

ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ И ИХ УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА (ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

В.А. Усольцев¹, В.П. Часовских²

¹Уральский государственный лесотехнический университет и ²Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Эл. почта: Usoltsev50@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; принята к печати 07.05.2026

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на 1,5 °С по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь чистого нуля к середине текущего столетия. Тем не менее, глобальные ежегодные выбросы CO₂ в результате лесных пожаров составляют примерно пятую часть их глобальных выбросов от использования ископаемого топлива. Дистанционный анализ площадей, пройденных природными пожарами за последние 20 лет, показал наличие как отрицательных, так и положительных тенденций, что связано с получением этих оценок датчиками с разным пространственным разрешением. На мировом уровне по разным оценкам наблюдалось как снижение, так и повышение уровня выбросов CO₂ при природных пожарах. В бореальной части Северной Америки выбросы CO₂ от пожаров увеличиваются и прогнозируется их повышение вплоть до 2050 года, однако увеличение финансирования на борьбу с пожарами, является экономически эффективной стратегией их ограничения. В Китае объем выбросов CO₂ от природных пожаров в последние десятилетия снижался за счет осуществления специальной политики по предотвращению лесных пожаров и эффективных мер борьбы с ними. В России в последние годы лесные пожары стали известны во всем мире как катастрофические. Выполненные оценки Службой мониторинга атмосферы (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 659 млн т CO₂, 55 % которых не отражены в официальных отчетах. С 2004 по 2021 годы пожары в резервной зоне, леса которой официально не охраняются, увеличили годовые выбросы CO₂ с 25 до 92 млн т. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года. В целом, в зависимости от применяемых методов, оценки выбросов CO₂ от пожаров за последние десятилетия выявили как положительные, так и отрицательные тенденции, а прогнозы на ближайшие десятилетия однозначно показывают увеличение выбросов CO₂ от природных пожаров, что с учетом глобального потепления означает возможность развития положительной обратной связи двух тенденций.

Ключевые слова: лесные пожары, углеродный след, изменение климата, дистанционное зондирование.

FOREST FIRES AND THEIR CARBON FOOTPRINT DUE TO CLIMATE CHANGE (REVIEW OF FOREIGN LITERATURE)

V.A. Usoltsev¹, V.P. Chasovskikh²

¹ Ural State Forest Engineering University and ² Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Email: Usoltsev50@mail.ru

To limit the 1.5°C increase in the average global surface temperature compared to pre-industrial levels, carbon dioxide emissions should reach net zero by the middle of this century. However, global annual CO₂ emissions from wildfires account for about a fifth of their global emissions from fossil fuel use. Remote analysis of the areas covered by wildfires over the past 20 years has shown the presence of both negative and positive trends, which is associated with the acquisition of these estimates by sensors with different spatial resolutions. At the global level, according to various estimates, there has been both a decrease and an increase in CO₂ emissions from wildfires. In the boreal part of North America, CO₂ emissions from fires are increasing and are projected to increase up to 2050, but increasing funding for fire control is a cost-effective strategy to limit them. In China, CO₂ emissions from wildfires have been decreasing in recent decades due to the implementation of special forest fire prevention policies and effective control measures. In recent years, forest fires in Russia have become known worldwide as catastrophic. Estimates made by the Copernicus Atmosphere Monitoring Service showed that from 2011 to 2020, Russian forests annually emitted 659 million tons of CO₂ into the atmosphere, 55% of which are not reflected in official reports. From 2004 to 2021, fires in the reserve zone, whose forests are not officially protected, increased annual CO₂ emissions from 25 to 92 million tons. Solving the problem of preventing and extinguishing catastrophic forest fires requires, first of all, the restoration of state forest protection, abolished by the Forest Code of 2006. In general, depending on the methods used, estimates of CO₂ emissions from fires over the past decades have revealed both positive and negative trends, and forecasts for the coming decades clearly show an increase in CO₂ emissions from wildfires, which, taking into account global warming, means the possibility of developing a positive feedback between the two trends.

Keywords: forest fires, carbon footprint, climate change, remote sensing.

Введение

“Экстремальные лесные пожары превращают крупнейшую в мире лесную экосистему из поглотителя углерода в чистый источник выбросов” [67].

«В 2017 году лесные пожары в провинции Британская Колумбия привели к выбросу в атмосферу в два-три раза большего количества CO₂ по сравнению со всем ископаемым топливом, сжигаемым в провинции в том же году» [55].

«Судьба лесов тесно связана с нашей собственной. Спасти их от изменения климата — значит сохранить баланс самой жизни, потому что без лесов Земля не сможет дышать, как и мы сами» [71].

В лесных экосистемах накапливается большее количество углерода, чем во всей атмосфере. Поэтому относительно небольшое снижение запаса углерода в лесах в результате пожаров может существенно повлиять на чистый углеродный обмен между биосферой и атмосферой, увеличивая выброс парниковых газов и усугубляя изменение климата [70]. В.М. Тарко [88] так описывает влияние лесных пожаров на функционирование биосферы: «Углерод сгоревшей при пожаре древесной растительности, соединившись с кислородом воздуха, превращается в CO₂ и переходит в атмосферу. Погибшая, но не полностью сгоревшая масса деревьев в течение нескольких лет разлагается, и образовавшийся при этом CO₂ тоже переходит в атмосферу. Часть древесины и ветвей при пожаре окисляется не полностью и образует окись углерода и метан, которые попадают в атмосферу и, сделав, сколько смогут, вреда людям и животным, постепенно окисляются и переходят в CO₂. Оставшиеся на вырубке гумус почвы и подстилка разлагаются и, если не начинается бурный рост трав и новой древесной растительности, тоже с некоторой задержкой в виде CO₂ переходят в атмосферу. Выделение CO₂ в атмосферу продолжается после пожара долго – только когда в нарушенной экосистеме установится новое положение равновесия, они престанут быть источником биосферных выбросов CO₂ и смогут снова выполнять свою биосферную функцию – поглощать выбросы CO₂ из атмосферы» [88. С. 35].

Хотя понятие «углеродный след» все чаще используется государственными и общественными организациями, существует несколько его определений, в частности приводят шесть определений в научной и семь – в «серой» литературе. Утверждается, что учет выбросов только CO₂ приводит к упущению почти трети выбросов парниковых газов и существенному пробелу в их глобальном регулировании, в то время как учет всех выбросов парниковых газов явля-

ется очень трудоемким и дорогостоящим процессом и должен учитываться в оценках жизненного цикла конкретной системы [103]. В контексте имеющейся информации понятие «углеродный след» рассматривается как составная часть более общего понятия «климатический след» [35] и предлагается следующее определение: «Углеродный след – это показатель общего количества выбросов CO₂ и CH₄ определенной популяцией, системой или видом деятельности с учетом всех соответствующих источников, поглотителей и хранилищ в пределах пространственных и временных границ интересующей популяции, системы или вида деятельности. Рассчитывается как CO₂-эквивалент с использованием соответствующего 100-летнего потенциала глобального потепления (GWP100)» [103. С. 70].

Леса покрывают около 30% поверхности суши в мире [109], они накапливают углерод, обеспечивая среду обитания для широкого спектра видов флоры и фауны и помогая уменьшить деградацию земель [33]. Однако леса становятся все более уязвимыми в результате их сведения [60], изменения климата [87], лесных пожаров [82] и других факторов, которые могут быть связаны с деятельностью человека [84]. Леса имеют особое значение, поскольку стабилизируют окружающую среду, регулируют круговорот углерода и являются местообитанием тысяч существующих форм жизни [6]. Лесные экосистемы представляют результат совокупного сочетания топографии, геологии, растительных видов и климата, которые связаны между собой физическими и биологическими процессами [96]. Лесная экосистема может быть размером с микросайт на ветке дерева, где взаимодействуют различные микробы, насекомые и мхи, или размером с бореальный лесной пояс, который окружает Землю в северных широтах [64]. Чем больше расширяется эта область, тем сложнее потенциальные взаимодействия. Лесоводство – один из древнейших видов человеческой деятельности, возникшей в результате необходимости людей культивировать древесные породы для удовлетворения таких основных потребностей, как кров, пища, одежда и тепло [45]. Все известные организации: “Рио-де-Жанейрская конвенция”, “Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН)”, “Конвенция Организации Объединенных Наций о биологическом разнообразии (КБР)” и “Конвенция Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием (КБО ООН)” - признают важную глобальную роль лесов [84].

Лесные пожары являются одним из непредсказуемых стихийных бедствий и наносят огромный ущерб людям, животным и природе, а также приводят к вымиранию видов и экономическим потерям [85], а экстремальные лесные пожары приводят к необратимым

потерям для общества, включая гибель людей, ухудшение качества воздуха, нагрузку на системы здравоохранения и экономические потери [14]. Лесные пожары представляют собой постоянную угрозу для жизни, но они также представляют угрозу для окружающей среды и могут проявляться в виде изменения климата [23]. Таким образом, лесные пожары и изменение климата - это взаимосвязанные понятия [84].

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на $1,5^{\circ}\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь чистого нуля к середине текущего столетия [76]. За период с 2001 по 2012 год лесные пожары во всем мире сократили накопление углерода в растительности примерно на 10 % [56], что существенно повлияло на концентрацию CO_2 в атмосфере [93]. Глобальные ежегодные выбросы CO_2 в результате лесных пожаров составляют примерно от 6,5 до 11 млрд т, что составляет примерно пятую часть глобальных выбросов CO_2 от использования ископаемого топлива [95]. Для смягчения последствий изменения климата и полного понимания механизмов углеродного обмена между наземными экосистемами и атмосферой важно учитывать воздействие выбросов CO_2 от лесных пожаров на наземную систему [30].

Антропогенное изменение климата способствовало увеличению числа благоприятствующих пожарам погодных аномалий во всем мире [47], более частых и экстремальных периодов засухи [1]. Повышенная жара и засуха создают периоды низкой влажности горючих материалов, что повышает вероятность возникновения лесных пожаров в экосистемах, где имеются достаточные запасы растительной биомассы и органики почв [1]. Повышенная атмосферная нестабильность связана с более непредсказуемым и экстремальным поведением лесных пожаров, что увеличивает распространение и интенсивность огня и ставит под угрозу способность пожарных тушить возгорания [21]. Эти повышенные риски привели к увеличению сгоревших площадей и выбросов углерода при пожарах в некоторых лесных регионах, особенно в течение последних двух десятилетий [11, 47]. Расширение землепользования и практика борьбы с пожарами по-разному взаимодействовали с последствиями изменения климата, усиливая или снижая активность лесных пожаров и выбросы углерода [29]. Увеличение частоты грозных разрядов в условиях изменения климата также усугубило возникновение лесных пожаров, особенно в лесах высоких широт с ограниченной способностью к возгоранию [44]. Исследования причин возникновения пожаров показали, что изменение климата повысило вероятность возникновения экстремальных погодных условий, обусловивших экстремальные лесные пожары [48]. При этом увеличение выбросов углерода при лесных пожарах,

наблюдаемое в бореальных регионах, контрастирует с сокращением выбросов углерода в саваннах глобальных тропиков [3, 107].

Лесные пожары играли ключевую роль в формировании наземных систем на протяжении 420 миллионов лет, начиная с эволюции сосудистых растений в силурийский период [83]. Пожары приводят к экосистемным нарушениям, которые повлияли на глобальное распределение лесов на Земле и контролировали накопление углерода в растительности и почвах в течение геологического времени [51]. Восстановление запасов углерода в растительности и органических почвах после лесных пожаров может занять десятилетия или столетия, и поэтому увеличение ежегодных выбросов углерода в результате пожаров и экстремальных выбросов приводит к длительному дефициту запасов углерода на суше [8]. В результате специального исследования, проведенного в лесостепной зоне России, установлено, что существующие методы расчета потерь углерода в лесах, пострадавших от пожаров, слишком упрощены, недостаточно дифференцированы по типу и интенсивности лесных пожаров, а также дают завышенные значения потерь углерода от пожаров [62]. В целом, увеличение выбросов углерода при пожарах может снизить способность глобальных лесов поглощать углерод из атмосферы, что создает проблемы для достижения климатических целей. В частности, увеличение активности пожаров только в северных районах Северной Америки может привести к чистым потерям углерода, эквивалентным 0,3-3% от оставшегося запаса углерода, необходимого для ограничения глобального потепления до $1,5^{\circ}\text{C}$ [70].

Наряду с климатическими факторами, масштабы лесных пожаров зависят от различных видов деятельности человека на местах [88], а также от экологических особенностей и продуктивности растительного покрова [69]. Хотя климатические, антропогенные и растительные факторы влияют на характер пожаров в лесах, важность каждого из них зависит от локальных условий того или иного региона [13]. В целом, определить лесные регионы, где пожары наиболее чувствительны к изменению климата или другим аспектам изменений окружающей среды, довольно непросто [13]. Чтобы определить регионы мира, где реакция на будущие изменения климата или другие экологические стрессовые факторы будет сравнительно сильной или слабой, требуется изучение временных и пространственных взаимосвязей между пожарами и комплексом мер борьбы с пожарами [48].

В бореальных лесах пожары происходят чаще, чем в большинстве других экосистем, подверженных пожарам, но дополнительный углерод, накапливающийся в почвах и деревьях в течение длительного периода между пожарами, обычно превышает потери от них. В течение последних примерно 6000 лет эта тонкая

взаимосвязь между поглощением и выделением углерода была довольно стабильной, и бореальные леса служили глобально важным поглотителем углерода. Но глобальное потепление, которое особенно заметно в высоких широтах северного полушария, угрожает равновесию. Высокие температуры привели к удлинению пожароопасного сезона и увеличению частоты и серьезности лесных пожаров, и появляется все больше свидетельств того, что по мере сокращения интервала между пожарами из органических почв в бореальных лесах выделяется больше углерода, чем могут поглотить экосистемы [108].

Помимо воздействия на запасы углерода, в результате нескольких экстремальных пожаров было зафиксировано значительное сокращение биоразнообразия, и многие из видов, находящиеся под угрозой исчезновения на Земле, страдают от изменения режима пожаров [102]. Недавние сезоны экстремальных лесных пожаров по всему миру продемонстрировали степень воздействия экстремальных лесных пожаров как на окружающую среду, так и на общество [48]. Что касается экологических аспектов, то наиболее существенными факторами возникновения лесных пожаров являются те, которые связаны с горючими материалами, погодой и рельефом местности. В последние годы режимы лесных пожаров менялись в нескольких частях мира с существенными различиями в зависимости от климатических условий регионов [75]. Таким образом, важно понимать связь между пожарами и движущими факторами в различных климатических

зонах. Существует три типа факторов, которые обычно регулируют распространение пожара: горючие материалы, погода и топография, которые составляют “Треугольник пожарной обстановки” [54] (рис. 1).

