

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СИЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПОЖАРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 2021 Г., ОБНАРУЖЕННЫЕ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2022 г. О. С. Воронова^а, *, К. А. Гордо^а, А. Л. Зима^а, Н. В. Феоктистова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

На основании данных космического мониторинга исследованы особенности крупных природных пожаров и обусловленных ими объемов эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5} на территории России и в ее отдельных регионах в период с апреля по октябрь 2001–2021 гг. Установлено, что в июле и августе 2021 г. среднемесячные значения площадей, пройденных огнем на всей территории России, превышали на 25 и 24.5 тыс. км² аналогичные значения, зарегистрированные в эти месяцы за период времени с 2001 по 2020 гг. Выявлены превышения значений площадей, пройденных огнем на территории крупных регионов в 2021 г. по сравнению с 2020 г.: в апреле на территории Европейской части России (на 2.1 тыс. км²), в мае в Уральском (на 6.7 тыс. км²) и в Сибирском (на 8.4 тыс. км²) федеральных округах, в июле и августе на территории Дальневосточного федерального округа (на 18.4 и 27 тыс. км² соответственно). Установлено, что в отдельные месяцы 2021 г. увеличение вклада объемов эмиссий, обусловленных природными пожарами на территориях указанных регионов в общие объемы выбросов по стране достигало 44.9% по сравнению с 2020 г. С использованием спутниковых данных проведен анализ изменения газового состава атмосферы в период сильных пожаров на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г., в результате которого выявлены области аномально высоких значений концентраций CO, CH₄ и повышение значений аэрозольного индекса AI от 1.4 до 3.7.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космические данные, космический мониторинг, природные пожары, эмиссии, аэрозольный индекс, тепловые аномалии

DOI: 10.31857/S0205961422010080

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие в настоящее время глобальные климатические изменения увеличивают риски возникновения природных пожаров. Средняя продолжительность сезона пожаров в мире за период с 1979 по 2013 гг. увеличилась на 18.7% (Jolly et al., 2015). Согласно докладу Росгидромета о климатических рисках на территории Российской Федерации во всех ее регионах, подверженных возникновению природных пожаров, к концу XXI века ожидается увеличение длительности пожароопасного периода на 20–29 сут, а в некоторых регионах на 30–50 сут (Доклад..., 2017).

Для территории России, имеющей значительные площади, покрытые лесами, исследование динамики природных пожаров и их последствий является важной задачей. Согласно работам (Бондур и др., 2021б; Мохов и др., 2020) среднегодовая площадь природных пожаров на территории России для периода времени с 2001 по 2020 гг. составила 199 тыс. км². Этому способствует рост температуры на фоне уменьшения осадков в пожароопасные периоды. В некоторых регионах увеличение плотностей эмиссий углеродсодержа-

щих газов CO и CO₂, а также мелкодисперсных аэрозолей PM_{2.5} превышает рост площадей природных пожаров за исследуемый период времени (Мохов и др., 2006).

Изменение климата в значительной мере влияет на режимы природных пожаров (Bradstock et al., 2008). Исследования изменения глобального потенциала возникновения природных пожаров в условиях изменения климата из-за парникового эффекта с использованием модели общей циркуляции показали, что будущий потенциал возникновения природных пожаров на планете в целом значительно возрастает (Liu et al., 2010). Периоды природных пожаров зависят от метеорологических атмосферных изменений различных временных масштабов, от межгодовых колебаний засухи до суточных колебаний влажности и ветра (Zhong et al., 2020). Возникающие тепловые аномалии, связанные с волнами жары, и уменьшение количества осадков вызывают усиление засушливых условий, значительно повышают вероятность возникновения природных пожаров, а также создают необходимые условия для быстро-

го распространения огня (Бондур, 2011; Crockett et al., 2018; Trauernicht, 2019; Мохов и др. 2003).

В свою очередь природные пожары повреждают растительный покров (Pellegrini et al., 2018; Бондур и др., 2019б; He et al., 2020) и вызывают неконтролируемое сгорание биомассы (Shirazi et al., 2021), в результате которого в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения, в том числе аэрозольных частиц, а также углеродсодержащих (CO , CO_2) и других малых газовых компонент, что приводит к загрязнению воздушной среды (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016) и оказывает влияние на климат (Certini, 2005; Pellegrini et al., 2018; Liu et al., 2017; Мохов и др., 2020).

