УДК 630*430

DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-17-41

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В ИССЛЕДОВАНИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Тарко А. М.¹, Курбатова А. И.², Григорец Е. А.²

¹ Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление»
Российской академии наук
119333, г. Москва, ул. Вавилова, д.44, корп. 2, Российская Федерация

² Российский университет дружбы народов
117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

Аннотация.

Цель. Исследовать динамику лесных пожаров в России и её субъектах, а также эмиссии CO₂ за период с 2001 по 2019 гг. для оценки связи между глобальным потеплением и лесными пожарами.

Процедура и методы. Проведён анализ опубликованных материалов и статистических источников. На базе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, а именно данных MODIS, проведено исследование динамики лесных пожаров в России и её субъектах. Наборы данных обработаны с использованием ПО QGIS и библиотек Python. Выбросы CO₂ проанализированы на базе наборов данных о пожарах Global Fire Emissions Database с применением методов системного анализа и математического моделирования. Математическое моделирование глобального цикла CO₂ выполнено с использованием глобальной пространственной модели А. М. Тарко по двум сценариям, с учётом: индустриальных выбросов и лесных пожаров; индустриальных выбросов и вырубок лесов.

Результаты. Выявлено, что за период с 2001 по 2019 гг. максимум эмпирических функций распределения площадей сгоревших лесов во всех федеральных округах смещен в сторону минимальных значений, из чего следует, что увеличение ежегодных площадей лесных пожаров в России и её субъектах происходит при общем уменьшении их количества. Наибольшее количество статистически значимых коэффициентов корреляции наблюдается в Центральном федеральном округе. Продемонстрирована прямая зависимость площадей лесных пожаров от средней годовой температуры и обратная – от среднего годового количества осадков. Отмечен рост массы сгоревшего сухого вещества и эмиссии CO₂ в результате пожаров на 90% в 2019 по сравнению с 2001 гг., в том числе в результате лесных пожаров – на 167%. Математическое моделирование глобального цикла CO₂ в биосфере показало положительную обратную связь между глобальным потеплением и лесными пожарами.

Теоретическая и/или практическая значимость. Проведенное исследование представляют собой актуальную базу для проведения дальнейшего анализа по изучению динамики лесных пожаров в России, их последствий как для биогеохимического цикла углерода, так и для экологических функций лесных сообществ.

Ключевые слова: лесной пожар, дистанционное зондирование, эмпирическая функция распределения, глобальное потепление, климатические аномалии, математическое моделирование, глобальный цикл двуокиси углерода

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке Российского университета дружбы народов Проекта 5-100

SYSTEM ANALYSIS OF FOREST FIRES IN THE RUSSIAN FEDERATION

A. Tarko¹, A. Kurbatova², E. Grigorets²

*1 Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS
44 str. 2, ul. Vavilova, Moscow 119333, Russian Federation*

*2 Peoples' Friendship University of Russia
6 ul. Miklukho-Maklaya, Moscow 6117198, Russian Federation*

Abstract

Aim. The dynamics of forest fires in Russia and its regions and CO₂ emissions from 2001 to 2019 are investigated to assess the relationship between global warming and forest fires.

Methodology. The published materials and statistical sources are analyzed and the databases on fires are studied. The dynamics of forest fires in Russia and its regions is examined on the basis of remote sensing data from the Earth (MODIS data). The datasets are processed using QGIS software and Python libraries. CO₂ emissions are analyzed using the Global Fire Emissions Database fire datasets using system analysis and mathematical modeling. Mathematical modeling of the global CO₂ cycle is carried out using the global spatial model of A. M. Tarko under two scenarios – taking into account industrial emissions and forest fires and taking into account industrial emissions and deforestation.

Results. It is found that for the period from 2001 to 2019, the maximum increase in the empirical distribution functions of the areas of burnt forests in all federal districts is shifted towards the minimum values, which implies an increase in the annual areas of forest fires in Russia and its constituent entities, with a general decrease in their number. The largest number of statistically significant correlation coefficients is observed in the Central Federal District. The direct dependence of the areas of fires on the average annual temperature and inverse dependence on the average annual amount of precipitation is demonstrated. It is revealed that the burnt dry matter and CO₂ emissions from fires increased by 90% in 2019 compared to 2001. An increase by 167% is found if forest fires are taken into account. Mathematical modeling of the global CO₂ cycle in the biosphere demonstrates a positive feedback between global warming and forest fires.

Research implications. The conducted research is an actual basis for the further study of the dynamics of forest fires in Russia, as well as for the ecological functions of forest communities.

Keywords: forest fires, remote sensing, empirical distribution function, global warming, climate anomalies, mathematical modeling, global carbon dioxide cycle.

Acknowledgment. The work is supported by a grant from the People's Friendship University of Russia (Project No. 5-100).

Введение

Исследование пожаров находится на стыке нескольких наук: биологических, географических, экологических, экономических и др. В настоящее время при экономическом анализе развития региона или страны нельзя не учитывать влияние пожаров на природные факторы, а при анализе динамики природных процессов необходимо оценивать влияние пожаров на экономические процессы. Необходимо исследовать нарушение биогеохимических циклов, прежде всего цикла CO_2 , в тоже время оценивая степень выполнения обязательств в рамках Парижского климатического соглашения 2015 г. В течение последних лет пожары стали элементом глобального развития биосферы, фактором, который необходимо учитывать при анализе глобального потепления и выборе действий для его ослабления.

Данные показывают¹ [4], что с годами лесных пожаров становится больше, масштаб их воздействия также увеличивается. Очевидно, что глобальное потепление является одной из причин такого увеличения. Проблема пожаров состоит не только в том, что борьба с ними становится все более дорогостоящей, а разрушения от них увеличиваются. Пожары стали одним из факторов мирового развития, прежде всего по причине ущерба, нанесенного населению и хозяйству, а также в связи с продолжающимися тенденциями глобального потепления и предпринимаемыми мерами для его ослабления.

Вместе с тем масштаб, сила и цикличность пожаров, их последствия для природы, экономики, климата слабо исследованы, особенно на региональном и глобальном уровнях. Публикация сведений о пожарах в России и мире содержит или изложение ограниченных сложных эффектов, или описание экстремальных нарушений, что мало соответствует пониманию происходящих процессов.

