

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ЭМИССИЙ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ В РОССИИ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2020 г. В. Г. Бондур^а, *, О. С. Воронова^а, Е. В. Черепанова^а, М. Н. Цидилина^а, А. Л. Зима^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 11.06.2020 г.

На основании результатов космического мониторинга проанализирована ежегодная и внутрисезонная динамика площадей природных пожаров и объемов, вызываемых ими эмиссий малых газовых компонент (CO , CO_2 , CH_4 , NO , NO_2) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) на территории Российской Федерации и ее крупных регионов за 19-летний период, с учетом влияния погодноклиматических аномалий на их интенсивность. Показано, что выгоревшие среднемесячные площади в Европейской части Российской Федерации в период с 2011 по 2019 гг. в апреле, мае и сентябре сократились в 2 раза, а в июле и августе в 4 раза по сравнению с соответствующими месяцами 2001–2010 гг. В Сибирском и Уральском федеральных округах выявлена отрицательная динамика для весенне-осеннего сезона и рост площадей пожаров в летний период с 2010 по 2019 гг. Установлено, что в Дальневосточном федеральном округе динамика выгоревших площадей для большинства месяцев пожароопасного периода за 19 лет выражена слабо. Выявлены экстремально высокие значения объемов эмиссий различных газовых примесей (в том числе CO и CO_2) и аэрозолей от природных пожаров на территории Сибирского федерального округа в 2003 и 2012 гг.

Ключевые слова: природные пожары, дистанционное зондирование, космические данные, космический мониторинг, эмиссии, малые газовые компоненты, аэрозоли

DOI: 10.31857/S0205961420040028

ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары на территории Российской Федерации – ежегодное явление, угрожающее населению, лесному фонду и инфраструктуре (Исаев и др., 1995; Воробьев и др., 2004; Бондур, 2011; Бондур и др., 2016). Они являются одним из основных источников эмиссий вредных газовых примесей и аэрозолей в атмосферу, оказывающих влияние на экологическое состояние окружающей среды и изменение климата (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2020; Виноградова, 2016; Швиденко и др., 2011).

Огромные площади и труднодоступность многих территорий Российской Федерации усложняют процесс раннего обнаружения и анализа последствий природных пожаров. Наиболее эффективным способом оперативного мониторинга природных пожаров и оценки их последствий является применение космических методов и технологий (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016, 2019 (а, б); Бондур, Гордо, 2018; Барталев и др., 2012; Шетинский и др., 2008; Сочилова, Ершов, 2007; Ху, Zhong, 2017; Lin et al., 2019).

Основными источниками оперативных данных для выявления очагов природных пожаров являются данные низкого пространственного разрешения, получаемые со спутников Terra, Aqua, NOAA, Suomi NPP, FengYun-3, Метеор-М-№ 2 и др., обеспечивающих высокую периодичность и позволяющих своевременно выявить возгорания на больших, в том числе труднодоступных территориях. Использование данных, полученных с этих спутников, обеспечивает возможность получения наиболее оперативной и полной информации, что особенно важно для мониторинга лесных, степных и торфяных пожаров, а также оценки объемов вызываемых ими эмиссий вредных примесей (малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей) в воздушную среду с целью обеспечения безопасности населенных пунктов и предупреждения негативных последствий на состояние окружающей среды, лесного фонда, а также для здоровья людей (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016, 2019 (а, б); Бондур, Гордо, 2018; Бондур, Гинзбург, 2016, 2015; Pu et al., 2004; Giglio et al., 2016).

Для более детального анализа площадей возгорания, а также последствий природных пожаров,

включая, оценку площадей выгоревших территорий, потерь лесного фонда, используются космические данные среднего разрешения с таких спутников, как Landsat, SPOT, Sentinel-2, Канопус и др. (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018; Сочилова, Ершов, 2007). Раннее обнаружение и непрерывное наблюдение крупных пожаров возможно также с использованием данных низкого пространственного разрешения, полученных с борта геостационарных спутников, таких, например, как Himawari, FengYun-2 и др. (Xu, Zhong, 2017; Lin et al., 2019).

В настоящей работе приводятся результаты пространственно-временного анализа площадей природных пожаров и вызываемых ими эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей на основе данных космического мониторинга на всей территории Российской Федерации и ее отдельных крупных регионов за период времени с 2001 по 2019 гг.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа динамики площадей природных пожаров на территории России и расчета соответствующих им объемов эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей за период с 2001 по 2019 гг. были обработаны данные космического мониторинга в соответствии с подходом, подробно описанным в работах (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016).

В общем виде методика проведения исследований состояла из нескольких шагов. На первом этапе проводился расчет площадей, пройденных огнем, на основе пространственного анализа ежедневных данных, формируемых с использованием информационного продукта MOD14 с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016) за пожароопасный период (с апреля по октябрь). При этом учитывалась фактически выгоревшая территория за год без учета повторяемости горения одного и того же участка внутри пожароопасного сезона.

Далее все выявленные площади, пройденные огнем, были идентифицированы в соответствии с преобладающим типом почвенно-растительного покрова по данным продукта MCD12Q1 v. 6 (MODIS Land Cover Type 500 m) на основе классификации международной геосферно-биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2010). Всего на территории Российской Федерации было выделено 13 типов почвенно-растительного покрова, включая 4 класса лесного покрова, 4 класса кустарниковой, степной и луговой растительности, 2 класса сельхозугодий, 3 класса непокрытых растительностью территорий. В настоящей работе были обновлены значения эмиссионных коэффициентов, соответствующие различным типам

сгораемой растительности, в формуле для расчета общей массы вещества (Seiler, Crutzen, 1980; Бондур, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018), выбрасываемого в атмосферу, в соответствии с данными, представленными в работах (Wiedinmyer et al., 2011; Akagi et al., 2011).

На заключительном этапе с использованием данных о типах почвенно-растительного покрова и выгоревших площадях, полученных по данным космического мониторинга, были рассчитаны ежемесячные и годовые суммарные значения площадей природных пожаров, а также вызванных ими объемов эмиссий малых газовых примесей (CO_2 , CO , CH_4 , NO , NO_2) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) для всей территории Российской Федерации и отдельных ее регионов в период времени с 2001 по 2019 гг. Необходимо подчеркнуть, что основную долю выбросов при сгорании биомассы от природных пожаров составляют углеродсодержащие малые газовые компоненты, такие как CO , CO_2 , которые несут долгосрочный характер воздействия на климат регионального и планетарного масштаба (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016).

Для наглядного представления и дальнейшей интерпретации полученных результатов проводилась статистическая обработка данных. Для выявления пространственного распределения площадей, пройденных огнем, с учетом преобладающего сезона горения, была проанализирована частота горения территории за каждый месяц для периода времени с 2001 по 2019 гг.

Для проведения исследования были выбраны 4 крупных региона Российской Федерации: Европейская часть России (ЕЧР), в которую вошли Центральный, Северо-Западный, Южный, Северо-Кавказский и Приволжский федеральные округа; Уральский федеральный округ (УрФО); Сибирский федеральный округ (СФО); Дальневосточный федеральный округ (ДФО). Выбор четырех крупных регионов был обоснован тем, что, во-первых, большая часть исполнительных мероприятий, в том числе по пожаротушению, по разработке мер по снижению площадей пожаров и проведению лесовосстановления принимаются на федеральном уровне. Во-вторых, при таком делении учитываются природно-климатические особенности, в частности преобладающее влияние Атлантического океана на климатические условия ЕЧР, влияние Уральского хребта на особенности движения воздушных масс в УрФО, а также влияние арктических, тихоокеанских воздушных масс и азиатского максимума на климатические условия ДФО и СФО.

Для исследования ежегодной и сезонной динамики в целом по стране и по выделенным регионам рассчитывались нормализованные значения площадей, пройденных огнем.

