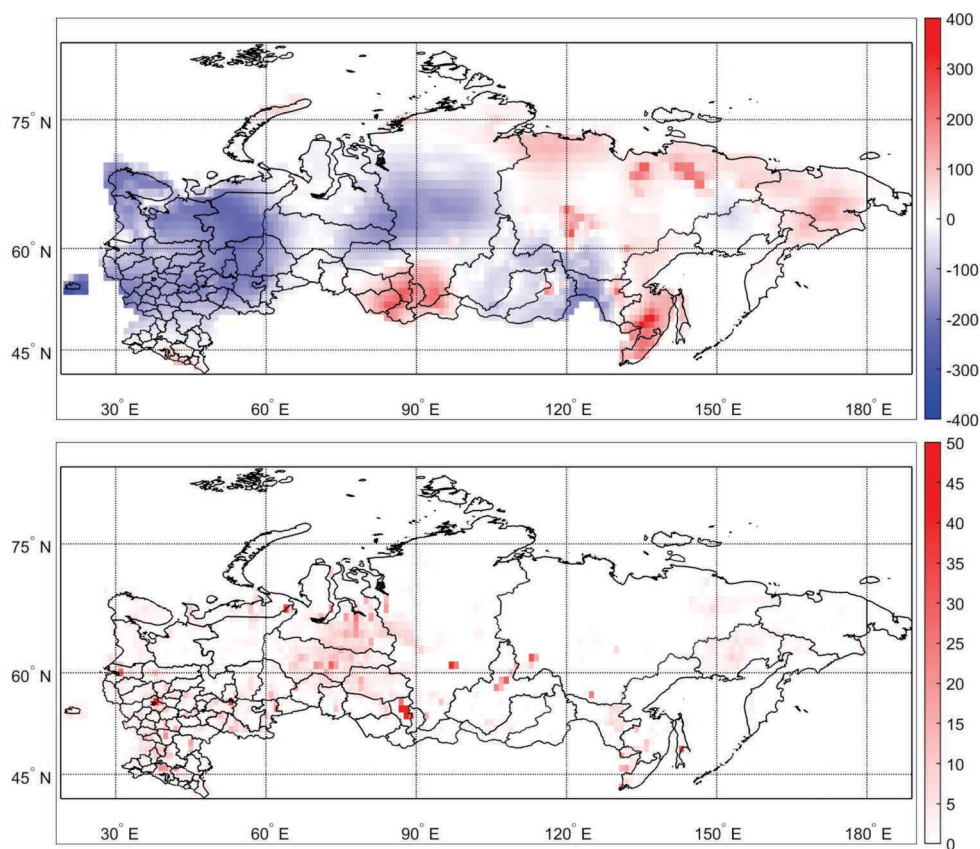


Рисунок 4. Оценка суммарных приземных потоков CO_2 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{год}$) и CH_4 ($\text{gCH}_4/\text{m}^2/\text{год}$) для территории России в 2024 году, полученная методами инверсионного моделирования с использованием спутниковых данных на платформе Copernicus Atmosphere Monitoring Service, CAMS [<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS+global+inversion-optimised+greenhouse+gas+fluxes+and+concentrations>]

Для потоков CO_2 оценки включают эмиссию и поглощение CO_2 природными экосистемами и вклад в потоки CO_2 природных пожаров. Потоки CH_4 оценивались как разность между интегральными потоками CH_4 у поверхности (природные и антропогенные) и выбросами CH_4 от сжигания ископаемого топлива. Карты построены А.О. Масляшовой

Figure 4. The estimation of total ground-level CO_2 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{year}$) and CH_4 ($\text{gCH}_4/\text{m}^2/\text{year}$) fluxes for Russia in 2024 obtained by inversion modeling from satellite observations, is available on the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) platform [<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS+global+inversion-optimised+greenhouse+gas+fluxes+and+concentrations>]. CO_2 flux estimates include emissions and absorption by natural ecosystems, as well as contributions from natural fires. CH_4 fluxes were estimated as the difference between total CH_4 fluxes at the surface (natural and anthropogenic) and CH_4 emissions from fossil fuels. Maps were designed by A.O. Maslyashova

Сельскохозяйственные земли и заброшенные пашни (залежи) также вносят существенный вклад в углеродный баланс России. В южных регионах

(например, в Черноземье) имеется высокий потенциал для секвестрации углерода при переходе на устойчивые методы землепользования (Kurganova et al., 2014), тогда как в нечерноземной зоне эмиссия CO_2 из почв может усиливаться из-за деградации земель. Дренаживание болот под сельхозугодья ведет к усилению эмиссии CO_2 (до 2-5 тС/га/год) (Sirin et al., 2021).

Вклад крупных промышленных центров и городских агломераций (например, Кузбасс, Москва, Норильск) в выбросы CO_2 и CH_4 требует дальнейшего уточнения, однако можно с уверенностью утверждать, что для большинства урбанизированных территорий и промышленных центров антропогенные выбросы CO_2 значительно превышают поглотительную способность локальных природных экосистем. Непростая ситуация также складывается в районах нефтегазовых месторождений (ХМАО, Ямал) где природные экосистемы также не всегда способны компенсировать локальные антропогенные выбросы парниковых газов (Kort et al., 2012; Pandey et al., 2019). Особую тревогу вызывает широкое распространение природных пожаров, которые приводят не только к нарушению растительного покрова, но и к значительным дополнительным выбросам CO_2 и CH_4 в атмосферу, превращая экосистемы и целые регионы из поглотителей парниковых газов в их источники (рис. 4).

В оценках потоков CO_2 и CH_4 в России сохраняется некоторая неопределенность, прежде всего, связанная с ограниченностью данных наземных наблюдений (концентрации и потоки парниковых газов). Наиболее сложная ситуация с экспериментальными данными сложилась в труднодоступных регионах Сибири и в Арктике. Развитие национальной сети мониторинга (например, проект "Карбоновые полигоны" и ВИП ГЗ "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ"), а также активная интеграция спутниковых данных (MODIS, OCO-2, Sentinel) с современными биогеохимическими моделями (например, TerM, VISIT и ORCHIDEE) позволят снизить эти неопределенности и улучшить качество прогнозов (Куричева и др., 2023; Olchev, Gulev, 2024; Гулев, Ольчев, 2025).

3.3. Проблемы интеграции разных методов для оценки потоков парниковых газов и сопоставление оценок, выполненных инверсионными и инвентаризационными методами

При анализе динамики поглощения CO_2 и CH_4 поверхностью суши и океана необходимо учитывать различия и погрешности оценок, возникающие при использовании разных методов расчета глобальных и региональных потоков. В качестве примера можно сравнить оценки потоков основных парниковых газов, полученных двумя ключевыми подходами: инвентаризационным (снизу-вверх) и методом инверсионного моделирования (сверху-вниз).

Для потоков CO_2 инверсионные модели обычно оценивают чистый обмен CO_2 между наземными экосистемами и атмосферой, включая как антропогенные, так и естественные процессы. Корректировка потоков с использованием априорных данных об антропогенных выбросах позволяет оценить потоки CO_2 исключительно от природных экосистем. Однако национальные кадастры парниковых газов (НКПГ) учитывают только потоки CO_2

на управляемых землях, что требует корректировки данных инверсионного моделирования для проведения корректного сравнения. Для решения данной задачи Денг с соавт. (Deng et al., 2025) использовал уточненные данные о границах управляемых земель для России, Канады и Бразилии, что позволило приблизить инверсионные оценки к данным НКПГ. Например, в России инверсионные модели показали больший сток CO_2 (490 ± 100 Тг С/год), чем НКПГ (180 ± 10 Тг С/год), что может быть связано с недоучетом поглощения CO_2 лесами в национальных отчетах. В Канаде разница между инверсионными оценками (130 ± 50 Тг С/год) и НКПГ (5 ± 4 Тг С/год) объясняется исключением пожаров и последующего восстановления лесов из кадастров. Оценки потоков CO_2 для Бразилии показывают хорошее согласование данных национального кадастра и инверсионного моделирования. Однако оба подхода при этом показывают, что в отличие от России и Канады Бразилия на протяжении последних десятилетий служит источником CO_2 для атмосферы. При этом, оценки, выполненные с использованием инверсионного моделирования, указывают на более высокие выбросы CO_2 , особенно в периоды засух и пожаров (например, в 2015-2016 гг.).

Для сравнения с НКПГ данные инверсионного моделирования корректировались также на латеральные потоки углерода, такие как речной сток, а также принимали во внимание данные о вывозе сельскохозяйственной и древесной продукции из исследуемых регионов. Эти поправки обычно уменьшают оценки поглощения CO_2 , особенно в странах-экспортерах (США, Канада, Китай). Например, в Китае поправка составила 48 Тг С/год (20% от общего потока), а в Бразилии — 145 Тг С/год (60%). Несмотря на это, в умеренных широтах инверсионные модели подтверждают значительный сток CO_2 , что согласуется с НКПГ в ЕС и США, но не в России и Канаде.

Для CH_4 инверсионные модели разделяют антропогенные (ископаемое топливо, сельское хозяйство, отходы) и естественные (болота, пожары) источники. В странах БРИКС (Китай, Индия, Бразилия) наблюдается быстрый рост антропогенных выбросов CH_4 , что подтверждается как инверсионными моделями, так и НКПГ. Однако в Индии инверсионные подходы указывают на выбросы CH_4 на 50% выше, чем в НКПГ, что может быть связано с недооценкой в кадастрах выбросов CH_4 от животноводства и отходов. В нефтедобывающих регионах (Персидский залив, Россия) инверсии показывают значительно более высокие выбросы CH_4 от ископаемого топлива, чем НКПГ, что объясняется недоучетом экстремальных разовых выбросов CH_4 (кратковременных, но интенсивных утечек). Например, в странах Персидского залива инверсии оценивают выбросы в 8-9 раз выше, чем НКПГ. Использование разных априорных данных (EDGAR и GAINS) также влияет на результаты инверсионных оценок: для территории России оценки с использованием GAINS на 45-75% выше, чем с EDGAR.

Для N_2O основным источником выбросов является сельское хозяйство, особенно в тропических странах. Инверсионные модели, исключая естественные выбросы (например, из рек), показывают более высокие антропогенные выбросы, чем НКПГ, в Бразилии, Индии и Индонезии. Это связано с исполь-

зованием в НКПГ упрощенных коэффициентов эмиссии N_2O , не учитывающих региональные особенности. В США и ЕС различия между методами меньше, но в ЕС инверсии указывают на менее выраженную тенденцию к снижению выбросов, чем НКПГ.

Таким образом, сравнение инверсионных и инвентаризационных методов выявляет значительные расхождения в оценках, особенно для потоков CH_4 в нефтегазовом секторе и для потоков N_2O в тропиках. Инверсии предоставляют независимую проверку НКПГ и подчеркивают необходимость учета всех источников парниковых газов, включая экстремальные разовые выбросы и естественные процессы. Для улучшения согласованности оценок потоков разными методами требуется уточнение определения управляемых земель в НКПГ, включение данных спутниковых наблюдений (например, GOSAT, OCO-2) для улучшения пространственного покрытия, а также развитие региональных сетей мониторинга потоков, особенно в тропиках и нефтедобывающих регионах.