Целью нашей работы является анализ изменений характера протекания лесных пожаров на территории России. Задачами работы являются: определение динамики лесных пожаров на территории страны во времени и пространстве; определение взаимосвязи увеличения их частоты и нарушения климатических процессов в биосфере на региональном и национальном уровнях; оценка степени зависимости лесных пожаров от климатических изменений, в частности, температуры и осадков; оценка актуального состояния и прогноз будущего изменения биогеохимического цикла двуокиси углерода с использованием метода компьютерного моделирования.

Углерод сгоревшей при пожаре древесной растительности, соединившись с кислородом воздуха, превращается в CO_2 и выделяется в атмосферу. Погибшая, но не полностью сгоревшая масса деревьев в течение нескольких лет разлагается, и образовавшийся при этом CO_2 продолжает выделяться в атмосферу. Часть древесины и зеленой массы при пожаре окисляются не полностью, что способствует образованию окиси углерода и метана, которые попадают в атмосферу, постепенно окисляются и переходят в CO_2 . Оставшиеся на вырубке гумус почвы

¹ Рамочная конвенция об изменении климата [Электронный ресурс]. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml (дата обращения: 24.03.2021)

и подстилка разлагаются и, если не начинается бурный рост трав и новой древесной растительности, тоже с некоторой задержкой в виде CO_2 переходят в атмосферу. Выделение CO_2 в атмосферу продолжается после пожара длительное время – до становления в нарушенной экосистеме нового положения равновесия, тогда она перестанет быть источником биосферных выбросов CO_2 и сможет снова выполнять свою биосферную функцию – поглощать выбросы CO_2 из атмосферы [6; 7].

По своему функциональному значению действие пожаров эквивалентно происходящим одновременно двум антропогенным воздействиям: вырубке лесов и эрозии почв. Однако проявление увеличения количества пожаров отличается от вырубки и эрозии. Поскольку вырубка и эрозия осуществляется людьми для своих нужд, то в первом приближении можно считать, что их увеличение пропорционально численности населения, которая сейчас растет всюду, кроме развитых стран. Пожарная горючесть лесов сильно увеличивается при росте температуры воздуха и уменьшении количества осадков. Именно это обстоятельство является проявлением глобального потепления и одного из его серьезных – климатических аномалий, которые особенно заметны в годы аномальной жары и/или засухи [12; 14].

В ряде публикаций¹ [2–5; 10–14; 16] отмечается, что в настоящее время ощутимое влияние на формирование лесопожарной ситуации оказывает

глобальное потепление. Тем не менее в данной области необходимо проводить дальнейшие исследования (в т. ч. весовую оценку антропогенного фактора).

Анализ средних годовых температур демонстрирует уверенный рост значений в первое двадцатилетие XXI в. параллельно с плавным снижением среднего количества осадков в стране за этот же период, что позволяет делать предположения о влиянии данных изменений на площадную динамику пожаров в нашей стране.

Таким образом, пожары по своему действию на биогеохимические циклы становятся источником CO_2 , действующим совместно с антропогенными индустриальными выбросов CO_2 , с которыми много лет борется человечество – сначала на основе Киотского протокола 1997 г., а с 2020 г. – Парижского соглашения 2015 г. [9].

Переход к использованию лесов как источника энергии еще не закончен, он перешел в другую форму. Ископаемые органические виды топлива (каменный уголь, нефть, газ), сейчас используются как основной источник энергии человечества, который представляет собой химически и физически преобразованные остатки растительности древних биосфер. В связи с наступлением глобального потепления идет борьба с их использованием в рамках дальнейшего перехода к низкоуглеродной энергетике [8].

Материалы и методы

В данной работе использованы данные базы данных ЕМИСС РОССТАТ²,

¹ WMO Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2018 году. Женева: WMO, 2019. 44 с.

² Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gks.ru/> (дата обращения: 21.07.2020).

данные CDIAC об индустриальных выбросах CO₂ в мире в целом, в регионах стран мира и странах Евросоюза¹, количественные данные для анализа и расчетов из базы данных Всемирного банка World Development Indicators².

Площадь сгоревших лесов была получена на базе обработанных данных дистанционного зондирования Земли из космоса с аппаратуры MODIS, установленной на научно-исследовательских спутниках Aqua/Terra. Система MODIS для регистрации пожаров, помимо обычных приборов для биологических и климатических исследований данных, дополнительно использует два канала, работающих в ближнем, и два канала – в среднем диапазоне инфракрасного излучения, которые дают наиболее четкое различие сожженной территории и неповрежденной. Использовались данные о площади сгоревших лесов в 2001–2019 гг.

По данным GFED, сочетающим спутниковую информацию о пожарной активности (по данным MODIS) и информацию о продуктивности растительности для оценки ежемесячной сожженной площади и выбросов от пожаров с привязкой к координатной сетке, был проведен расчет суммарной массы сухого вещества, сгоревшего в результате пожаров на территории России с 2001 по 2019 гг., а также количества выделенного CO₂ в результате пожаров каждого типа экосистем: сельскохозяйственные земли, болота

(торфяники), саванны и леса умеренного пояса, бореальные леса.

Наборы данных загружены с веб-сайта <https://www.globalfiredata.org/>. Основные наборы использованных данных GFED:

- 1) сожженная область на базе методики Giglio et al. (2013);
- 2) сожженная область от «небольших» пожаров на основе наземного обнаружения пожаров, не входящих в данные п. 1, подробно описанные в Randerson et al. (2012) и обновления в van der Werf et al. (2017);
- 3) выбросы углерода и сухого вещества от van der Werf et al. (2017);
- 4) процентный вклад различных типов пожаров в общие выбросы;
- 5) список коэффициентов для различных веществ в составе выбросов для расчета массы выбросов газов и аэрозолей на основе Akagi et al. (2011), а также Andreae и Merlet (2001) с обновлениями, предоставленными в 2013 г. компанией М. О. Andreae.

Данные наборы были обработаны с использованием ПО QGIS и библиотек Python. На их основе проведен расчет массы сгоревшего сухого вещества (в тоннах), приходящейся на каждую ячейку с учетом типа экосистемы. Полученный набор данных зонирован по регионам и федеральным округам страны, приведен к единой СИ (тонны вещества).