Серия крайне аномальных случаев экстремальных выбросов углерода при лесных пожарах в последнее время выявила долгосрочные тенденции [108]. Значительные различия между странами в глобальных выбросах CO_2 от лесных пожаров подчеркивают сложность проблемы выбросов CO_2 . Сильные лесные пожары в нескольких странах, таких как Австралия, Канада и Соединенные Штаты, привели к выбросам CO_2 , которые превышают совокупные выбросы за несколько лет, оказывая значительное воздействие на глобальный климат и окружающую среду. В течение сезона лесных пожаров 2019–2020 годов в Австралии площадь, охваченная пожарами, более чем в два раза превысила предыдущий рекорд 1930-х годов [92]. В 2021 году на долю бореальных пожаров пришлось 0,48 млрд т выбросов углерода, или 23% глобальных выбросов CO_2 (обычно около 10 %), что является самым высоким показателем с 2000 года. Результаты моделирования показали, что в результате этих лесных пожаров было выброшено более 1300 млрд т CO_2 и 140 млрд т других парниковых газов, включая CH_4 и N_2O . При увеличении числа пожаров в бореальном регионе эти леса могут достичь “критической точки лесных пожаров” [67, 108]. Затем наступил 2023 год, установивший новый рекорд по выбросу углерода при пожарах, когда его выбросы в бореальных лесах Канады

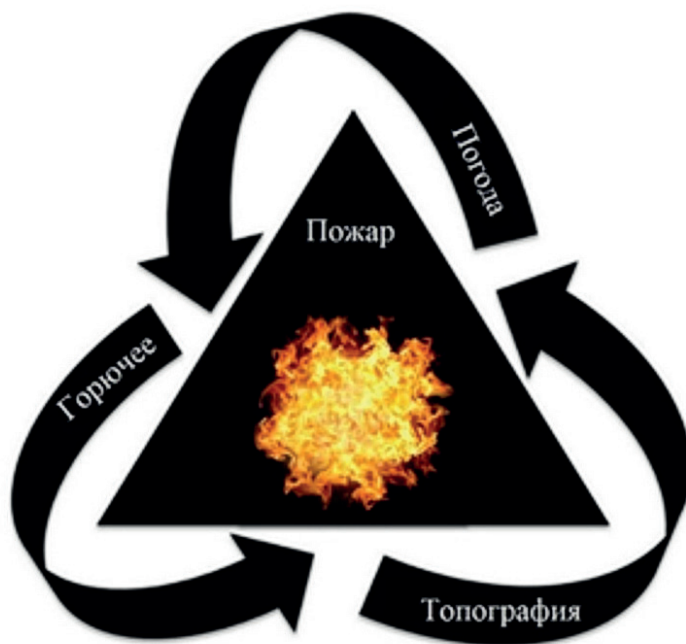


Рис. 1. Треугольник пожарной обстановки [84].

более чем в девять раз превысили средний показатель с 2001 по 2022 год [48], а затем и 2025 год, поставивший новый рекорд в Европе, когда за несколько недель выгорело около 1 млн га лесов [80]. И в этой связи возникает закономерный вопрос: «А есть ли свет в конце туннеля?» [15].

Изменение площади глобальных лесов вследствие пожаров

В последние годы леса многих регионов мира подверглись экстремальным лесным пожарам, однако не было четкой информации о том, что именно горело: леса или ранее обезлесенные участки, превращенные в пастбища и пахотные земли [12]. Данные об активных пожарах, полученные с помощью датчиков радиометра Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) и спектрометрического среднего разрешения (MODIS), предоставляют информацию в режиме, близком к реальному времени [31], но получаемые данные с грубым пространственным разрешением (375 м для VIIRS и 1 км для MODIS) не позволяют уверенно различать лесные и нелесные пожары. Эта проблема особенно актуальна для обезлесенных ландшафтов, где относительно небольшие участки оставшихся лесов переплетаются с участками, ранее расчищенными под сельское хозяйство [89].

В работе В. Тарко [88] площадь сгоревших лесов оценена по данным аппаратуры MODIS, установленной на научно-исследовательских спутниках Aqua/Терра. Полученная динамика площадей сгоревших

лесов в странах мира в 2001-2019 годах показана на рис. 2. Видно, что площадь сгоревших мировых лесов возрастала с 2001 по 2010 годы, а с 2010 по 2018 годы имела некоторую тенденцию к снижению.

Иная тенденция изменения площадей сгоревших мировых лесов (рис. 3) была выявлена другими исследователями на основе той же аппаратуры MODIS [107]. Согласно рис. 3 среднее годовое снижение площади сгоревших лесов за период с 2000 по 2018 годы составило $-1,6 \pm 0,4\%$.

Существующие глобальные карты сгоревших территорий [30, 58] имеют грубое разрешение 250-500 м и не позволяют различать лесные пожары, приводящие к потере лесного покрова (stand-replacement fires), и не приводящие к ней (non-stand-replacement fires). В отчете ФАО ООН по оценке лесных ресурсов (FRA) за 2020 год [25] сообщается об общей региональной площади сгоревших лесов при сопоставлении карты сгоревших территорий с разрешением 500 м [30] с глобальной 30-метровой картой сгоревших лесов, составленной в 2000 году [37]. Этот подход учитывал зону лесных пожаров, не связанных с потерей лесного покрова, и зону подсечно-огневого земледелия (где пожары возникают после вырубki деревьев), а также зону пожаров, связанных с потерей лесного покрова. Таким образом, Восточная и Южная Африка, а также Западная и Центральная Африка выделены в отчете (FRA) на 2020 год как два основных региона с выгоревшей площадью лесов, хотя большинство пожаров в этих регионах происходят в адаптированных к по-

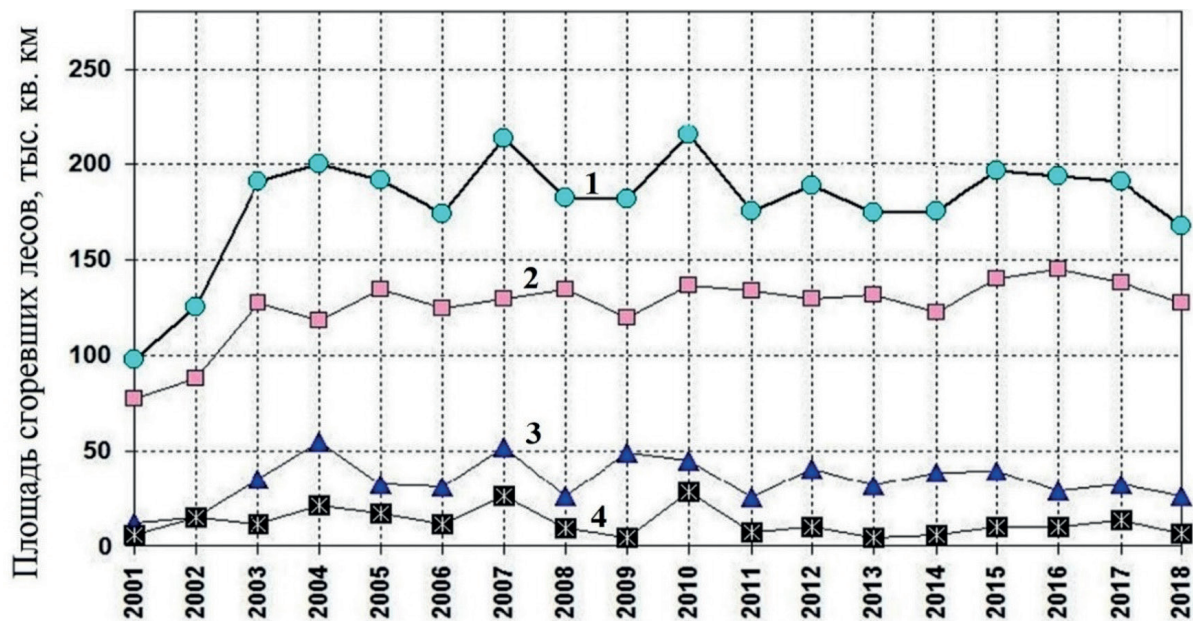


Рис. 2. Динамика площадей пожаров в мировых лесах (1), Африке (2), Азии (3) и Южной Америке (4) [88].

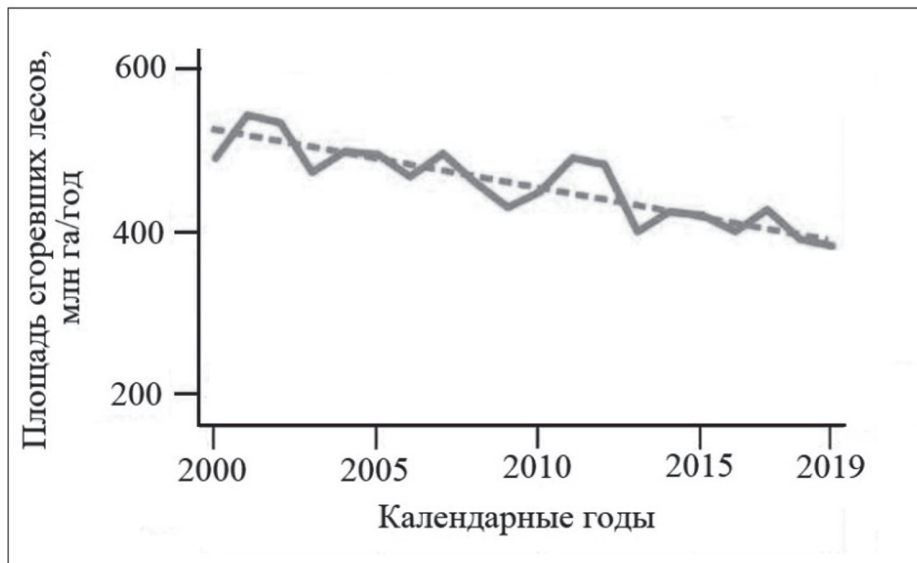


Рис. 3. Изменение глобальных сгоревших площадей в результате пожаров с 2000 по 2019 годы, полученное на основе данных MODIS с разрешением 500 м [107].

жарам парковых зонах и лесных саваннах, где насаждения практически не погибают. Такая отчетность вводит в заблуждение с точки зрения учета выбросов углерода и скрывает потенциальное увеличение потерь лесного покрова из-за пожаров в районах влажных тропических лесов [16].

Начиная с 1990-х годов, глобальные оценки сгоревших лесных площадей, основанные на спутниковых наблюдениях, позволяют получить критическую информацию о характере и тенденциях возникновения пожаров. Однако получение этих оценок основано на датчиках с грубым пространственным разрешением, которые непригодны для обнаружения небольших пожаров, когда сгорает лишь часть площади спутникового пикселя. На территории Африки были сопоставлены оценки сгоревших площадей, полученные как на основе изображений Sentinel-2 MSI с пространственным разрешением 20 м, так и на основе изображений спектрорадиометра MODIS с разрешением 500 м [74], и оказалось, что в первом случае сгоревших площадей было на 80% больше, чем во втором. Это различие в основном связано с наличием небольших площадей пожаров: при пожарах площадью менее 100 га в первом случае обнаружено 2,02 млн км² сгоревших лесов, а во втором – только 0,13 млн км². Это вызвало 31–101%-ное завышение оценок выбросов углерода при пожарах [74]. Существующие оценки сгоревших площадей регионального и национального масштабов с использованием дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения (≤ 30 м), в основном сосредоточены на лесах Северной Америки, Африки и Евразии [39, 43, 74]. На сегодняшний

день не существует глобальной спутниковой оценки высокого разрешения по потерям лесов в результате пожаров, использующей согласованные методы для разных биомов [89].

В одном из недавних исследований [89] этот глобальный информационный пробел восполняется путем составления карты потерь лесов от пожаров за 2001–2019 годы, которая дополняет набор результатов глобального мониторинга лесного покрова с 30-метровым разрешением [37], ежегодно обновляемый в рамках инициативы Global Forest Watch (<https://www.globalforestwatch.org/>). Ограничив область, представляющую интерес для составляемой вновь карты потерь от пожаров, территориями потерь лесов согласно картам, составленным Хансеном и соавт. [37], были исключены низовые лесные пожары низкой интенсивности, которые не приводят к существенной потере лесного покрова в масштабе 30-метровых пикселей. Потери лесов от пожаров были нанесены на карту с использованием глобальных показателей ежегодных изменений на основе спутниковой системы Landsat за 2001–2019 годы [72] в качестве входных данных, откалиброванных на региональном уровне классификации лесов (рис. 4). Результат процесса картографирования представлен набором бинарных карт (потери лесов от пожаров в сравнении с другими факторами потерь), каждая из которых определяется выбором границы между двумя классами на основе непрерывного вывода из дерева решений [89].

В результате составления карты были получены основанные на выборках пикселей несмещенные оценки общей площади потерь лесов результате по-

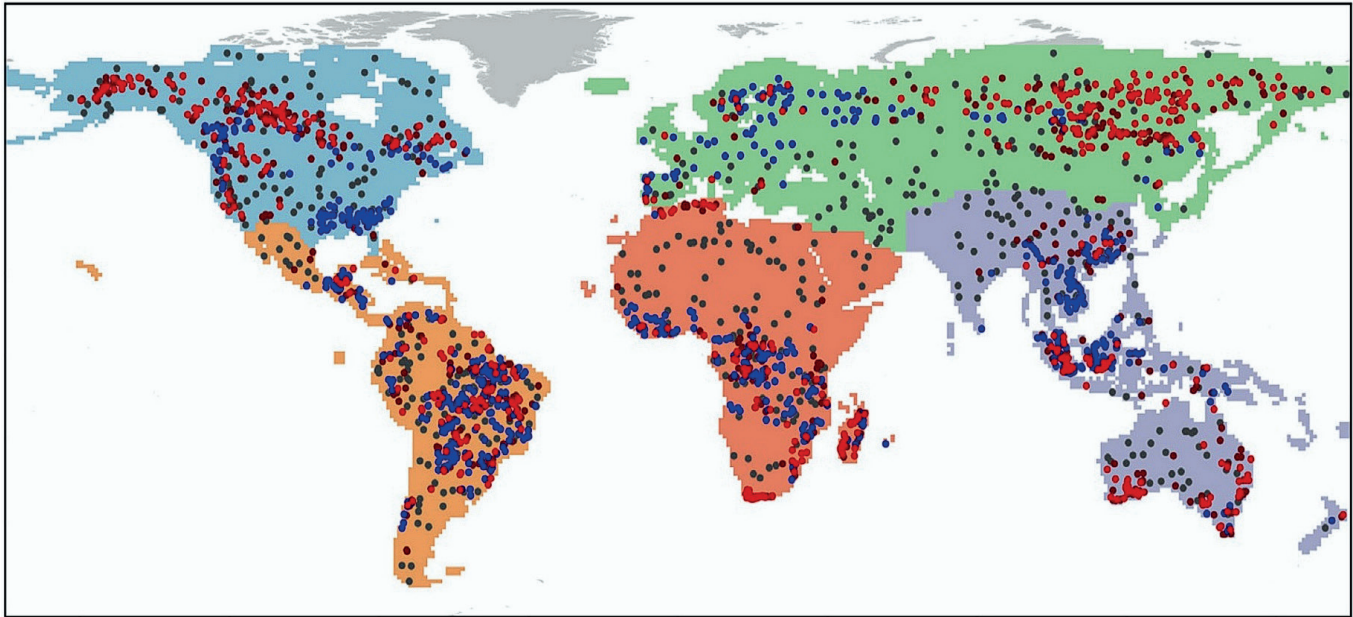


Рис. 4. Расположение 30-метровых пикселей лесов на карте исследуемых регионов [89].