Следовательно, в условиях изменяющегося климата, ежегодный мониторинг пожарной активности на Земном шаре, в том числе и на территории Российской Федерации имеет важное значение для изучения динамики этих природных явлений. Для этого формируются различные программы, описанные, например, в работах (Kulmala et al., 2015, 2016; Lappalainen et al., 2016, 2021).

Учитывая огромную площадь территории Российской Федерации, удаленность и часто труднодоступность отдельных территорий, для решения задач мониторинга природных пожаров и оценки влияния сгорания биомассы на состав атмосферы наиболее перспективным подходом является использование методов и технологий дистанционного зондирования Земли (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б, 2020а, 2020б, 2021а, 2021б; Bondur et al., 2021). Использование информации, полученной из космоса, позволяет своевременно выявлять очаги природных пожаров на различных участках, определять площади выгоревших территорий (Бондур, 2011, Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018), а также оценивать объемы вызванных ими эмиссий вредных газовых примесей и аэрозолей (Бондур, 2011, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016).

В настоящей работе представлены результаты космического мониторинга природных пожаров на территории России в 2021 г., который характеризуется особенно сильными пожарами в Сибири. Проанализированы площади, пройденные огнем, а также рассчитаны объемы эмиссий малых газовых компонент (CO , CO_2) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) от природных пожаров на территории России с 2001 по 2021 гг. По данным, полученным прибором AIRS (спутник Aqua), проведен анализ изменений температур земной поверхности. Выполнен сравнительный анализ данных общего содержания оксида углерода (CO) в июле 2021 г., полученных с помощью приборов AIRS (спутник Aqua) и TROPOMI (спутник Sentinel-5P). Выявлены концентрации метана CH_4 , а также изменения распространения мелкодисперсных аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$, обусловленные при-

родными пожарами в июле 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) по данным прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P).

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Методика проведения космических исследований для мониторинга очагов природных пожаров и выявления изменений границ площадей, пройденных огнем, разработана ранее и описана в работах (Бондур, 2011; Бондур, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018). Расчет площадей, пройденных огнем, производился за пожароопасный период с апреля по октябрь, в который существует наибольшая вероятность возникновения природных пожаров на территории России. Для расчета площадей, пройденных огнем, использовался информационный продукт MOD14 с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016). При этом учитывалась фактически выгоревшая территория за год без учета повторяемости горения одного и того же участка внутри пожароопасного сезона. Анализ значений площадей, пройденных огнем осуществлялся путем сравнения каждого года с использованием скользящего среднего в период с 2001 по 2021 гг.

В соответствии с преобладающим типом почвенно-растительного покрова на исследуемой территории, по данным продукта MCD12Q1 v. 6 (MODIS Land Cover Type 500 m) на основе классификации международной геосферно-биосферной программы (IGBP) (Friedl et al., 2010) были идентифицированы площади, пройденные огнем для дальнейшего расчета объемов эмиссий, выделившихся от природных пожаров. Объем эмиссий рассчитывался с использованием метода Сейлера-Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980). Метод учитывает плотность распределения биомассы на данной площади, ее долю сгорания. В формулу расчета также входят значения площадей пожаров, которые в данной работе вычислены с введением поправочного коэффициента, полученного по данным более высокого пространственного разрешения (Бондур, 2015; Бондур, Гордо, 2018).

Вероятность возникновения и скорость распространения природных пожаров начинает увеличиваться при аномальных природно-климатических условиях. Одним из таких условий является наличие тепловых аномалий, сопутствующих возникновению крупных природных пожаров (Tomshin and Solovyev, 2014; Crockett et al., 2018; Bondur et al., 2021).

В данной работе проведены исследования ежемесячных изменений температуры земной поверхности на территории России в пожароопасные периоды с 2003 по 2021 гг. В процессе проведения ис-

следований использовались космические данные, полученные прибором AIRS (спутник Aqua, тематический продукт AIRS3STM v006), с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013). Произведены расчеты аномального превышения температуры поверхности за 2021 г. по сравнению со средними температурами с 2003 по 2020 гг.