Математическое моделирование глобального биогеохимического цикла CO₂, связанного с лесными пожарами, с учетом влияния антропогенных факторов проведены на глобальной пространственной модели А. М. Тарко [16], в составе которой реализованы

¹ Carbon dioxide information analysis center [Электронный ресурс]. URL: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/> (дата обращения: 24.03.2020).

² DataBank // The World Bank [Электронный ресурс]. URL: <https://databank.worldbank.org/home.aspx> (дата обращения: 21.07.2020).

три функциональных блока: «Растения – Атмосфера» и «Антропогенные воздействия – почва – атмосфера», «Океан – действия» (рис. 1).

Рис. 1 / Fig. 1. Схема математической модели глобального биогеохимического цикла углерода в биосфере, структура модели глобального цикла углерода / The scheme of the mathematical model of the global biogeochemical cycle of carbon in the biosphere, the structure of the model of the global carbon cycle.

Источник: составлено авторами по данным глобальной пространственной модели
А. М. Тарко

В модели территория всей планеты разделена на ячейки размером 0,5°0,5° географической сетки (приблизительно 50050 км). Предполагается, что в каждой ячейке суши находится растительность одного типа согласно мировой классификации. Переменными модели для каждой ячейки являются количество углерода в массе растительности, органического вещества почвы (гумуса и подстилки). Происходит обмен углеродом в форме CO₂ с атмосферой, общее количество углерода в которой также является переменной модели. 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. Климат в каждой ячейке характеризуется среднегодовой температурой воздуха у поверхности земли и количеством осадков за год. Значения температуры и осадков для каждой ячейки в зависимости от количества углерода в атмосфере (парниковый эффект) рассчитываются с помощью климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана. Модель содержит блок действия антропогенных факторов: вырубки лесов, эрозии почв и пожаров. Модель содержит более 150 тыс. дифференциальных уравнений и реализована на ЭВМ.

Моделировалась динамика биосферы с 1860 г. по 2100 гг. с услови-

ем следующего базового сценария: антропогенное поступление CO_2 в атмосферу начинается в 1860 г, происходит в результате промышленных выбросов CO_2 от сжигания ископаемых органических топлив (каменный уголь, нефть, газ), от вырубки лесов и эрозии почв. После 2016 г. темпы роста промышленных выбросов задаются прогнозом, задаваемым исследователем, с 1950 по 2100 г. идет антропогенная вырубка лесов, эрозия почв, связанная с сельскохозяйственной эксплуатацией земель, начинается в 1860 г. Территория вырубки лесов и эрозии почв задается соответствующими пространственными распределениями.

Результаты исследования

Первостепенно рассмотрена временная динамика пожаров. На рисунке 2 представлена динамика площади сгоревших лесов на территории России в 2001–2019 гг., полученная на основе анализа указанных ранее данных дистанционного зондирования. В целом за рассмотренные годы площадь пожаров увеличивается – это показывает изображенная на графике возрастающая линия линейной регрессии. Видно, что в течение этого периода площади пожаров сильно отличаются в разные годы – от минимальной величины $16,4 \text{ км}^2$ в 2001 г. площадь увеличивается в 5,1 раза до максимального значения $84,3 \text{ км}^2$ в 2003 г.

Рис. 2 / Fig. 2. Динамика площади сгоревших лесов в стране в 2001–2019 гг. (км^2). Указаны линии регрессии для всех пожаров (сплошная линия) и крупных пожаров (штриховая линия) / Dynamics of the area of burnt forests in the country in 2001–2019 (км^2). Regression lines are shown for all fires (solid line) and large fires (dashed line).

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Максимальные площадные значения гарей на территории России отмечены в 2003, 2008, 2011, 2012, 2014 и 2018 гг. На графике построена линия тренда (линейная регрессия) для аномально крупных лесных пожаров, которая демонстрирует снижение их площади к 2019 г. В связи с этим было принято решение о проведении дальнейшего анализа динамики пожаров на основе их разделения на три основные категории: отсутствие пожаров, пожары малые и средние, крупные пожары, что согласуется с различными существующими классификациями пожаров [1]. Это поможет более качественно проводить анализ и прогнозирование. При этом необходимо учесть, что на территории России крупными лесными пожарами считаются те из

них, которые имеют площадь от 20 тыс. км² (в азиатской части России) и более 200 км² в (европейской части России) [1].

На рисунке 3 представлена динамика площади гарей в трех крупнейших по площади азиатских регионах России в 2001–2019 гг. – Республика Саха (Якутия), Красноярский край, Хабаровская область. Данный график также демонстрирует пики аномально крупных пожаров и сильную вариабельность величины пожаров в течение рассматриваемого периода в каждом из регионов. При этом линии регрессии на графике указывают, что площадь пожаров в Республике Саха (Якутия) и Красноярском крае увеличивается, а в Хабаровском крае – несколько уменьшается.

Рис. 3 / Fig. 3. Динамика площади сгоревших лесов трех регионов Сибири в 2001–2019 гг. (км²). Указаны линии регрессии для пожаров Саха (Якутия) (сплошная линия), Красноярского края (штриховая линия) и Хабаровского края (штрихпунктирная линия) / Dynamics of the area of burnt forests in three regions of Siberia in 2001–2019 (km²). Regression lines are shown for the fires of Sakha (Yakutia) (solid line), Krasnoyarsk Krai (dashed line) and Khabarovsk Krai (dashed line).

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Представление о лесных пожарах по стране дает рисунок 4, на котором показаны площади гарей в 8 федеральных округах России в 2019 г. Более чем в 1 000 раз по площади отличаются пожары в Северо-Кавказском и Дальневосточном

федеральных округах, что связано с большой разницей площадей самих регионов и лесных экосистем, больше всего развитых в Сибири. К Дальневосточному федеральному округу приближается по величине пожаров и Сибирский.

Рис. 4 / Fig. 4. Соотношение площадей лесных пожаров в федеральных округах Российской Федерации в 2019 г. (км²). Горизонтальная ось имеет логарифмический масштаб / The ratio of forest fire areas in the federal districts of the Russian Federation in 2019 (km²). The horizontal axis has a logarithmic scale.