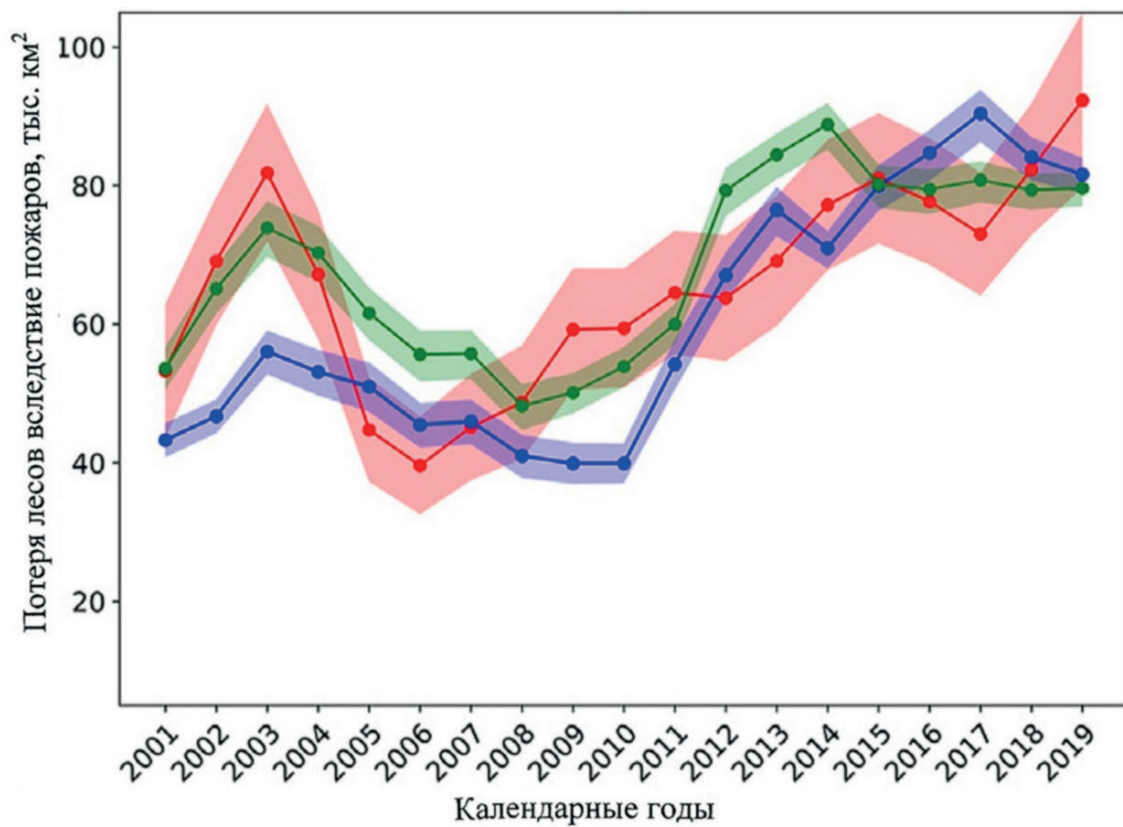


Рис. 5. Ежегодная площадь потерь лесов в результате пожаров (средние значения за три года) по картам (синий и зеленый цвета) и на основе эталонной выборки (красный цвет) на мировом уровне. Синяя линия соответствует модели потерь лесов в результате пожаров, ежегодно применяемой в рамках текущей версии карты потерь лесов Хансена с соавторами [37]; зеленая линия соответствует модели пожаров по глобальной карте потерь лесов, полученной на основе последней модели годовичных потерь лесов [89].

жаров для каждого региона. Используя выборочные данные, были рассчитаны ежегодные площади потерь лесов в результате пожаров за период 2001–2019 годы. (рис. 5).

С 2001 по 2019 год наблюдается глобальная тенденция к увеличению потерь лесов от пожаров, обусловленная равномерным увеличением их площади в бореальной Евразии и в тропиках, субтропиках и умеренном климате Австралии. Полученные результаты дают количественную оценку растущей угрозы пожаров для сохранившихся лесов во всем мире и могут улучшить результаты моделирования будущих потерь от лесных пожаров при различных сценариях изменения климата и развития событий [89].

Согласно составленной новой карте [89], 26–29% глобальных потерь лесов в 2001–2019 годах были вызваны пожарами, что выше предыдущих оценок в 21–25% за 2001–2015 годы [20] и 12–18% за 2003–2014 годы [57]. Эти различия связаны с более тонким пространственным масштабом текущего исследования и более длительным временным интервалом, охватывающим последние годы с высокой пожарной опасностью. Оценки региональных масштабов утраты лесов в результате пожаров варьируют от 58–61% в Австралии и Океании до 2% в Африке. Наибольшая разница с предыдущим исследованием [20] наблюдается в Латинской Америке (11–14% в этом исследовании против 1% в работе [20]). В глобальном масштабе на бореальные леса приходится самая высокая доля потерь лесов в результате пожаров (69–73%), за ними следуют субтропические (19–22%), умеренные (17–21%) и тропические леса (6–9%) [89].

Таким образом, в зависимости от степени разрешения космической съемки площадей сгоревших лесов динамика их изменения с 2000 по 2019 годы имеет положительную тенденцию при разрешении 30 м и отрицательную или переменную при разрешении 500 м. Причиной может быть учет (или его игнорирование) площадей, пройденных пожаром, но не приведших к гибели насаждений, а также занижение площадей сгоревших лесов за счет наличия небольших площадей в больших пикселях [74, 89].

Однако, при установленной динамике площадей сгоревших лесов за некоторый период динамика выбросов углерода за тот же период может отличаться. Так, в выше упомянутой работе [107] при установленном снижении площади сгоревших лесов $-1,6\% \pm 0,4\%$ в год уровень выбросов углерода за тот же период был «квазистабильным», то есть, наблюдалось его снижение лишь в размере $-0,7\% \pm 1,0\%$, причем статистически не значимое. Причина состоит в проявлении компенсирующего эффекта вследствие роста доли лесного покрова в общей площади лесных и нелесных сгоревших площадей, при этом коэффициент корреляции между увеличением выброса углерода,

отнесенного к единице сгоревшей площади, и увеличением доли лесного покрова в общей сгоревшей площади составил 0,88 [107].

Лесные пожары и эмиссия углерода на глобальном уровне

Пожары влияют на климат через прямые выбросы углекислого газа и через источники его поступления после пожаров [94], являющихся неотъемлемыми компонентами глобального углеродного цикла. По прогнозам, к концу столетия интенсивность и продолжительность пожароопасного сезона увеличатся по всему земному шару, особенно в северных высоких широтах [27]. Деятельность человека приводит к фрагментации лесов [38], а их деградация снижает устойчивость лесов к пожарам [16, 106]. Сложное взаимодействие социальных и экологических факторов определяет различия регионов по интенсивности и частоте лесных пожаров [3]. Эти региональные различия могут изменить глобальный климат посредством биофизических обратных связей, хотя потенциальная величина и направление этих долгосрочных изменений остаются неопределенными [101].

Начиная с 2000 года, выбросы в результате использования ископаемого топлива и изменений в землепользовании составляли в глобальном масштабе около 9 млрд т углерода в год, в то время как выбросы при пожарах составляли около 2 млрд т углерода в год [107]. Около 80 % углерода, выделяющегося при пожарах, поглощается растительностью в последующие вегетационные периоды, а остальные 20% остаются в атмосфере и способствуют накоплению атмосферного CO_2 . С 2000 года увеличиваются выбросы в глобальных лесных экосистемах в результате экстремальных пожаров, вызванных засухой [92, 107]. Согласно прогнозам, такие экстремальные пожары станут более частыми и масштабными в связи с будущим изменением климата [47]. Тропические лесные пожары привлекали большое внимание в результате обезлесения и деградации лесов, угрожающих биоразнообразию и поглощению углерода на суше. Бореальным лесам уделялось гораздо меньше внимания, несмотря на то, что они являются одним из самых обширных и важных биомов на Земле и несмотря на потепление в Арктическом регионе, которое происходит гораздо быстрее, чем на остальной планете. Таким образом, мониторинг и моделирование пространственно-временных колебаний выбросов при пожарах, особенно в обширных экосистемах с высокой плотностью углерода, таких как бореальные леса, имеют решающее значение для понимания углеродно-климатических и биофизических связей, влияющих на температуру на поверхности Земли [57], а также способствующих нивелированию усилий по смягчению последствий изменения климата [108].

Однако точный и своевременный мониторинг выбросов CO_2 в результате пожаров остается сложной задачей из-за сильных изменений в условиях горения и вследствие особенностей ландшафта, которые возникают при пожарах. Кроме того, сильные аэрозольные выбросы, возникающие в результате пожаров, часто мешают спутниковым наблюдениям за характеристиками послепожарных ландшафтов, а также затрудняют обнаружение небольших пожаров [74]. Имитационные модели (bottom-up) выбросов, которые моделируют загрузку горючего материала, степень и эффективность сгорания, хорошо воспроизводят средние условия горения и уровни выбросов в соответствии с наблюдениями, полученными в ходе полевых экспериментов [94], но не дают точной характеристики экстремальных выбросов при сжигании [92]. Использование коэффициентов выбросов при пожарах из справочных таблиц для усредненных по биомам уровней может привести к искажению информации о смешанном факельном и тлеющем состояниях горения из-за низкого пространственно-временного разрешения данных о коэффициентах выбросов. Кроме того, грубое пространственное разрешение спутниковых датчиков, используемых для определения большинства имеющихся в настоящее время данных о глобальных очагах возгорания (как правило, с разрешением в несколько сотен метров), создает большую неопределенность, особенно в районах с преимущественно небольшими очагами пожаров [74]. Эти недостатки спутниковых сенсоров, моделей и наборов данных препятствуют точной и динамичной оценке выбросов углерода при пожарах, особенно экстремальных, в режиме реального времени [108].

Эмиссия углерода при пожарах в бореальных и тропических лесах, оцененная по выбросам окиси углерода

При имеющихся сложностях непосредственного измерения выбросов CO_2 при пожарах на основе спутниковых наблюдений, подобные наблюдения за атмосферной окисью углерода (CO), полученные на основе данных ближнего и теплового инфракрасного излучения, обеспечивают альтернативный подход к косвенному отслеживанию выбросов CO_2 при пожарах. Выбросы CO от пожаров, особенно от чрезвычайно интенсивного горения, могут быть обнаружены спутниками и отделены от фоновых уровней CO из-за их неоднородности в распределении выбросов и короткого срока нахождения в атмосфере [108].

С учетом сказанного, в одном из последних исследований полученные со спутника данные о концентрациях CO были использованы для отслеживания выбросов различных загрязняющих веществ при пожарах путем интеграции моделей переноса химических веществ, методов атмосферной инверсии и соотношений выбросов между CO и другими видами загрязнений, определенных на основе локальных измерений [92]. Отмеченные данные были использованы для оценки глобальных еженедельных выбросов CO и CO_2 при пожарах с разрешением по горизонтали $3,75^\circ$ на $1,9^\circ$. Упомянутая инверсионная система была разработана в результате усилий по разработке моделей в течение последних 15 лет и модернизирована для использования новейших данных о CO, полученных в результате измерений загрязнения тропосферы спутниковой системой MORITT [107].

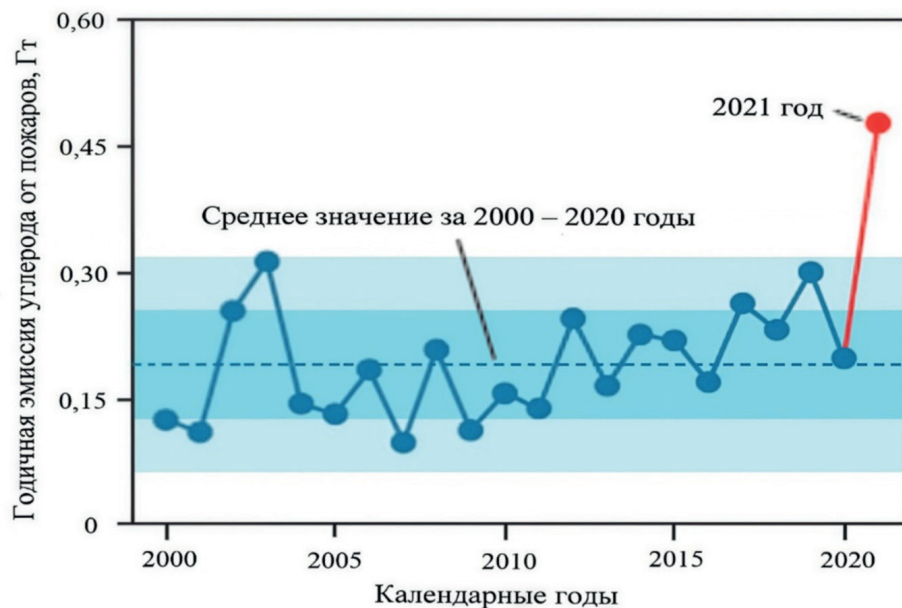


Рис. 6. Инверсионные оценки ежегодных выбросов углерода в результате бореальных пожаров за период с 2000 по 2021 год. Тонировка обозначает одно и два стандартных отклонения от среднего значения за 2000-2020 годы [108].

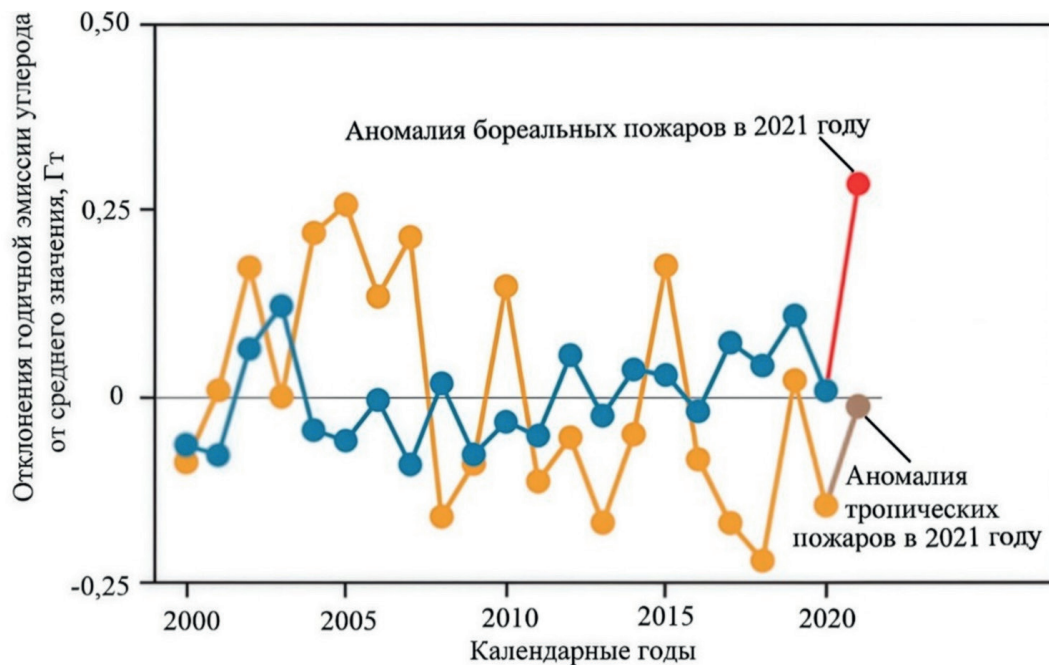


Рис. 7. Аномалии выбросов углерода в результате бореальных и тропических пожаров в период с 2000 по 2021 годы относительно среднего значения за период с 2000 по 2020 годы с целью сопоставления годовых аномалий бореальных выбросов с аномалиями тропических выбросов, полученных на основе моделирования глобальной атмосферной инверсии [108].

Полученные результаты глобального инверсионного анализа [108] выявили тенденцию к значительному увеличению выбросов при пожарах в бореальном регионе с 2000 по 2021 год (рис. 6). Напротив, выбросы при пожарах в тропическом регионе (от 23° южной широты до 23° северной широты) за тот же период несколько снизились (рис. 7). В 2021 году бореальные пожары привели к пиковым выбросам CO₂ в объеме 0,48 Гт (млрд т) углерода, в том числе 0,17 млрд т в бореальной части Северной Америки и 0,31 млрд т углерода в бореальной части Евразии, что на 150% превышает среднегодовые выбросы в период с 2000 по 2020 год. Аномалия выбросов от бореальных пожаров в 2021 году превышает любую ежегодную аномалию выбросов от тропических пожаров с 2000 года.

Полученные глобальные атмосферные инверсии выявили контрастные тенденции между выбросами от пожаров в бореальных и тропических регионах с 2000 года и рекордную ежегодную и сезонную аномалию выбросов от пожаров в бореальном регионе, которая в 2021 году превысила выбросы в тропических регионах. Оба эти факта свидетельствуют о том, что бореальные экосистемы становятся одним из доминирующих регионов-источников интенсивных пожаров и выбросов углекислого газа при пожарах, а также важнейшим фактором положительной обратной связи между пожарами и климатом [108].