3.4. Сценарии будущих изменений потоков парниковых газов в региональном и глобальном масштабе

Прогнозирование эмиссии и поглощения парниковых газов поверхностью суши и океана представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных задач в исследованиях будущих глобальных и региональных климатических изменений. Точные оценки потоков CO_2 , CH_4 и других парниковых газов в условиях будущего климата критически важны для понимания динамики климатической системы, разработки адаптационных мер и формирования эффективных стратегий смягчения последствий антропогенного воздействия для климатической системы. Современные климатические модели демонстрируют значительный разброс прогнозных значений изменений потоков парниковых газов в XXI веке в зависимости от выбранного сценария социально-экономического развития и климатической политики. Наиболее оптимистичные сценарии, такие как SSP1-1.9 (Shared Socioeconomic Pathways) и RCP2.6 (Representative Concentration Pathways), предполагают строгое соблюдение Парижского соглашения по климату и достижение углеродной нейтральности к середине XXI века, что приведет к стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере. В то же время пессимистичные сценарии (SSP5-8.5, RCP8.5), учитывающие сохранение высоких уровней антропогенных выбросов, прогнозируют резкое увеличение эмиссии парниковых газов и усиление парникового эффекта с катастрофическими последствиями для климатической системы (Canadell et al., 2021; Friedlingstein et al., 2025).

Надежное прогнозирование возможных изменений потоков парниковых газов в будущем значительно осложняется комплексным воздействием множества взаимосвязанных факторов, которые прямо или косвенно влияют на углеродный баланс и его составляющие. Растительный покров суши выступает ключевым компонентом углеродного цикла, поглощая CO_2 в процессе фотосинтеза и выделяя его при автотрофном дыхании и разложении био-

массы. Изменение продуктивности экосистем под влиянием климатических факторов (температуры, осадков, концентрации CO_2) может как усиливать, так и ослаблять поглощение парниковых газов. Увеличение частоты и интенсивности лесных пожаров или усыхание водно-болотных угодий при потеплении и усилении засушливости способны трансформировать природные экосистемы, превратив их из поглотителей в источники парниковых газов. Океан поглощает около 25-30% антропогенных выбросов CO_2 , но его способность как поглотителя снижается из-за закисления вод, вызванного растворением CO_2 . Это негативно влияет на морские экосистемы, особенно на организмы с кальциевыми скелетами (кораллы, моллюски, планктон). Изменение циркуляции океанских вод и температурного режима может привести к дестабилизации гидратов метана на шельфе, что потенциально может спровоцировать дополнительные выбросы CH_4 в атмосферу. Изменения в структуре землепользования (вырубка лесов, урбанизация, расширение сельскохозяйственного производства) существенно влияют на способность экосистем к секвестрации углерода. Технологические инновации и политика декарбонизации (широкое использование возобновляемых источников энергии, внедрение технологий улавливания и захоронения углерода) способны также значительно скорректировать прогнозы эмиссии и поглощения парниковых газов.

Рассмотрим более подробно влияние изменения климата на потоки CO_2 для природных экосистем суши при разных сценариях его будущих изменений. При сценарии SSP1-1.9, соответствующем строгой климатической политике, результаты модельных экспериментов предсказывают стабилизацию наземного стока CO_2 на уровне 2.5-3.5 Гт С/год благодаря стратегии сохранения и восстановления лесов, а также устойчивому землепользованию. В то же время для экстремального сценария SSP5-8.5, предполагающего высокие уровни выбросов, прогнозируется значительное ослабление поглотительной способности природных экосистем. По оценкам (Schwalm et al., 2020) наземный сток CO_2 к 2100 году может снизиться до 0.5-1.5 Гт С/год, а в некоторых регионах – поглощение CO_2 может смениться эмиссией CO_2 , главным образом, из-за увеличения повторяемости и интенсивности атмосферных и почвенных засух, деградации лесов и таяния многолетней мерзлоты.

Тропические леса на фоне климатических изменений будут оставаться критически важным компонентом глобального углеродного цикла, однако их устойчивость может сильно измениться в зависимости от региональных условий. К наиболее уязвимым регионам тропических широт можно отнести бассейн Амазонки в Южной Америке, где комбинированное воздействие обезлесения и климатических факторов может привести к значительному снижению поглощения CO_2 . Согласно существующим прогнозным оценкам, при реализации сценария SSP5-8.5, характеризующегося высокими выбросами парниковых газов и интенсивным землепользованием, поглощение CO_2 амазонскими лесами может сократиться на 30-50%. Это связано не только с прямым уничтожением лесного покрова, но и с усилением рисков гибели древостоев под воздействием учащающихся засух, роста температуры и высокой повторяемости природных пожаров. Последние исследования (Yao et al.,

2024) свидетельствуют о том, что усиление аридизации уже сейчас провоцирует переходы отдельных регионов из поглотителей в источники CO_2 для атмосферы. Если существующие тенденции сохранятся, значительная часть этого биома может стать чистым эмитентом CO_2 уже к середине века, что окажет катастрофическое влияние на глобальный климат.

В отличие от Амазонки, тропические леса Африки демонстрируют более высокую устойчивость к климатическим изменениям, что, вероятно, связано с их адаптацией к более изменчивым условиям увлажнения. Однако их углеродный баланс также подвержен возрастающим рискам, главным образом, из-за изменений в режиме осадков. Как показывают исследования (Burgin et al., 2025), сокращение количества осадков или увеличение продолжительности засушливых сезонов может привести к снижению продуктивности лесов и уменьшению их секвестрационного потенциала. Особую тревогу вызывает возможное нарушение баланса между GPP и дыханием экосистем, что в долгосрочной перспективе способно трансформировать африканские тропические леса из стабильного поглотителя CO_2 в его слабый источник.

Влияние изменений климата на бореальные экосистемы (Северная Евразия, Канада) осуществляется через сложную систему прямых и обратных связей, которые зачастую могут привести к разнонаправленным тенденциям в изменении структуры углеродного баланса. С одной стороны, повышение концентрации CO_2 в атмосфере и удлинение вегетационного периода способствуют росту GPP растительных сообществ за счет как увеличения атмосферной концентрации CO_2 (fertilization effect) (Schimel et al., 2015) и температуры, так и роста продолжительности периода активной вегетации растений. Оба эти фактора могут привести к увеличению секвестрации углерода в почве, особенно в высоких широтах, где температурные ограничения традиционно являются лимитирующим фактором роста растений. Однако, с другой стороны, климатические изменения могут вызвать и ряд дестабилизирующих процессов в природных экосистемах, способных не только нивелировать потенциальный прирост углеродных запасов на фоне роста температуры и продолжительности вегетационного периода, но и привести к их значительным потерям.

К числу наиболее существенных угроз для бореальных лесов относятся прогнозируемое увеличение рисков лесных пожаров, деградация многолетней мерзлоты, а также вспышки численности насекомых-вредителей. Лесные пожары не только вызывают значительные прямые выбросы больших объемов CO_2 в атмосферу, но и снижают эвапотранспирацию и альбедо поверхности, что способствует повышению приземной температуры воздуха (Kirsanov et al., 2020). Таяние многолетней мерзлоты, в свою очередь, высвобождает ранее законсервированный органический углерод, способствуя его разложению и эмиссии в виде CO_2 и CH_4 (Natali et al., 2021). Кроме того, потепление климата создает благоприятные условия для распространения фитопатогенов и насекомых-ксилофагов, таких как короеды, что приводит к масштабной гибели лесов и дополнительным выбросам CO_2 в атмосферу.

Согласно результатам модельных экспериментов, представленным в исследовании МакГир и др. (McGuire et al., 2018), при сценарии RCP4.5 (умеренно-жесткий сценарий) к 2100 году бореальные леса могут потерять от 20 до 40% своих текущих углеродных запасов. Наиболее уязвимыми оказываются регионы со сплошным распространением многолетней мерзлоты, где сочетание термокарстовых процессов, повышенной пожарной активности и деградации лесных массивов создает положительную обратную связь, ускоряющую дальнейшее высвобождение CO_2 в атмосферу.

Широколиственные леса умеренных широт и субтропические леса Северного полушария при сохранении текущих темпов глобального потепления в рамках умеренного климатического сценария (SSP2-4.5) сохраняют свою роль стабильных поглотителей атмосферного CO_2 (Wei, Xia, 2024). Однако экстремальные климатические события, такие как волны жары и засухи, могут существенно нарушить углеродный баланс этих экосистем. Например, аномальная жара и засуха в Европе в 2003 году привели к снижению GPP на 30% по сравнению со средними многолетними значениями, что превратило многие лесные экосистемы региона из поглотителя в источник CO_2 для атмосферы. В результате этой погодной аномалии в атмосферу было дополнительно выброшено около 0.5 ГтС, что эквивалентно нетто-поглощению CO_2 всех лесных экосистем Европы на протяжении предыдущего 4-летнего периода (Ciais et al., 2005).

Аналогичные последствия наблюдались в Европе во время волн жары 2022 года – одних из самых сильных за всю историю метеорологических наблюдений. Исследования показали, что экстремально высокие температуры и дефицит влаги привели к снижению поглощения CO_2 лесами Европы на 18-24% в течение летних месяцев по сравнению с обычными условиями (van der Woude et al., 2023). В наиболее пострадавших регионах, таких как Средиземноморье и Центральная Европа, наблюдалось ускоренное опадание листвы и гибель деревьев, что усилило эмиссию CO_2 в атмосферу. Таким образом, хотя умеренные леса в долгосрочной перспективе и могут взять на себя ключевую роль в поглощении CO_2 из атмосферы, повторяющиеся климатические аномалии могут не только привести к временному снижению их продуктивности, но также и провоцировать долговременные изменения в структуре лесных экосистем, уменьшая их способность выполнять функции по смягчению изменений климата.

Отдельно необходимо рассмотреть влияние прогнозируемых изменений климата на районы распространения многолетней мерзлоты, включая тундровые, лесотундровые и лесные ландшафты. Данные районы обладают значительными запасами почвенного углерода (1460-1600 ГтС), запасы которого по меньшей мере вдвое превышают запасы углерода в атмосфере (Koven et., 2011; Turetsky et al., 2020). По оценкам (Schuur et al., 2022), таяние многолетней мерзлоты при различных сценариях RCP (Representative Concentration Pathway) к 2100 году может привести к высвобождению 37-149 ГтС в виде CO_2 и 1.1-5.0 ГтС в виде CH_4 , что будет оказывать влияние на глобальный климат на протяжении нескольких столетий.