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Далее были проанализированы данные и оценен размер площадей лесных пожаров в субъектах Российской Федерации. На рисунке 5 представлены десять субъектов, в которых отмечено меньше всего количество пожаров и десять субъектов с самым большим количеством лесных пожаров в течение 10 лет (в период с 2010 по 2019 гг.). Наличие субъектов в верхних позициях в значительной степени объясняется малой площадью лесных территорий. Нижние позиции занимают субъекты с наибольшим

количеством лесных ресурсов. Стоит отметить, что список замыкают только регионы Сибири, среди которых Новосибирская, Иркутская, Амурская области, Еврейская АО, Приморский, Хабаровский, Красноярский, Забайкальский и Красноярский края, Республики Бурятия и Республика Саха (Якутия). Также важно отметить, что в Амурской области и в Республике Саха (Якутия) частота лесных пожаров почти вдвое выше, чем у остальных регионов из данного перечня.

а

б

Рис. 5 / Fig 5. Распределение 10 лидирующих (а) и 10 замыкающих (б) субъектов Российской Федерации по пожарам лесов. Указано среднее количество сгоревших лесов в течение 2010–2019 гг. / Distribution of 10 leading (a) and 10 closing (b) subjects of the Russian Federation on forest fires. The average number of burned forests during 2010–2019 is indicated

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Проведён анализ аномально высоких значений площадей сгоревших лесов в субъектах России в 2001–2019 гг. В таблице 1 указаны данные о регионах-рекордсменах по пожарам – десять регионов с максимальной величи-

ной сгоревшей в течение одного года площадью лесов (в таблицу берется лишь одно, самое высокое значение каждого региона). Все эти «рекордсмены» находятся в Сибири. Самый высокий результат в семь раз больше

самого меньшего. Имеющие самые высокие показатели Амурская область, Забайкальский край и Республика Бурятия по величине площади уступают таким гигантам, как Республика Саха (Якутия) и Красноярский край. Возможно, эти регионы, находящиеся

южнее гигантов, имеют лучшие характеристики по фотосинтетически активной части радиации (ФАР), радиационному балансу и другим тепловым климатическим характеристикам, что дает большую величину горючести для лесов.

Таблица 1 / Table 1

Рекордные значения площадей сгоревших лесов десяти регионов за год в течение 2001–2019 гг. (км¹) / Record values of burned forest areas in ten regions per year during 2001–2019 (km²)

Субъект	Рекордная площадь лесов, сгоревших за один год, (км ¹)
Амурская обл.	28 948
Забайкальский край	19 754
Республика Бурятия	19 017
Республика Саха (Якутия)	16 923
Красноярский край	13 715
Хабаровский край	11 150
Еврейская АО	8 371
Иркутская обл.	7 094
Тюменская обл.	5 788
Ханты-Мансийский АО	4 139

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Средние значения в основном показывают уже известные данные о неравномерном распределении площадей. Минимальные значения площадей лесных пожаров, из которых все, кроме Уральского федерального округа, равны нулю, означают, что во всех остальных округах бывают годы без сгоревших лесов. То, что значения медиан значительно отличаются от средних значений, свидетельствует о том, что функции распределения зарегистрированных лесных пожаров имеют в высокой степени несимметричное распределение. Это, но уже количественно, показывают скосы,

характеризующие степень асимметрии функций распределения. Оказывается, распределения сильно несимметричны, их моды (наиболее часто встречающиеся значения) смещены влево по оси координат (в сторону маленьких значений). Параметр эксцесс показывает остроту распределения. Самое высокое распределение 161,5 имеется в Приволжском федеральном округе, а самое плоское – в Дальневосточном.

Вариабельность пожаров во времени (табл. 2) количественно выражают дисперсия и коэффициент вариации – характеристики неравномерности

данных в отношении отклонения от среднего значения. Коэффициент вариации площадей пожаров значителен – от 178 до 386% для субъектов и

403% для всей страны. Для сравнения, коэффициент вариации ожидаемой продолжительности жизни людей всех стран мира равен 10%.

Таблица 2 / Table 2

Статистические параметры площадей сгоревших лесов федеральных округов Российской Федерации в 2001–2019 гг. / Statistical parameters of the areas of burnt forests of the federal districts of the Russian Federation in 2001–2019

Параметр	Российская Федерация	Центральный ФО	Северо-Западный ФО	Южный ФО	Северо-Кавказский ФО	Приволжский ФО	Уральский ФО	Сибирский ФО	Дальневосточный ФО
Сумма, км ²	782343	11947	7073	4627	1180	5406	49344	167152	535705
Максимум, км ²	28948	587	560	587	135	1085	5788	13715	28948
Минимум, км ²	0	0	0	0	0	0	0,43	0	0
Среднее, км ²	484	35	34	30	9	19	433	880	2563
Медиана, км ²	10	4	6	1	3	4	93	174	939
Дисперсия	3819379	6830	5097	5795	387	5353	878268	3109929	20712394
Коэффициент вариации	403	237	211	250	222	386	217	200	178
Скос (асимметрия)	7,7	3,9	4,2	4,5	4,6	11,6	4,0	3,8	3,0
Экссесс	74	17	22	25	24	161,5	14	19	10,3

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Главной особенностью полигоны частот (эмпирические функции распределения) площадей сгоревших лесов в федеральных округах (рис. 6) является сильный сдвиг моды распределения в сторону малых значений площадей лесных пожаров. Скос распределения лежит в диапазоне от 3,0 до 11,6, что значит преобладающее возникновение малоплощадных лесных пожаров. Лесные пожары размером около 5 км² возникают от 20 до 190 раз за изучаемый период, в то время как крупные – менее, чем 6–8 раз за период.

Также следует обратить внимание, что в Центральном и Дальневосточном федеральных округах отмечается до 60 случаев отсутствия зарегистрированных пожаров.

Более точное представление функции распределения пожаров дают рисунки 7а, 7б. На нём представлен полигон частот площадей сгоревших лесов на территории страны в 2001–2019 гг. На рисунке 7а границы интервалов для площадей пожаров лежат в диапазоне от 0 до 170 км². На рисунке 7б границы интервалов идут от 1 до зна-

Рис. 6 / Fig. 6. Полигон частот площадей сгоревших лесов федеральных округов Российской Федерации в 2001–2019 гг. / Landfill of burned forest areas in the federal districts of the Russian Federation in 2001–2019.