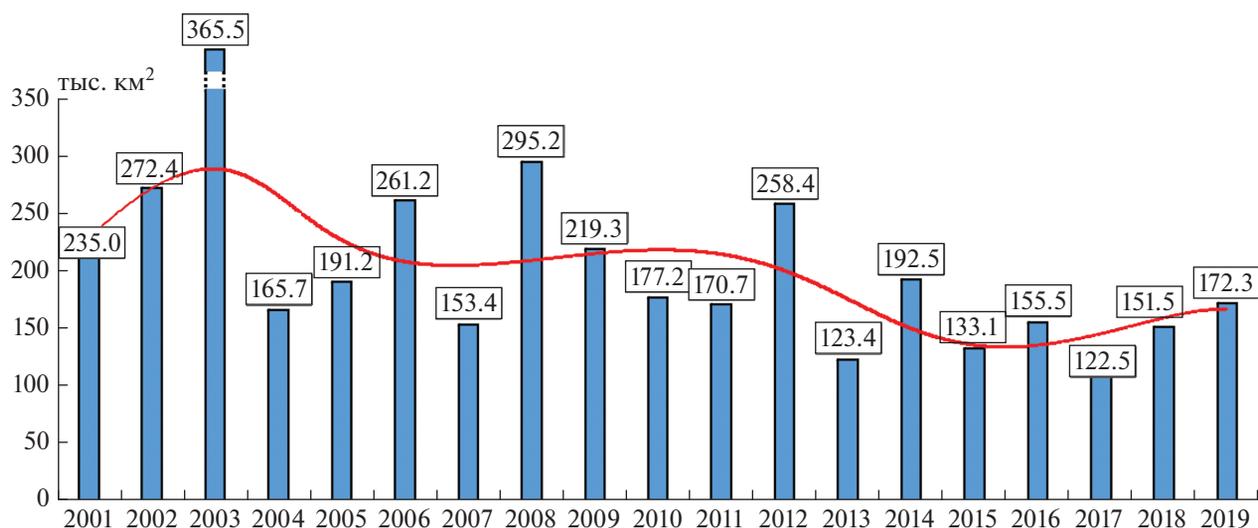


Рис. 1. Суммарные значения площадей, пройденных огнем на территории Российской Федерации в период с 2001 по 2019 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены значения суммарных площадей, пройденных огнем на всей территории Российской Федерации в пожароопасный период (апрель—октябрь) с 2001 по 2019 гг.

Анализ результатов, представленных на рис. 1, позволил выявить годы с максимальными значениями площадей, пройденных огнем, а также общие тренды их изменений. Из рис. 1 следует, что общая площадь природных пожаров на всей территории России в 2003 г. составила 365.5 тыс. км², значения которой сильно превышают показатели других лет за исследуемый период. С экстремально высокими значениями площадей, пройденных огнем, выделяются также следующие годы: 2008 (295.2 тыс. км²), 2002 (272.4 тыс. км²), 2006 (261.2 тыс. км²), 2012 (258.4 тыс. км²).

За период с 2001 по 2013 гг. в целом по стране наблюдалась общая тенденция к уменьшению площадей природных пожаров (см. рис. 1). С 2013 по 2019 гг. наблюдается незначительное повышение площадей природных пожаров. Исключение составил 2017 г., когда было зарегистрировано минимальное количество природных пожаров (122.5 км²).

Пространственное распределение площадей природных пожаров на всей территории России в пожароопасные периоды (апрель—октябрь) с 2001 по 2019 гг. приведено на рис. 2, а. Различными цветами выделены области горения, характерные для отдельных сезонов (весна, лето и осень). Из анализа рис. 2, а следует, что максимальные значения площадей, пройденных огнем на терри-

тории России, приходится на весенние (апрель, май) и летние (июнь—август) месяцы.

Весной в апреле—мае в основном горят поля, луга и степи в лесостепной и степной зоне ЕЧР, УрФО и СФО. В ДФО пожары возникают преимущественно в зоне смешанных лесов на юго-востоке территории, где в настоящее время расположены сельхозугодья (см. рис. 2, а). В летние месяцы наиболее сильно выгорают таежные леса в УрФО, СФО и ДФО, в то время как в ЕЧР основные территории, подверженные воздействию огня, находятся в южной части региона преимущественно на землях сельскохозяйственного назначения (см. рис. 2, а). Осенью очаги природных пожаров выявлены в поясе активного земледелия по всем округам вдоль южных границ Российской Федерации. В лесной зоне наблюдаются фрагментарные возгорания преимущественно в таежной зоне СФО и ДФО (см. рис. 2, а) (Бондур и др., 2019б).

На рис. 2, б приведены графики распределения площадей природных пожаров по месяцам для всей территории Российской Федерации. Из рис. 2, б следует, что за анализируемый 19-летний период эти значения достигали максимумов в мае 2003 г. (133.79 тыс. км²) и 2006 г. (103.19 тыс. км²), а также в апреле 2008 г. (118.46 тыс. км²) и 2009 г. (90.68 тыс. км²). В июле максимальные значения площадей, пройденных огнем, были выявлены в 2012 г. (76.19 тыс. км²), а в августе максимум пришелся на 2002 г. (68.99 тыс. км²).

Ежегодная динамика площадей природных пожаров, полученных по данным космического мониторинга, для анализируемых крупных регионов Российской Федерации (ЕЧР, УрФО, СФО,

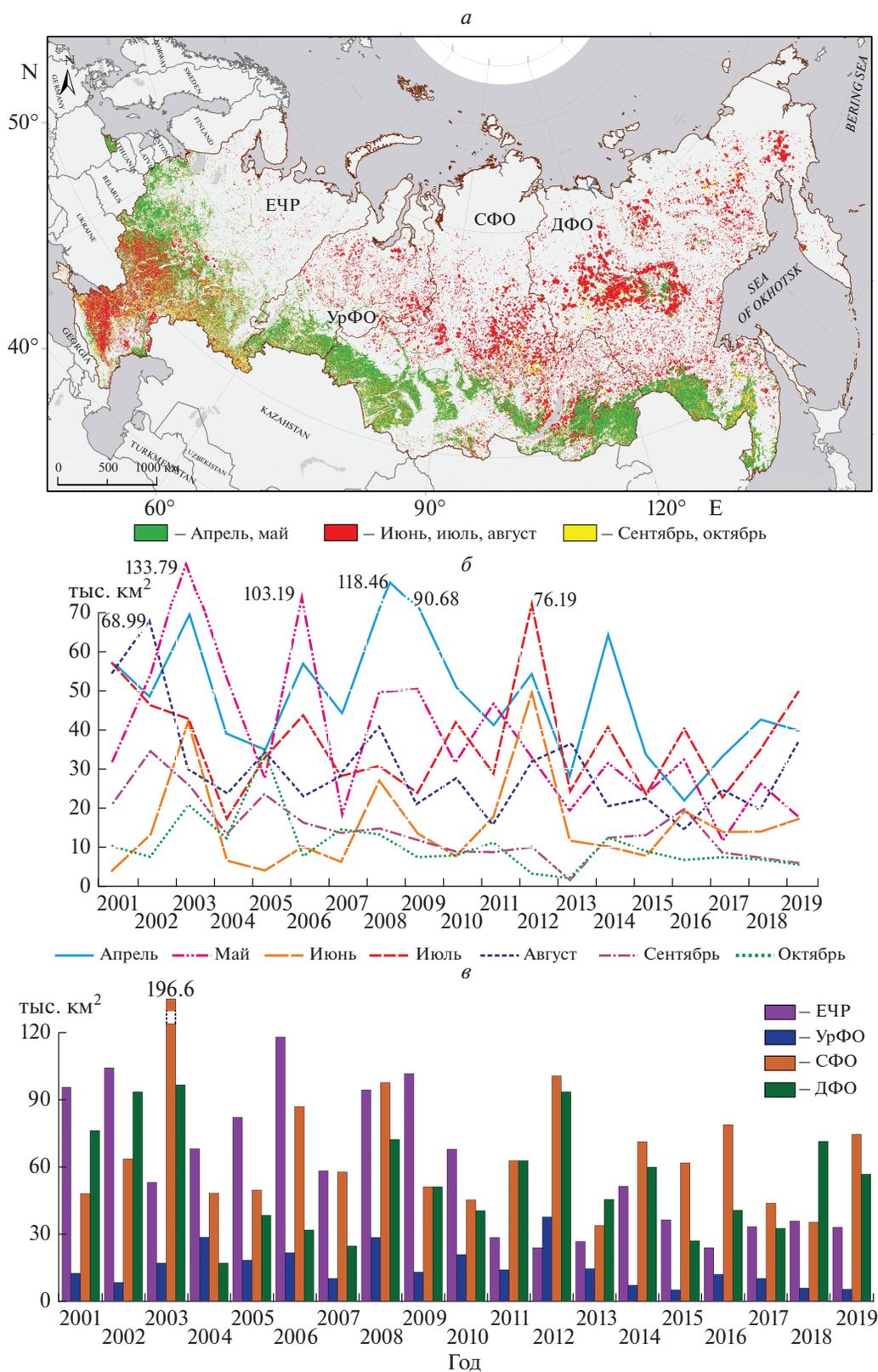


Рис. 2. Пространственно-временная динамика площадей природных пожаров с апреля по октябрь в 2001–2019 гг.: *a* – пространственное распределение площадей, пройденных огнем в различные сезоны для всей территории Российской Федерации; *b* – графики распределений площадей природных пожаров по месяцам для всей территории России; *в* – площади природных пожаров в различных регионах России (ЕЧР, УрФО, СФО, ДФО).