Особую опасность представляют термокарстовые озера, которые в первые десятилетия после образования становятся активным источником CH_4 . Многочисленные дискуссии о внезапном катастрофическом выбросе CH_4 в течение одного или нескольких лет пока не подтверждаются текущими наблюдениями или прогнозами (Schuur et al., 2022). В то же время недавнее появление метановых кратеров с повышенными концентрациями CH_4 является напоминанием о том, что арктический углеродный цикл требует особого внимания и дополнительных исследований (Walter Anthony et al., 2012).

Изменение потоков парниковых газов в водно-болотных угодьях при разных сценариях изменений климата будут определяться не только их географическим положением и локальными климатическими условиями, но также и местными ландшафтными особенностями, характером водно-минерального питания болот, и др. В полярных широтах потепление может на первом этапе привести к усилению поглощения CO_2 болотами из-за удлинения вегетационного периода и роста GPP растительности, однако в дальнейшем увеличение эмиссии CO_2 от более быстрого разложения органики может привести к снижению нетто поглощения CO_2 и даже переходу от поглощения к эмиссии CO_2 в атмосферу (Loisel et al., 2021). Выбросы CH_4 будут возрастать из-за таяния многолетней мерзлоты и повышения уровня грунтовых вод (Кнох et al., 2020). В болотных экосистемах умеренных широт сток CO_2 будет снижаться из-за увеличения повторяемости летних засух, хотя в некоторых районах при оптимальных условиях увлажнения на фоне роста температуры может наблюдаться и усиление поглощения CO_2 (IPCC, 2023). Выбросы CH_4 будут увеличиваться в более влажных регионах, но сокращаться в более засушливых (Turetsky et al., 2014). Чистый сток углерода останется стабильным или незначительно уменьшится (~0-10%) при сценарии RCP4.5, но снизится на 10-30% при RCP8.5 (Loisel et al., 2021). Тропические водно-болотные угодья (Юго-Восточная Азия, Амазония) так же, как и полярные болота, оказываются сильно уязвимыми к изменению внешних условий: осушение и пожары могут превратить их из стоков в источники CO_2 для атмосферы, особенно при сценарии RCP8.5 (Hapsari et al., 2022). Выбросы CH_4 будут расти с увеличением осадков, но сокращаться при засухах (Sjögersten et al., 2014). Чистый сток может снизиться на 20-40% при умеренном сценарии будущих изменений климата и на 50-100% — при наиболее экстремальном сценарии RCP8.5/SSP5-8.5 (IPCC, 2023).

Рассмотрим возможное влияние процессов обезлесения и облесения на потоки парниковых газов в XXI веке, обусловленное как климатическими изменениями, так и изменением антропогенной нагрузки на природные экосистемы. Современные темпы обезлесения за последние десятилетия внесли дополнительный вклад в эмиссию CO_2 с поверхности суши на уровне 0.76 ГтС/год (Harris et al., 2021). Наиболее высокие темпы обезлесения наблюдаются в тропических лесах Южной Америки и Юго-Восточной Азии (~10-20% глобальных антропогенных выбросов CO_2) (Houghton et al., 2012). При сохранении современных темпов обезлесения дополнительные выбросы парниковых газов в атмосферу в зависимости от климатического сценария

могут существенно возрасти (RCP8.5/SSP5-8.5). Однако при реализации жесткой природоохранной политики в будущем (SSP1-1.9) этот вклад может быть и существенно уменьшен. Вырубка лесов на территориях с избыточным увлажнением (бореальные и тропические леса) может также привести к заболачиванию территорий (на фоне уменьшения эвапотранспирации и снижения инфильтрации почвенной влаги) и усилению процессов метаногенеза (Guo, Gifford, 2002; Swails et al., 2024). Сокращение темпов вырубки и активное лесовосстановление, наоборот, будет способствовать стабилизации углеродного баланса (Pan et al., 2011; Griscom et al., 2017).

Лесные пожары, как уже отмечалось, выступают в качестве важного фактора, влияющего на углеродный баланс суши в условиях климатических изменений. По прогнозных оценкам, число экстремальных пожаров может вырасти до 15% к 2030 году, 30% – к концу 2050 года и 50% – к концу столетия. Увеличение частоты и интенсивности пожаров в полярных широтах (например, Аляска, Сибирь, Канада) будет отмечаться особенно сильно при экстремальных климатических сценариях (например, RCP8.5/SSP5-8.5). Это может вести к значительным выбросам CO_2 и CH_4 при горении богатых углеродом торфяников и таянии многолетней мерзлоты. После пожаров лесные экосистемы на несколько десятилетий превращаются из поглотителей в источники CO_2 для атмосферы (Jones et al., 2022). Постпожарная деградация мерзлоты приводит также к увеличению выбросов CH_4 из-за анаэробного разложения почвенной органики (Witze, 2020; Natali et al., 2021). В умеренных широтах (например, запад США, Средиземноморье) пожары также приведут к краткосрочному усилению эмиссии CO_2 и CH_4 . Однако дальнейшее восстановление растительности может частично компенсировать выбросы CO_2 в течение последующих десятилетий. Усиление засухливости приведет к уменьшению влажности почвы, снижая эмиссионные потоки CH_4 (van der Werf et al., 2017). В том же исследовании также отмечается, что увеличение частоты и интенсивности лесных пожаров на фоне роста засухливости при сценариях с высоким уровнем выбросов (например, RCP8.5) в тропических регионах (например, Амазония, Индонезия) приведут к значительному дополнительному выбросу CO_2 в атмосферу. Изменения структуры землепользования после пожаров (например, смена лесов саванной) может, в свою очередь, существенно снизить секвестрационный потенциал региона (Brando et al., 2020).

Океан в настоящее время поглощает около 25% антропогенного CO_2 (~2.5 млрд тонн С в год), играя значительную роль в глобальном углеродном цикле. В большинстве современных исследований прогнозируется замедление поглощения CO_2 океаном в XXI веке на фоне климатических изменений и увеличения антропогенной нагрузки. Движущие механизмы и темпы этих изменений пока остаются неопределенными, ограничивая способность разработки достоверных прогнозов изменения климата на долгосрочную перспективу. Ослабление способности океана к поглощению CO_2 из атмосферы связывается с ростом температуры океана, изменениями в стратификации и щелочности, снижением pH и содержания кислорода в

поверхностных водах. Согласно модельным расчетам для сценария RCP8.5, при сохранении высокой неопределенности прогноза поглотительная способность океана для CO_2 может снизиться к 2100 году на 30-50% (Vorp et al., 2013; Chikamoto et al., 2023). Велики и региональные различия в потоках парниковых газов. Так, в Северной Атлантике поглощение CO_2 может ослабнуть и из-за снижения меридиональной циркуляции (модели CMIP6), тогда как в Южном океане на фоне роста выбросов CO_2 первичная продуктивность в течение XXI века может, наоборот, вырасти до 40% за счет роста поглощения морским фитопланктоном (Fisher et al., 2025). В тропических широтах глобальное потепление усилит стратификацию вод и приведет к уменьшению вертикального перемешивания и снижению поглощения CO_2 (IPCC, 2023). Кроме того, во всех прогнозных оценках надо учитывать, что подкисление океана (снижение pH на 0.3-0.5 единиц при SSP5-8.5) нарушает жизнедеятельность кальцифицирующих организмов, что сокращает биологический экспорт углерода (Planchat et al., 2024). Таким образом, многообразие оценок и сложность прямых и обратных связей в системе океан-атмосфера делает прогнозные оценки изменений поглотительной способности CO_2 и эмиссии CH_4 с поверхности океана в высокой степени неопределенными.

3.5. Предложения по дальнейшему развитию системы мониторинга потоков парниковых газов в региональном и глобальном масштабе

Современные вызовы, связанные с изменением климата, требуют совершенствования систем наземного и спутникового мониторинга потоков парниковых газов и, прежде всего, CO_2 и CH_4 . На основе анализа существующих методов и их ограничений, можно сформулировать следующие рекомендации для дальнейшего развития мониторинговых систем потоков парниковых газов на региональном и глобальном уровнях:

- расширение наземных наблюдательных сетей за потоками парниковых газов и комплексная интеграция экспериментальных данных;
- совершенствование спутниковых технологий;
- более тщательный мониторинг критических регионов и экосистем;
- развитие модельных подходов и методов машинного обучения;
- улучшение координации исследований на национальном и международном уровне и стандартизация используемых методов;
- открытость получаемых данных;
- развитие методов краткосрочного и долгосрочного климатического прогнозирования с целью выбора оптимальных стратегий адаптации и смягчения последствий изменения климата.

Задача по расширению наземных и океанических сетей наблюдений за потоками и концентрациями парниковых газов важна, главным образом, для снижения существующей неопределенности в региональных и глобальных оценках потоков парниковых газов. Особое внимание следует уделить созданию станций наблюдений в пока слабо исследованных регионах (Сибирь, Арктика, Амазония, Африка). Развитие морских наблюдательных систем может включать создание буйковых станций и судовые измерения. Эффектив-

ную помощь в подобных исследованиях может оказать применение новых технологических решений (например, использование беспилотных летательных и подводных аппаратов для сбора данных в удалённых регионах с экстремальными условиями). Объединение данных из различных источников (наземные станции, спутники, модели) в единые базы данных, подобные Global Carbon Budget, позволит улучшить согласованность оценок и снизить погрешности.

Совершенствование спутниковых технологий предполагает запуск специализированных спутников с улучшенным разрешением и чувствительностью, таких как CO2M, для лучшего пространственного покрытия и диагностики точечных источников CH_4 и CO_2 . Развитие геостационарных спутников (например, GeoCARB) перспективно для непрерывного мониторинга ключевых регионов. Новые данные предполагают развитие и совершенствование алгоритмов обработки данных для учёта влияния облачности, атмосферных аэрозолей и вертикальной неоднородности атмосферы.

Некоторые наиболее уязвимые экосистемы суши и океана, такие как зоны многолетней мерзлоты, тропические леса и водно-болотные угодья, требуют особого внимания при исследовании потоков парниковых газов. Данная задача может решаться путем создания специализированных мониторинговых программ для оценки выбросов CO_2 и CH_4 из термокарстовых озёр и деградирующих болот. Необходимо развивать программы регулярных авиационных и спутниковых наблюдений за пожарами в бореальных и тропических лесах для учёта их вклада в углеродный баланс. Важно продолжать мониторинг океанических процессов, таких как закисление и изменение стратификации вод, влияющих на поглощение CO_2 из атмосферы.

Моделирование остаётся критически важным инструментом для определения и прогнозирования потоков парниковых газов над сушей и океаном. В качестве приоритетных направлений можно рассматривать разработку гибридных моделей, сочетающих инверсионное моделирование и процесс-ориентированные подходы для повышения точности оценок. Кроме того, перспективным остается внедрение методов машинного обучения для анализа больших объёмов данных и выявления существующих сложных нелинейных зависимостей между потоками парниковых газов, состоянием и функциональными характеристиками природных экосистем и атмосферными условиями. Калибровка разрабатываемых моделей может проводиться с использованием дистанционных данных высокого разрешения, например, с применением лидаров, гипер- и мультиспектральной съёмки в видимом и ИК диапазоне.