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

чения 28 948 км² (Амурская область). Горизонтальная ось графика имеет логарифмический масштаб, поэтому интервал с точкой 0 не входит в их границы. Из графика (рис. 7а) видно, что в течение 19 лет 232 раза не было зарегистрировано лесных пожаров на территории страны. За этот же период 439 зарегистрированных лесных пожаров имели площадь до 10 км², 134 пожара – от 10 до 20 км². Далее в диапазонах площадей пожаров от 30 км² до 170 км² с шагом 10 км² отмечается до 50 пожаров. Таким образом, отмечается плавно спадающая линия, демонстрирующая, что, чем больше площадь пожара, тем он реже происходит. Далее из рис. 7б видно, что в диапазоне свыше 170 км² площадь пожаров увеличивалась, а количество случаев в каждом из диапазонов уменьшалось, но неравномерно. Самым крупным был упомянутый пожар размером 28 948 км² в Амурской области.

Для анализа статистических связей пожаров в регионах построена корреляционная матрица значений площадей пожаров в субъектах Центрального федерального округа в 2001–2019 гг. (табл. 3) Значимых коэффициентов корреляции ($p=0,05$) достаточно много, что приводит к выводу о статистической связи между лесными пожарами в регионах за счет действия погодных-климатических факторов, их вызывающих. Эти обстоятельства следует проверить с помощью дополнительного анализа погодных-климатических параметров, таких как температура воздуха и количество осадков, т. к. именно данные параметры являются одной из основных причин возникновения и ускоренного распространения лесных пожаров. Однако по данным Росстат, в период с 2014 по 2016 гг. от 47 до 60% от общего количества лесных пожаров возникло по вине граждан [2].

Рис. 7 / Fig. 7. Полигон частот площадей сгоревших лесов федеральных округов Российской Федерации в 2001–2019 гг., границы интервалов 0–170 км² (а) Полигон частот площадей сгоревших лесов федеральных округов Российской Федерации в 2001–2019 гг., границы интервалов от 1 до 100 тыс. км², логарифмический масштаб горизонтальной оси (б).

В подписях – «число случаев; граница интервала» / The range of the frequencies of the areas of burnt forest Federal districts of the Russian Federation in the years 2001–2019, the boundaries of the intervals 0–170 км² (a) the range of frequencies of the areas of burnt forest Federal districts of the Russian Federation in the years 2001–2019, the boundaries of the intervals from 1 to 100 thousand км², the logarithmic scale of the horizontal axis (b).
In the captions – “the number of cases; boundary interval”.

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Наибольшее количество статисти- в Воронежской, Ивановской, Вла-
стических связей прослеживается димирской и Московской областях

Таблица 3 / Table 3

Корреляционная матрица значений площадей лесных пожаров в регионах Центрального федерального округа в 2001–2019 гг. Указаны только значимые коэффициенты корреляции ($p=0,5$) / Correlation matrix of forest fire areas in the regions of the Central Federal District in 2001–2019 Only significant correlation coefficients are indicated ($p=0.5$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1																	
2		1																
3			1															
4	0,61	0,51	0,74	1														
5			0,99	0,71	1													
6			0,69		0,73	1												
7			0,71	0,68	0,66		1											
8	0,87	0,56						1										
9		0,63	0,55	0,62	0,59	0,70			1									
10			0,67		0,66	0,66			0,28	1								
11			0,93	0,61	0,95	0,85			0,67	0,73	1							
12	0,69			0,56				0,56				1						
13			0,79	0,49	0,84	0,90			0,77	0,52	0,90		1					
14														1				
15			0,84	0,78	0,87	0,74			0,82		0,86		0,87		1			
16					0,48	0,75			0,54		0,58		0,59	0,64	0,57	1		
17			0,70	0,49	0,68	0,65				0,89	0,68		0,52		0,56		1	
18			0,74	0,70	0,68		0,99				0,49						0,47	1
(1) Белгородская, (2) Брянская, (3) Владимирская, (4) Воронежская, (5) Ивановская, (6) Калужская, (7) Костромская, (8) Курская, (9) Липецкая, (10) Москва, (11) Московская, (12) Орловская, (13) Рязанская, (14) Смоленская, (15) Тамбовская, (16) Тверская, (17) Тульская, (18) Ярославская области																		

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

(табл. 4). Эти субъекты граничат друг с другом на относительно небольшой территории, и можно предположить, что их статистические связи столь высоки из-за схожих климатических условий, свойственных соседним территориям.

Также отметим, что самые большие корреляции по величине пожаров (более 0,9) имеют шесть регионов: Московская (3), Владимирская (2), Ивановская (2), Костромская (1), Рязанская (1) и Ярославская (1) области (табл. 5).

Далее определены годы с наибольшим количеством статистических связей в регионах (табл. 6), где отмечается их непрерывное максимальное число в период с 2014 по 2016 гг., а также в 2018 и 2019 гг. Это может свидетельствовать о корреляции климатических параметров в течение последних семи лет и являться основой для выявления новых механизмов возникновения лесных пожаров.

В таблице 7 представлены 15 субъектов, имеющих самое большое количество значимых корреляционных связей по стране за период 2001–2019 гг., а также 15

Таблица 4 / Table 4

Количество значимых статистических связей субъектов Центрального федерального округа / Number of significant statistical relationships of subjects Central Federal District

Субъект	Число значимых корреляционных связей
Воронежская обл.	12
Ивановская обл.	12
Владимирская обл.	11
Московская обл.	11
Липецкая обл.	10
Рязанская обл.	10
Калужская обл.	9
Тамбовская обл.	9
Тульская обл.	9
г. Москва	7
Тверская обл.	7
Ярославская обл.	6
Костромская обл.	4
Белгородская обл.	3
Брянская обл.	3
Курская обл.	3
Орловская обл.	3
Смоленская обл.	1

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Таблица 5 / Table 5

Число субъектов с величиной коэффициента корреляции больше 0,9 / The number of subjects with a correlation coefficient greater than 0.9