Увеличение площади сгоревших лесов и выбросов в результате пожаров в бореальном пожароопасном сезоне 2021 года совпадает с сильной жарой, засухой

и большим дефицитом влаги. Во всех регионах с большими выбросами от пожаров в 2021 году наблюдались более высокие температурные аномалии (>1°C над бореальной частью Северной Америки и >1,5°C над бореальной частью Евразии). Увеличение выбросов от пожаров в бореальной части Евразии также сопровождалось аномалиями с низким уровнем осадков (<-10 мм) и значительные аномалии климатического дефицита влаги (количество осадков минус потенциальное суммарное испарение, в основном <-20 мм). Проведенный анализ данных указывает на связь между масштабными бореальными пожарами и климатическими факторами, а также предполагает, что механизмы распространения лесных пожаров в Северной Америке и Евразии могут отличаться [108].

Географический анализ, объединяющий широтное распределение выбросов от пожаров и карты растительного покрова, показал, что чрезвычайно высокие выбросы в 2021 году произошли в бореальных регионах с плотным лесным пологом в высоких северных широтах. Тенденции к увеличению количества пожаров и аномалий в бореальном регионе происходят одновременно с наступлением более теплых и сухих пожароопасных сезонов. Существенное увеличение выбросов в результате бореальных пожаров в 2021 году наблюдается в основном в регионах с более сухими условиями засух, чем в среднем за период с 2000 по 2020 год, причем это увеличение более заметно в бореальной части Евразии. Поскольку леса высоких широт очень уязвимы к засухам, которые могут

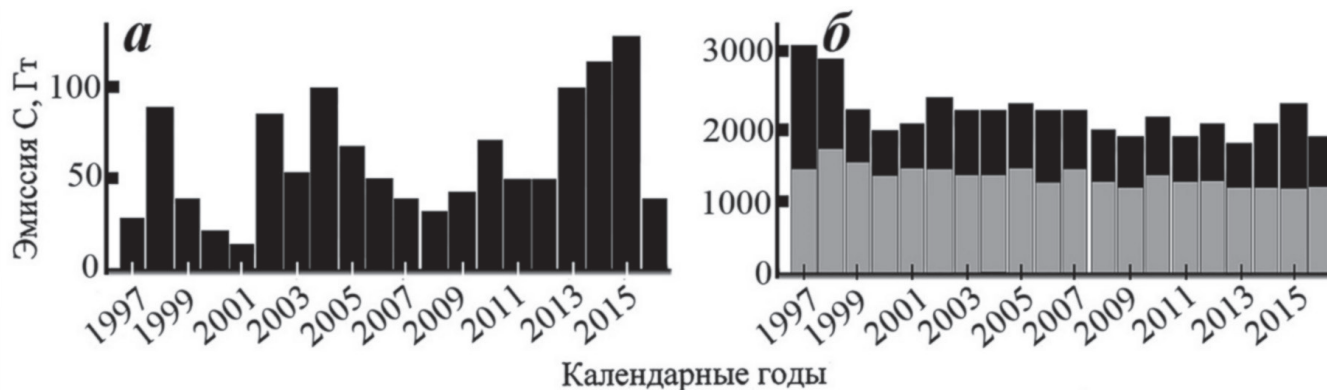


Рис. 8. Ежегодная суммарная эмиссия углерода от лесных и торфяных пожаров, сжигания отходов сельского хозяйства, послепожарной деградации территорий и от пожаров в саваннах, лугопастбищных угодьях и кустарниковом покрове в бореальной зоне Северной Америки (а) и в мире (б). На рис. 8б серой тонировкой обозначена эмиссия углерода от выжигания саванн, черной – эмиссия от остальных источников [94].

значительно увеличить количество пожаров и, в свою очередь, спровоцировать выброс огромного количества углерода, как это произошло в 2021 году, тенденции к засухам и возможное увеличение частоты экстремальных засух могут привести к сильной положительной обратной связи между пожарами и климатом [108].

Кроме того, проведенное исследование показало, что выбросы углерода в результате пожаров в бореальных экосистемах Евразии более чувствительны к климатическому дефициту влаги, чем в бореальных экосистемах Северной Америки. Северная Америка и Евразия не всегда переживают засуху одновременно, как это было в случае с засухой в Северной Америке в 2017 году и засухой в Евразии в 2019 году, которые вызвали экстремальные пожары, связанные с большими выбросами CO_2 , только в одном из двух регионов, что привело к меньшим аномалиям выбросов, чем те, которые произошли в других регионах в 2021 году [108].

Несмотря на то, что в последние годы в лесах по всему миру часто случались экстремальные пожары, в результате бореальных пожаров в 2021 году было выделено аномально большое количество углерода (на 0,29 Гт С выше среднего показателя за период с 2000 по 2020 год), то есть больше, чем за все предыдущие годы. В связи с глобальным потеплением в будущем более вероятно возникновение экстремальных пожаров, которые могут привести бореальный ландшафт к частым нарушениям и существенно снизить стабильность накопления углерода. Эта положительная обратная связь между климатом и пожарами усугубляет неполное восстановление после пожаров и повторное поглощение углерода после пожаров в последующие вегетационные периоды [108].

На основе модифицированной версии модели Карнеги–Эймса–Стэнфорда (CASA) с использованием

платформы MODIS и характеристик растительности, метеоданных и параметров пожаров была рассчитана динамика годичных выбросов углерода за период с 1997 по 2018 годы на мировом уровне и по регионам мира [94]. На рис. 8 показаны суммарные выбросы углерода от лесных и торфяных пожаров, сжигания отходов сельского хозяйства, послепожарной деградации территорий и от пожаров в саваннах, лугопастбищных угодьях и кустарниковом покрове. На мировом уровне от 50% до 60% выбросов углерода происходит от пожаров в саваннах, и общая тенденция снижения выбросов углерода, особенно с 1999 по 2016 годы определяется снижением выбросов от выжигания саванн (рис. 8б) [94]. Динамика выбросов от пожаров в бореальной зоне Северной Америки (рис. 8а) находится в соответствии с выше изложенным результатом, полученным по выбросам окиси углерода (см. рис. 6) [108].

Таким образом, пожары являются ключевым фактором, влияющим на бореальные регионы Северного полушария. Проведенное исследование выявило 20-летнюю тенденцию к увеличению числа летних пожаров в бореальных лесах Евразии, которые приводят к огромным выбросам углекислого газа и вызваны постоянной и усиливающейся засухой. 2021 год был исключительным с точки зрения засухи, интенсивности и пространственных масштабов пожаров и связанных с ними выбросов углекислого газа, которые достигли рекордных значений с тех пор, как в 2000 году начали проводить измерения с помощью спутниковой системы МОРИТТ. Более жаркие и сухие пожароопасные сезоны в бореальных регионах, вероятно, из-за антропогенного изменения климата, повышают воспламеняемость растительной биомассы и эффективность воспламенения от молний, способствуя возникновению экстремальных и интенсивных пожаров [94].

Эмиссия углерода при пожарах в тропических и внетропических лесах на уровне пиромов

В ходе другого глобального анализа и систематизации регионов мира по степени общности реакций экосистем на лесопожарную обстановку [48] был использован алгоритм кластеризации по методу *k*-средних с целью сгруппировать 414 лесных экорегионов мира [68] в 12 лесных пиромов (*pyromes*), в пределах которых лесные массивы имеют общий набор взаимосвязей с климатическими условиями, растительностью и контролем со стороны человека [30]. После выделения пиромов, отличающихся высокой чувствительностью к климатическим воздействиям, было проанализировано изменение ежегодных сгоревших площадей [30] и выбросов углерода при пожарах [97] за период с 2001 по 2023 годы и оценена их связь с тенденциями изменения ключевых климатических переменных [48]. Для выделения пиромов был использован полный набор средств контроля за пожарами. Климатические параметры включали показатели пожароопасной погоды [99], влажность почвы [66], степень нестабильности атмосферы (представленную непрерывным индексом Хейнса) [21] и частоту разрядов молний [44]. Контроль за растительностью включал оценку потенциальных запасов горючих материалов в растительном покрове, его продуктивность в течение вегетационного периода, представленную нормализованным разностным индексом растительности, и степень сомкнутости насаждений [42]. Факторы, контролируемые человеком, включали плотность населения [22], площадь пахотных земель и пастбищ [3] и густоту дорожной сети [63]. Включены в расчет также особенности рельефа [2] из-за его потенциального влияния на поведение пожара [21]. Каждая из этих переменных продемонстрировала способность объяснять пространственную или временную изменчивость размера сгоревших площадей [48].

Концепция пирома была впервые введена К. Арчибалдом с соавторами [5] в качестве пирогеографического аналога биогеографической концепции биома. Биомы определяются не только их наблюдаемыми биологическими характеристиками, но и климатическими и другими факторами окружающей среды, которые вызывают возникновение определенных биологических характеристик. В предыдущих работах пирома характеризовались только наблюдаемыми характеристиками, такими, как размер, продолжительность, интенсивность и частота пожаров [5, 19]. В данном исследовании концепция пирома была расширена, и в нее включена систематическая группировка экорегионов, основанная на эффективности климатических и других экологических мер контроля за пожарами [48].

Этот подход обогащает концепцию пирома аспектами, отражающими сложность, присущую изуче-

нию биомов, и в то же время дает критическое представление о различной чувствительности пиромов к различным аспектам глобальных изменений. Анализ глобальных лесных пожаров выявил быстрое увеличение выбросов от пожаров во внетропических лесах, которое превысило снижение выбросов от пожаров в тропических лесах в период с 2001 по 2023 годы. Это увеличение показало, что климатический контроль за лесными пожарами превосходит человеческий контроль за тенденциями выбросов при пожарах в глобальном масштабе [48]. Понимание причин возникновения пожаров в различных пиромах имеет важное значение для разработки целенаправленных стратегий прогнозирования и управления рисками возникновения пожаров. Объединение лесных экорегионов в пирома с различными мерами контроля за пожарами, дало возможность лучше понять региональные различия в динамике пожаров и их чувствительность к изменению климата. Такой подход позволяет изолировать последствия изменения климата от других влияющих факторов, таких как землепользование и продуктивность растительности [48].

Выполненное исследование [48] показало, что выбросы от внетропических лесных пожаров существенно возросли в связи с изменением климата. Выбросы от пожаров в одном из внетропических очагов, охватывающем бореальные леса Евразии и Северной Америки, почти утроились в период с 2001 по 2023 годы. Это увеличение было связано с ужесточением пожароопасных погодных условий, снижением влажности почвы и повышением продуктивности растительного покрова. Напротив, тропические пожары показали снижение выбросов при пожарах, связанное с уменьшением масштабов вырубки лесов во влажных тропических лесах и увеличением фрагментации сухих тропических лесов в сельском хозяйстве и других видах землепользования [48].

В целом, за исследуемый период (с 2001 по 2023 годы) выбросы углерода при лесных пожарах во всем мире увеличились на 60%, причем наиболее существенный вклад в это внесли внетропические регионы. Увеличение активности внетропических пожаров свидетельствует о сильном влиянии климатических факторов по сравнению с деятельностью человека, которая играет более доминирующую роль в тропических регионах. Увеличение выбросов углерода при лесных пожарах было объяснено изменениями как в масштабах, так и в серьезности пожаров (измеряемыми в пересчете на выбросы углерода на единицу сгоревшей площади). Во время пожаров во внетропических лесах наблюдается значительное усиление интенсивности пожаров наряду с расширением площадей, затронутых огнем. Этот результат показывает, что интенсивность и серьезность пожаров во внетропических лесах возрастает, что согласуется с тем, что пожары затра-

гивают более сухие и легковоспламеняющиеся запасы горючих материалов по мере потепления климата и учащения засух [48].

Таким образом, на мировом уровне от 50 до 60 % выбросов углерода происходит от пожаров в саваннах. Это создает серьезную проблему для глобальных целевых показателей по борьбе с изменением климата, поскольку пожары снижают способность лесов поглощать углерод. Эффективное лесопользование и политика, направленные на сокращение выбросов парниковых газов, необходимы для снижения этих рисков. Выполненное исследование подчеркивает важность учета региональных различий в способах контроля за пожарами при разработке противопожарных мероприятий и защиты лесных экосистем. Активные меры, такие как мониторинг изменений в продуктивности растительного покрова, могут помочь определить приоритетность областей для ведения лесного хозяйства во внетропических районах. При тропических пожарах уменьшение количества возгораний при экстремально благоприятных погодных условиях и предотвращение фрагментации лесов должны защитить леса и усилить депонирование углерода. В регионах с длительной историей тушения пожаров смещение акцента на управляемые, экологически более благоприятные пожары, может помешать преобразованию источников возгорания в поглотители углерода. Устранение первопричин изменения климата, в частности выбросов ископаемого топлива, имеет решающее значение для минимизации будущих рисков возникновения лесных пожаров во всем мире и обеспечения устойчивости лесов в будущем. Кроме того, выполненная работа свидетельствует о необходимости более полной отчетности о выбросах при лесных пожарах перед Организацией Объединенных Наций в рамках национальных отчетностей об антропогенных потоках углерода. Существующая норма учета выбросов от естественных лесных пожаров, как на управляемых, так и на неуправляемых землях, все больше противоречит наблюдаемому росту выбросов от пожаров, связанному с антропогенным изменением климата. Это способствует возникновению разрывов между антропогенными балансами содержания углерода, которые официально представляются в Организацию Объединенных Наций, и бюджетами, составленными на основе моделей и наблюдений за наземными запасами углерода или концентрациями CO_2 в атмосфере. Имеется потенциальная возможность существенного завышения запасов углерода (и, следовательно, кредитов на содержание углерода) в рамках схем лесовосстановления во внетропических лесах, если растущий риск возникновения пожаров не будет должным образом учтен в протоколах аккредитации [48].

Прогнозирование эмиссии углерода от пожаров, вырубки лесов и промышленных выбросов на основе модели глобального биогеохимического цикла

Изложенные выше результаты исследования выбросов углерода от лесных пожаров посвящены констатации прогрессирующих выбросов углерода в течение последних 20 лет с расчетом конкретных количественных показателей. Поскольку Парижским соглашением предусмотрено, что рост CO_2 не должен приводить к росту температуры атмосферы выше 2°C , большое внимание уделяется вопросам включения моделей природных пожаров в глобальные модели Земной системы. Представляет интерес результат моделирования глобального биогеохимического цикла CO_2 и прогноза роста CO_2 в атмосфере на ближайшие 10-летия при разных сценариях, в том числе с учетом лесных пожаров [88]. В основе расчетов лежит глобальная пространственная модель, включающая три функциональных блока: «Растения – почва – атмосфера», «Океан – Атмосфера» и «Антропогенные воздействия». В исходных данных территория всей планеты разделена на ячейки размером 50×50 км, и предполагается, что в каждой ячейке суши находится растительность одного типа. Переменными модели для каждой ячейки являются количество углерода в массе растительности, органического вещества почвы, количество углерода в атмосфере, среднегодовые температура воздуха и количество осадков. Модель описывает процессы роста и отмирания растительности, накопления и разложения гумуса в терминах обмена углеродом между атмосферой, растениями и гумусом почвы в каждой ячейке суши и включает более 150 тысяч дифференциальных уравнений [88].

Были проведены два расчета, являющиеся одновременно и прогнозом, и иллюстрацией к пониманию различия проявления пожаров лесов и их вырубки. В первом вычислительном эксперименте совокупный антропогенный эффект включал промышленные выбросы CO_2 и пожары лесов, во втором – промышленные выбросы CO_2 и вырубку лесов. Рис. 9 иллюстрирует полученную расчетом динамику содержания CO_2 в атмосфере и в биомассе растительности в интервале 1950–2100 годов в результате совокупного влияния промышленных выбросов, лесных пожаров и вырубки лесов.