Координация деятельности государств в рамках реализации климатической повестки предполагает стандартизацию методов наблюдений и прогнозирования потоков парниковых газов. Требуется создание единых протоколов для мониторинга и подготовки отчётности, например, в рамках Парижского соглашения. Необходима дальнейшая поддержка международных инициатив, таких как Global Carbon Project, для координации исследований климата, глобального углеродного баланса и потоков парниковых газов, а также сохране-

ние открытости при обмене данными. Требуется поддержка развивающихся стран в создании национальных систем мониторинга, включая обучение специалистов и предоставление технологий.

Все данные, получаемые в ходе мониторинговых наблюдений, должны быть открыты и доступны для проведения комплексных климатических исследований, включая как данные наземных и спутниковых наблюдений, так и результаты модельных расчетов.

Необходимо дальнейшее развитие методов краткосрочного и долгосрочного прогнозирования климата для выбора оптимальной стратегии по адаптации и смягчению последствий изменения климата. Для долгосрочного планирования важна разработка сценариев изменения потоков парниковых газов с учётом климатических и антропогенных факторов, а также оценка устойчивости природных поглотителей парниковых газов, таких как леса и океаны, в условиях глобального потепления.

Таким образом, совершенствование системы мониторинга потоков парниковых газов требует комплексного подхода, включающего технологические инновации, международное сотрудничество и интеграцию данных. Реализация этих рекомендаций позволит снизить неопределённости в прогнозных оценках, увеличить точность прогнозирования климатических изменений и повысить эффективность мер по смягчению последствий глобальных климатических изменений.

Заключение

Анализируя динамику изменений оценок CO_2 и CH_4 обмена между поверхностью суши и океана с атмосферой в XXI веке, можно отметить ее заметную трансформацию. Ранние исследования, обобщенные в Третьем оценочном докладе МГЭИК (TAR) и основывавшиеся в основном на ограниченных данных об углеродном балансе и потоках парниковых газов, а также на применении относительно упрощенных моделей земной системы, показали крайне высокую неопределённость в разделении антропогенных и природных источников парниковых газов. При этом важно подчеркнуть, что, несмотря на значительные вариации в оценках потоков CO_2 и CH_4 , рост концентрации парниковых газов на фоновых станциях (таких, как Мауна-Лоа или станциях глобальной сети GAW) демонстрирует удивительную стабильность. Этот тренд слабо подвержен влиянию межгодовых колебаний, связанных с климатической изменчивостью, что указывает на доминирующую роль антропогенных выбросов в долгосрочной динамике CO_2 и CH_4 . В отличие от сложных и неоднозначных процессов в природных экосистемах, где поглощение и эмиссия CO_2 и CH_4 зависят от множества факторов (температура, осадки, природные пожары и др.), антропогенный сигнал остается стабильным и предсказуемым.

Активное развитие международных сетей мониторинга потоков и концентраций парниковых газов (например, FLUXNET, SOCAT), спутниковых миссий (GOSAT, OCO-2, TROPOMI) и совершенствование модельных подходов привели к значительному уточнению оценок потоков парниковых газов в

различных пространственных и временных масштабах. Так, было установлено, что природные экосистемы суши играют ключевую роль в поглощении CO_2 , сопоставимую с океаном, что противоречило ранним представлениям о доминировании океанического стока CO_2 конца XX века. Однако, несмотря на уточнение этих процессов, глобальный рост CO_2 и CH_4 в атмосфере продолжает следовать четкому тренду, определяемому, в первую очередь, антропогенной эмиссией, тогда как природные вариации (например, усиление поглощения в отдельные годы) лишь модулируют скорость этого роста, но не меняют общей направленности. Среднегодовые оценки поглощения CO_2 сушей варьировали от 1.9 до 4.1 ГтС/год, демонстрируя значительную межгодовую изменчивость, связанную с внутренней климатической изменчивостью и климатическими аномалиями, такими, как например явление Эль-Ниньо Южное Колебание. Тропические водно-болотные угодья и деградация многолетней мерзлоты были идентифицированы как крупные источники CH_4 , чьи выбросы сильно зависят от температурных и гидрологических условий. Однако, как и в случае с CO_2 , долгосрочный рост концентрации CH_4 в атмосфере остается относительно устойчивым, несмотря на региональные и временные изменения его потоков.

Современные оценки потоков парниковых газов основаны на комплексном использовании четырёх основных методов: методов национальной инвентаризации (подход "снизу-вверх"), стандартизированных МГЭИК и использующихся для отчётности в рамках Парижского соглашения; биогеохимических моделей (например, CESM, LPJ, ORCHIDEE), описывающих процессы взаимодействия между растительностью, почвой и атмосферой; инверсионного моделирования (например, с использованием инверсионных алгоритмов TM5, GEOS-Chem), которое воссоздают приземные потоки на основе данных спутниковых и наземных наблюдений; методов машинного обучения, позволяющих анализировать большие объёмы данных и выявлять сложные нелинейные зависимости между результирующими потоками и параметрами внешней среды.

Развитие этих методов привело к уменьшению существующих неопределённостей в оценке потоков. Тем не менее, до настоящего времени сохраняются значительные расхождения между оценками потоков, выполненными разными методами. Например, инверсионные модели часто показывают более высокие выбросы CH_4 от нефтегазового сектора по сравнению с национальными кадастрами, что может быть связано с недоучётом в национальных кадастрах экстремальных утечек. Для потоков CO_2 различия между инвентаризационными и инверсионными методами связаны с такими факторами, как определение границ управляемых земель и учёт латеральных потоков углерода.

Несмотря на очевидный прогресс в оценках потоков парниковых газов, в их оценках сохраняются значительные неопределённости, связанные с: редкой сетью наблюдений за потоками, особенно в труднодоступных регионах (Сибирь, Амазония, Арктика); использованием упрощенных параметризаций в моделях, особенно для описания процессов метаногенеза, пожаров и таяния многолетней мерзлоты; региональной изменчивостью климатических и

антропогенных воздействий, затрудняющей проведение глобальных обобщений. В частности, оценки потоков CO_2 в океане варьируют из-за различий в учёте закисления и стратификации вод, а прогнозы выбросов CH_4 из термокарстовых озёр остаются в значительной степени приблизительными из-за недостатка априорных данных.

Будущая динамика потоков парниковых газов будет определяться комплексным влиянием климатических и антропогенных факторов. Сценарии МГЭИК (например, SSP1-1.9 и SSP5-8.5) прогнозируют диаметрально противоположные тенденции в изменении потоков парниковых газов: при строгой климатической политике (SSP1-1.9) поглощение CO_2 сушей может стабилизироваться на уровне 3.0-3.5 ГтС/год благодаря восстановлению лесов, тогда как океанический сток сократится из-за закисления вод океана; в сценарии SSP5-8.5 деградация экосистем (особенно тропических лесов и многолетней мерзлоты) может превратить сушу в чистый источник CO_2 к 2100 году, а выбросы CH_4 увеличатся на 50-70%.

Рассматривая различные сценарии дальнейшего развития системы мониторинга потоков парниковых газов в региональном и глобальном масштабе, очевидно, основное внимание необходимо направить на: расширение мониторинговых сетей, включая использование новых спутников (CO2M) и развитие станций долговременного мониторинга потоков парниковых газов; интеграцию данных из разных источников для снижения неопределённостей; более комплексный учёт прямых и обратных связей в системе «суша-океан-атмосфера», связанных, например, с природными пожарами или таянием мерзлоты, ускоряющими современные климатические изменения.

Дальнейшие исследования должны фокусироваться на улучшении пространственного охвата данных, разработке гибридных моделей и усилении международного сотрудничества. Точные и репрезентативные оценки необходимы для реализации Парижского соглашения и предотвращения катастрофических сценариев изменения климата. Устойчивость природных поглотителей парниковых газов, таких как леса и океаны, будет играть ключевую роль в достижении углеродной нейтральности, что требует не только совместных научных усилий, но и скоординированных политических решений.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность заведующему кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета МГУ Кислову А.В. за ценные советы и рекомендации при подготовке рукописи. Автор выражает благодарность Масляшовой А.О. за помощь при подготовке иллюстративного материала.

Список литературы

Барталев, С.А., Стыценко, Ф.В., Хвостиков, С.А., Лупян, Е.А. (2017) Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на

основе данных спутниковых наблюдений, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, т. 14, № 6, с. 176-193.

Володин, Е.М. (2023) Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 59, № 1, с. 19-26.

Гулев, С.К., Ольчев, А.В. (2025) *Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии*, Москва, Научный мир, 420 с.

Куричева, О.А., Авилов, В.К., Варлагин А.В. и др. (2023) Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России, сеть RuFlux, *Известия Российской академии наук, серия географическая*, т. 87, № 4, с. 512-535.

Романовская, А.А. (2023). *Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации*, Москва, ИГКЭ, ООО «Принт», 343 с.

Романовская, А.А. и др. (2025) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов из источников и их абсорбции поглотителями за 1990-2023 гг.*, Москва, Росгидромет, 422 с.

Швиденко, А.З., Щепаченко, Д.Г., Ваганов, Е.А., Сухинин, А.И., Максютов, Ш.Ш., МкКалум, И., Лакида, И.П. (2011) Влияние природных пожаров в России 1998-2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет, *Доклады академии наук, Науки о Земле*, т. 441, № 4, с. 544-548.

Ahlström, A. et al. (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink, *Science*, vol. 348(6237), pp. 895-899, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>.

Aumont, O. et al. (2015) PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies, *Geoscientific Model Development*, vol. 8(8), pp. 2465-2513, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2465-2015>.

Bakker, D.C.E., et al. (2016) A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT), *Earth System Science Data*, vol. 8(2), pp. 383-413, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-8-383-2016>.

Baldocchi, D. et al. (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 82(11), pp. 2415-2434, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2).

Basu, S. et al. (2013) Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13(17), pp. 8695-8717, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-8695-2013>.

Beck, V. et al. (2013) WRF-Chem simulations in the Amazon region during wet and dry season transitions: evaluation of methane models and wetland inundation maps, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 13, pp. 7961-7982, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-7961-2013>.

Bender, M. et al. (2005) Atmospheric O₂/N₂ changes, 1993-2002: Implications for the partitioning of fossil fuel CO₂ sequestration, *Glob. Biogeochem. Cyc.*, vol. 19, GB4017, available at: <https://doi.org/10.1029/2004GB002410>.

Bey, I. et al. (2001) Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106(D19), pp. 23073-23095, available at: <https://doi.org/10.1029/2001JD000807>.

Bopp, L. et al. (2023) Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models, *Biogeosciences*, vol. 10, pp. 6225-6245, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>.

Bonan, G.B., Doney, S.C. (2018) Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models, *Science*, vol. 359(6375), eaam8328, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aam8328>.