Субъект	Число корреляционных связей
Московская обл.	3
Владимирская обл.	2
Ивановская обл.	2
Костромская обл.	1
Рязанская обл.	1
Ярославская обл.	1

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

Таблица 6 / Table 6

Количество значимых связей по годам (по убыванию) в Центральном федеральном округе по годам / Number of significant relationships by year (in descending order) in the Central Federal District by year

Год	Число значимых корреляционных связей	Год	Число значимых корреляционных связей
2002	10	2007	4
2014	10	2005	3

2015	9	2010	3
2016	9	2011	3
2018	9	2017	3
2019	9	2001	1
2008	8	2004	1
2012	8	2006	1
2013	8	2009	0
2003	7	-	-

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

субъектов, имеющих минимум таких связей. Максимальное число, 28 связей, представлено в Ульяновской области. К ней примыкают Ивановская, Московская, Рязанская и Тамбовская области. Отметим, что все указанные субъекты расположены в непосредственной близости друг от друга, каждый из которых обладает небольшой площадью. Можно предположить, что

ввиду схожести погодно-климатических факторов лесные пожары в субъектах также имеют схожий принцип возникновения.

В то же время Республика Саха (Якутия), Ямало-Ненецкий автономный округ, Красноярский, Камчатский и Приморский края имеют огромные территории, на которых климатические параметры сильно различаются

Таблица 7 / Table 7

Пятнадцать субъектов Российской Федерации, имеющих наибольшее и наименьшее количество статистически значимых корреляционных связей по площади сгоревших лесов в течение 2001–2019 гг. ($p=0,05$) / Fifteen subjects of the Russian Federation with the highest and lowest number of statistically significant correlations in the area of burned forests during 2001–2019 ($p=0.05$)

№	Субъект	Число значимых корреляций	№	Субъект	Число значимых корреляций
1	Ульяновская обл.	28	71	Новгородская обл.	2
2	Ивановская обл.	26	72	Ненецкий АО	2
3	Московская обл.	26	73	Ростовская обл.	2
4	Рязанская обл.	26	74	Республика Тыва	2
5	Тамбовская обл.	26	75	Красноярский край	2
6	Удмуртская Республика	26	76	Камчатский край	2
7	Пензенская обл.	26	77	Республика Коми	1
8	Омская обл.	26	78	Республика Крым	1
9	Владимирская обл.	25	79	Ямало-Ненецкий АО	1
10	Республика Мордовия	25	80	г. Калининград	0
11	Чувашская Республика	25	81	Псковская обл.	0
12	Нижегородская обл.	25	82	Республика Калмыкия	0
13	Пермский край	24	83	Астраханская обл.	0
14	Калужская обл.	23	84	Приморский край	0
15	Республика Марий Эл	23	85	Республика Саха (Якутия)	0

Источник: составлено авторами по данным MODIS MCD64A1 v.006

по временным и пространственным составляющим. Вероятно, именно данный факт определяет у них минимум корреляционных связей между лесными пожарами – от двух до нуля.

Имеющие минимальное число связей г. Калининград и Республика Крым обособлены от других регионов, их климатические и лесные условия сильно разнятся, потому их корреляционная связь по лесным пожарам также мала. К таким же субъектам относятся Астраханская область, Республика Калмыкия и Ненецкий автономный

округ. Для первых двух субъектов характерен жаркий и сухой климат, не повторяющийся в других частях России. Ненецкий автономный округ – это Крайний Север страны, включающий в себя две климатические зоны – арктическую и субарктическую. Условия для возникновения пожаров в таких нетипичных климатических условиях проявляются иначе.

В соответствии с графиком на рис. 8 выделяются четыре пиковых значения в период с 2001 по 2019 гг., которые приходятся на 2003, 2012, 2018 и 2019 г.

Рис. 8 / Fig. 8. Кривая массы сгоревшего сухого вещества всех типов экосистем и динамика массы эмиссии CO_2 по типам экосистем для территории Российской Федерации в период с 2001 по 2019 гг. / The curve of the mass of burnt dry matter of all types of ecosystems and the dynamics of the mass of CO_2 emissions by ecosystem types for the territory of the Russian Federation in the period from 2001 to 2019.

Источник: составлено авторами по данным GFED

Несомненными лидерами по общему выделению CO_2 в результате пожаров является Дальневосточный и Сибирский федеральные округа (рис. 9).

Рис. 9 / Fig. 9. Динамика эмиссии CO_2 в результате лесных пожаров по федеральным округам Российской Федерации с 2001 по 2019 гг. с интервалом в 5 лет / Dynamics of CO_2 emissions from forest fires in the federal districts of the Russian Federation from 2001 to 2019 with an interval of 5 years.

Источник: составлено авторами по данным GFED

За первое двадцатилетие XXI в. выделения CO_2 в атмосферу на территории Российской Федерации имеют тенденцию к увеличению: по отношению к 2001 в 2019 г. выбросы выросли на 90% по всем категориям земель. При этом в 2019 г. общая масса выбросов диоксида углерода в результате пожаров бореальных лесов на территории

страны составила более 600 млн т, в то время как в 2001 г. значение составляло порядка 250 млн т. Леса умеренных широт в результате пожаров выбросили в 2019 г. 13 млн т CO_2 по сравнению с 8 млн т в 2001 г. Таким образом, суммарно выбросы CO_2 в результате пожаров лесов увеличились с 2001 г. на 167% (рис. 10).

Рис. 10 / Fig. 10. Кривая процентного отношения суммарной эмиссии CO₂ с 2002 по 2019 гг. к значению эмиссии в 2001 г. и эмиссии CO₂ в результате лесных пожаров отдельно за тот же период / The curve of the percentage ratio of total CO₂ emissions from 2002 to 2019 to the value of emissions in 2001 and CO₂ emissions from forest fires separately for the same period.

Источник: составлено авторами по данным GFED

Проведены два расчёта, являющиеся одновременно и прогнозом, и иллюстрацией к пониманию различия проявления лесных пожаров и вырубок. Для расчёта промышленных выбросов CO₂ после 2016 г. использовались данные¹ для условий до начала применения Парижского соглашения. В первом случае в вычислительном расчёте антропогенными воздействиями являются промышленные выбросы CO₂ и лесные пожары, во втором – промышленные выбросы CO₂ и вырубка лесов. Количественные параметры воздействий берутся соответствующими данным измерений и анализа, проведённого, в том числе авторами, по лесным пожарам – в этой статье и по вырубке лесов в статье: [14].