Основным источником поступления в атмосферу угарного газа CO является неполное сгорание ископаемого топлива или биомассы. Путем фотохимического окисления CO разрушается и является доминирующим поглотителем гидроксильного радикала (OH), что влияет на способность атмосферы к самоочищению (Lelieveld et al., 2016). При реакции с гидроксил радикалом (OH) изменяется и срок существования метана (CH₄) в тропосфере (Prather, 2007). Угарный газ CO является кратковременным загрязнителем климата. Он воздействует на образование углекислого газа (CO₂) и озона, а также на бюджет метана (CH₄) (Muyhre et al., 2014). Его влияние чувствительно к местоположению выбросов (Bowman and Henze, 2012; Buchholz et al., 2021).

Изучение изменения содержания CO₂ в атмосфере, получение данных о количестве выбросов, а также расчет максимально возможной поглощающей способности лесов и других экосистем, является актуальным для России, в том числе и для выполнения условий Парижского соглашения об изменении климата.

Время существования CO в атмосфере составляет от нескольких недель до месяцев (Holloway et al., 2000). Это позволяет выявлять загрязняющие шлейфы, которые постепенно подвергаются атмосферному перемешиванию (Buchholz et al., 2021).

Тропосферный оксид углерода CO доступен для дистанционного зондирования, благодаря его поглощению инфракрасным излучением, и наблюдается с помощью датчиков, установленных на спутниковых инструментах. Многолетние данные об общем содержании CO в тропосферном слое были получены с помощью прибора AIRS (спутника Aqua) с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013). Для анализа этих данных было произведено осреднение ежемесячных значений, полученных прибором AIRS для июля месяца в период времени с 2018 по 2020 гг. и их сравнение со значениями 2021 г. для этого месяца. Выбранный период осреднения объясняется наличием аномально высоких площадей природных пожаров на исследуемой территории республики Саха (Якутия) (Бондур и др., 2020б; Воронова и др., 2021). Также был проведен сравнительный анализ общего содержания CO, полученного по данным прибора AIRS (спутника Aqua), с данными прибора TROPOMI (спутник

Sentinel-5P), обеспечивающими улучшенное пространственное разрешение (7 км).

Еще одним индикатором загрязнения атмосферы являются аэрозоли. Мелкодисперсные частицы (PM_{2.5}), оказывают значительное негативное воздействие на здоровье человека (McClure and Jaffe, 2018). В зависимости от типа аэрозоли способны проявлять заметное влияние на климат (Ramanathan and Carmichael, 2008) и на другие загрязнители, такие как озон (Li et al., 2019). Спутниковые наблюдения атмосферного аэрозоля наряду с CO и другими малыми газовыми компонентами (CO₂, CH₄ и др.), могут служить дополнительной информацией при определении источников и понимании их пространственной и временной изменчивости (Edwards et al., 2004).

Анализ содержания метана (CH₄) и мелкодисперсных аэрозолей в атмосфере в период сильных пожаров на исследуемой территории осуществлялся на основании данных прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P). Для измерения содержания CH₄ использовался коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR – 2305–2385 нм) прибора TROPOMI. Чувствительность этого прибора падает при больших зенитных углах Солнца, но имеет лучшее пространственное разрешение по сравнению с данными, получаемыми в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне (MWIR, LWIR). В связи с этим, данные этого прибора использовались для изучения содержания метана над материковой частью бореально-арктической зоны Российской Федерации в летний сезон.

Наличие аэрозоля в атмосфере можно оценить с помощью аэрозольного индекса (AI), который вычисляется как отношение измеренного коэффициента отражения верхней части атмосферы в УФ диапазоне спектра и предварительно рассчитанного теоретического коэффициента отражения для атмосферы, в которой присутствует только рэлеевское рассеяние (Zweers Stein, 2018). Для исследований использовался аэрозольный индекс (AI), рассчитанный на основании измерений на длинах волн 354 и 388 нм с помощью спутниковых данных прибора TROPOMI (спутник Sentinel-5P).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты космического мониторинга природных пожаров на территории России представлялись для пожароопасного сезона (с апреля по октябрь) в период времени с 2001 по 2021 гг. На рис. 1 приведены отклонения суммарных ежемесячных значений площадей, пройденных огнем в пожароопасный период 2021 г., по сравнению с осредненными данными других лет для соответ-