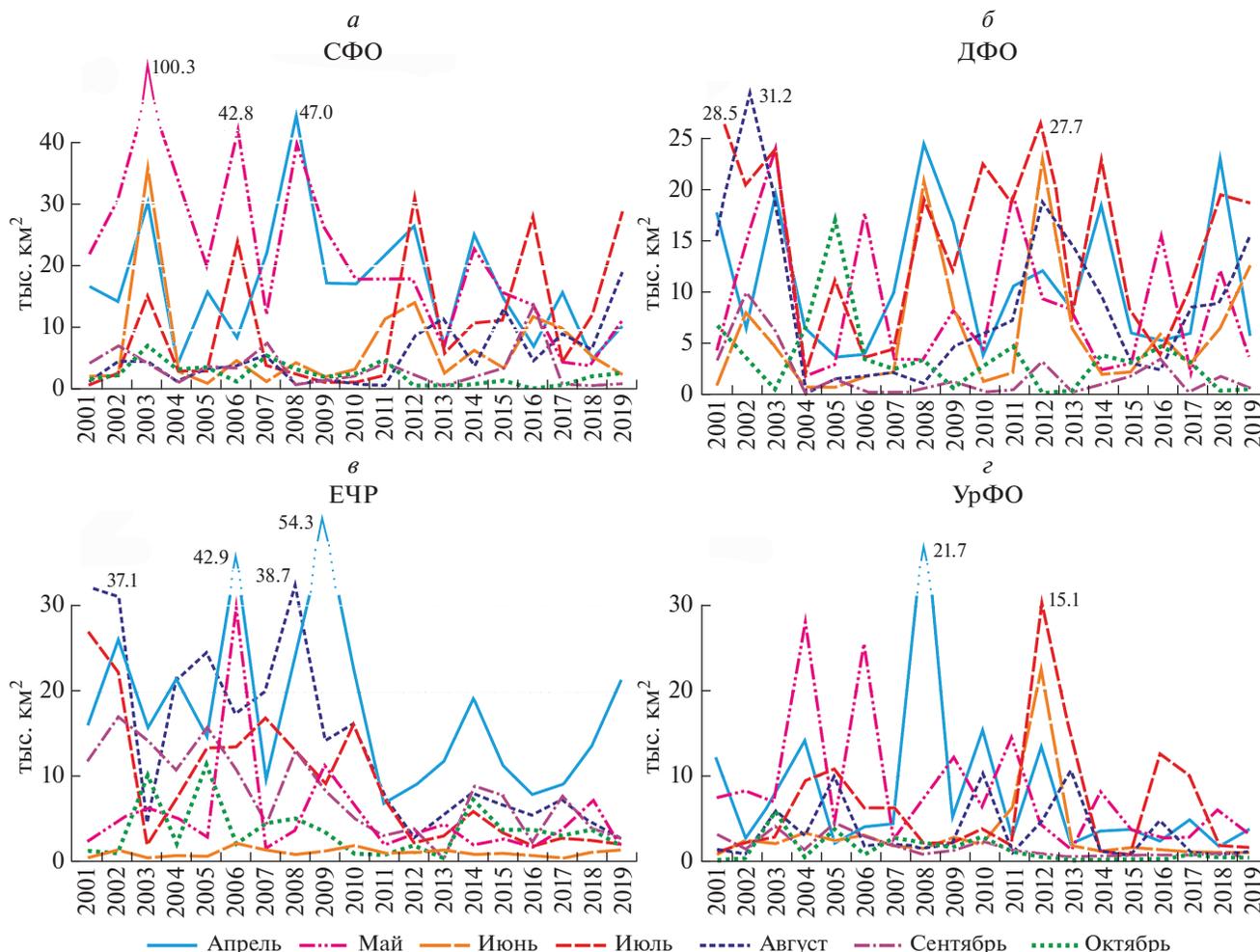


Рис. 3. Распределение природных пожаров по месяцам в различных регионах Российской Федерации в период с 2001 по 2019 гг.: а – СФО, б – ДФО, в – ЕЧР, г – УрФО.

ДФО) с 2001 по 2019 гг. представлена на рис. 2, в. Из этого рисунка следует, что наблюдается тенденция к уменьшению площадей выгоревших в результате природных пожаров территорий и, начиная с 2012 г., суммарные годовые площади не превышают 200 тыс. км². Анализ рис. 2, в показывает, что тенденция сокращения площадей пожаров прослеживается для ЕЧР и УрФО, в то время как динамика колебаний площадей, пройденных огнем территорий в СФО и ДФО носит циклический характер, то понижаясь, то увеличиваясь за 19 лет.

Для оценки вклада отдельных крупных регионов в статистику выгоревших площадей в целом по стране были проанализированы внутрисезонные колебания значений таких площадей для каждого региона по всем месяцам пожароопасного периода. На рис. 3 представлены графики распределения площадей, пройденных огнем для каждого месяца этого периода с 2001 по 2019 гг. для СФО (рис. 3, а), ДФО (рис. 3, б), ЕЧР (рис. 3, в)

и УрФО (рис. 3, г). Учитывая то, что после 2010 г. для территории России в целом наблюдается тенденция к сокращению площадей пожаров (см. рис. 1), что, скорее всего, связано с введением эффективных мер по предотвращению пожаров, то ниже проанализировано, как изменялась динамика площадей пожаров в различных регионах в периоды времени до 2010 г. и после 2010 г.

Наиболее наглядно эффективность принятых мер демонстрируется на примере ЕЧР (рис. 3, в). Так, среднемесячная выгораемая площадь в период с 2011 по 2019 гг. сократилась в 2 раза в апреле, мае и сентябре и в 4 раза в июле и августе по сравнению с 2001–2010 гг. В июле и октябре изменения незначительны, однако, для октября необходимо отметить тенденцию к постепенному снижению размеров выгораемых площадей с 7.38 тыс. км² в 2014 г. до 1.9 тыс. км² в 2019 г. (рис. 3, в). После 2010 г. в ЕЧР наиболее крупные площади горения регистрируются в апреле: от 7.25 тыс. км² в 2011 г.

до 21.59 тыс. км² в 2019 г. с нестабильными межгодовыми флуктуациями (рис. 3, в).

В УрФО в апреле–мае и сентябре–октябре, то есть в сезон преимущественно сельскохозяйственных палов, также наблюдается снижение выгораемых площадей более чем в 2.5 раза в период с 2011 по 2019 гг. по сравнению с предыдущим десятилетием. Для июня–августа наблюдается рост площадей лесных пожаров в период времени с 2010 по 2019 гг. Так суммарная площадь выгорания в июле за 10 лет (2001–2010 гг.) составила 23.63 тыс. км². В то время, как за период с 2011 по 2019 гг. это значение выросло в 1.5 раза и превысило 37 тыс. км² (см. рис. 3, з).

Аналогичная ситуация с отрицательной динамикой для весенне-осеннего сезона и положительной динамикой роста выгоревших площадей в летний период в последнее десятилетие наблюдается в СФО (см. рис. 3, а). Наиболее высокие темпы снижения площадей выгорания для этого региона характерны для мая – более чем в 2 раза за период времени с 2011 по 2019 гг. по сравнению с периодом 2001–2010 гг. Напротив, в летние месяцы в период с 2012 по 2019 гг. зарегистрирована тенденция увеличения выгоревших площадей в СФО по сравнению с предыдущим периодом с 2001–2010 гг. (см. рис. 3, а). Так, в период времени с 2001 по 2010 гг. в июне суммарное значение площадей пожаров не превышало 5 тыс. км²/год за исключением катастрофических пожаров 2003 г. (35.64 тыс. км²) (см. рис. 3, а). За следующий период времени с 2011 по 2019 гг. только в июне 2013 г., 2015 г. и 2019 г. В этом регионе фиксировались площади пожаров менее 5 тыс. км²/год, в остальные годы эти значения были выше, а для 2011 г., 2012 г. и 2016 г. они превышали 10 тыс. км²/год (см. рис. 3, а). За 10 лет с начала двухтысячных годов в июле в СФО суммарно выгорело 57 тыс. км², в то время как за последние 9 лет этот показатель вырос до 133.81 тыс. км². Необходимо отметить, что, если в июле месяце с 2001 по 2010 гг. наблюдалось только два года с катастрофическими пожарами – 2003 г. (15.27 тыс. км²), 2006 г. (23.55 тыс. км²), то в дальнейшем в СФО частота крупных пожаров и площади пройденных огнем территорий увеличились и составляли – в 2012 г. (30.89 тыс. км²), в 2016 г. (27.86 тыс. км²), а в 2019 г. (28.13 тыс. км²) (см. рис. 3, а).

В ДФО в целом динамика выгоревших площадей для большинства месяцев пожароопасного периода за 19 лет мониторинга выражена слабо (см. рис. 3, б). Можно отметить снижение выгоревших площадей в сентябре–октябре, однако, в остальные месяцы величины площадей, пройденных огнем, практически одинаковы для двух периодов наблюдений 2001–2010 гг. и 2011–2019 гг. (см. рис. 3, б). В ДФО в июле зарегистрированы наибольшие значения площадей территорий,

выгоревших при пожарах, по сравнению с другими регионами (СФО, ЕЧР и УрФО) (см. рис. 3). Суммарные значения этого показателя в ДФО составили 147.18 тыс. км² для периода времени с 2001 по 2010 гг. и 138.33 тыс. км² для периода времени с 2011 по 2019 гг. В эти же периоды времени значения выгоревших площадей были меньше и составили: в СФО – 57.67 и 133.81 тыс. км², в ЕЧР – 135.52 и 31.33 тыс. км², в УрФО – 23.63 и 24.05 тыс. км², соответственно.