Согласно выполненному прогнозу, лесные пожары и вырубка лесов дают меньший вклад в выбросы CO_2 в атмосферу по сравнению с промышленными выбросами. Однако, если при гипотетическом отсутствии лесных пожаров концентрация углекислоты в атмосфере к 2100 году по отношению к базовому 1860 году увеличится примерно в 2,8 раза, то с учетом пожаров – почти в 3,5 раза. Согласно рис. 9, количество

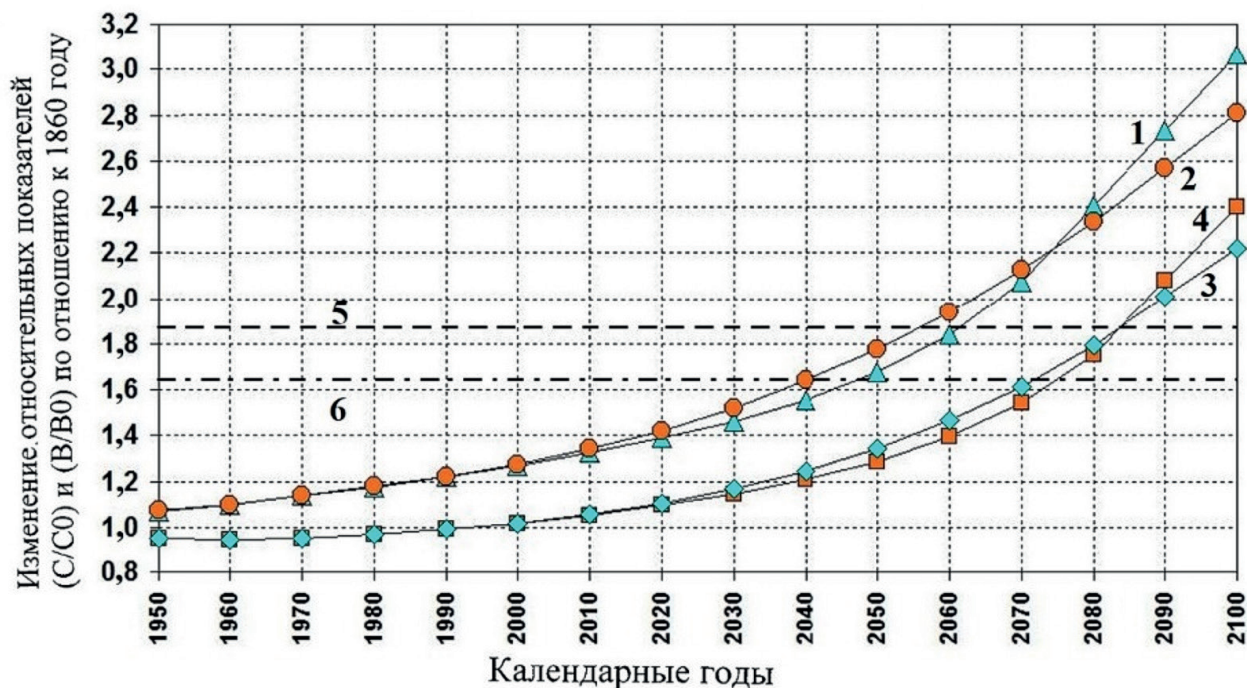


Рис. 9. Прогноз относительного роста концентрации CO_2 (C/C_0) с 1950 по 2100 годы вследствие: (1) промышленных выбросов CO_2 и пожаров и (2) промышленных выбросов CO_2 и вырубке лесов; и прогноз относительного роста биомассы лесов (B/B_0) за тот же период вследствие: (3) промышленных выбросов CO_2 и пожаров и (4) промышленных выбросов CO_2 и вырубке лесов; (5) и (6) линии, соответствующие концентрации атмосферной CO_2 , обеспечивающей увеличение температуры атмосферы не выше соответственно 2°C и $1,5^\circ\text{C}$ [88].

CO_2 в атмосфере с течением времени увеличивается при всех сценариях. При этом влияние вырубки оказывается больше, чем пожаров, и CO_2 от вырубки до 2070 г. увеличивается быстрее, чем от пожаров, а растительная биомасса с учетом пожаров до 2085 года наоборот растет быстрее, чем с учетом вырубки лесов. По мере роста концентрации CO_2 в атмосфере и глобального потепления частота и интенсивность пожаров увеличивается, и влияние пожаров будет опережать влияние вырубки лесов. Таким образом, возникает положительная обратная связь между глобальным потеплением и выбросами от лесных пожаров лесов – чем больше глобальное потепление, тем больше выбросы [88].

Эмиссия углерода от лесных пожаров в Северной Америке и экономическая эффективность борьбы с ними

Чтобы ограничить повышение средней глобальной температуры поверхности земли на $1,5^\circ\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным уровнем, выбросы углекислого газа должны достичь нуля к середине столетия различными путями, включая изменения в землепользовании [76]. Бореальные леса, которые занимают площадь около 16,6 млн. km^2 в приполярном ре-

гионе и содержат примерно две трети глобального лесного углерода [9], могут сыграть огромную роль в режиме будущих выбросов углерода, связанных с пожарами. Несмотря на то, что все более распространенные бореальные лесные пожары ускоряют выброс углерода, накопленного в этих экосистемах [98], ни влияние этих будущих выбросов на соответствующие углеродные бюджеты, ни потенциал борьбы с пожарами для их сдерживания, количественно не были оценены [70].

Преобладающий пожарный режим бореальной части Северной Америки характеризуется редкими, но очень сильными верховыми пожарами [77]. При этом текущая частота пожаров и площадь выгорания превышают показатели прошлых пожароопасных периодов [52]. За последние 60 лет площадь пожаров в бореальной части Северной Америки почти удвоилась, а количество крупных пожаров (площадью более 1000 km^2) увеличилось, особенно в западной части Северной Америки [36]. Бореальные леса Канады более разнообразны, чем леса Аляски, как с точки зрения видового состава и периодичности возникновения пожаров, так и с точки зрения борьбы с ними [77], однако риск увеличения выбросов парниковых газов, вызванного пожарами, остается высоким во всех экорегионах. Температура во всем бореальном био-

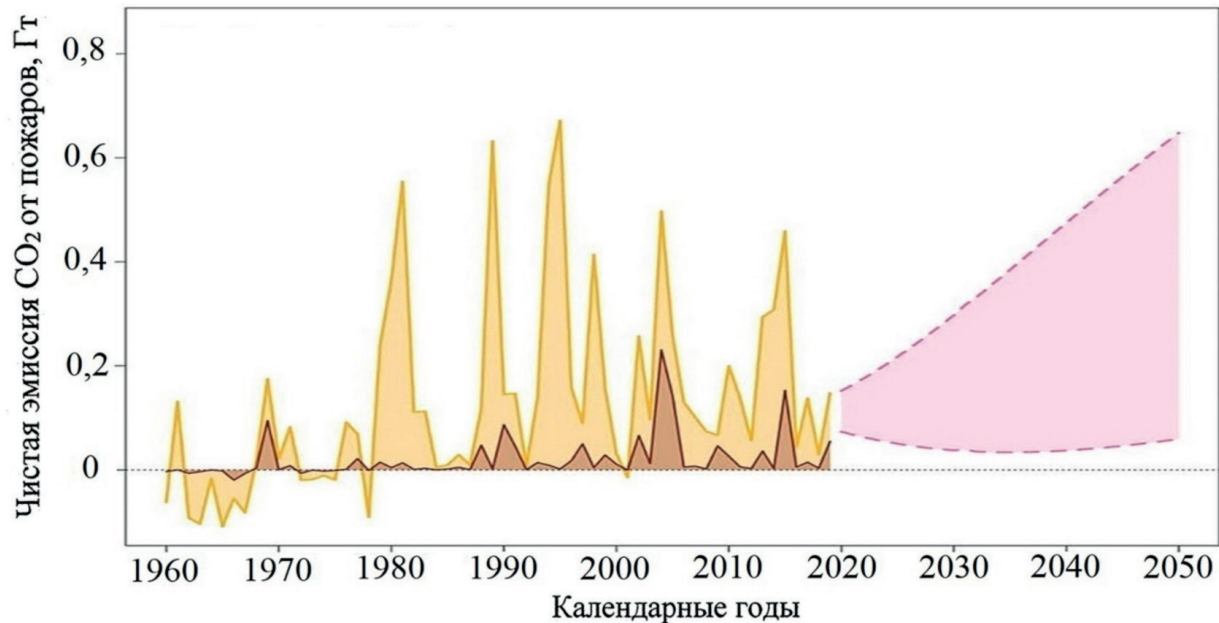


Рис. 10. Наблюдаемые в течение 1960-2019 годов и прогнозируемые на 2020-2050 годы чистые годовые выбросы CO_2 в бореальной части Северной Америки. Коричневые области представляют выбросы бореальных лесов Аляски, в то время как оранжевые области представляют совокупные выбросы бореальных лесов Северной Америки (Аляски и Канады). Розовые области показывают диапазон прогнозируемых среднегодовых выбросов до середины столетия для бореальной части Аляски и Канады [70].

ме повышается почти в два раза быстрее, чем среднемировая [7]. По прогнозам, в связи с дальнейшим потеплением, а также более частыми грозами [98], площадь сгоревших территорий в циркумбореальном регионе в течение следующих нескольких десятилетий должна увеличиться [53]. Борьба с бореальными пожарами дает возможность сокращения выбросов. В течение 60 лет пожары в бореальных районах Северной Америки устранялись, главным образом, путем тушения, главная цель которого состояла в защите населения и инфраструктуры [10].

Цель специального исследования, проведенного в бореальных лесах Северной Америки [70], состояла в оценке не только будущих выбросов углекислого газа в результате лесных пожаров, но также экономической эффективности защиты запасов бореального лесного углерода посредством борьбы с пожарами. Проведенный анализ выбросов углекислого газа к середине века включал всю Северную Америку, в то время как оценка экономической эффективности борьбы с пожарами в северных районах, как стратегии сокращения выбросов, была сосредоточена на Аляске. Согласно опубликованным прогнозам, площадь выгоревших лесов на Аляске с 2020 по 2050 годы увеличится на 24%-169%, а в бореальных лесах Канады на 36%-150% (рис. 10). Если текущий уровень тушения пожаров сохранится до середины столетия, лесные пожары в бореальной части Северной Америки приведут к суммарным выбросам от 1,33 до 11,93

Гт углекислого газа. Усиленная борьба с пожарами могла бы снизить выброс CO_2 в период с 2021 по 2050 годы до уровня от 0,89 до 3,87 Гт [70].

Результаты построенной линейной модели «случайный лес» показали, что отношение к зоне управляемых пожаров является важным фактором, определяющим их площадь, и объясняет ~22% общей изменчивости конечного размера пожара. В подмножество предикторов регрессии вошло 11 переменных, включая состав растительности, вид горючего материала, погодный фактор, причину и год возникновения пожара, а также отношение к зоне управляемых пожаров. После обратного преобразования и перекрестной проверки коэффициент детерминации модели составил 0,43. Оценка важности условных переменных [86] показала, что, хотя такие факторы, как состав растительности и погодные условия важны для прогноза возникновения пожаров, отношение к зоне управляемых пожаров была пятым по значимости фактором, определяющим масштабы пожара, и только максимальная температура, средняя температура, максимальная влажность воздуха и причина возникновения пожара были отнесены к более важным факторам. Выявлена отрицательная связь между усилиями по тушению в зоне управляемых пожаров и размерами пожара: увеличение общих расходов по тушению пожаров на 1% уменьшало их площадь на $0,21 \pm 0,10\%$ [70].

Установлено, что средняя стоимость предотвращения выбросов CO_2 за 1 т составляет 12,63 долл. США.

Выбросы от сжигания топлива техникой при тушении пожаров составили около 0,57% от годового объема чистых выбросов от лесных пожаров. Средние затраты на борьбу с пожарами на Аляске составили примерно 133 млн долларов США. Для поддержания выбросов углекислого газа в результате лесных пожаров на Аляске на историческом уровне в течение следующего десятилетия потребуются инвестиции в размере 696 млн долларов США в год. В течение следующих 30 лет для сокращения выбросов до исторического уровня потребуются инвестиции в размере от 7,1 до 50 млрд долларов [70].

Полученные результаты показывают, что лесные пожары в бореальной части Северной Америки представляют собой как существенный риск увеличения выбросов углекислого газа, так и, в частности, для бореальных лесов Аляски, значительные возможности для экономически эффективного ограничения этих выбросов за счет усиления борьбы с пожарами. Полученные результаты показывают, что увеличение инвестиций в борьбу с бореальными пожарами следует рассматривать в рамках стратегий по смягчению последствий изменения климата, необходимых для того, чтобы к середине столетия свести выбросы к нулю и ограничить повышение глобальной температуры до 1,5°C, что является целью, установленной. Парижским соглашением по климату. При отсутствии борьбы с пожарами в северных районах Аляски и Канады они могут привести к выбросу от 1,33 до 11,93 Гт CO₂ в период с 2020 по 2050 годы, или от 0,33 до 2,98% от оставшихся глобальных выбросов углекислого газа, связанных с поддержанием температуры в пределах 1,5°C. Полученные результаты показывают, что увеличение ресурсов, выделяемых на борьбу с пожарами, может стать экономически эффективной стратегией ограничения потерь глобально значимых количеств углерода, накопленных в бореальных лесах [70].

Лесные пожары и эмиссия углерода в Китае

В Китае опубликован большой объем данных о выбросах от лесных пожаров, но они были сосредоточены главным образом на небольших территориях и краткосрочных периодах [73, 104]. В частности, в центральном и восточном Китае с 2003 по 2015 годы была выполнена оценка выбросов загрязняющих веществ в результате лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования [104]. Большинство исследований были сосредоточены на выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, а исследования выбросов CO₂ были ограничены [105]. При оценке последствий пожаров на пахотных землях в условиях сильного задымления в провинции Хэйлуцзян была использована геохимическая модель, показывающая наличие высокой неопределенности в существующей

глобальной базе данных о выбросах от пожаров (GFED) версии 4.1 [105]. Существенная неопределенность в оценке выбросов от лесных пожаров в существующих кадастрах выбросов была отмечена и в других исследованиях [94]. Изучению долгосрочной динамики выбросов от лесных пожаров фактически не уделялось должного внимания [32].

В долгосрочном исследовании по оценке выбросов CO₂ в результате природных пожаров на территории Китая за период с 2001 по 2022 годы [32] были оценены пожары в лесах, кустарниках, травяном покрове и пахотных землях. Данные о площади сгоревших участков были получены с использованием платформы MODIS-MCD64A1 с пространственным разрешением 500 м [30], а данные о растительном покрове получены из набора данных дистанционного зондирования (CNLUCC) с пространственным разрешением 30 м. Данные о нормализованном разностном растительном индексе (NDVI) получены из регионального 250-метрового набора данных для Китая [32].

Коэффициент выбросов представляет количество газа, выделяющегося при сгорании единицы массы сухого горючего материала, обычно в г/кг. На коэффициенты выбросов влияют различные факторы, включая горючесть пород деревьев, интенсивность горения и различия в типах растительного покрова [59]. Чтобы обеспечить максимальную точность оценки выбросов от лесных пожаров, были выбраны соответствующие коэффициенты выбросов. Важным фактором, влияющим на точность оценок выбросов CO₂ при лесных пожарах, является также эффективность сжигания биомассы, на которую влияют интенсивность и тип лесного пожара, содержание влаги и количество горючих материалов, а также метеорологические условия. Для расчета эффективности сжигания для древостоев, кустарников и лугопастбищных угодий использована эмпирическая зависимость между эффективностью сжигания и долей растительного покрова на территории [40]. Количество выбросов CO₂ от лесных пожаров рассчитано по формуле, включающей произведение сгоревшей площади (га), наземной биомассы (т/га), коэффициента выбросов и коэффициента эффективности сжигания [32].