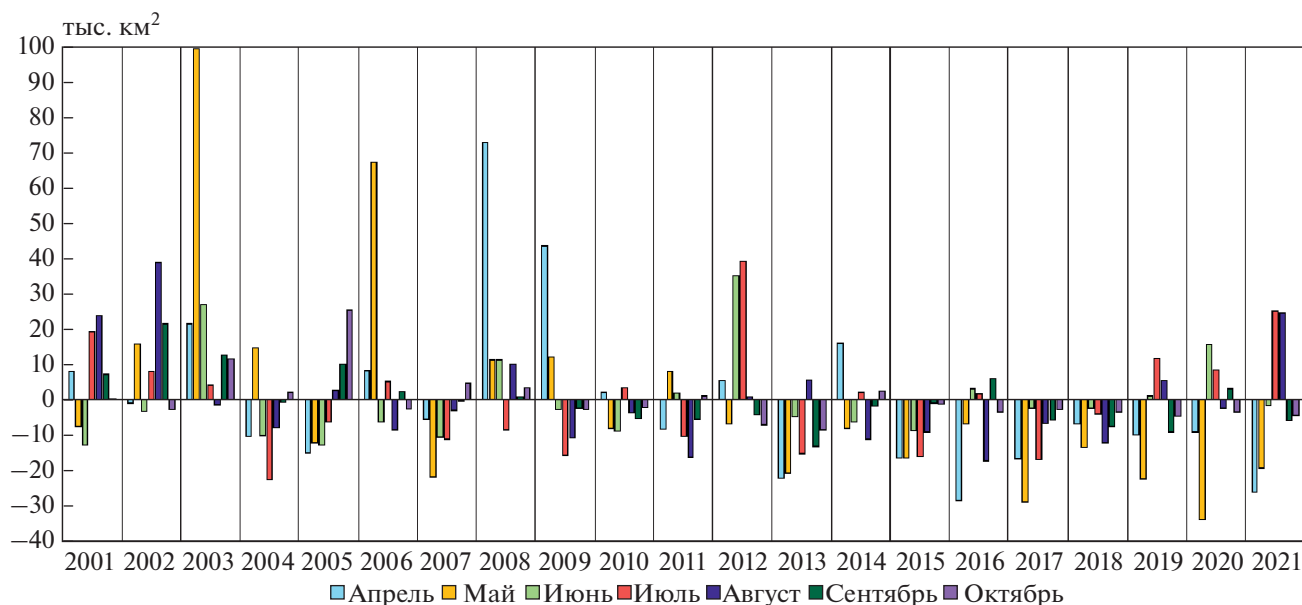


Рис. 1. Отклонения ежемесячных значений площадей, пройденных огнем за пожароопасный период по сравнению с данными за соответствующий месяц для других лет с 2001 по 2021 гг. на территории России.

ствующего месяца за период времени с 2001 по 2021 гг.

Анализ рис. 1 показал, что в период с 2013 по 2018 гг. на территории России выявлена тенденция к снижению площадей, пройденных огнем относительно других лет с апреля по октябрь. В июле 2019 г. выявлены превышения суммарных ежемесячных значений площадей, пройденных огнем на 11.5 тыс. км² по сравнению с данными других лет. В июне 2020 г. суммарные значения площадей, пройденных огнем, увеличились на 15.4 тыс. км² в сравнении с июнем других лет в период с 2001 по 2021 гг.

В июле и августе 2021 г. значения площадей природных пожаров на территории России превысили среднемесячные значения тех же месяцев периода 2001–2021 гг. на 25 и 24.5 тыс. км² соответственно (рис. 1).

Пожароопасный сезон 2021 г. был рассмотрен более детально, проведен сравнительный анализ с результатами 2020 г. На рис. 2, а приведены результаты сравнения значений площадей, пройденных огнем в пожароопасный период (с апреля по октябрь) 2021 г. с соответствующими данными за 2020 г. на территории крупных регионов России, таких как Европейская часть России, Уральский, Сибирский и Дальневосточный федеральные округа.

Анализ результатов на рис. 2, а показал, что по сравнению с 2020 г. площадь, пройденная огнем в 2021 г. увеличилась: в апреле на территории ЕЧР (на 2.1 тыс. км²), в мае на территории УрФО (на

6.7 тыс. км²) и СФО (на 8.4 тыс. км²), в июле и августе в районе ДФО (на 18.4 и 27 тыс. км² соответственно).

На рис. 2, б приведены распределения вклада регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские объемы эмиссий CO, CO₂, PM_{2.5}, обусловленные сгоранием биомассы, в апреле–октябре 2021 г. по сравнению с 2020 г.