Результаты, полученные в настоящей работе, а также результаты последних исследований, выполненных на основе данных космического мониторинга (Бондур и др., 2019а, б; Бондур и др., 2020), свидетельствуют о том, что в целом по стране наблюдается тенденция к снижению частоты природных пожаров за длительный период времени. Несмотря на то, что площади, пройденные огнем, при природных пожарах в 2019 г., превысили в 4.9 раза средние значения за период с 2001 по 2019 гг., а в 2018 г. в 1.15 раза средние значения за период с 2001 по 2018 гг., в целом наблюдается снижение числа очагов пожаров относительно среднесезонных значений. В первую очередь, это связано с мерами, предпринятыми по предотвращению лесных пожаров после катастрофических пожаров 2010 г. на Европейской части России (Бондур, 2011; Виноградова и др., 2016). Во-вторых, это обусловлено тем, что с конца 2015 г. введен запрет на бесконтрольное выжигание сухой травы на всех категориях земель в Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации от 10 ноября 2015 г. № 1213), в то время как ранее действовавшие запреты были выборочными.

Несмотря на это, даже с учетом предпринятых мер, пожароопасные сезоны 2018–2019 гг. в Сибири и на Дальнем Востоке стали одними из самых катастрофических (Бондур и др., 2019, 2020; Воронова и др., 2020; Konovalov et al., 2018). Основными причинами возникновения лесных пожаров в 2019 г. являются неосторожное обращение с огнем и сухие грозы в условиях длительной засухи и аномально жаркой и ветреной погоды, которые наблюдались в области влияния блокирующего антициклона с положительными аномалиями геопотенциала (Прогноз..., 2019; Бондур и др., 2020).

Исследования погодно-климатических особенностей в регионах Северной Евразии выявили влияния блокирующих антициклонов, в областях, где отмечается высокая температура, способствующая возникновению интенсивных природных пожаров. Усиления блокинговой антициклонической активности в атмосфере, в частности над континентальными регионами (Бондур, 2011; Бондур и др., 2020; Ситнов и др., 2017), в сочетании с летними тенденциями иссу-

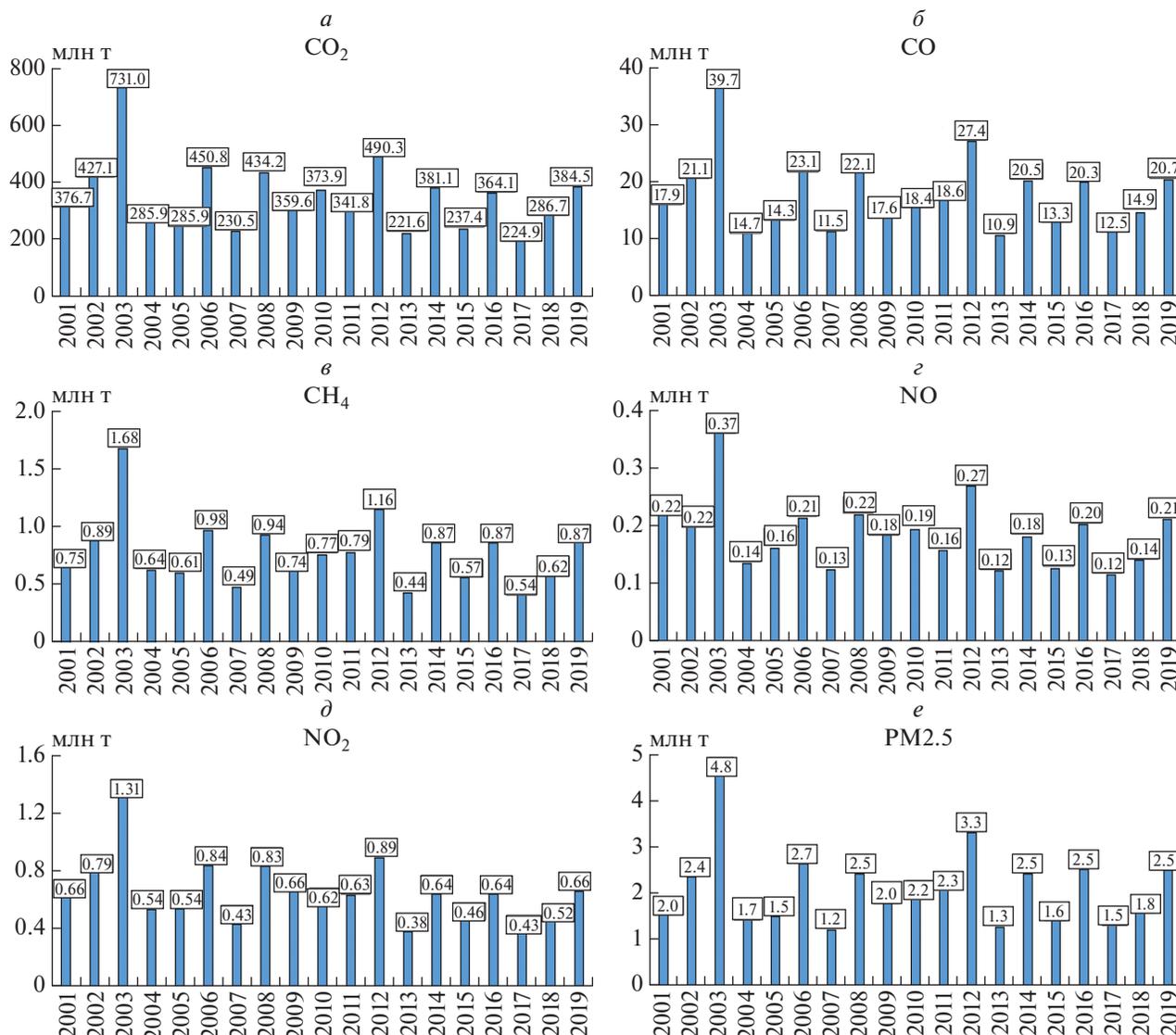


Рис. 4. Суммарные по годам объемы эмиссий различных примесей от природных пожаров на территории Российской Федерации в период с апреля по октябрь 2001–2019 гг.: а – CO₂, б – CO, в – CH₄, г – NO, д – NO₂, е – PM2.5.

шения во внутриконтинентальных среднеширотных регионах (Yuanhuizi He et al., 2020) способствует увеличению вероятности природных пожаров и их негативных последствий.

На рис. 4 представлены суммарные объемы эмиссий малых газовых компонент (CO₂, CO, CH₄, NO, NO₂) и мелкодисперсных аэрозолей (PM2.5) в атмосферу от природных пожаров, происшедших на территории Российской Федерации в период времени с 2001 по 2019 г. Объемы выбросов в атмосферу зависят от массы сгоревшего органического вещества, его химического состава, условий воспламенения и распространения огня, типа и интенсивности пожара. Горение биомассы является источником многих газов, но в основном исследуют эмиссию твердых веществ

и парниковых газов: CO₂, CO, CH₄, оксидов азота (NO) (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Вивчар и др., 2010).

Анализ объемов эмиссий в воздушную среду различных компонент, определенных по космическим данным в период с 2001 по 2019 гг. на территории Российской Федерации, представленных на рис. 4, позволил выявить экстремально высокие объемы эмиссий от природных пожаров в 2003 г.: CO₂ (731 млн т), CO (39.7 млн т), CH₄ (1.68 млн т), NO (0.37 млн т), NO₂ (1.31 млн т) и PM2.5 (4.8 млн т). В 2012 г. зафиксирован второй по величине максимум объемов эмиссий от природных пожаров за период исследований, которые составили: CO₂ (490.3 млн т), CO (27.4 млн т),