Общий объем выбросов CO₂ в результате природных пожаров в период с 2001 по 2022 годы составил 693,7 Гт при среднегодовом значении 31,5 Гт, что составляет 0,46% от глобального объема выбросов при всех типах пожаров и 0,52% выбросов от сжигания ископаемого топлива в Китае. Выбросы CO₂ в результате лесных пожаров в Китае были относительно низкими и медленно снижались на 0,43 Гт в год (рис. 11) [32].

Ежегодные выбросы CO₂ в результате пожаров различных типов характеризовались разными временными тенденциями. Тенденция к снижению выбросов в

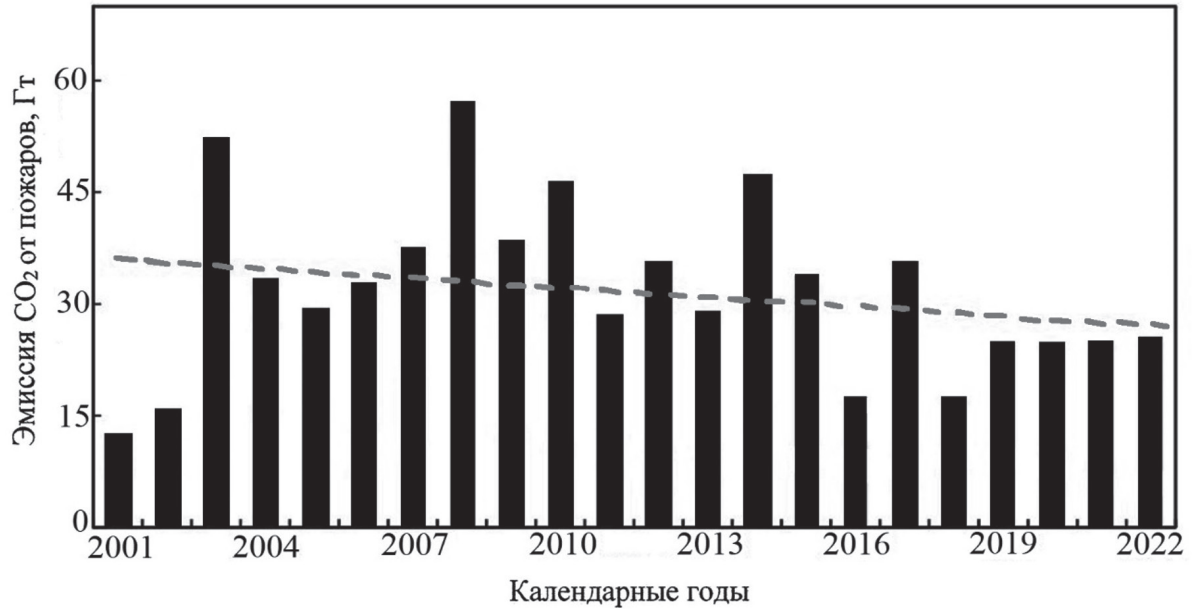


Рис. 11. Ежегодные выбросы CO₂ в результате пожаров в растительном покрове Китая с 2001 по 2022 годы [32].

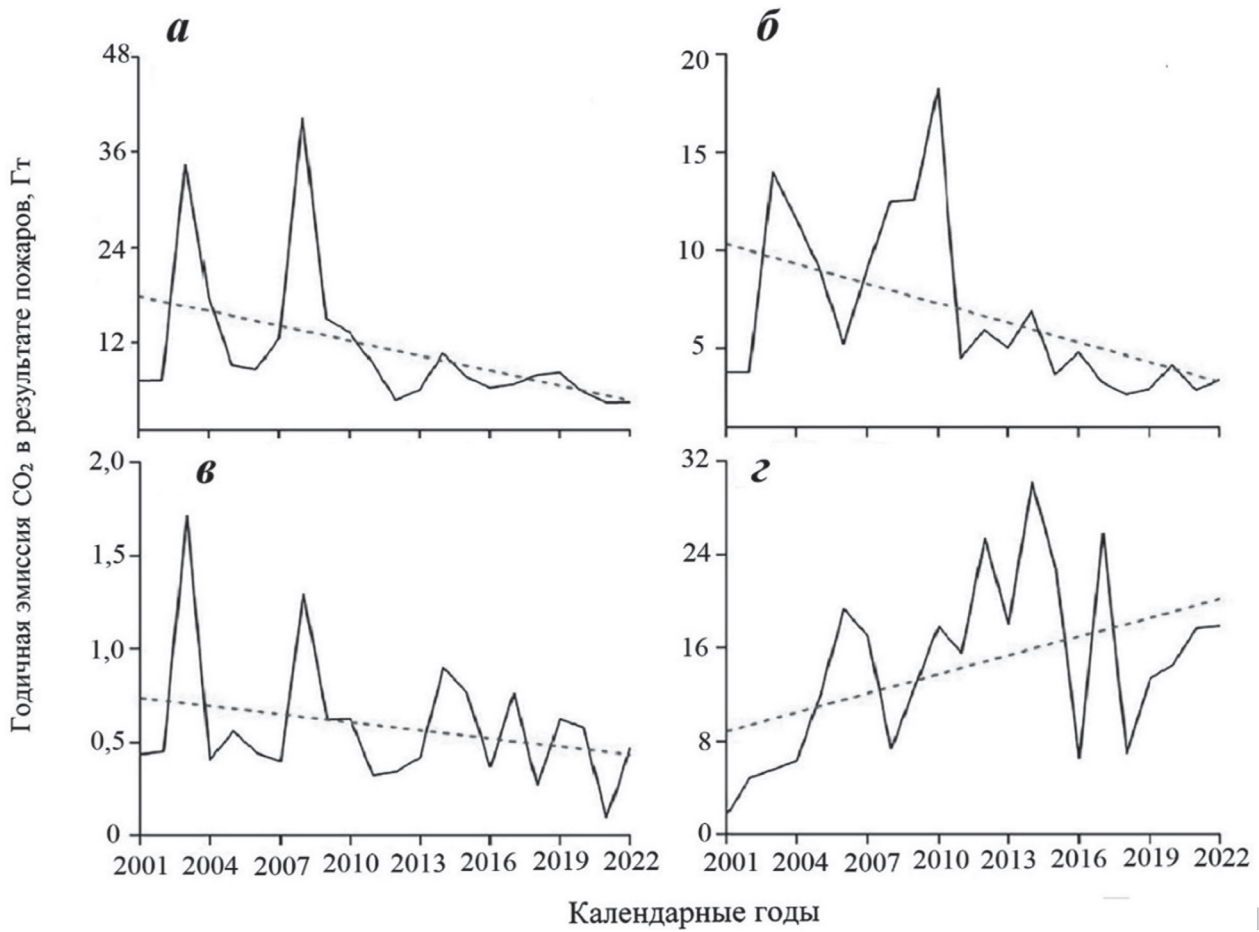


Рис. 12. Динамика ежегодных выбросов CO₂ в Китае в результате пожаров в лесном (а) и кустарниковом (б) покрове, в лугопастбищных угодьях (в) и на пахотных землях (г) [32].

лесах и кустарниках была значительной и составила 0,63 и 0,33 Гт в год соответственно (рис. 12а и 12б). Такое снижение получено за счет эффективных мер борьбы с лесными и кустарниковыми пожарами. Напротив, выбросы на пахотных землях показали четкую тенденцию к росту, увеличившись на 0,63 Гт в год (рис. 12в), что может быть связано с расширением сельскохозяйственной деятельности, изменениями в землепользовании и повышением интенсивности возделывания культур. Динамика выбросов на лугопастбищных угодьях была относительно стабильной (рис. 12г), на что могло повлиять сочетание экологических и антропогенных факторов [32].

Факторы, влияющие на выбросы CO_2 в результате лесных пожаров, многочисленны и сложны. Для анализа связи между выбросами CO_2 в результате лесных пожаров и такими климатическими факторами, как температура, осадки, относительная влажность, скорость ветра, интенсивность солнечной инсоляции, а также первичная продукция растительности и индекс NDVI, был использован коэффициент корреляции Спирмена r . Основными факторами, влияющими на выбросы CO_2 при лесных и кустарниковых пожарах, были суммарное количество солнечных часов в сутки (r равен соответственно $-0,41$ и $0,25$) и NDVI (r равен соответственно $-0,35$ и $0,37$), в то время как основным фактором, влияющим на выбросы CO_2 при пожарах в лугопастбищных угодьях, была температура ($r = -0,45$). Пожары на пахотных землях, вызванные деятельностью человека, показали отрицательную корреляцию с валовым внутренним продуктом ($r = -0,52$) и плотностью населения ($r = -0,51$).

На выбросы CO_2 от лесных пожаров влияют изменения в технике и интенсивности борьбы с пожарами [28, 105]. Органами власти Китая была реализована специальная политика по предотвращению лесных пожаров, возгораний кустарников и лугопастбищных угодий, что позволило снизить частоту возникновения лесных пожаров, в результате чего выбросы CO_2 от лесных и кустарниковых пожаров с 2001 года значительно снизились (рис. 13а, б). В целом с 2001 по 2019 годы средние выбросы CO_2 , вызванные лесными, кустарниковыми и луговыми пожарами, в соответствии с осуществляемой политикой борьбы с пожарами, снизились более чем на 80% по сравнению с выбросами от природных пожаров при отсутствии борьбы с ними [46].

Одновременно с изложенным выше было проведено исследование по оценке выбросов основных углерод содержащих газов в результате лесных пожаров в материковом Китае за более короткий период последних лет, с 2011 по 2021 годы [24]. Информация о лесных пожарах была получена с помощью инструмента Google Earth Engine (GEE) на основе объединения результатов платформы MODIS и данных о глобальной лесной наземной биомассе, полученной в рамках программы «Инициатива по биомассе и изменению климата» (CCI BIOMASS). Используя модель плотности горючих материалов и принимая во внимание коэффициенты выбросов углерода в различных растительных сообществах, установлено, что с 2011 по 2022 год пожары в материковом Китае привели к выбросам 46,9 Гт углерод содержащих газов. Углекислый газ является преобладающей формой выбросов углерода

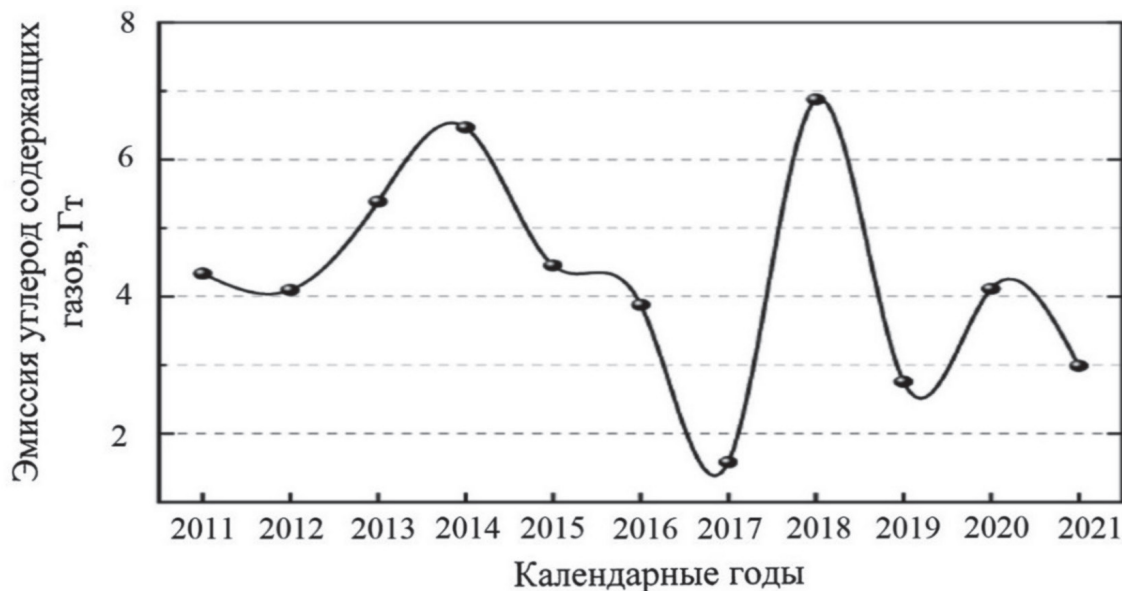


Рис. 13. Ежегодные выбросы углеродсодержащих газов в Китае в результате лесных пожаров с 2011 по 2021 годы [24].

в результате лесных пожаров, составляя около 89,8% от общего объема выбросов. Среднегодовые выбросы углерод содержащих газов составили 4,3 Гт, что существенно ниже предыдущего результата оценки выбросов CO₂ только от лесных пожаров, за период с 2001 по 2022 годы (около 10 Гт в год) [32]. Как показано на рис. 13, межгодовые колебания выбросов углерод содержащих газов в результате лесных пожаров демонстрируют закономерность, характеризующуюся первоначальным увеличением, последующим снижением, еще одним увеличением и, в конечном итоге, снижением [24].

Но в целом тенденция последовательного снижения выбросов CO₂ в Китае от лесных пожаров за последние годы подтверждает закономерность, показанную на рис. 11 и 12 а-в.

Лесные пожары и эмиссия углерода в России

Площадь лесов России составляет 815 млн га, или 20 % от общей площади лесов в мире. Динамика лесов и управление ими на этой обширной территории играют важную роль в глобальном круговороте углерода и влияют на уровень CO₂ в атмосфере [50]. В последние годы пожары в российских лесах стали известны во всем мире как катастрофические: они распространяются на обширные территории, образуя густой дым, который достигает других регионов и стран [78, 79]. Согласно отчету Службы мониторинга атмосферы Copernicus [17], в результате пожаров в Дальневосточном федеральном округе России в период с июня по август 2020 года было выброшено в общей сложности около 540 млн т CO₂, что превышает предыдущий самый высокий объем выбросов в 2003 году. Согласно выполненным расчетам [78], основанным на картах лесной растительности и лесопожарного районирования, дальневосточные леса охватывают более 304 млн га, из них 160 млн га (54%) не подлежат охране от пожаров. Из-за усиления лесных пожаров происходит выброс все большего количества углерода [61], что усугубляет последствия изменения климата [110].

Национальный кадастровый отчет России согласно Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) [90] содержит официальные значения поглощения углерода лесами и выбросов в результате лесных пожаров. Существенный недостаток национального кадастрового отчета [90] заключается в том, что он не отражает выбросы из неуправляемых (резервных) лесов в соответствии с действующей отчетностью РКИК ООН. Кроме того, официальная государственная статистика содержит устаревшие данные, которые соответствуют состоянию лесов на 2012 год, а не на 2020 год. Поэтому для всестороннего анализа выбросов во всех лесах России было выполнено исследование на основе спутниковых данных [79].

Полный набор информации о составе атмосферы [100] предоставляет алгоритм Copernicus Atmosphere Monitoring Service [18]. Он основан на следующем надежном физическом принципе: скорость выделения теплового излучения при пожаре зависит от скорости сгорания топлива и образования дыма. Усредненные за день данные о радиационной мощности и интенсивности пожаров используются для оценки выбросов газов и твердых частиц в глобальном масштабе. Для анализа поврежденных пожарами районов [30] за 2010-2020 годы была использована информация о сгоревших площадях, основанная на данных MODIS (MCD64A1). Продукт MCD64A1 с разрешением 500 м в пикселях включает в себя информацию о дате пожара, неопределенности данных о пожаре, гарантии качества данных, первом и последнем дне надежного обнаружения изменений. Спутниковые наблюдения MODIS предоставляют глобальные данные о пространственно-временных закономерностях сгоревшей фитомассы [4]. Исходные данные о площади сгоревших лесов, представленные в растровом формате, были преобразованы в проекцию ESRI:102025, и построены векторные полигоны на основе растра, совмещенные с векторной маской лесной растительности [18]. Затем рассчитана площадь сгоревших лесов с использованием инструмента QGIS v 3.16 [79].