Bondeau, A. et al. (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biology*, vol. 13(3), pp. 679-706, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x>.

Bousquet, P. et al. (2000) Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, *Science*, vol. 290(5495), pp. 1342-1346, available at: <https://doi.org/10.1126/science.290.5495.1342>.

Brando, P.M. et al. (2020) The gathering firestorm in southern Amazonia, *Sci. Adv.*, vol. 6, eaay1632, available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>.

Brienen, R.J.W. et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink, *Nature*, vol. 519(7543), pp. 344-348, available at: <https://doi.org/10.1038/nature14283>.

Burgin, L. et al. (2025) Insights on climate risks to the central African forest ecosystems: an interdisciplinary review, *Climate Resil Sustain.*, vol. 4, e70010, available at: <https://doi.org/10.1002/cli2.70010>.

Byrne, B. et al. (2023) National CO₂ budgets (2015-2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stock take, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, pp. 963-1004, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-15-963-2023>.

Canadell, J.G. et al. (2021) Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, *Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.

Chevallier, F. et al. (2010) CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21-year reanalysis of atmospheric measurements, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, vol. 115(D21), D21303, available at: <https://doi.org/10.1029/2010JD013887>.

Chikamoto, M. et al. (2023) Long-term slowdown of ocean carbon uptake by alkalinity dynamics, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, e2022GL101954, available at: <https://doi.org/10.1029/2022GL101954>.

Ciais, P. et al. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, vol. 437, pp. 529-533, available at: <https://doi.org/10.1038/nature03972>.

Ciais, P. et al. (2010) The European carbon balance. Part 2: croplands, *Global Change Biology*, vol. 16(5), pp. 1409-1428, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02055.x>.

Clark, D.B. et al. (2011) The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, *Geoscientific Model Development*, vol. 4(3), pp. 701-722, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-4-701-2011>.

Comyn-Platt, E. et al. (2018) Carbon budgets for 1.5 and 2°C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks, *Nature Geoscience*, vol. 11(8), pp. 568-573, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0174-9>.

Crisp, D. et al. (2004) The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission, *Advances in Space Research*, vol. 34(4), pp. 700-709, available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>.

Crowell, S. et al. (2019) The 2015-2016 Carbon Cycle as Seen from OCO-2 and the Global in situ Network, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19(15), pp. 9797-9831, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-9797-2019>.

Deng, Z. et al. (2025) Global greenhouse gas reconciliation 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 17, pp. 1121-1152, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-17-1121-2025>.

DeVries, T. et al. (2017) Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning, *Nature*, vol. 542(7640), pp. 215-218, available at: <https://doi.org/10.1038/nature21068>.

Dolman, A.J. et al. (2012) An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences*, vol. 9(12), pp. 5323-5340, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>.

Dutkiewicz, S. et al. (2015) Capturing optically important constituents and properties in a marine biogeochemical and ecosystem model, *Biogeosciences*, vol. 12(14), pp. 4447-4481, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-12-4447-2015>.

Eldering, A. et al. (2017) The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes, *Science*, vol. 358(6360), eaam5745, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aam5745>.

Evans, C.D. et al. (2021) Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions, *Nature*, vol. 593(7860), pp. 548-552, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020) *Global Forest Resources Assessment 2020*, available at: <https://www.fao.org>.

Feng, L. et al. (2022) Methane emissions in the 2010-2018 Global Methane Budget consistent with inverse analyses of atmospheric observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22(6), pp. 3857-3865.

Fennel, K. et al. (2022) Ocean biogeochemical modelling, *Nat. Rev. Methods Primers*, vol. 2, 76, available at: <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00154-2>.

Fisher, J.B. et al. (2017) The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management and water resources, *Water Resources Research*, vol. 53(4), pp. 2618-2626, available at: <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>.

Fisher, B. J. et al. (2025) Climate-driven shifts in Southern Ocean primary producers and biogeochemistry in CMIP6 models, *Biogeosciences*, vol. 22(4), pp. 975-994, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-22-975-2025>.

Follows, M.J. et al. (2007) Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean, *Science*, vol. 315(5820), pp. 1843-1846, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1138544>.

Friedlingstein, P. et al. (2022) Global Carbon Budget 2022, *Earth System Science Data*, vol. 14(11), pp. 4811-4900, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

Friedlingstein, P. et al. (2023) Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, pp. 5301-5369, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.

Friedlingstein, P. et al. (2025) Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data*, vol. 17, pp. 965-1039, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>.

Ganesan, A.L. et al. (2015). Quantifying methane and nitrous oxide emissions from the UK and Ireland using a national-scale monitoring network, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15(11), pp. 6393-6406, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-15-6393-2015>.

Glagolev, M. et al. (2011) Regional methane emission from West Siberia mire landscapes, *Environ. Res. Lett.* vol. 6, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>.

Griscom, B.W. et al. (2017) Natural climate solutions, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 114 (44), pp. 11645-11650, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.

Gruber, N. et al. (2019) The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007, *Science*, vol. 363(6432), pp. 1193-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aau5153>.

Guimbertau, M. et al. (2018) ORCHIDEE-MICT (v8.4.1), a land surface model for the high latitudes: model description and validation, *Geoscientific Model Development*, vol. 11(1), pp. 121-163, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-121-2018>.

Guo, L.B., Gifford, R.M. (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis, *Global Change Biology*, vol. 8, pp. 345-360, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.

Harris, N.L. et al. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, pp. 234-240, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.

Hein, R., Crutzen, P. J., Heimann, M. (1997) An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 11(1), pp. 43-76.

Henze, D.K. et al. (2007) Development of the adjoint of GEOS-Chem, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7(9), pp. 2413-2433, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-7-2413-2007>.

Houghton, R.A. et al. (2012) Carbon emissions from land use and land-cover change, *Biogeosciences*, vol. 9, pp. 5125-5142, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>.

Iida, Y. et al. (2021) Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables, *J. Oceanogr.*, vol. 77, pp. 323-358, available at: <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5>.

Inatomi, M. et al. (2010) Greenhouse Gas Budget of a Cool-Temperate Deciduous Broad-Leaved Forest in Japan Estimated Using a Process-Based Model, *Ecosystems*, vol. 13(3), pp. 472-483, available at: <http://www.jstor.org/stable/40603666>.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, in Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds.), Published IGES, Japan.

IPCC (2019) *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds.), IPCC, Switzerland.

IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, available at: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2019) *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*, available at: <https://ipbes.net>.

Ito, A., Inatomi, M. (2012) Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water

cycles, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 13(2), pp. 681-694, available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05034.1>.

Jacobson et al. (2020) *Carbon Tracker CT2019B, NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, Data set*, available at: <https://doi.org/10.25925/20201008>.

Janardanana, R. et al. (2020) Country-Scale Analysis of Methane Emissions with a High-Resolution Inverse Model Using GOSAT and Surface Observations, *Remote Sensing*, vol. 12(3), 375, available at: <https://doi.org/10.3390/rs12030375>.

Jin, H., Ma, Q. (2021) Impacts of Permafrost Degradation on Carbon Stocks and Emissions under a Warming Climate. A Review, *Atmosphere*, vol. 12(11), 1425, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12111425>.

Jin, Z. et al. (2024) A global surface CO₂ flux dataset (2015-2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 16, pp. 2857-2876, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-16-2857-2024>.

Jones, M.W. et al. (2022) Global and regional trends and drivers of fire under climate change, *Reviews of Geophysics*, vol. 60(3), e2020RG000726, available at: <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>.

Jung, M. et al. (2020) Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach, *Biogeosciences*, vol. 17(5), pp. 1343-1365, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-17-1343-2020>.

Keeling, C.D. (1979) The Suess effect: ¹³Carbon – ¹⁴Carbon interrelations, *Environ. Int.*, vol. 2, pp. 229-300, available at: [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(79\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(79)90005-9).

Keeling, R.F., Manning, A.C. (2014) Studies of Recent Changes in Atmospheric O₂ Content, *Treatise on Geochemistry*, Second Edition, vol. 5, pp. 385-404, available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00420-4>.

Kirsanov, A., Rozinkina, I., Rivin, G., Zakharchenko, D., Olchev, A. (2020) Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia, *Atmosphere*, vol. 11(10), 1133, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>.

Knox, S.H. et al. (2020) FLUXNET-CH₄ Synthesis Activity: Objectives, Observations, and Future Directions, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100, pp. 2607-2632, available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0268.1>.

Kort, E. A. et al. (2012) Space-based observations of megacity carbon dioxide, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L17806, available at: <https://doi.org/10.1029/2012GL052738>.

Koven, C.D. et al. (2011) Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 08(36), pp. 14769-14774, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1103910108>.

Krinner, G. et al. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 19(1),

GB1015, available at: <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.

Krol, M. et al. (2005) The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5(2), pp. 417-432, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-5-417-2005>.

Kurganova, I. et al. (2014) Carbon cost of collective farming collapse in Russia, *Glob. Change Biol.*, vol. 20, pp. 938-947, available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.

Landschützer, P., Gruber, N., Bakker, D.C.E. (2015) Decadal variations and trends of the global ocean carbon sink, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 30(10), pp. 1396-1417, available at: <https://doi.org/10.1002/2015GB005359>.

Lan, X. et al. (2019) Long-term measurements show little evidence for large increases in total U.S. methane emissions over the past decade, *Geophysical Research Letters*, vol. 46, pp. 4991-4999, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GL081731>.

Lan, X. et al. (2021) What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 379(2210), 20200440, available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0440>.

Lawrence, D.M. et al. (2019). The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 1(12), pp. 4245-4287, available at: <https://doi.org/10.1029/2018MS001583>.

Leifeld, J., Menichetti, L. (2018) The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies, *Nature Communications*, vol. 9(1), 1071, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.

Le Quéré, C. et al. (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, *Nature Geoscience*, vol. 2(12), pp. 831-836, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo689>.

Lindeskog, M. et al. (2013) Implications of accounting for land use in simulations of ecosystem services and carbon cycling in Africa, *Earth System Dynamics*, vol. 4(2), pp. 385-407, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-4-385-2013>.

Lindqvist, H. et al. (2024) Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI Methane Observations at Northern High Latitudes, *Remote Sensing*, vol. 16(16), 2979, available at: <https://doi.org/10.3390/rs16162979>.

Loisel, J. et al. (2021) Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 70-77, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>.

Lorente, A. et al. (2021) Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 665-684, available at: <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>.

Lunt, M.F. et al. (2021) An increase in methane emissions from tropical Africa between 2010 and 2016 inferred from satellite data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21(19), pp. 14721-14740, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>.

Maasakkers, J.D. et al. (2019) Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010-2015, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19(11), pp. 7859-7881, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-7859-2019>.

Manning, A.J. et al. (2011) Estimating UK methane and nitrous oxide emissions from 1990 to 2007 using an inversion modeling approach, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116(D2), available at: <https://doi.org/10.1029/2010JD014763>.