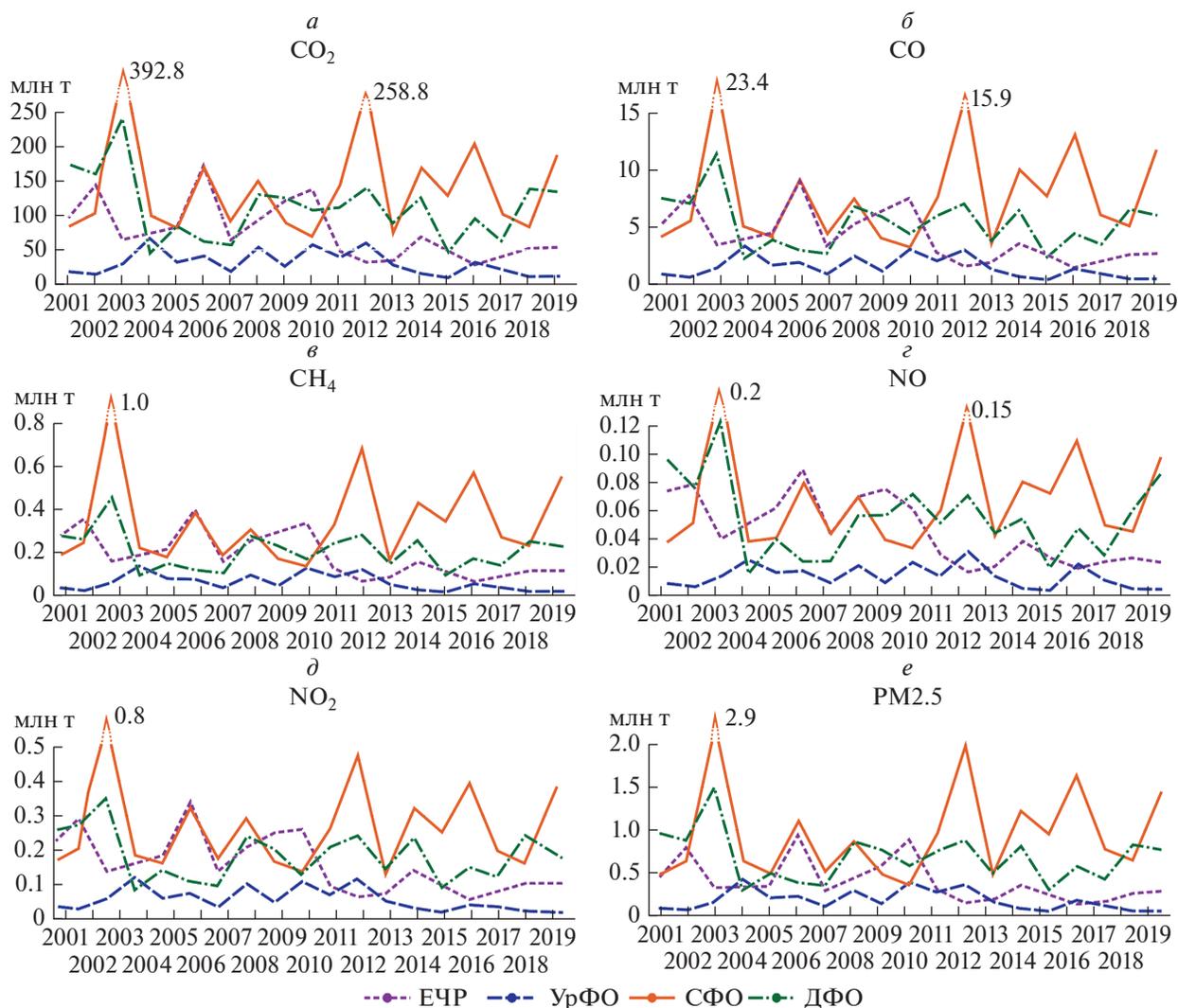


Рис. 5. Объемы эмиссий от природных пожаров, произошедших в СФО, ДФО, ЕЧР и УрФО в период с апреля по октябрь 2001–2019 гг.: а – CO_2 , б – CO , в – CH_4 , г – NO , д – NO_2 , е – $\text{PM}_{2.5}$.

CH_4 (1.16 млн т), NO (0.27 млн т), NO_2 (0.89 млн т) и $\text{PM}_{2.5}$ (3.3 млн т).

На рис. 5 приведены результаты оценок объемов эмиссий газовых примесей от природных пожаров в различных регионах России (СФО, ДФО, ЕЧР и УрФО) на примере выбросов CO_2 (а), CO (б), CH_4 (в), NO (г), NO_2 (д), $\text{PM}_{2.5}$ (е), рассчитанных с учетом ежегодно выгоревших площадей, выявленных по данным космического мониторинга в пожароопасные периоды (с апреля по октябрь) для интервала времени с 2001 по 2019 гг.

Анализ результатов, представленных на рис. 5, показывает, что наибольшие вклады в эмиссии от природных пожаров дают такие соединения, как CO_2 и CO . В то же время значения объемов эмиссий CH_4 , NO , NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ сравнительно невысоки. Поэтому дальнейшие исследования проведены

для оценок объемов выбросов оксида и диоксида углерода.

На рис. 6 приведены результаты оценок объемов эмиссий газовых примесей от природных пожаров в СФО (рис. 6, а), ДФО (рис. 6, б), ЕЧР (рис. 6, в) и УрФО (рис. 6, г) на примере выбросов CO и CO_2 , рассчитанных с учетом ежегодно выгоревших площадей, выявленных по данным космического мониторинга за период времени с 2001 по 2019 гг. Так как распределения объемов эмиссий CO и CO_2 за рассматриваемый период близки, то дополнительно была введена ось значений для отображения объемов эмиссий CO_2 на диаграммах размаха CO .

Из анализа результатов, представленных на рис. 6, а, следует, что пожары на территории СФО вносят значительный вклад в эмиссии CO и CO_2 . Максимальные среднегодовые объемы эмиссий

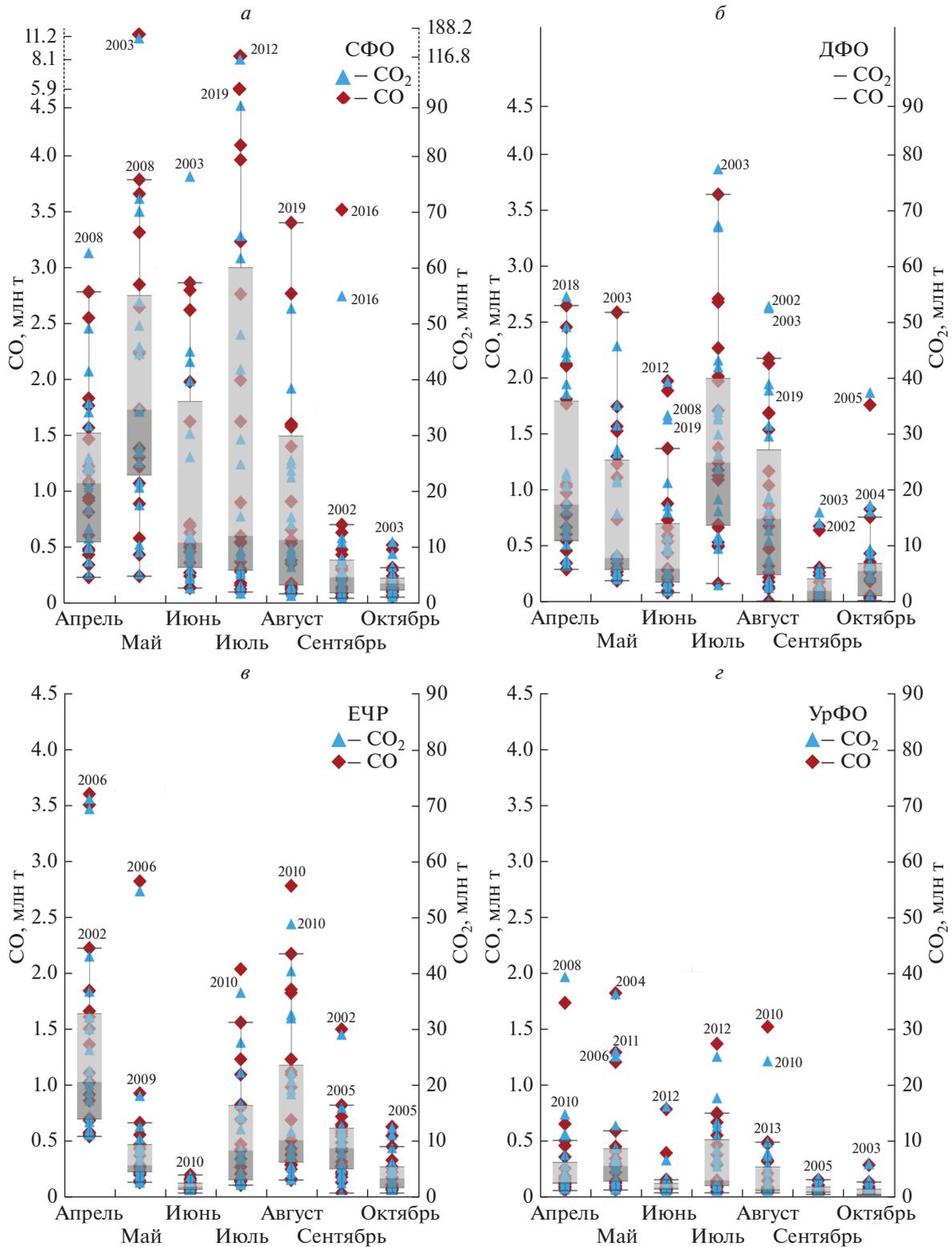


Рис. 6. Распределение годовых эмиссий CO и CO₂ с обозначением квартилей в пожароопасный период с 2001 по 2019 гг. для отдельных регионов Российской Федерации: а – СФО; б – ДФО; в – ЕЧР; г – УрФО.