Авторы [79] отмечают, что в российском законодательстве нет определения понятия «управляемый лес». В Лесном кодексе 2006 года, регулирующем правила ведения лесного хозяйства, не используются термины «управляемый» и «неуправляемый лес». Отсутствие терминологии и четкого различия между управляемыми и неуправляемыми категориями, которые должны быть прозрачными в соответствии с руководящими принципами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) приводит к непониманию методологии управления лесами на региональном уровне и вносит неопределенность в глобальный углеродный цикл российских лесов. В начале подготовки отчетности по Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН) в 2011 году в России было решено считать охраняемые и лесопромышленные леса управляемыми, а резервные леса неуправляемыми, в результате чего не были учтены какие-либо изменения в поглощении углерода или его потерях в резервных лесах, охватывающих 21,6% лесов России. Хотя резервные леса поглощают около 120 тыс. тонн углерода в год [26] и существует неопределенный объем потерь углерода, связанных с пожарами, нападениями насекомых и незаконными рубками, резервные леса по-прежнему не включаются в отчеты согласно РКИК ООН [79].

Оценка площадей сгоревших лесов [79] была выполнена с учетом качества противопожарного контроля за лесами, т.е. на площадях наземного, авиационного

и космического контроля, составляющих соответственно 9, 40 и 43 % общей площади лесов. Наибольшее сокращение площади лесов с 2000 по 2020 год наблюдалось в зоне космического контроля (резервные леса Сибири и Дальнего Востока) - на 15 млн га. Площадь лесов в зоне авиаконтроля сократилась на 5 млн га. Были сопоставлены выгоревшие площади согласно данным Национального кадастрового отчета (NIR) и согласно спутниковым данным MODIS на основе продукта MCD64A1. Результаты представлены на рис. 14. Общая площадь сгоревших лесов России за 2001-2020

годы, представленная по данным Национального кадастрового отчета за 2021 год была занижена на 95,9 млн га (или в среднем на 4,8 млн га за 1 год).

Средние годовые выбросы в результате лесных пожаров в период с 2001 по 2020 годы по данным Национального кадастрового отчета составили 81,2 млн т углерода, или 298 млн т CO₂. Чтобы получить более точные данные, были сопоставлены потери углерода вследствие лесных пожаров по Национальному кадастровому отчету и оцененные Службой мониторинга атмосферы [18] (рис. 15).

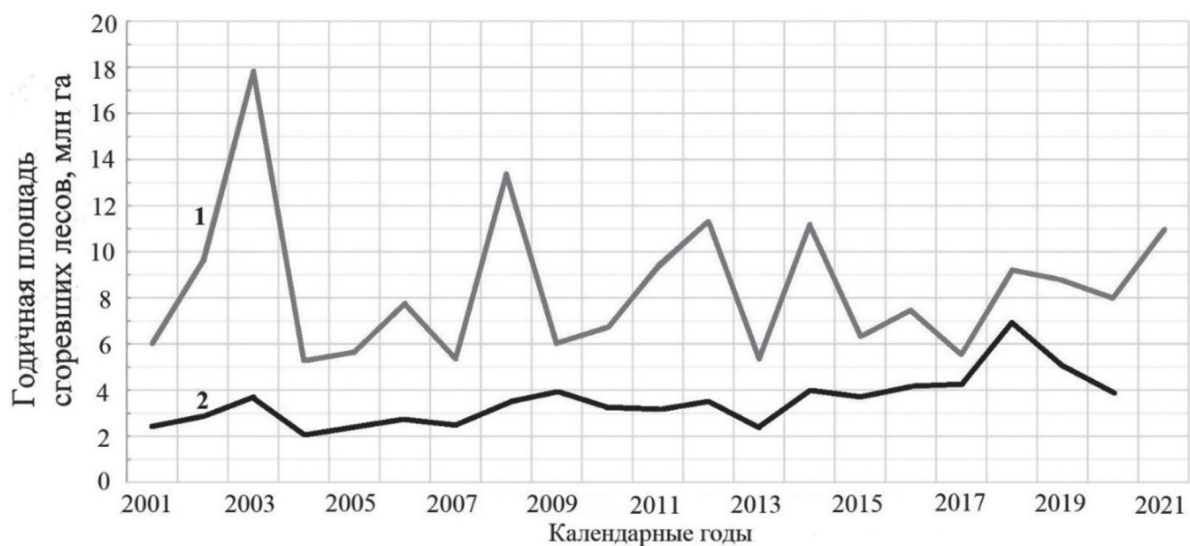


Рис. 14. Годичная площадь сгоревших лесов по данным MODIS (MCD64A1) (1) и Национального кадастрового отчета (NIR) (2) и в России с 2001 по 2021 годы [79].

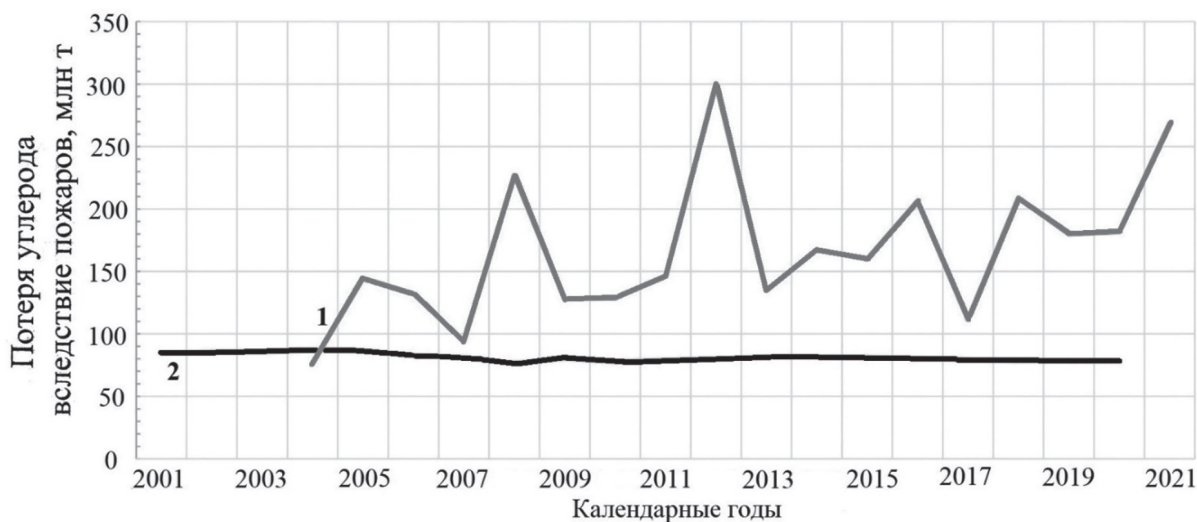


Рис. 15. Потери углерода в результате лесных пожаров, которые оцениваются с использованием данных Службы мониторинга атмосферы Сорепісус (1) и о которых сообщается в Национальном кадастровом отчете (NIR) (2) за период с 2001 по 2021 годы [79].

Выполненные оценки с использованием данных Службы мониторинга атмосферы [18] показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 179,7 млн т углерода, что эквивалентно 659 млн т CO₂. Таким образом, около 99,9 млн т углерода (или 366 млн т CO₂) не отражено в Национальном кадастровом отчете за тот же период. В целом, совокупные выбросы в результате пожаров в российских лесах с 2004 по 2020 годы были выше на 1359 млн т углерода, и эти цифры до сих пор не указываются в кадастровых отчетах. В целом, в 2016-2021 годы на 417,7 млн га лесов резервной зоны (43% площади лесов) приходилось около половины (53 %) всех выбросов углекислого газа от пожаров, в то время как на остальные 487 млн га приходилась другая половина (47%). Разрушительные пожары в резервной зоне увеличили средние годовые выбросы с 25 млн тонн (с 2004 по 2010 годы) до 66,2 млн т (с 2011 по 2020 годы) и за период с 2016 по 2021 годы достигли 92,1 млн тонн. Вследствие игнорирования эмиссии углерода от пожаров резервных лесов в Национальных кадастровых отчетах заявлено лишь 45% общей фактической эмиссии [79].

С учетом установленных потерь углерода в результате лесных пожаров была предложена переоценка чистого поглощения углерода российскими лесами [79]. Для этого была использована методологически наиболее строгая (поскольку она учитывает все типы растительности) оценка поглощения углерода с учетом резервных лесов по методике А. Н. Филипчука [26]. Расчет был выполнен на основе данных Государственного лесного реестра за 2015 год с использованием методологии МГЭИК. Накопление углерода в российских лесах в 2015 году составило 630 ± 110 млн тонн [26], что примерно в два раза превышает официальные 332 млн тонн углерода в год согласно Национальному кадастровому отчету. Основное отличие этой оценки от предыдущих заключается в том, что она учитывает накопление углерода в труднодоступных резервных лесах и включает площади кустарников (около 80 млн га) [26]. Полученная оценка чистого поглощения углерода за 2015-2020 годы [79], довольно близка к оценке Д. Щепаченко на основе спутниковых данных за период с 1988 по 2014 годы [81].

Вызовы, связанные с изменением климата, требуют разработки и последовательного проведения особой экологической политики в России. Несмотря на то, что ежегодное накопление углерода в российских лесах полностью компенсирует его суммарную промышленную эмиссию, в проведении лесной политики сказывается слабая эффективность Лесного кодекса Российской Федерации 2006 года, которая была поставлена под сомнение профессиональным лесным сообществом практически сразу после его введения [41, 91]. В результате в оценке углеродного бюджета

лесного покрова есть существенные неопределенности и недочеты. По крайней мере, одна из них связана с использованием устаревших на 20 лет данных инвентаризации лесов в связи с отменой ГУЛФ, а вторая – с ликвидацией существовавшей ранее лесной охраны. Летом 2010 года в европейской части РФ было зарегистрировано более 6 тыс. пожаров, повлекших выбросы CO₂ в количестве 256 млн т. В это же время в Оренбургской области, где всё лето стояла жара за 40° С, не было потеряно ни одного гектара леса, потому что по согласованию с губернатором действие нового Лесного кодекса было отложено, сохранена служба охраны лесов, и все пожары тушили «в зародыше» [34, 91].

Необходимость усовершенствования системы охраны лесов от пожаров в России является неотложной государственной задачей, однако ее эффективное решение остается пока делом будущего, а ряд государственных решений последних лет нанес непоправимый ущерб существовавшей системе пожарной охраны лесов. Хотя более 87 % лесных пожаров в России происходит по вине населения [65], продолжающаяся административная реформа и постоянные изменения в лесном законодательстве ведут к полному демонтажу системы лесной охраны [49]. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года [91].

Заключение

Глобальные ежегодные выбросы CO₂ в результате лесных пожаров составляют примерно пятую часть глобальных выбросов CO₂ от использования ископаемого топлива, а в некоторых регионах уже сегодня лесные пожары привели к выбросу в атмосферу в два-три раза большего количества CO₂ по сравнению с сжигаемым ископаемым топливом. Дистанционный анализ площадей, пройденных природными пожарами за последние 20 лет, показал наличие как отрицательных, так и положительных тенденций, что связано с получением этих оценок датчиками с грубым пространственным разрешением, непригодными для обнаружения небольших пожаров. При имеющихся сложностях непосредственного измерения выбросов CO₂ при пожарах на основе спутниковых наблюдений, подобные наблюдения за атмосферной окисью углерода (CO), полученные на основе данных ближнего и теплового инфракрасного излучения, обеспечивают альтернативный подход к косвенному отслеживанию выбросов CO₂ при пожарах. За последние 20 лет установлено увеличение выбросов углерода от природных пожаров в бореальных лесах и их снижение в тропиках. На мировом уровне по разным оценкам имеется как снижение, так и повышение уровня выбросов CO₂

при природных пожарах. В результате моделирования глобального биогеохимического цикла CO_2 , в том числе с учетом лесных пожаров, установлено, что по мере роста концентрации CO_2 в атмосфере и глобального потепления частота и интенсивность пожаров в ближайшие десятилетия будет возрастать, и возникает положительная обратная связь между глобальным потеплением и выбросами от лесных пожаров лесов.

В бореальной части Северной Америки площадь лесных пожаров за последние 60 лет почти удвоилась, и увеличилось количество крупных пожаров. Согласно прогнозам, к 2050 году лесные пожары здесь могут привести к суммарным выбросам от 1,33 до 11,93 Гт CO_2 . Усиленная борьба с пожарами могла бы снизить выброс CO_2 в период с 2021 по 2050 годы до уровня от 0,89 до 3,87 Гт. Показано, что увеличение ресурсов, выделяемых на борьбу с пожарами, может стать экономически эффективной стратегией ограничения потерь глобально значимых количеств углерода, накопленных в бореальных лесах.

В Китае среднегодовой объем выбросов CO_2 в результате природных пожаров в период с 2001 по 2022 годы составил 31,5 Гт, что составляет 0,52% выбросов от сжигания ископаемого топлива. Выбросы CO_2 в результате лесных пожаров в Китае снижались на 0,43 Гт в год за счет осуществления специальной политики по предотвращению лесных пожаров и эффективных мер борьбы с ними.

В России в последние годы лесные пожары стали известны во всем мире как катастрофические: они распространяются на обширные территории, образуя густой дым, который достигает других регионов и стран. При использовании радиометра AVHRR со спутника NOAA оценка среднегодовой площади лесных пожаров с 1998 по 2010 годы составила 8,23 млн

га, что в 5,9 раза больше, чем средняя годовая площадь пожаров по официальным данным Росстата за 2000–2009 годы – 1,4 млн га. Последняя цифра относится только к площади управляемых лесов. В результате лесных пожаров с 2001 по 2020 годы средние годовые выбросы по данным Национального кадастрового отчета составили 298 млн т CO_2 . Выполненные оценки с использованием данных Службы мониторинга атмосферы Copernicus Atmosphere Monitoring Service показали, что с 2011 по 2020 годы российские леса ежегодно выбрасывали в атмосферу 659 млн т CO_2 . Таким образом, выбросы около 361 млн т CO_2 (55%) не отражены в Национальном кадастровом отчете за тот же период. С 2004 по 2021 годы пожары в резервной зоне, где борьба с ними не предусмотрена, увеличили средние годовые выбросы CO_2 с 25 до 92 млн т. Для решения проблемы предупреждения и тушения катастрофических лесных пожаров требуется, прежде всего, восстановление государственной лесной охраны, упраздненной Лесным кодексом 2006 года. В России велика вероятность развития положительной обратной связи между глобальным потеплением и эскалацией катастрофических лесных пожаров.

В целом, в зависимости от применяемых методов, оценки выбросов CO_2 от пожаров за последние десятилетия выявили как положительные, так и отрицательные тенденции, а прогнозы на ближайшие десятилетия однозначно показывают увеличение выбросов CO_2 от природных пожаров, что с учетом глобального потепления означает возможность развития положительной обратной связи двух тенденций.

Благодарности. Авторы благодарят Николая Ивановича Плюху за помощь в оформлении рисунков.