На рис. 11 представлены результаты расчётов – динамики хода углерода в CO₂ в атмосфере (первый расчёт) и в биомассе растительности (второй расчёт) в 1950–2100 гг.

Главным действующим антропогенным фактором в обоих случаях являются промышленные выбросы CO₂ в атмосферу. Вырубка и лесные пожары дают меньший вклад. Расчёты показывают, что количество CO₂ в атмосфере с течением времени увеличивается в обоих случаях. Биомасса лесов под действием как вырубок, так и лесных пожаров сначала уменьшается, а затем, по мере роста концентрации CO₂ в атмосфере, продуктивность растительности на участках, не затронутых воздействием, увеличивается. Это приводит к увеличению биомассы на других участках и в целом на планете (компенсации уменьшения массы лесов). Влияние вырубки оказывается больше, чем самих лесных пожаров, и

¹ WMO Заявление WMO о состоянии глобального климата в 2018 году. Женева: WMO, 2019. 44 с.

Рис. 11 / Fig. 11. Прогнозы относительного роста концентрации CO_2 (C/C0) и биомассы лесов (B/B0) в 1950–2100 гг. в случаях воздействия промышленных выбросов CO_2 , лесных пожаров и вырубки лесов. Изображены линии, соответствующие концентрации атмосферной CO_2 и температуре атмосферы 1,5°C и 2°C / Forecasts of relative growth of CO_2 concentration (C/C0) and forest biomass (B/B0) in 1950–2100 in cases of exposure to industrial CO_2 emissions, forest fires and deforestation. The lines corresponding to the atmospheric CO_2 concentration and the atmospheric temperature of 1.5 °C and 2 °C. are shown.

Источник: составлено авторами по данным глобальной пространственной модели
А. М. Тарко

CO_2 от вырубки до 2070 г. увеличивается быстрее, чем от пожаров. При этом рост биомассы происходит в обратном порядке – биомасса в случае «пожаров» растёт быстрее, чем в случае «вырубки» до 2085 г. Далее, по мере роста концентрации CO_2 в атмосфере и глобального потепления, как отмечалось ранее, количество лесных пожаров увеличивается, и «пожары» существенно опережают «вырубку» – после 2070 г. CO_2 атмосферы растёт от лесных пожаров быстрее, чем от вырубки, а масса лесов, наоборот, после 2085 г. растёт медленнее. Происходит инверсия – картина динамики в случае «пожары» и «вырубка» – до 2100 г. меняется на противоположную. В этом случае мы видим

положительную обратную связь между глобальным потеплением и лесными пожарами – чем больше глобальное потепление, тем больше лесных пожаров.

Заключение

В заключение следует отметить, что за период с 2001 по 2019 гг. увеличение ежегодных площадей лесных пожаров в России и ее субъектах происходит при общем уменьшении их количества. Наибольшее количество статистически значимых коэффициентов корреляции наблюдается в Центральном федеральном округе, что может быть связано со схожестью погодно-климатических параметров и типов растительных экосистем.

Выявлена прямая зависимость площадей пожаров от средней годовой температуры и обратная – от среднего годового количества осадков. Отмечен рост массы сгоревшего сухого вещества и эмиссии CO_2 в результате пожаров на 90% в 2019 г. по сравнению с 2001 г., в том числе в результате пожаров лесов – на 167%.

Математическое моделирование глобального цикла CO_2 в биосфере показало положительную обратную связь между глобальным потеплением и лесными пожарами. Также отмечено, что полученный в результате моделирования

результат смены мощности действия лесных пожаров и вырубки связан с ростом CO_2 в атмосфере. В данном расчете инверсия наступает при превышении количества CO_2 в атмосфере, значения, задаваемого Парижским соглашением – рост CO_2 не должен приводить к росту температуры атмосферы выше 2 °C. То есть полученный результат показывает, что, если человечество сможет выполнить требование Парижского соглашения, то до «пожарной» инверсии биосфера Земли не дойдет.

Статья поступила в редакцию 23.09.2020

ЛИТЕРАТУРА

1. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары / под ред. Л. К. Поздняков. М.: Наука, 1979. 198 с.
2. Варламова Е. В., Соловьев В. С. Влияние глобального потепления на пространственно-временные тренды индекса NDVI растительности Восточной Сибири // Международная конференция по изменениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Якутск, 2018. С. 259–261.
3. Голятина М. А., Вахнина И. Л., Носкова Е. В. Оценка динамики площадей, пройденных пожарами, на территории Забайкальского края в условиях изменения климата по данным ДЗЗ // Географический вестник. 2018. № 3(46). С. 126–135.
4. Курбатова А. И., Тарко А. М. Пространственно-временная динамика углерода в нативных и нарушенных экосистемах мира. М.: РУДН, 2017. 234 с.
5. Медведков А., Котова М. В. Противопожарный потенциал лесов водоохранной зоны озера Байкал (на примере территории Байкало-Ленского заповедника) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 5. С. 764–775.
6. Тарко А. М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит. 2005. 232 с.
7. Тарко А. М. Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье // Доклады РАН. 1995. Т. 343. № 3. С. 393–395.
8. Тарко А. М. О настоящем и будущем России и мира. Тула, 2016. 196 с.
9. Тарко А. М. Мировое развитие и Парижское климатическое соглашение // Стратегические приоритеты. 2019. № 21 (1). С. 129–147.
10. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство / И. О. Торжков, Е. А. Кушнир, А. В. Константинов, Т. С. Королева, С. В. Ефимов, И. М. Школьник // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40–49.
11. Рамазанов Равшан Гасан Оглы. Оценка повторяемости по степени опасности лесных пожаров (на примере северо-восточного склона Кавказа) // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и Экология. 2020. № 7-18 (330-341). С. 115–124.
12. Carbon dioxide sequestration as a climate mitigation strategy criterion in tropical forests (Case study from central african region) / A. I. Kurbatova, A. M. Tarko, H. A. Qdais,

- E. A. Grigorets, P. V. Kozhevnikova // International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2019. C. 633–640.
13. Chugunkova A. V., Pyzhev A. I. Impacts of global climate change on duration of logging season in siberian boreal forests // *Forests*. 2020. № 7 (11). C. 1–18.
14. Evaluation of spatial and temporal dynamics of forest fires in Indonesia using satellite data / A. I. Kurbatova, A. V. Orlovsky, V. Lobanov, P. V. Kozhevnikova // *Test Engineering and Management*. 2020. № (83). C. 15429–15435.
15. Fossil CO₂ & GHG emissions of all world countries / Janssens-Maenhout G. et al. // *Earth System Science Data Discussions* [Электронный ресурс]. URL: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2andGHG1970-2016&dst=CO2pc> (дата обращения: 21.07.2020).
16. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? / Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D.M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O. // *Global Change Biology*. 2020. № 7 (26). C. 3965–3977.