Marshall, J. et al. (1997) Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 102(C3), pp. 5733-5752, available at: <https://doi.org/10.1029/96JC02776>.

McGuire, A.D. et al. (2018) Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* vol. 115(15), pp. 3882-3887, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>.

Meirink, J.F. et al. (2008) Four-dimensional variational data assimilation for inverse modelling of atmospheric methane emissions: method and comparison with synthesis inversion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8(21), pp. 6341-6353, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-8-6341-2008>.

Natali, S.M. et al (2021) Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118(21), e2100163118, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2100163118>.

Nisbet, E.G. et al. (2019) Very strong atmospheric methane growth in the 4 Years 2014–2017: implications for the Paris agreement, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 33(3), pp. 318-342, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.

Olchev, A.V., Gulev, S.K. (2024) Carbon flux measurement supersites of the Russian Federation: objectives, methodology, prospects, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 60 (Suppl 3), pp. S428-S434, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433824700841>.

Orr, J.C. et al. (2017) Biogeochemical protocols and diagnostics for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geoscientific Model Development*, vol. 10(6), pp. 2169-2199, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2169-2017>.

Pan, Y. et al. (2011) A large and persistent carbon sink in the World's forests, *Science*, vol. 333, pp. 988-993, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.

Pandey, S. et al. (2019) Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout, *PNAS*, vol. 116(52), pp. 26376-26381, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>.

Pastorello, G. et al. (2020) The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data, *Scientific Data*, vol. 7(1), 225, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>.

Paustian, K., Ravindranath, N. H., van Amstel, A. R. (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Part 2.

Paustian, K. et al. (2016) Climate-smart soils, *Nature*, vol. 532(7597), pp. 49-57, available at: <https://doi.org/10.1038/nature17174>.

Peylin, P. et al. (2013) Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions, *Biogeosciences*, vol. 10(10), pp. 6699-6720, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-10-6699-2013>.

Peters, W. et al. (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104(48), pp. 18925-18930, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.0708986104>.

Peters, W. et al. (2010) Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations, *Global Change Biology*, vol. 16(4), pp. 1317-1337, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02078.x>.

Piao, S. et al. (2009) The carbon balance of terrestrial ecosystems in China, *Nature*, vol. 458(7241), pp. 1009-1013, available at: <https://doi.org/10.1038/nature07944>.

Planchat, A. et al. (2024) The carbonate pump feedback on alkalinity and the carbon cycle in the 21st century and beyond, *Earth Syst. Dynam.*, vol. 15, pp. 565-588, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-15-565-2024>.

Poulter, B. et al. (2017) Global wetland contribution to 2000-2012 atmospheric methane growth rate dynamics, *Environmental Research Letters*, vol. 12(9), 094013, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8391>.

Prentice, I.C. et al. (2001) The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, *Climate Change 2001, The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Houghton, J.T. et al. (eds.), Cambridge University Press.

Reichstein, M. et al. (2013) Climate extremes and the carbon cycle, *Nature*, vol. 500, pp. 287-295, available at: <https://doi.org/10.1038/nature12350>.

Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B. et al. (2019) Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science, *Nature*, vol. 566, pp. 195-204, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>.

Ryall, D.B., Maryon, R.H. (1998) Validation of the UK Met Office's NAME model against the ETEX dataset, *Atmospheric Environment*, vol. 32(24), pp. 4265-4276, available at: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00177-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00177-0).

Rosentreter, J.A. et al. (2021) Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources, *Nature Geoscience*, vol. 14(4), pp. 225-230, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>.

Salmon, E. et al. (2022) Assessing methane emissions for northern peatlands in ORCHIDEE-PEAT revision 7020, *Geosci. Model Dev.*, vol. 15, pp. 2813-2838, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2813-2022>.

Saunois, M. et al. (2016) The global methane budget 2000-2012, *Earth System Science Data*, vol. 8(2), pp. 697-751, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.

Saunois, M. et al. (2020) The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth System Science Data*, vol. 12(3), pp. 1561-1623, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.

Schaphoff, S. et al. (2018) LPJmL4 – a dynamic global vegetation model with managed land – Part 1, Model description, *Geoscientific Model Development*, vol. 11(4), pp. 1343-1375, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1343-2018>.

Schepaschenko, D. et al. (2021) Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Sci Rep*, vol. 11, 12825, available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>.

Schimel, D., Stephens, B.B., Fisher, J.B. (2015) Effect of increasing CO₂ on the terrestrial carbon cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112(2), pp. 436-441.

Schuh et al. (2019) Quantifying the impact of atmospheric transport uncertainty on CO₂ surface flux estimates, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 33, pp. 484-500, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006086>.

Schuur, E.A.G. et al. (2015) Climate change and the permafrost carbon feedback, *Nature*, vol. 520(7546), pp. 171-179, available at: <https://doi.org/10.1038/nature14338>.

Schwalm, C.R. et al. (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117(33), pp. 19656-19657, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.

Sirin, A. et al. (2021) Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting, *Land*, vol. 10(11), 1200, available at: <https://doi.org/10.3390/land10111200>.

Sitch, S. et al. (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, *Global Change Biology*, vol. 9(2), pp. 161-185, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x>.

Sitch, S. et al. (2024) Trends and drivers of terrestrial sources and sinks of carbon dioxide. An overview of the TRENDY project, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 38, e2024GB008102, available at: <https://doi.org/10.1029/2024GB008102>.

Sjögersten, S.C. et al. (2014) Tropical wetlands. A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 28, pp. 1371-1386, available at: <https://doi.org/10.1002/2014GB004844>.

Smith, B. et al. (2001) Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space, *Global Ecology & Biogeography*, vol. 10(6), pp. 621-637, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x>.

Stepanenko V.M. et al. (2024) Land surface scheme term: the model formulation, code architecture and applications, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39(6), pp. 363-377, available at: <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031>.

Takahashi, T. et al. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 56(8), pp. 554-577, available at: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>.

Turetsky, M.R. et al. (2020) Carbon release through abrupt permafrost thaw, *Nature Geoscience*, vol. 13(2), pp. 138-143, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>.

Thornton, B.F. et al. (2016) Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(11), pp. 5869-5877, available at: <https://doi.org/10.1002/2016GL068977>.

Veefkind, J.P. et al. (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor. A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 70-83, available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.

Wecht, K.J. et al. (2014) Spatially resolving methane emissions in California: constraints from the CalNex aircraft campaign and from present (GOSAT, TES) and future (TROPOMI, geostationary) satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14(15), pp. 8173-8184, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-14-8173-2014>.

Walter Anthony, K.M. et al. (2012) Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers, *Nature Geoscience*, vol. 5(6), pp. 419-426, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo1480>.

Wang, J. et al. (2020) Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis, *Science*, vol. 370(6522), pp. 1295-1300, available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb7772>.

Watson, A.J. et al. (2020) Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory, *Nature Communications*, vol. 11(1),

4422, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>.

Weber, T., Wiseman, N.A., Kock, A. (2019) Global Ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters, *Nature Communications*, vol. 10, 4584, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7>.

Wei, N., Xia, J. (2024) Robust projections of increasing land carbon storage in boreal and temperate forests under future climate change scenarios, *One Earth*, vol. 7(1), pp. 88-99, available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.013>.

van der Werf, G.R. et al. (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 9, pp. 697-720, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.

Wiltshire, A.J. et al. (2021) JULES-CN. A coupled terrestrial carbon–nitrogen scheme (JULES vn5.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 14(4), pp. 2161-2186, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2161-2021>.

Witze, A. (2020) The Arctic is burning like never before – and that's bad news for climate change, *Nature*, vol. 585(7825), pp. 336-337, available at: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02568-y>.

World Wildlife Fund (WWF) (2022) *Living Planet Report 2022*, available at: <https://www.worldwildlife.org>.

van der Woude, A.M. et al. (2023) Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe, *Nat. Commun.*, vol. 14, 6218, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41851-0>.

Yao, Y. et al. (2024) Future drought-induced tree mortality risk in Amazon rainforest, *Earth's Future*, vol. 12, e2023EF003740, available at: <https://doi.org/10.1029/2023EF003740>.

Zhang, Z. et al. (2017) Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114(36), pp. 9647-9652, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>.

Zhao, X., et al. (2023) Understanding greenhouse gas (GHG) column concentrations in Munich using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 14325-14347, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-23-14325-2023>.

References

Bartalev, S.A., Stytsenko, F.V., Khvostikov, S.A., Lupyan, E.A. (2017) Metodologiya monitoringa i prognozirovaniya pirogennoj gibeli lesov na osnove dannyh sputnikovyh nablyudenij [Methodology for monitoring and forecasting pyrogenic forest death based on satellite observations], *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, vol. 14, no. 6, pp. 176-193.

Volodin E.M. (2023) Vosproizvedenie sovremennogo klimata model'yu klimaticheskoy sistemy INMCM60 [Reproduction of the modern climate by the model of the INMCM60 climate system], *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 59, no. 1, pp. 19-26.

Gulev, S.K., Olchev, A.V. (2025) *Karbonovye poligony: monitoring, geoinformacionnye sistemy, sekvestracionnye tekhnologii* [Carbon supersites: monitoring, geographic information systems, sequestration technologies], Nauchnyj mir, Moscow, Russia, 420 p.

Kuricheva, O.A., Avilov, V.K., Varlagin A.V. et al. (2023) Monitoring ekosistemnyh potokov parnikovyh gazov na territorii Rossii, set' RuFlux [Monitoring of ecosystem fluxes of greenhouse gases in Russia, RuFlux network], *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, vol. 87, no. 4, pp. 512-535.

Romanovskaya, A.A. (2023). *Ocenka potokov parnikovyh gazov v ekosistemah regionov Rossijskoj Federacii* [Assessment of greenhouse gas fluxes in the ecosystems of the regions of the Russian Federation]. IGKE, ООО «Print», Moscow, Russia, 343 p.

Romanovskaya, A.A. et al. (2025) *Nacional'nyj doklad o kadastro antropogennyh vybrosov parnikovyh gazov iz istochnikov i ih absorbcii poglotitelyami za 1990-2023 gg.* [National report on the inventory of anthropogenic greenhouse gas emissions from sources and their absorption by sinks from 1990 to 2023], Roshydromet, Moscow, Russia, 422 p.

Shvidenko, A.Z. Shchepashchenko, D.G., Vaganov, E.A., Sukhinin, A.I., Maksyutov, Sh. Sh., MkKalum, I., Lakida, I.P. (2011) Vliyanie prirodnyh pozharov v Rossii 1998-2010 gg. na ekosistemy i global'nyj uglerodnyj byudzhet [Impact of wildfires in Russia 1998-2010 on ecosystems and the global carbon budget], *Doklady Earth Sciences*, vol. 441, no. 4, p. 544-548.

Ahlström, A. et al. (2015) The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink, *Science*, vol. 348(6237), pp. 895-899, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>.

Aumont, O. et al. (2015) PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies, *Geoscientific Model Development*, vol. 8(8), pp. 2465-2513, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2465-2015>.