Анализ результатов на рис. 2, б для каждого месяца, показал, что в апреле 2021 г. вклад эмиссий на территории СФО в ежегодные общие выбросы от природных пожаров снизился на 32% по сравнению с 2020-м г., в то время как в ЕЧР в 2021 г. произошло увеличение вклада эмиссий в общие по стране на 21%. В мае 2021 г. на территории УрФО были зафиксированы сильные природные пожары, вклад эмиссий от которых в общие объемы пожарных выбросов по России вырос на 44.9% по сравнению с 2020 г.

Для территории СФО характерна тенденция к снижению объемов эмиссий, зарегистрированных в 2021 г., по сравнению с 2020 г., исключением стал только июнь, когда вклад объемов выбросов CO, CO₂, PM_{2.5} в общероссийские вырос на 23.5% по сравнению с 2020 г.

Вклад эмиссий CO₂, обусловленных сгоранием биомассы на территории ДФО, в общероссийские объемы выбросов от природных пожаров в 2021 г. с июля по октябрь возрос на 9–28%, а объемов эмиссий CO и PM_{2.5} на 2–27.4% в сравнении с 2020 г.

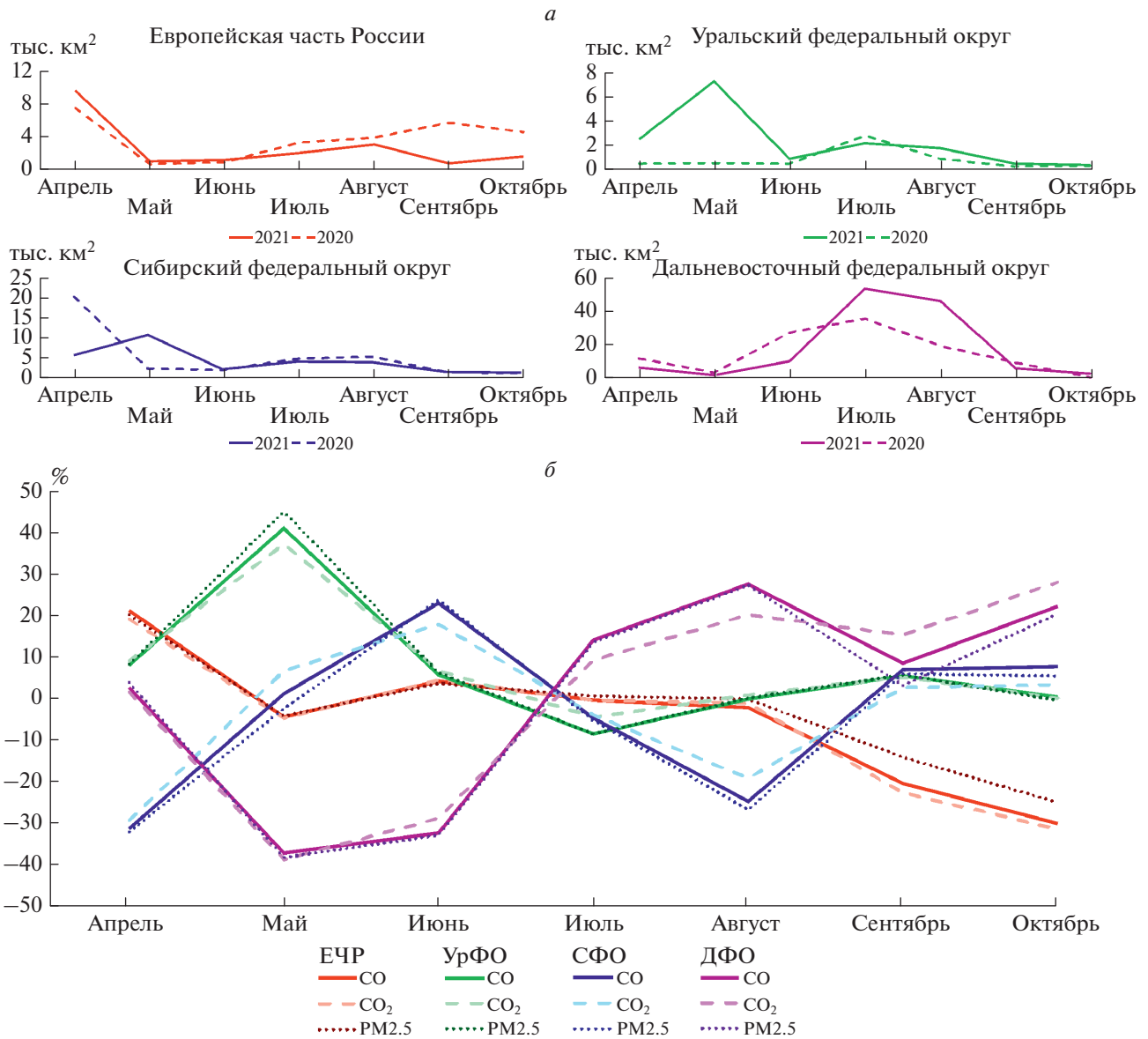


Рис. 2. Результаты космического мониторинга площадей природных пожаров на территории России: *а* – площадь, пройденная огнем на территории крупных регионов в период апрель–октябрь 2021 г. по сравнению с 2020 г.; *б* – распределение вклада регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в общероссийские эмиссии CO, CO₂, PM2.5 в 2021 г. по сравнению с 2020 г.

В настоящей работе по данным прибора AIRS (спутник Aqua) получены среднемесячные температуры земной поверхности на территории России за период времени с марта по июнь 2021 г., которые сравнивались с осредненными значениями температуры с 2003 по 2020 г. этих же месяцев. Пространственные распределения зарегистрированных таким образом температурных аномалий земной поверхности представлены на рис. 3.

На основании результатов анализа таких температурных аномалий установлено, что в марте–апреле 2021 г. на территории ЕЧР превышения многолетних значений температур по сравнению

с 2003–2020 гг. доходили до 3.5–4 К (см. рис. 3, *а*, 3, *б*). Такая температурная аномалия способствовала возникновению природных пожаров в апреле 2021 г. на территории ЕЧР, что также повлияло на увеличение общей площади пожаров по сравнению с апрелем 2020 г. (рис. 1, *а*).

В апреле–мае 2021 г. (рис. 3, *б*, 3, *в*) на территории УрФО зафиксированы аномально высокие температуры земной поверхности по сравнению со среднемесячными значениями температуры за период времени 2003–2020 гг. Превышения температур достигали 7–8 К. Повышение температур в апреле содействовало возникновению сильных