Литература

1. Abatzoglou JT, Williams AP, Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. *Geophys Res Lett.* 2019;46(1):32-36.
2. Amatulli G, McInerney D, Sethi T et al. Geomorpho90m, empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers. *Sci Data.* 2020;7(1):162.
3. Andela N, Morton DC, Giglio L et al. A human-driven decline in global burned area. *Science.* 2017;356(6345):1356-62.
4. Andela N, Morton D, Giglio L et al. The global fire atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth Syst Sci Data.* 2019;11(2):529-52.
5. Archibald S, Lehmann CER, Gómez-Dans JL et al. Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2013;110(16):6442-7.
6. Balla A, Silini A, Cherif-Silini H et al. The threat of pests and pathogens and the potential for biological control in forest ecosystems. *Forests.* 2021;12(11):1579.
7. Bekryaev RV, Polyakov IV, Alexeev VA Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. *J. Climate.* 2010; 23(14):3888-906.
8. Bowman DMJS, Williamson GJ, Price OF et al. Australian forests, megafires and the risk of

- dwindling carbon stocks. *Plant Cell Environ.* 2021;44(2):347-55.
9. Bradshaw CJA, Warkentin IG Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global Planet Change.* 2015;128:24-30.
 10. Calef MP, Varvak A, McGuire AD et al. Recent changes in annual area burned in interior Alaska: The impact of fire management. *Earth Interact.* 2015;19(5):1-17.
 11. Canadell JG, Meyer CP, Cook GD et al. Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. *Nat Commun.* 2021;12(1):6921.
 12. Cardil A, De-Miguel S, Silva CA et al. Recent deforestation drove the spike in Amazonian fires. *Environ Res Lett.* 2020;15(12):121003.
 13. Chuvieco E, Pettinari ML, Koutsias N et al. Human and climate drivers of global biomass burning variability. *Sci Total Environ.* 2021;779:146361.
 14. Clarke H, Nolan RH, De Dios VR et al. Forest fire threatens global carbon sinks and population centres under rising atmospheric water demand. *Nat Commun.* 2022;13(1):7161.
 15. International Energy Agency. CO₂ emissions in 2023 - A new record high, but is there light at the end of the tunnel? URL: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
 16. Cochrane MA Fire science for rainforests. *Nature.* 2003;421(6926):913-9.
 17. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), 2020. Copernicus Reveals Summer 2020's Arctic Wildfires Set New Emission Records [WWW Document]. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/copernicus-reveals-summer-2020s-arctic-wildfires-set-new-emission-records>.
 18. Copernicus Atmosphere Monitoring Service, 2021. Northern Hemisphere Wildfires Follow Pattern of Warm and Dry Weather. URL: <https://atmosphere.copernicus.eu/northern-hemisphere-wildfires-follow-pattern-warm-and-dry-weather>.
 19. Cunningham CX, Williamson GJ, Nolan RH et al. Pyrogeography in flux: Reorganization of Australian fire regimes in a hotter world. *Glob Change Biol.* 2024;30(1):e17130.
 20. Curtis PG, Slay CM, Harris NL et al. Classifying drivers of global forest Loss. *Science.* 2018;361(6407):1108-11.
 21. Di Virgilio G, Evans JP, Blake SAP et al. Climate change increases the potential for extreme wildfires. *Geophys Res Lett.* 2019;46(1):8517-26.
 22. Dobson JE, Bright EA, Coleman PR et al. LandScan: A global population database for estimating populations at risk. *Photogramm Eng Remote Sens.* 2000;66(7):849-57.
 23. Ertugrul M, Varol T, Ozel HB et al. Influence of climatic factor of changes in forest fire danger and fire season length in Turkey. *Environ Monit Assess.* 2021;193(1):28.
 24. Fan D, Wang M, Liang T et al. Estimation and trend analysis of carbon emissions from forest fires in mainland China from 2011 to 2021. *Ecol Inform.* 2024;81:102572.
 25. FAO. Global forest resources assessment 2020: Main report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2020.
 26. Filipchuk A, Moiseev B, Malysheva N et al. Russian forests: a new approach to the assessment of carbon stocks and sequestration capacity. *Environ Dev.* 2018;26:68-75.
 27. Flannigan M, Cantin AS, de Groot WJ et al. Global wildland fire season severity in the 21st century. *For Ecol Manag.* 2013;294(S1):54-61.
 28. Gao J, Yang Y, Wang H et al. Climate responses in China to domestic and foreign aerosol changes due to clean air actions during 2013–2019. *Clim Atmos Sci.* 2023;6:160.
 29. Gatti LV, Basso LS, Miller JB et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature.* 2021;595(7867):388-93.
 30. Giglio L, Boschetti L, Roy DP et al. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sens Environ.* 2018;217(7):72-85.
 31. Giglio L, Schroeder W, Justice CO. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sens Environ.* 2016;178(1):31-41.
 32. Gong X, Liu Z, Tian J et al. Global carbon emission accounting: national-level assessment of wildfire CO₂ emission - a case study of China. *EGUsphere.* 2024. Preprint. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1684>
 33. Gupta GS. Land degradation and challenges of food security. *Rev Eur Stud.* 2019;11(1):63.
 34. Guo M, Li J, Xu J et al. CO₂ emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data. *Environ Pollut.* 2017; 226:60-8.
 35. Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. *Nature.* 2007;445(7125):256.
 36. Hanes CC, Wang X, Jain P et al. Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Can J For Res.* 2019;49(3):256-69.
 37. Hansen MC, Potapov PV, Moore R et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science.* 2013;342(6160):850-3.
 38. Hansen MC, Wang L, Song XP et al. The fate of tropical forest fragments. *Sci Adv.* 2020;6(11):eaax8574.
 39. Harvey BJ, Donato DC, Turner MG. Drivers and trends in landscape patterns of stand-replacing fire in forests of the US Northern

- Rocky Mountains (1984-2010). *Landscape Ecol.* 2016;31(10):2367-83.
40. Hély C, Caylor K, Alleaume S et al. Release of gaseous and particulate carbonaceous compounds from biomass burning during the SAFARI 2000 dry season field campaign. *J Geophys Res.* 2003;108(D13):8470.
 41. Hitchcock E. The 2006 Forest Code of the Russian Federation: An evaluation of environmental legislation in Russia. *ASEES.* 2010;24(1-2):19-39.
 42. Huete A, Didan K, Miura T et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ.* 2002;83(1-2):195-213.
 43. Huo LZ, Boschetti L, Sparks AM. Object-based classification of forest disturbance types in the conterminous United States. *Remote Sens.* 2019;11(5):477.
 44. Janssen TAJ, Jones MW, Finney D et al. Extratropical forests increasingly at risk due to lightning fires. *Nat Geosci.* 2023;16(12):1136-44.
 45. Jhariya MK, Banerjee A, Meena RS, Yadav DK, eds.. *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management.* Berlin: Springer; 2019.
 46. Jin Q, Wang W, Zheng W et al. Dynamics of pollutant emissions from wildfires in Mainland China. *J Environ Manage.* 2022;318(9):115499.
 47. Jones MW, Abatzoglou JT, Veraverbeke S et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Rev Geophys.* 2022;60(3):e2020RG000726.
 48. Jones MW, Veraverbeke S, Andela N et al. Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. *Science.* 2024;386(6719):ead15889.
 49. Karpachevskiy ML. Forest fires in the Russian taiga: Natural disaster or poor management? In: *Taiga Rescue Network Factsheet.* Jokkmokk, Sweden: Biodiversity Conservation Center; 2004.
 50. Keenan RJ. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Ann For Sci.* 2015; 72(2):145-67.
 51. Kelly LT, Giljohann KM, Duane A et al. Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science.* 2020;370(6519):eabb0355.
 52. Kelly R, Chipman ML, Higuera PE et al. Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2013;110(32):13055-60.
 53. Kitzberger T, Falk DA, Westerling AL et al. Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America. *PLoS One.* 2017;12(12):e0188486.
 54. Krawchuk MA, Haire SL, Coop J et al. Topographic and fire weather controls of fire refugia in forested ecosystems of northwestern North America. *Ecosphere.* 2016;7(12):e01632.
 55. Kurz WA, Hayne S, Fellows M et al. Quantifying the impacts of human activities on reported greenhouse gas emissions and removals in Canada's managed forest: conceptual framework and implementation. *Can J For Res.* 2018;48(10):1227-40.
 56. Lasslop G, Hantson S, Harrison SP et al. Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction. *Glob Change Biol.* 2020;26(9):5027-41.
 57. Liu Z, Ballantyne AP, Cooper LA. Biophysical feedback of global forest fires on surface temperature. *Nat Commun.* 2019;10(1):214-9.
 58. Lizundia-Loiola J, Otón G, Ramo R et al. Spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sens Environ.* 2020;236:2005-12.
 59. Lü A, Tian H, Liu M et al. Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000. *J Geophys Res.* 2006;111:D05313.
 60. Mahmoud MI, Campbell MJ, Sloan S et al. Land-cover change threatens tropical forests and biodiversity in the Littoral Region, Cameroon. *Oryx.* 2020;54(6):882-91.
 61. Masyagina OV. Carbon dioxide emissions and vegetation recovery in fire-affected forest ecosystems of Siberia: Recent local estimations. *Curr Opin Environ Sci Health.* 2021;23:100283.
 62. Matveev SM, Slavskiy VA, Sheshnitsan SS et al. Sequestered carbon in the above-ground phytomass of forests affected by fires of different intensity. *Rus J Ecol.* 2025; 56(3):245-57.
 63. Meijer JR, Huijbregts MAJ, Schotten KCGJ et al. Global patterns of current and future road infrastructure. *Environ Res Lett.* 2018;13(6):064006.
 64. Ménard LP, Ruel JC, Thiffault N. Abundance and impacts of competing species on conifer regeneration following careful logging in the eastern Canadian boreal forest. *Forests.* 2019;10(2):177.
 65. Mollicone D, Eva H, Achard F. Human role in Russian wild fires. *Nature.* 2006;440(7083):436-7.
 66. Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst Sci Data.* 2021;13(9):4349-83.
 67. Nikonovas T, Doerr SH. Extreme wildfires are turning the world's largest forest ecosystem from carbon sink into net-emitter. *Conversation Newslett.* 2023:1-5. URL: <https://phys.org/>

- news/2023-03-extreme-wildfires-world-largest-forest.html
68. Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED et al. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth. *Bioscience*. 2001;51(11):933.
 69. Pausas JG, Keeley JE. Wildfires and global change. *Front Ecol Environ*. 2021;19(7):387-95.
 70. Phillips CA, Rogers BM, Elder M et al. Escalating carbon emissions from North American boreal forest wildfires and the climate mitigation potential of fire management. *Sci Adv*. 2022;8(17):eabl7161.
 71. Pinto FAN. Saving global forests from the changing climate. *Science Insights*. 2025; 47(5): 2025-9.
 72. Potapov P, Hansen MC, Kommareddy I et al. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. *Remote Sens*. 2020;12(3):426.
 73. Qiu X, Duan L, Chai F et al. Deriving high-resolution emission inventory of open biomass burning in China based on satellite observations. *Environ Sci Technol*. 2016;50:11779-86.
 74. Ramo R, Roteta E, Bistinas I et al. African burned area and fire carbon emissions are strongly impacted by small fires undetected by coarse resolution satellite data. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2021;118(9):e2011160118.
 75. Reid PC, Hari RE, Beaugrand G et al. Global impacts of the 1980s regime shift. *Glob Change Biol*. 2016;22(2):682-703.
 76. Rogelj J, Shindell D, Jiang K et al. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In: G. Flato, J. Fuglestedt, R. Mrabet, R. Schaeffer, eds. *Global Warming of 1.5°C. Final Government Draft. Chapter 2*. Geneva; 2018. P.93-174.
 77. Rogers BM, Soja AJ, Goulden ML et al. Influence of tree species on continental differences in boreal fires and climate feedbacks. *Nat Geosci*. 2015;8(3):228-34.
 78. Romanov AA, Tamarovskaya AN, Gusev BA et al. Catastrophic PM_{2.5} emissions from Siberian forest fires: Impacting factors analysis. *Environ Pollut*. 2022a;306(8):119324.
 79. Romanov AA, Tamarovskaya AN, Gloor E et al. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021. *Sci Total Environ*. 2022b;846(333):157322.
 80. Sánchez-Hernández G, Turco M, Repeto-Deudero I et al. Record-breaking 2025 European wildfires concentrated in Northwest Iberia. *Glob Change Biol*. 2025;31:e70649.
 81. Schepaschenko D, Moltchanova E, Fedorov S et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Sci Rep*. 2021;11(1):12825.
 82. Schoennagel T, Balch JK, Brenkert-Smith H et al. Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2017;114(18):4582-90.
 83. Scott AC, Glasspool IJ. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2006;103(29):10861-5.
 84. Singh S. Forest fire emissions: A contribution to global climate change. *Front For Glob Change*. 2022;5:925480.
 85. Singh S, Suresh Babu KV. Forest fire susceptibility mapping for Uttarakhand state by using geospatial techniques. In: Rai PK, Singh P, Mishra VN, eds. *Recent Technologies for Disaster Management and Risk Reduction*. Cham: Springer; 2021. P. 173-88.
 86. Strobl C, Boulesteix A-L, Kneib T et al. Conditional variable importance for random forests. *BMC Bioinformatics*. 2008;9(1):307.
 87. Tabor K, Hewson J, Tien H et al. Tropical protected areas under increasing threats from climate change and deforestation. *Land*. 2018;7(3):90.
 88. Tarko AM. Analysis of the world's forest fires and their relationship to the global carbon dioxide cycle. *NJD-iScience*. 2020;50:34-44.
 89. Tyukavina A, Potapov P, Hansen MC et al. Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. *Front Remote Sens*. 2022;3:825190.
 90. UNFCCC. Russia. National Inventory Report. 2021. URL: <https://unfccc.int/documents/273477>.
 91. Usoltsev V. *Forest Arabesques, or Sketches of Our Trees' Life*. Radom: Radomska Szkoła Wyższa w Radomiu; 2019. URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.2551187>
 92. van der Velde IR, van der Werf GR, Houweling S et al. Vast CO₂ release from Australian fires in 2019-2020 constrained by satellite. *Nature*. 2021;597(7876):366-9.
 93. van der Werf GR, Randerson JT, Collatz GJ et al. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Nino/La Nina period. *Science*. 2004;303(5654):73-6.
 94. van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth Syst Sci Data*. 2017;9(2):697-720.
 95. van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L et al. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmosph Chem Phys*. 2010;10(6):11707-35.
 96. van Dijk J. Biodiversity and nature. In: *The Netherlands and the Dutch. World Regional Geography Book Series*. Cham: Springer; 2019. P. 81-104.

97. van Wees D, van der Werf GR, Randerson JT et al. Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED). *Geosci Model Dev.* 2022;15(22):8411-37.
98. Veraverbeke S, Rogers BM, Goulden ML et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nat Clim Chang.* 2017;7(7):529-34.
99. Vitolo C, Di Giuseppe F, Barnard C et al. ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Sci Data.* 2020;7(1):216.
100. Wagner A, Bennouna Y, Blechschmidt AM et al. Comprehensive evaluation of the Copernicus atmosphere monitoring service (CAMS) reanalysis against independent observations: reactive gases. *Elementa Sci Anthropocene.* 2021;9(1). URL: <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00171>.
101. Walker XJ, Baltzer JL, Cumming SG et al. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature.* 2019;572(7770):520-3.
102. Ward M, Tulloch AIT, Radford JQ et al. Impact of 2019-2020 mega-fires on Australian fauna habitat. *Nat Ecol Evol.* 2020;4(10):1321-6.
103. Wright LA, Kemp S, Williams I. "Carbon footprinting": towards a universally accepted definition. *Carbon Manag.* 2011;2(1):61-2.
104. Wu C, Liu X, Lin Z et al. Impacts of absorbing aerosol deposition on snowpack and hydrologic cycle in the Rocky Mountain region based on variable-resolution CESM (VR-CESM) simulations. *Atmos Chem Phys.* 2018;18:511-33.
105. Xie X, Zhang Y, Liang R et al. Wintertime heavy haze episodes in Northeast China driven by agricultural fire emissions. *Environ Sci Technol Lett.* 2024;11(2):150-7.
106. Xu X, Jia G, Zhang X et al. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Glob Change Biol.* 2020;26(10):5874-85.
107. Zheng B, Ciais P, Chevallier F et al. Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Sci Adv.* 2021;7(39):eabh2646.
108. Zheng B, Ciais P, Chevallier F et al. Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. *Science.* 2023;379(6635):912-7.
109. Zhou X, Prigent C, Yamazaki D. Toward improved comparisons between land-surface-water-area estimates from a global river model and satellite observations. *Water Resour Res.* 2021;57(5):e2020WR029256.
110. Zhu C, Kobayashi H, Kanaya Y et al. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: large underestimation in croplands. *Sci Rep.* 2017;7(1):4181.