вредных загрязняющих веществ в атмосферу этого региона России характерны для мая и июля, с пиковыми значениями в мае 2003 г. (CO – 11.2 млн т,

CO₂ – 188 млн т), в июле 2012 г. (CO – 8.1 млн т и CO₂ – 116.8 млн т) и 2019 г. (CO – 5.9 млн т, CO₂ – 89.2 млн т). Эмиссии оксида и диоксида углерода

в летние месяцы характеризуются значительными межгодовыми колебаниями с преобладанием более высоких значений в целом за 19 лет. В сентябре–октябре распределение по годам объемов эмиссий симметрично и составляет для СО в среднем 0.18–0.23 млн т/год, с отдельными выбросами, как, например, в сентябре 2016 г., когда объемы эмиссий СО₂ превышали 55 млн т и СО – 3.5 млн т.

На рис. 6, б приведены объемы эмиссий СО и СО₂ от природных пожаров в ДФО. Из анализа этого рисунка следует, что максимальные значения объемов эмиссий в этом регионе были зафиксированы в июле 2003 г. Разброс значений объемов эмиссий СО и СО₂ от природных пожаров в ДФО в июле с 2001 по 2019 гг. колебался от 0.2 до 3.6 млн т и от 3.2 до 77.4 млн т соответственно, медианное значение составило 1.2 млн т СО и 35 млн т СО₂. Распределение и величины объемов эмиссий СО в апреле в СФО и ДФО близки (медиана порядка 1 млн т), однако, в мае в ДФО наблюдалось снижение объемов эмиссий СО (медиана 0.4 млн т), в то время как в СФО был зафиксирован устойчивый рост объемов эмиссий СО (медиана 1.7 млн т) за весь 19-летний период наблюдений (см. рис. 6, а и б, б). Аналогичная закономерность наблюдается и для распределения объемов эмиссий СО₂ в СФО и ДФО в апреле и мае с 2001 по 2019 гг. (см. рис. 6, а и б, б).

В ЕЧР (см. рис. 6, в) и в УрФО (см. рис. 6, г) медианные значения среднегодовых объемов СО за анализируемый период не превышают 0.5 млн т для большинства месяцев за исключением апреля в ЕЧР. Максимальные выбросы среднегодовых объемов СО регистрировались в апреле–мае, однако, следует отметить, что все они были получены до 2010 г.

На основании анализа ежегодных среднемесячных оценок объемов эмиссий углеродосодержащих примесей, полученных с использованием данных космического мониторинга, был исследован вклад каждого региона с оценкой изменений за 19 лет. На рис. 7 представлен вклад регионов СФО, ДФО, ЕЧР и УрФО в объемы эмиссий СО и СО₂, обусловленные природными пожарами, в период с 2001 по 2019 гг. Из анализа рис. 7 следует, что в апреле с 2001 по 2010 гг. вклад ЕЧР в эмиссии СО и СО₂ был максимальным. Объемы выбросов достигали в отдельные годы 60–80% от суммарных объемов эмиссий для всей территории Российской Федерации. Начиная, с 2012 г. и до 2017 г. наблюдается близкое распределение объемов эмиссий СО и СО₂ в пределах 20–40% между ЕЧР, СФО и ДФО. В последние два года наблюдался прирост значений объемов эмиссий СО и СО₂ в ЕЧР, который достигал 60% от общероссийских.

В мае максимальный вклад в эмиссии СО и СО₂ с 2001–2017 гг. обеспечивал СФО – от 40 до 80% от общероссийских объемов, однако, начиная с 2012 г. наблюдается постепенная тенденция к усилению роста влияния ДФО с четко выраженной 1–2-летней цикличностью высоких и низких значений объемов эмиссий (см. рис. 7).

В ЕЧР и УрФО суммарный вклад в эмиссии СО и СО₂ в июне не превышал 20%, в то время как СФО и ДФО вносили циклично до 60–80% объемов эмиссий СО и СО₂. Следует отметить, что это единственный месяц, когда максимальные ежегодные объемы выбросов в СФО соответствовали минимальным в ДФО, и наоборот, то есть фактически находились в противофазе (см. рис. 7). В период с 2001 по 2010 гг. вклад ЕЧР в эмиссии СО и СО₂ в июле достигал 40%, снизившись в 2011–2019 гг. с 10% практически до 0. Вклад УрФО в эмиссии СО и СО₂ в июле составил от 2 до 26%. Максимальные значения были зарегистрированы в 2005 г. (17%), 2007 г. (16%), 2013 г. (26%) и 2017 г. (22%). Максимальный вклад ДФО в 2008 г. составил более 70%. Каждые 3–4 года в июле максимальные ежегодные объемы выбросов в СФО достигали 80% от объемов эмиссий СО и СО₂ в целом по стране (см. рис. 7).

В августе до 2010 г. вклад ЕЧР в эмиссии СО и СО₂ был преобладающим и в отдельные годы превышал 80% (2004 г., 2008 г.) от общероссийских. В УрФО в августе в целом сохранялась тенденция межгодовых колебаний значений вклада СО и СО₂, характерная для июля, с небольшим повышением. Роль СФО и ДФО начиная с 2008 г. постоянно росла и достигала 80% (в 2015 г.) для СФО и 50% (в 2011 г. и 2014 г.) для ДФО. Интересно отметить, что в отличие от июня и июля рост объемов эмиссий СО и СО₂ происходил фактически синхронно (см. рис. 7).

В сентябре ЕЧР и СФО вносили наибольший вклад в эмиссии СО и СО₂ от природных пожаров на протяжении всего периода наблюдений с 2001 по 2019 гг. Графики динамики объемов эмиссий СО и СО₂ для этих регионов имеют асинхронный характер, то есть в те годы, когда наблюдались пиковые значения объемов эмиссий для ЕЧР, для СФО были характерны минимумы таких объемов (рис. 7).

В октябре, начиная с 2010 г., вклад УрФО в эмиссии СО и СО₂ уменьшается. Динамика объемов эмиссий СФО и ЕЧР носит ровный характер с небольшими колебаниями, при которых максимальный вклад регионов в общую ситуацию не превышал 50%, а минимальный редко опускался ниже 20%. В то время как вклад ДФО в эмиссии СО и СО₂ в октябре превышал 60% в 2001, 2002, 2006 и 2016 гг. (см. рис. 7).