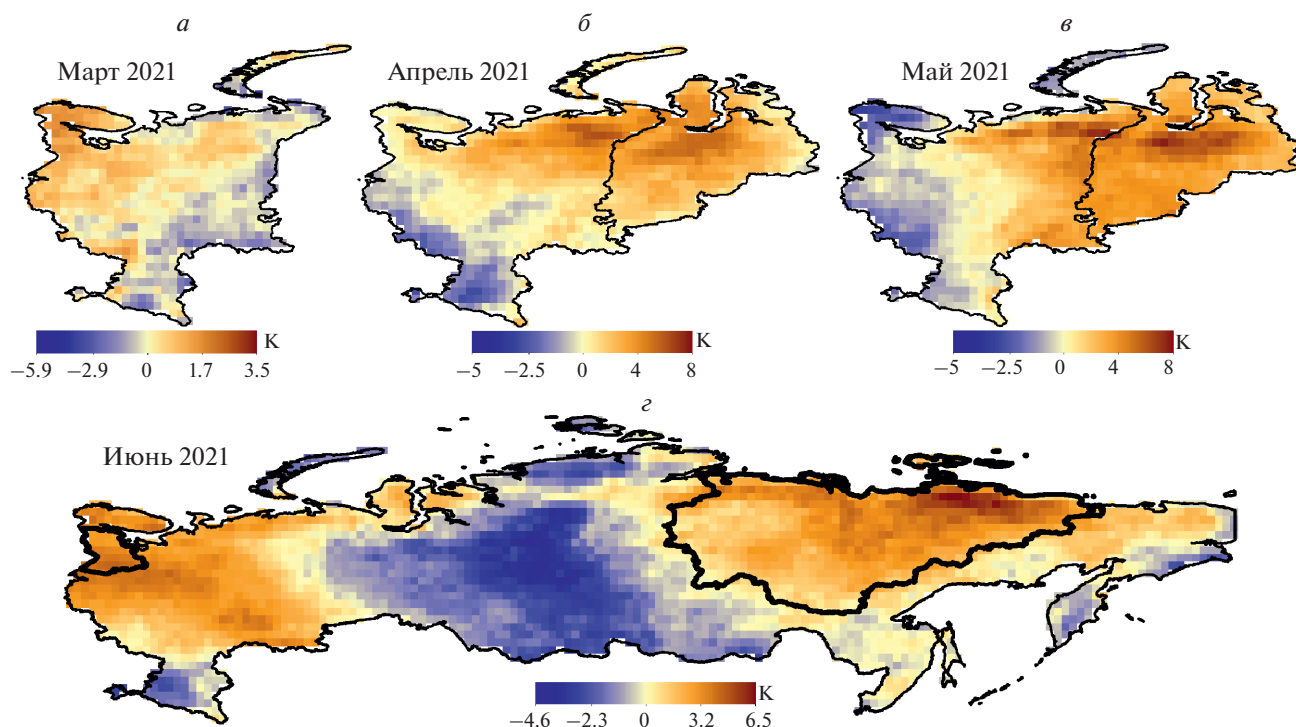


Рис. 3. Аномалия температуры земной поверхности (К) в 2021 г. по сравнению со средними температурами того же месяца в период времени 2003–2020 гг.: *a* – Европейская часть России; *б, в* – Европейская часть России и Уральский федеральный округ; *г* – Территория России с выделенными областями республики Карелия и Республики Саха (Якутия).

пожаров в мае 2021 г. на территории УрФО, которые по площадям превысили значения не только 2020 г. (рис. 1, *a*), но и прошлых лет, начиная с 2012 г. (Воронова и др., 2021).

На рис. 3, *г* приведена карта изменения температур, построенная по данным прибора AIRS (спутник Aqua). Анализ этой тепловой карты позволил выявить на территории ЕЧР и ДФО аномалии температуры земной поверхности в июне 2021 г. по сравнению со средними температурами 2003–2020 гг. В связи с засушливой погодой, установившейся в июне 2021 г. в республике Карелия, в июле 2021 г. были зафиксированы интенсивные природные пожары. По данным МЧС из-за сильного задымления от лесных пожаров и ухудшения видимости в Карелии вечером 18 июля 2021 г. на несколько часов закрывали федеральную трассу Р-21 “Кола” в районе Сегежи (<https://10.mchs.gov.ru/>).

Аномальные температуры, зарегистрированные в июне 2021 г. на территории ДФО, способствовали усилению пожароопасной ситуации, что привело к увеличению площадей, действующих пожаров, а также нарастанию их в июле и августе 2021 г. (рис. 1, *a*). Воздействию природных пожаров сильнее всего подверглась территория республики Саха (Якутия), на которой зафиксированы наиболее высокие значения площадей,

пройденных огнем в июле и августе 2021 г. за всю историю спутниковых наблюдений с использованием аппаратуры MODIS (спутники Terra/Aqua) с 2001 г. (см. рис. 4).

Республика Саха (Якутия) входит в состав ДФО, обладает наибольшей площадью лесного покрова среди всех субъектов Российской Федерации и на территории которой наблюдается высокая частота природных пожаров. Пожары на территории Якутии вызывают различные локальные воздействия как загрязнение воздуха, так и влияют на глобальное изменение климата (Narita et al., 2020).

Природные пожары являются одним из источников эмиссий загрязнителей воздуха, оказывающих негативное влияние на здоровье человека. Выбросы оксида углерода (СО) сохраняются в атмосфере от нескольких недель до месяцев и являются хорошим индикатором загрязнения воздуха (Ding et al., 2015). Поэтому важно определить пространственные закономерности, временные вариации и долгосрочные тенденции концентраций СО в атмосфере. С 2003 г. прибор AIRS, установленный на спутнике Aqua, обеспечивает глобальные и долгосрочные измерения атмосферного СО.