REFERENCES

1. Valendik E. N., Matveev P. M., Sofronov M. A. *Krupnye lesnye pozhary* [Large forest fires]. Moscow, Science Publ., 1979. 198 p.
2. Varlamova E. V., Soloviev V. S. [Influence of global warming on the space-time trends of the NDVI index of vegetation in Eastern Siberia]. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya po izmeneniyam, modelirovaniyu i informatsionnym sistemam dlya izucheniya okruzhayushchei sredy* [International conference on changes, modeling and information systems for studying the environment]. Yakutsk, 2018, pp. 259–261.
3. Golyatina M. A., Vakhnina I. L., Noskova E. V. [Assessment of the dynamics of areas covered by fires on the territory of the Trans-Baikal Territory under climate change according to remote sensing data]. In: *Geograficheskii vestnik* [Geographic Bulletin], 2018, no. 3(46), pp. 126–135.
4. Kurbatova A. I., Tarko A. M. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika ugleroda v nativnykh i narushennykh ekosistemakh mira* [Spatial-temporal dynamics of carbon in native and disturbed ecosystems of the world]. Available at: <https://repository.rudn.ru/ru/records/monograph/record/32036/> (accessed: 24.03.2021).
5. Medvedkov A., Kotova M. V. [Fire-fighting potential of forests in the water protection zone of Lake Baikal (on the example of the territory of the Baikal-Lensky nature reserve)]. In: *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographic series], 2020, no. 5, pp. 764–775.
6. Tarko A. M. *Antropogennye izmeneniya global'nykh biosfernykh protsessov. Matematicheskoe modelirovanie* [Anthropogenic Changes of the Global Biosphere Processes. Mathematical Modelling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 232 p.
7. Tarko A. M. [Stability of biospheric processes and Le Chatelier's principle]. In: *Doklady RAN*, 1995, vol. 343, no. 3, pp. 393–395.
8. Tarko A. M. *O nastoyashchem i budushchem Rossii i mira* [About the present and future of Russia and the world]. Tula, 2017. 196 p.
9. Tarko A. M. [World Development and the Paris Climate Agreement]. In: *Strategicheskie priority* [Strategic Priorities], 2019, no. 21 (1), pp. 129–147.
10. Torzhkov I. O., Kushnir E. A., Konstantinov A. V., Koroleva T. S., Efimov S. V., Shkol'nik I. M. [Assessment of the impact of expected climate change on forestry]. In: *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2019, no. 3, pp. 40–49.
11. Ramazanov Ravshan Gasan Ogly [Evaluation of recurrence according to the degree of danger of forest fires (on the example of the north-eastern slope of the Caucasus)]. In:

- Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i Ekologiya* [International scientific journal *Alternative Energy and Ecology*], 2020, no. 7-18 (330-341), pp. 115–124.
12. Kurbatova A. I., Tarko A. M., Qdais H. A., Grigorets E. A., Kozhevnikova P. V. Carbon dioxide sequestration as a climate mitigation strategy criterion in tropical forests (Case study from central african region). In: *International Multidisciplinary Scientific Geoconference*, 2019, pp. 633–640.
 13. Chugunkova A. V., Pyzhev A. I. Impacts of global climate change on duration of logging season in siberian boreal forests. In: *Forests*, 2020, no. 7 (11), pp. 1–18.
 14. Kurbatova A. I. Orlovsky A. V., Lobanov V., Kozhevnikova P. V. Evaluation of spatial and temporal dynamics of forest fires in Indonesia using satellite data. In: *Test Engineering and Management*, 2020, no. (83), pp. 15429–15435.
 15. Janssens-Maenhout G. et al. Fossil CO₂ & GHG emissions of all world countries. In: *Earth System Science Data Discussions*. Available at: <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=CO2andGHG1970-2016&dst=CO2pc> (accessed: 21.07.2020).
 16. Rees W. G., Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D. M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? In: *Global Change Biology*, 2020, no. 7 (26), pp. 3965–3977.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тарко Александр Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына РАН Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН;
e-mail: tarko328@mail.ru

Курбатова Анна Игоревна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологического мониторинга и прогнозирования Российского университета дружбы народов;
e-mail: kurbatova-ai@rudn.ru

Григорец Елизавета Андреевна – аспирант кафедры экологического мониторинга и прогнозирования Российского университета дружбы народов;
e-mail: 5977749@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander M. Tarko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Academician, Russian Academy of Natural Sciences, Chief Researcher, Institution of Russian Academy of Sciences 'Dorodnitsyn Computing Centre of RAS';
e-mail: tarko328@mail.ru

Anna I. Kurbatova – Cand. Sci. (Biology), Assoc. Prof., Department of Environmental Monitoring and Forecasting, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: kurbatova-ai@rudn.university.ru

Elizaveta A. Grigorets – postgraduate student, Department of Environmental Monitoring and Forecasting, Peoples' Friendship University of Russia;
e-mail: 5977749@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА

Тарко А. М., Курбатова А. И., Григорец Е. А. Применение методов системного анализа в исследовании лесных пожаров на территории Российской Федерации // Географическая среда и живые системы. 2021. № 1. С. 17–41.

DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-17-41

FOR CITATION

Tarko A. M., Kurbatova A. I., Grigorets E. A. System analysis of forest fires in the Russian Federation. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2021, no. 1, pp. 17–41.

DOI: 10.18384/2712-7621-2021-1-17-41