Bakker, D.C.E. et al. (2016) A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT), *Earth System Science Data*, vol. 8(2), pp. 383-413, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-8-383-2016>.

Baldocchi, D. et al. (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 82(11), pp. 2415-2434, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2).

Basu, S. et al. (2013) Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13(17), pp. 8695-8717, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-8695-2013>.

Beck, V. et al. (2013) WRF-Chem simulations in the Amazon region during wet and dry season transitions: evaluation of methane models and wetland inundation maps, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 13, pp. 7961-7982, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-13-7961-2013>.

Bender, M. et al. (2005) Atmospheric O₂/N₂ changes, 1993-2002: Implications for the partitioning of fossil fuel CO₂ sequestration, *Glob. Biogeochem. Cyc.*, vol. 19, GB4017, available at: <https://doi.org/10.1029/2004GB002410>.

Bey, I. et al. (2001) Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106(D19), pp. 23073-23095, available at: <https://doi.org/10.1029/2001JD000807>.

Bopp, L. et al. (2023) Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models, *Biogeosciences*, vol. 10, pp. 6225-6245, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>.

Bonan, G.B., Doney, S.C. (2018) Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models, *Science*, vol. 359(6375), eaam8328, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aam8328>.

Bondeau, A. et al. (2007) Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biology*, vol. 13(3), pp. 679-706, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x>.

Bousquet, P. et al. (2000) Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, *Science*, vol. 290(5495), pp. 1342-1346, available at: <https://doi.org/10.1126/science.290.5495.1342>.

Brando, P.M. et al. (2020) The gathering firestorm in southern Amazonia, *Sci. Adv.*, vol. 6, eaay1632, available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>.

Brienen, R.J.W. et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink, *Nature*, vol. 519(7543), pp. 344-348, available at: <https://doi.org/10.1038/nature14283>.

Burgin, L. et al. (2025) Insights on climate risks to the central African forest ecosystems: an interdisciplinary review, *Climate Resil. Sustain.*, vol. 4, e70010, available at: <https://doi.org/10.1002/cli2.70010>.

Byrne, B. et al. (2023) National CO₂ budgets (2015-2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stock take, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, pp. 963-1004, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-15-963-2023>.

Canadell, J.G. et al. (2021) Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, *Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Contribution of*

Chevallier, F. et al. (2010) CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21-year reanalysis of atmospheric measurements, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, vol. 115(D21), D21303, available at: <https://doi.org/10.1029/2010JD013887>.

Chikamoto, M. et al. (2023) Long-term slowdown of ocean carbon uptake by alkalinity dynamics, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, e2022GL101954, available at: <https://doi.org/10.1029/2022GL101954>.

Ciais, P. et al. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, vol. 437, pp. 529-533, available at: <https://doi.org/10.1038/nature03972>.

Ciais, P. et al. (2010) The European carbon balance. Part 2: croplands, *Global Change Biology*, vol. 16(5), pp. 1409-1428, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02055.x>.

Clark, D.B. et al. (2011) The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics, *Geoscientific Model Development*, vol. 4(3), pp. 701-722, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-4-701-2011>.

Comyn-Platt, E. et al. (2018) Carbon budgets for 1.5 and 2°C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks, *Nature Geoscience*, vol. 11(8), pp. 568-573, <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0174-9>.

Crisp, D. et al. (2004) The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission, *Advances in Space Research*, vol. 34(4), pp. 700-709, available at: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>.

Crowell, S. et al. (2019) The 2015-2016 Carbon Cycle as Seen from OCO-2 and the Global in situ Network, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19(15), pp. 9797-9831, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-9797-2019>.

Deng, Z. et al. (2025) Global greenhouse gas reconciliation 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 17, pp. 1121-1152, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-17-1121-2025>.

DeVries, T. et al. (2017) Recent increase in oceanic carbon uptake driven by weaker upper-ocean overturning, *Nature*, vol. 542(7640), pp. 215-218, available at: <https://doi.org/10.1038/nature21068>.

Dolman, A.J. et al. (2012) An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods, *Biogeosciences*, vol. 9(12), pp. 5323-5340, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>.

Dutkiewicz, S. et al. (2015) Capturing optically important constituents and properties in a marine biogeochemical and ecosystem model, *Biogeosciences*, vol. 12(14), pp. 4447-4481, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-12-4447-2015>.

Eldering, A. et al. (2017) The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes, *Science*, vol. 358(6360), eaam5745, available at: <https://doi.org/10.1126/science.aam5745>.

Evans, C.D. et al. (2021) Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions, *Nature*, vol. 593(7860), pp. 548-552, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020) *Global Forest Resources Assessment 2020*, available at: <https://www.fao.org>.

Feng, L. et al. (2022) Methane emissions in the 2010-2018 Global Methane Budget consistent with inverse analyses of atmospheric observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22(6), pp. 3857-3865.

Fennel, K. et al. (2022) Ocean biogeochemical modelling, *Nat. Rev. Methods Primers*, vol. 2, 76, available at: <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00154-2>.

Fisher, J.B. et al. (2017) The future of evapotranspiration: global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management and water resources, *Water Resources Research*, vol. 53(4), pp. 2618-2626, available at: <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>.

Fisher, B. J. et al. (2025) Climate-driven shifts in Southern Ocean primary producers and biogeochemistry in CMIP6 models, *Biogeosciences*, vol. 22(4), pp. 975-994, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-22-975-2025>.

Follows, M.J. et al. (2007) Emergent biogeography of microbial communities in a model ocean, *Science*, vol. 315(5820), pp. 1843-1846, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1138544>.

Friedlingstein, P. et al. (2022) Global Carbon Budget 2022, *Earth System Science Data*, vol. 14(11), pp. 4811-4900, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

Friedlingstein, P. et al. (2023) Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 15, pp. 5301-5369, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>.

Friedlingstein, P. et al. (2025) Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data*, vol. 17, pp. 965-1039, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>.

Ganesan, A.L. et al. (2015). Quantifying methane and nitrous oxide emissions from the UK and Ireland using a national-scale monitoring network, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15(11), pp. 6393-6406, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-15-6393-2015>.

Glagolev, M. et al. (2011) Regional methane emission from West Siberia mire landscapes, *Environ. Res. Lett.* vol. 6, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>.

Griscom, B.W. et al. (2017) Natural climate solutions, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 114 (44), pp. 11645-11650, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.

Gruber, N. et al. (2019) The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007, *Science*, vol. 363(6432), pp. 1193-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aau5153>.

Guimberteau, M. et al. (2018) ORCHIDEE-MICT (v8.4.1), a land surface model for the high latitudes: model description and validation, *Geoscientific Model Development*, vol. 11(1), pp. 121-163, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-121-2018>.

Guo, L.B., Gifford, R.M. (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis, *Global Change Biology*, vol. 8, pp. 345-360, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.

Harris, N.L. et al. (2021) Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes, *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, pp. 234-240, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.

Hein, R., Crutzen, P. J., Heimann, M. (1997) An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 11(1), pp. 43-76.

Henze, D.K. et al. (2007) Development of the adjoint of GEOS-Chem, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7(9), pp. 2413-2433, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-7-2413-2007>.

Houghton, R.A. et al. (2012) Carbon emissions from land use and land-cover change, *Biogeosciences*, vol. 9, pp. 5125-5142, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>.

Iida, Y. et al. (2021) Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables, *J. Oceanogr.*, vol. 77, pp. 323-358, available at: <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5>.

Inatomi, M. et al. (2010) Greenhouse Gas Budget of a Cool-Temperate Deciduous Broad-Leaved Forest in Japan Estimated Using a Process-Based Model, *Ecosystems*, vol. 13(3), pp. 472-483, available at: <http://www.jstor.org/stable/40603666>.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, in Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds.), Published IGES, Japan.

IPCC (2019) *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds.), IPCC, Switzerland.

IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, available at: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2019) *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services*, available at: <https://ipbes.net>.

Ito, A., Inatomi, M. (2012) Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 13(2), pp. 681-694, available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05034.1>.

Jacobson et al. (2020) *Carbon Tracker CT2019B, NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, Data set*, available at: <https://doi.org/10.25925/20201008>.

Janardanana, R. et al. (2020) Country-Scale Analysis of Methane Emissions with a High-Resolution Inverse Model Using GOSAT and Surface Observations, *Remote Sensing*, vol. 12(3), 375, available at: <https://doi.org/10.3390/rs12030375>.

Jin, H., Ma, Q. (2021) Impacts of Permafrost Degradation on Carbon Stocks and Emissions under a Warming Climate. A Review, *Atmosphere*, vol. 12(11), 1425, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12111425>.

Jin, Z. et al. (2024) A global surface CO₂ flux dataset (2015-2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 16, pp. 2857-2876, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-16-2857-2024>.

Jones, M.W. et al. (2022) Global and regional trends and drivers of fire under climate change, *Reviews of Geophysics*, vol. 60(3), e2020RG000726, available at: <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>.

Jung, M. et al. (2020) Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach, *Biogeosciences*, vol. 17(5), pp. 1343-1365, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-17-1343-2020>.

Keeling, C.D. (1979) The Suess effect: ¹³Carbon – ¹⁴Carbon interrelations, *Environ. Int.*, vol. 2, pp. 229-300, available at: [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(79\)90005-9](https://doi.org/10.1016/0160-4120(79)90005-9).

Keeling, R.F., Manning, A.C. (2014) Studies of Recent Changes in Atmospheric O₂ Content, *Treatise on Geochemistry*, Second Edition, vol. 5, pp. 385-404, available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00420-4>.

Kirsanov, A., Rozinkina, I., Rivin, G., Zakharchenko, D., Olchev, A. (2020) Effect of natural forest fires on regional weather conditions in Siberia, *Atmosphere*, vol. 11(10), 1133, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>.

Knox, S.H. et al. (2020) FLUXNET-CH₄ Synthesis Activity: Objectives, Observations, and Future Directions, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100, pp. 2607-2632, available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0268.1>.

Kort, E. A. et al. (2012) Space-based observations of megacity carbon dioxide, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, L17806, available at: <https://doi.org/10.1029/2012GL052738>.

Koven, C.D. et al. (2011) Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 08(36), pp. 14769-14774, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1103910108>.

Krinner, G. et al. (2005) A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 19(1), GB1015, available at: <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.

Krol, M. et al. (2005) The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5(2), pp. 417-432, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-5-417-2005>.

Kurganova, I. et al. (2014) Carbon cost of collective farming collapse in Russia, *Glob. Change Biol.*, vol. 20, pp. 938-947, available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.

Landschützer, P., Gruber, N., Bakker, D.C.E. (2015) Decadal variations and trends of the global ocean carbon sink, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 30(10), pp. 1396-1417, available at: <https://doi.org/10.1002/2015GB005359>.

Lan, X. et al. (2019) Long-term measurements show little evidence for large increases in total U.S. methane emissions over the past decade, *Geophysical Research Letters*, vol. 46, pp. 4991-4999, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GL081731>.