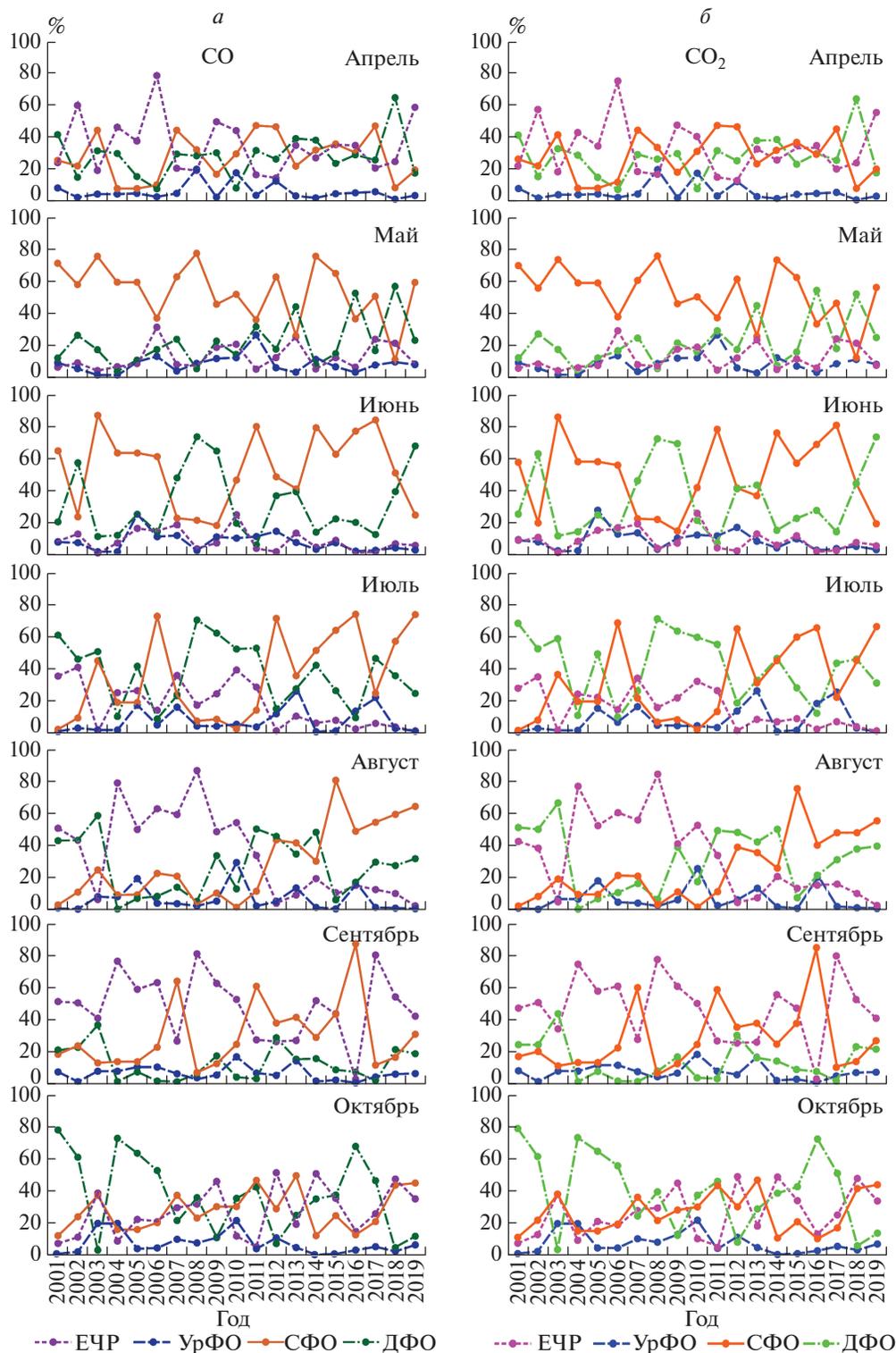


Рис. 7. Распределение вклада регионов СФО, ДФО, ЕЧР и УрФО в эмиссии CO (а) и CO₂ (б), обусловленные природными пожарами, в период с 2001 по 2019 гг.

Таким образом, проведенный анализ на основе данных космического мониторинга позволил выявить ряд закономерностей пространственно-временной динамики изменения площадей,

пройденных огнем на территории РФ с 2001 по 2019 гг., а также оценить вклад крупных регионов РФ в эмиссии основных малых газовых компонент (в том числе углеродосодержащих газов) и

мелкодисперсных аэрозолей от природных пожаров за 19-летний период времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что в период с 2001 по 2019 гг. на территории Российской Федерации наблюдается общая тенденция к снижению площадей природных пожаров даже с учетом катастрофических пожаров 2019 г. в Сибири и Дальнем Востоке. Основной вклад в сокращение площадей территорий, выгоревших при пожарах, внесли ЕЧР и УрФО, преимущественно в результате принятых после 2010 г. административно-правовых мер.

С использованием результатов анализа космических данных показано, что динамика колебаний площадей территорий, пройденных огнем, в СФО и ДФО носит циклический характер, то понижаясь, то возрастая в период с 2001–2019 гг., что предопределяется, скорее всего, влиянием природных факторов, таких как блокирующие антициклоны, аномалии осадков, температуры и ветрового режима. В весенне-осенний период в поясе активного земледелия во всех регионах страны отчетливо наблюдалась тенденция к снижению выгоревших площадей в апреле, мае, сентябре и октябре, начиная с 2010 г. С июня по август, когда преобладают лесные пожары, характерны циклические колебания (однолетние для июля, двух/трехлетние для июня и августа) за период с 2001 по 2019 гг. с максимумами в 2002, 2003 и 2012 гг. и без ярко выраженных минимумов.

Оценка объемов эмиссий различных малых газовых примесей и мелкодисперсных аэрозолей от природных пожаров на всей территории Российской Федерации позволила выявить экстремально высокие значения в 2003 г.: CO_2 (731 млн т), CO (39.7 млн т), CH_4 (1.68 млн т), NO (0.37 млн т), NO_2 (1.31 млн т) и $\text{PM}_{2.5}$ (4.8 млн т). В 2012 г. зафиксирован второй максимум за период исследований, объемы эмиссий от природных пожаров составили: CO_2 (490.3 млн т), CO (27.4 млн т), CH_4 (1.16 млн т), NO (0.27 млн т), NO_2 (0.89 млн т) и $\text{PM}_{2.5}$ (3.3 млн т).

На основании результатов космического мониторинга установлено, что ЕЧР вносит значительный вклад в эмиссии оксидов углерода в апреле и сентябре–октябре на протяжении всего периода наблюдений. Хотя, начиная с 2010 г., в ЕЧР прослеживается устойчивая тенденция к снижению объемов эмиссий в пожароопасный период, в последние три года наблюдается рост значений объемов эмиссий в весенне-осенний период, как, например, в сентябре 2017 г. объем выбросов в регионе достигал 80% от общероссийских. Выявлен асинхронный характер динамики объемов эмиссий CO и CO_2 в СФО и ЕЧР, то есть

в те годы, когда наблюдались пиковые значения для ЕЧР, для СФО были характерны минимумы. Максимальные вклады в эмиссии CO и CO_2 на территории Российской Федерации вносят СФО и ДФО, преимущественно от лесных пожаров, происходивших в период с мая по август. Для этих регионов характерны межгодовые колебания максимальных и минимальных значений. В июне СФО и ДФО вносят до 60–80% суммарных по стране объемов эмиссий CO и CO_2 от пожаров, то есть максимальные ежегодные объемы выбросов в СФО соответствуют минимальным в ДФО, и наоборот. Начиная с 2012 г., в июле вклад СФО становился доминирующим и достигал практически 80% общероссийских каждые 3–4 года. Для августа до 2010 г. вклад ЕЧР в объемы эмиссий CO и CO_2 был преобладающим и превышал 80% от общероссийских в 2004 г. и 2008 г. С 2008 г. выявлен постоянный рост влияния сибирского и дальневосточного регионов в общероссийские эмиссии CO и CO_2 от пожаров, который достигал 80% в 2015 г. для СФО и 50% в 2011 и 2014 гг. для ДФО. При этом в отличие от июня и июля рост объемов эмиссий CO и CO_2 происходил фактически синхронно.

Установлено, что УрФО со сравнительно небольшими ежегодными площадями выгоревших территорий вносит незначительный вклад в общероссийские эмиссии CO и CO_2 от природных пожаров. Однако, следует отметить, что, начиная с 2010 г. в июле–августе прослеживалась тенденция с превышением вклада региона на 20% в отдельные годы, в отличие от периода до 2010 г., когда вклад этого региона в среднем не превышал 5%.

Таким образом, на основании анализа результатов космического мониторинга были установлены закономерности пространственного и сезонного распределения площадей природных пожаров на региональном и общероссийском уровне. Несмотря на общую тенденцию к снижению площадей, выгоревших при природных пожарах, на всей территории России за период времени (с 2001 по 2019 гг.), региональный анализ показывает, что в Сибирском и Дальневосточном регионах площади пожаров в летний сезон циклично возрастали или снижались в разные годы за рассматриваемый период времени, демонстрируя тенденцию к увеличению частоты возникновения сильных пожаров.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности использования данных космического мониторинга для количественной оценки пространственно-временной динамики площадей, пройденных огнем, а также объемов эмиссий малых газовых компонент (прежде всего оксидов углерода) и мелкодисперсных аэрозолей от природных пожаров как на всей территории

Российской Федерации, так и на территориях ее крупных регионов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, MOST и DST в рамках научного проекта № 19-55-80021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS LANDSAT-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>
- Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.
<https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>
- Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. АН. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.
<https://doi.org/10.31857/S2686739720050047>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л., Гордо К.А.* Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2019 (а). Т. 485. № 6. С. 745–749.
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019 (б). № 3. С. 13–32.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
- Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В.* Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионально-го атмосферного переноса и климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 1–11.
- Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н.* Аномальные пожары 2010 и 2012 гг. на территории России и поступление черного углерода в Арктику // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6.
<https://doi.org/10.15372/AOO20160606>
- Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.Н.* Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС–ПРЕСС. 2004. 312 с.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н. и др.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России: Аналитический обзор. М.: Центр экологической политики России – 1995 г., 155 с.
- Воронова О.С., Зима А.Л., Кладов В.Л., Черепанова Е.В.* Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 года // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.
- Постановление Правительства Российской Федерации от 10 ноября 2015 г. № 1213.
- Прогноз чрезвычайной обстановки на территории Российской Федерации на 2020 год // Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий). От 25. 12. 2019 г. № 6276-19-3-2.
- Ситнов С.А., Мохов, И.И., Джола А.В.* Влияние сибирских пожаров на содержание монооксида углерода в атмосфере над европейской частью России летом 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2.
<https://doi.org/10.15372/AOO20170207>
- Сочилова Е.Н., Ершов Д.В.* Картографирование и оценка поврежденных пожарами лесов и пожарных эмиссий углерода по спутниковым изображениям высоко-го пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 322–331.
- Швиденко А.З., Шенащенко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКалум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. АН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
- Щетинский В.Е., Котельников Р.В., Сементин В.Л., Лупян Е.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В., Галлеев А.А., Ефремов В.Ю., Толпин В.А., Мазаров А.А., Крашенинникова Ю.С., Ершов Д.В.* Применение информационно-й системы дистанционного мониторинга “ИСДМ Рослесхоз” для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации (Издание второе) // ФГУ “Авиалесоохрана”, Пушкино (МО), 2008, 87 с.
- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 4039–4072.
<https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 168–182.

- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment Volume 178, 1 June 2016, Pages 31–41.
- He Y., Chen F., Jia H., Bondur V.G.* Different Drought Legacies between Rain-fed and Irrigated Croplands in a Typical Russian Agricultural Region // Remote Sens. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
<https://doi.org/10.3390/rs12111700>
- Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethva H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciaï P., Andreae M.O.* Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // Atmos. Chem. Phys., 2018. V. 18. P. 14889–14924.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-14889-2018>
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T. et al.* Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 13085–13096.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>
- Lin Z., Chen F., Li B., Yu B., Jia H., Zhang M., Liang D.* A Contextual and Multitemporal Active-Fire Detection Algorithm Based on FengYun-2G S-VISSR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. V. 57. № 11.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2923248>
- Pu R., Gong P., Li Z., Scarborough J.* A dynamic algorithm for wildfire mapping with NOAA/AVHRR data // International Journal of Wildland Fire. 2004. V. 13. № 3. P. 275–285.
<https://doi.org/10.1071/WF03054>
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J.* The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning // Geosci. Model Dev. 2011. V. 4. P. 625–641.
<https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>
- Xu G., Zhong X.* Real-time wildfire detection and tracking in Australia using geostationary satellite: Himawari-8 // Remote Sensing Letters. 2017. V. 8. № 11. P. 1052–1061.
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2017.1350303>

The Spatiotemporal Analysis of Multiannual Wildfires and Trace Gas and Aerosol Emissions in Russia Based of Satellite Data

V. G. Bondur¹, O. S. Voronova¹, E. V. Cherepanova¹, M. N. Tsidilina¹, and A. L. Zima¹

¹*Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russia*

The annual and intraseasonal dynamics of wildfire areas and volumes of trace gas components (CO, CO₂, CH₄, NO, and NO₂) and fine aerosols (PM_{2.5}) due to wildfires in Russia and its large regions over 19-year period are analyzed based on the results of satellite monitoring taking into account the impact of weather-climate anomalies on the intensity of fires. Average monthly burned out areas in the European part of Russia in the period between 2011 and 2019 in April, May, and September decreased 2-fold, and in July and August decreased 4-fold as compared to the corresponding months in 2001–2010. In the Siberian and Ural Federal Districts, there was revealed a negative trend for the spring-autumn season and increase of fire areas in summer from 2010 to 2019. It has been found that the dynamics of burned out areas for the most of months of the normal fire season in the Far Eastern Federal District over 19 years is weakly expressed. Extremely high volumes of emissions of various trace gases (including CO and CO₂) and aerosols due to wildfires were detected in the Siberian Federal district in 2003 and 2012.

Keywords: wildfires, remote sensing, satellite data, satellite monitoring, emissions, trace gases, aerosols

REFERENCES

- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crouse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 4039–4072. doi: 10.5194/acp-11-4039-2011
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V.* Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data // Sovremennyye problemy dıstantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 2. P. 9–26.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091. doi: 10.1134/S0001433816090103.
- Bondur V.G.* Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. doi: 10.1134/S0001433811090040.
- Bondur V.G., Ginzburg A.S.* Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 466. № 2. P. 148–152. doi 10.1134/S1028334X16020045.
- Bondur V.G., Gordo K.A.* Satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. № 9. P. 955–965. doi: 10.1134/S0001433818090104.
- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L.* Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic

- Physics. 2017. V. 53. № 9. P. 859–874. doi: 10.1134/S0001433817090055.
- Bondur V.G., Mokhov I.I., Voronova O.S., Sitnov S.A.* Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 492. № 1. P. 370–375. doi: 10.1134/S1028334X20050049.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Satellite monitoring of wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation cover in the federal districts of the Russian Federation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1238–1253. doi: 10.1134/S000143381909010X.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Kladov V.L., Gordo K.A.* Irregular Variability of Spatiotemporal Distributions of Wildfires and Emissions of Harmful Trace Gases in Europe Based on Satellite Monitoring Data // *Doklady Earth Sciences*. 2019a. V. 485. № 2. P. 461–464. doi: 10.1134/S1028334X19040202.
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 168–182.
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 178. P. 31–41.
- He Y., Chen F., Jia H., Bondur V.G.* Different Drought Legacies between Rain-fed and Irrigated Croplands in a Typical Russian Agricultural Region // *Remote Sens*. 2020. V. 12. № 11. P. 1700. doi: 10.3390/rs12111700
- Isaev A.S., Korovin G.N. et al.* Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii: Analiticheskiy obzor [Environmental Issues of Carbon Dioxide Absorption through Reforestation and Afforestation in Russia: An Analytical Review] // Moscow: Center for Russian Environmental Policy Publ., 1995. 155 p. (In Russian).
- Konovalov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethva H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciaia P., Andreae M.O.* Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018. V. 18. P. 14889–14924. doi: 10.5194/acp-18-14889-2018
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T. et al.* Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13085–13096. doi: 10.5194/acp-15-13085-2015.
- Lin Z., Chen F., Li B., Yu B., Jia H., Zhang M., Liang D.* A Contextual and Multitemporal Active-Fire Detection Algorithm Based on FengYun-2G S-VISSR Data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. № 11. doi: 10.1109/TGRS.2019.2923248.
- Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 10 noyabrya 2015, No 1213 [Decree of the Government of the Russian Federation of November 10, 2015, No. 1213]
- Prognoz chrezvychaynoy obstanovki na territorii Rossiyskoy Federatsii na 2020 god [Forecast of the emergency situation in the Russian Federation for 2020] // *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut po problemam grazhdanskoy oborony i chrezvychaynykh situatsiy MCHS Rossii*. December 12, 2019, No. 6276-19-3-2 (In Russian).
- Pu R., Gong P., Li Z., Scarborough J.* A dynamic algorithm for wildfire mapping with NOAA/AVHRR data // *International J. Wildland Fire*. 2004. V. 13. № 3. P. 275–285 doi: 10.1071/WF03054
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Clim. Change*. 1980. V. 2, № 3. P. 207–247.
- Shchetinskij V.E., Kotelnikov R.V., Sementin V.L., Lupyan E.A., Flitman E.V., Shcherbenko E.V., Galleev A.A., Efremov V.Yu., Tolpin V.A., Mazarov A.A., Krashenninnikova Yu.S., Ershov D.V.* Primenenie informacionnoy sistemy distancionnogo monitoringa “ISDM Rosleskhoz” dlya opredeleniya pozharnej opasnosti v lesah Rossijskoj Federatsii (Izdanie vtoroe) [The use of the information system of remote monitoring “ISDM Rosleskhoz” to determine the fire hazard in the forests of the Russian Federation (Second Edition)] // *Avialesookhrana Publ., Pushkino*, 2008. 87 p. (In Russian)
- Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., McCallum I., Lakyda I.P., Vaganov E.A., Sukhinin A.I., Maksyutov Sh.Sh.* Impact of wildfire in Russia between 1998–2010 on ecosystems and the global carbon budget *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 441. № 2. P. 1678–1682.
- Sitnov S.A., Mokhov I.I., Dzholo A.V.* Impact of Siberian wildfires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over European Russia in summer 2016 // *Optika Atmosfery i Okeana*. 2017. V. 30. № 2. (In Russian). doi: 10.15372/AOO20170207
- Sochilova E.N., Ershov D.V.* Kartografirovaniye i otsenka povrezhdennykh pozharami lesov i pozharnykh emissiy ugleroda po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostanstvennogo razresheniya [Mapping and assessment of forest damaged fires and fire carbon emissions from satellite images of high spatial resolution] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2007. V. 2. № 4. P. 322–331. (In Russian).
- Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N.* Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016. V. 29. № 6. P. 545–550.
- Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V.* Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in northern Eurasia for airquality assessment and climate modeling // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. V. 46. № 3. P. 281–293.
- Vorobyev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.N.* Lesnye pozhary na territorii Rossii: sostoyaniye i problemy [Forest fires in Russia: Conditions and problems]. Moscow: DEKS-PRESS, 2004. 312 p. (In Russian)
- Voronova O.S., Zima A.L., Kladov V.L., Cherepanova E.V.* Anomalnye pozhary na territorii Sibiri letom 2019 goda [Anomalous Wildfires in Siberia in Summer 2019] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 1. P. 70–82. (In Russian). doi: 10.31857/S0205961420010121
- Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J.* The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning // *Geosci. Model Dev*. 2011. V. 4. P. 625–641. doi: 10.5194/gmd-4-625-2011
- Xu G., Zhong X.* Real-time wildfire detection and tracking in Australia using geostationary satellite: Himawari-8 // *Remote Sensing Letters*. 2017. V. 8. № 11. P. 1052–1061. doi: 10.1080/2150704X.2017.1350303