Lan, X. et al. (2021) What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 379(2210), 20200440, available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0440>.

Lawrence, D.M. et al. (2019). The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 1(12), pp. 4245-4287, available at: <https://doi.org/10.1029/2018MS001583>.

Leifeld, J., Menichetti, L. (2018) The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies, *Nature Communications*, vol. 9(1), 1071, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.

Le Quéré, C. et al. (2009) Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, *Nature Geoscience*, vol. 2(12), pp. 831-836, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo689>.

Lindeskog, M. et al. (2013) Implications of accounting for land use in simulations of ecosystem services and carbon cycling in Africa, *Earth System Dynamics*, vol. 4(2), pp. 385-407, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-4-385-2013>.

Lindqvist, H. et al. (2024) Evaluation of Sentinel-5P TROPOMI Methane Observations at Northern High Latitudes, *Remote Sensing*, vol. 16(16), 2979, available at: <https://doi.org/10.3390/rs16162979>.

Loisel, J. et al. (2021) Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink, *Nature Climate Change*, vol. 11, pp. 70-77, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>.

Lorente, A. et al. (2021) Methane retrieved from TROPOMI: Improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 14, pp. 665-684, available at: <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>.

Lunt, M.F. et al. (2021) An increase in methane emissions from tropical Africa between 2010 and 2016 inferred from satellite data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21(19), pp. 14721-14740, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-14721-2019>.

Maasakkers, J.D. et al. (2019) Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010-2015, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19(11), pp. 7859-7881, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-19-7859-2019>.

Manning, A.J. et al. (2011) Estimating UK methane and nitrous oxide emissions from 1990 to 2007 using an inversion modeling approach, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116(D2), available at: <https://doi.org/10.1029/2010JD014763>.

Marshall, J. et al. (1997) Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 102(C3), pp. 5733-5752, available at: <https://doi.org/10.1029/96JC02776>.

McGuire, A.D. et al. (2018) Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* vol. 115(15), pp. 3882-3887, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>.

Meirink, J.F. et al. (2008) Four-dimensional variational data assimilation for inverse modelling of atmospheric methane emissions: method and comparison with synthesis inversion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8(21), pp. 6341-6353, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-8-6341-2008>.

Natali, S.M. et al (2021) Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118(21), e2100163118, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2100163118>.

Nisbet, E.G. et al. (2019) Very strong atmospheric methane growth in the 4 Years 2014–2017: implications for the Paris agreement, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 33(3), pp. 318-342, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.

Olchev, A.V., Gulev, S.K. (2024) Carbon flux measurement supersites of the Russian Federation: objectives, methodology, prospects, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, vol. 60 (Suppl 3), pp. S428-S434, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433824700841>.

Orr, J.C. et al. (2017) Biogeochemical protocols and diagnostics for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geoscientific Model*

-
- Development*, vol. 10(6), pp. 2169-2199, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2169-2017>.
- Pan, Y. et al. (2011) A large and persistent carbon sink in the World's forests, *Science*, vol. 333, pp. 988-993, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Pandey, S. et al. (2019) Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout, *PNAS*, vol. 116(52), pp. 26376-26381, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>.
- Pastorello, G. et al. (2020) The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data, *Scientific Data*, vol. 7(1), 225, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3>.
- Paustian, K., Ravindranath, N. H., van Amstel, A. R. (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use, Part 2.
- Paustian, K. et al. (2016) Climate-smart soils, *Nature*, vol. 532(7597), pp. 49-57, available at: <https://doi.org/10.1038/nature17174>.
- Peylin, P. et al. (2013) Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions, *Biogeosciences*, vol. 10(10), pp. 6699-6720, available at: <https://doi.org/10.5194/bg-10-6699-2013>.
- Peters, W. et al. (2007) An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104(48), pp. 18925-18930, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.0708986104>.
- Peters, W. et al. (2010) Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations, *Global Change Biology*, vol. 16(4), pp. 1317-1337, available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02078.x>.
- Piao, S. et al. (2009) The carbon balance of terrestrial ecosystems in China, *Nature*, vol. 458(7241), pp. 1009-1013, available at: <https://doi.org/10.1038/nature07944>.
- Planchat, A. et al. (2024) The carbonate pump feedback on alkalinity and the carbon cycle in the 21st century and beyond, *Earth Syst. Dynam.*, vol. 15, pp. 565-588, available at: <https://doi.org/10.5194/esd-15-565-2024>.
- Poulter, B. et al. (2017) Global wetland contribution to 2000-2012 atmospheric methane growth rate dynamics, *Environmental Research Letters*, vol. 12(9), 094013, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8391>.
- Prentice, I.C. et al. (2001) The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide, *Climate Change 2001, The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Houghton, J.T. et al. (eds.), Cambridge University Press.
-

- Reichstein, M. et al. (2013) Climate extremes and the carbon cycle, *Nature*, vol. 500, pp. 287-295, available at: <https://doi.org/10.1038/nature12350>.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B. et al. (2019) Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science, *Nature*, vol. 566, pp. 195-204, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>.
- Ryall, D.B., Maryon, R.H. (1998) Validation of the UK Met Office's NAME model against the ETEX dataset, *Atmospheric Environment*, vol. 32(24), pp. 4265-4276, available at: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00177-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00177-0).
- Rosentreter, J.A. et al. (2021) Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources, *Nature Geoscience*, vol. 14(4), pp. 225-230, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>.
- Salmon, E. et al. (2022) Assessing methane emissions for northern peatlands in ORCHIDEE-PEAT revision 7020, *Geosci. Model Dev.*, vol. 15, pp. 2813-2838, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2813-2022>.
- Saunois, M. et al. (2016) The global methane budget 2000-2012, *Earth System Science Data*, vol. 8(2), pp. 697-751, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.
- Saunois, M. et al. (2020) The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth System Science Data*, vol. 12(3), pp. 1561-1623, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
- Schaphoff, S. et al. (2018) LPJmL4 – a dynamic global vegetation model with managed land – Part 1, Model description, *Geoscientific Model Development*, vol. 11(4), pp. 1343-1375, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1343-2018>.
- Schepaschenko, D. et al. (2021) Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Sci Rep*, vol. 11, 12825, available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>.
- Schimel, D., Stephens, B.B., Fisher, J.B. (2015) Effect of increasing CO₂ on the terrestrial carbon cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112(2), pp. 436-441.
- Schuh et al. (2019) Quantifying the impact of atmospheric transport uncertainty on CO₂ surface flux estimates, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 33, pp. 484-500, available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006086>.
- Schuur, E.A.G. et al. (2015) Climate change and the permafrost carbon feedback, *Nature*, vol. 520(7546), pp. 171-179, available at: <https://doi.org/10.1038/nature14338>.
- Schwalm, C.R. et al. (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117(33), pp. 19656-19657, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>.
- Sirin, A. et al. (2021) Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting, *Land*, vol. 10(11), 1200, available at: <https://doi.org/10.3390/land10111200>.
-

Sitch, S. et al. (2003) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model, *Global Change Biology*, vol. 9(2), pp. 161-185, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x>.

Sitch, S. et al. (2024) Trends and drivers of terrestrial sources and sinks of carbon dioxide. An overview of the TRENDY project, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 38, e2024GB008102, available at: <https://doi.org/10.1029/2024GB008102>.

Sjögersten, S.C. et al. (2014) Tropical wetlands. A missing link in the global carbon cycle? *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 28, pp. 1371-1386, available at: <https://doi.org/10.1002/2014GB004844>.

Smith, B. et al. (2001) Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space, *Global Ecology & Biogeography*, vol. 10(6), pp. 621-637, available at: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x>.

Stepanenko V.M. et al. (2024) Land surface scheme term: the model formulation, code architecture and applications, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39(6), pp. 363-377, available at: <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031>.

Takahashi, T. et al. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 56(8), pp. 554-577, available at: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>.

Turetsky, M.R. et al. (2020) Carbon release through abrupt permafrost thaw, *Nature Geoscience*, vol. 13(2), pp. 138-143, available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>.

Thornton, B.F. et al. (2016) Methane fluxes from the sea to the atmosphere across the Siberian shelf seas, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(11), pp. 5869-5877, available at: <https://doi.org/10.1002/2016GL068977>.

Veefkind, J.P. et al. (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor. A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications, *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 70-83, available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.

Wecht, K.J. et al. (2014) Spatially resolving methane emissions in California: constraints from the CalNex aircraft campaign and from present (GOSAT, TES) and future (TROPOMI, geostationary) satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14(15), pp. 8173-8184, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-14-8173-2014>.

Walter Anthony, K.M. et al. (2012) Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers, *Nature Geoscience*, vol. 5(6), pp. 419-426, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo1480>.

Wang, J. et al. (2020) Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis, *Science*, vol. 370(6522), pp. 1295-1300, available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb7772>.

Watson, A.J. et al. (2020) Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory, *Nature Communications*, vol. 11(1), 4422, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>.

Weber, T., Wiseman, N.A., Kock, A. (2019) Global Ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters, *Nature Communications*, vol. 10, 4584, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7>.

Wei, N., Xia, J. (2024) Robust projections of increasing land carbon storage in boreal and temperate forests under future climate change scenarios, *One Earth*, vol. 7(1), pp. 88-99, available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.013>.

van der Werf, G.R. et al. (2017) Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 9, pp. 697-720, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>.

Wiltshire, A.J. et al. (2021) JULES-CN. A coupled terrestrial carbon–nitrogen scheme (JULES vn5.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 14(4), pp. 2161-2186, available at: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2161-2021>.

Witze, A. (2020) The Arctic is burning like never before – and that's bad news for climate change, *Nature*, vol. 585(7825), pp. 336-337, available at: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02568-y>.

World Wildlife Fund (WWF) (2022) *Living Planet Report 2022*, available at: <https://www.worldwildlife.org>.

van der Woude, A.M. et al. (2023) Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe, *Nat. Commun.*, vol. 14, 6218, available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41851-0>.

Yao, Y. et al. (2024) Future drought-induced tree mortality risk in Amazon rainforest, *Earth's Future*, vol. 12, e2023EF003740, available at: <https://doi.org/10.1029/2023EF003740>.

Zhang, Z. et al. (2017) Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114(36), pp. 9647-9652, available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>.

Zhao, X. et al. (2023) Understanding greenhouse gas (GHG) column concentrations in Munich using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 14325-14347, available at: <https://doi.org/10.5194/acp-23-14325-2023>.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.03.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.04.2025.

Принята к публикации (Accepted): 04.08.2025.

Для цитирования / For citation

Ольчев, А.В. (2025) Оценка эмиссии и поглощения диоксида углерода и метана поверхностью суши и океана в XXI веке, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 3, с. 374-440, doi:10.21513/2410-8758-2025-3-374-440.

Olchev, A.V. (2025) Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, № 3, pp. 374-440, doi:10.21513/2410-8758-2025-3-374-440.