В настоящей работе приведены результаты исследования пространственного распределения

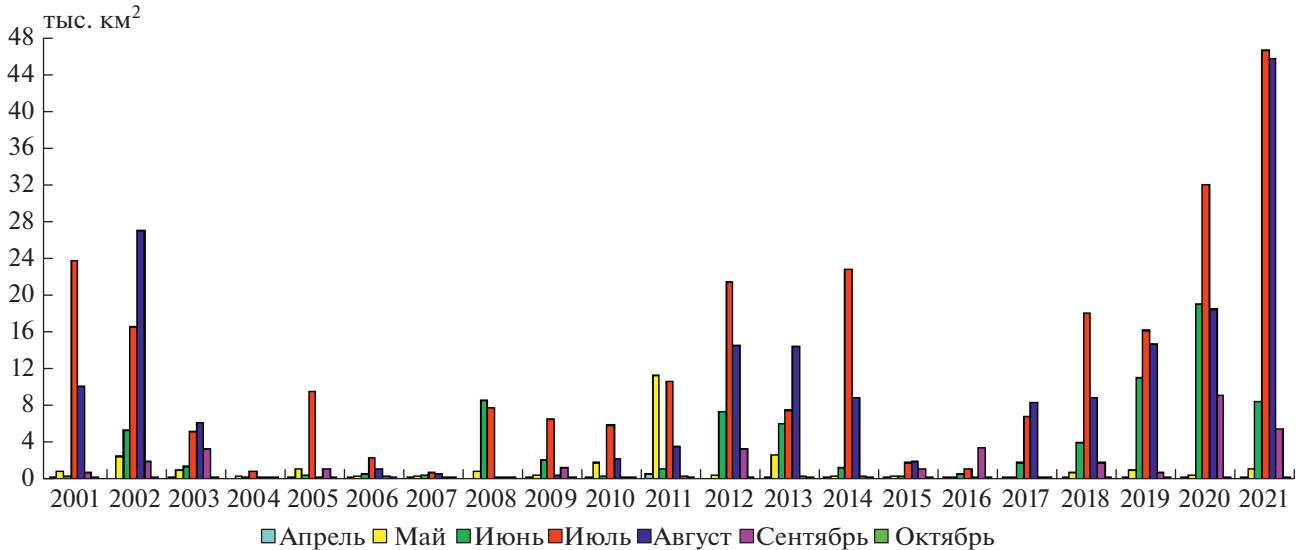


Рис. 4. Площади природных пожаров по данным информационного продукта MOD14 на территории республики Саха (Якутия) с апреля по октябрь 2001–2021 г.

концентраций CO в период сильных пожаров на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г. По данным прибора AIRS получены среднемесячные концентрации CO, зарегистрированные в июле 2021 г., и проведено их сравнение с осредненными значениями для этого же месяца за 2018–2020 гг. Результаты превышения концентраций оксида углерода на территории республики Саха (Якутия) представлены на рис. 5, а. Анализ результатов, представленных на рис. 5, а показал, что на территории Якутии в июле месяце с 2018 по 2021 гг. природные пожары носили аномально высокий характер (рис. 4). Анализ рис. 5, а позволил выделить три зоны аномального превышения концентраций CO. Наибольшее превышение концентрации CO над территорией Оймяконского улуса (район) в июле 2021 г. составило на 3.9×10^{17} molec/cm² по сравнению с 2018–2020 гг. Причиной этого явились интенсивные природные пожары, не происходившие в данной области в период с 2018–2020 гг. Территория Верхоянского района и Якутской области также попала в зону превышающих концентраций по сравнению с июлем 2018–2020 гг.

Пространственное распределение площадей, пройденных огнем, построенное по данным MOD14 (Terra/Aqua), приведено на рис. 5, б. Анализ рис. 5, б показал, что в июле 2021 г. на исследуемой территории площадь, пройденная огнем, достигла аномальных значений (46.6 тыс. км²) и явилась причиной увеличенного выброса CO.

Анализ общего содержания оксида углерода, полученного по данным прибора AIRS (рис. 5, в) и прибора TROPOMI (рис. 5, г) продемонстрировал различную чувствительность к их изменениям

от сжигания биомассы в июле 2021 г. Например, над территорией Оймякона, по данным AIRS значения концентрации CO доходили до 2×10^{18} molec/cm², а по данным TROPOMI общее содержание CO в тропосфере не превышало 2.6×10^{18} molec/cm². В то же время значения концентраций CO над территорией Верхоянского района по данным AIRS были наоборот выше, чем по данным TROPOMI. Минимальное количество природных пожаров в июле 2021 г., зарегистрированных в Верхоянском районе, позволяет сделать вывод о том, что высокие значения концентраций CO не связаны со сжиганием биомассы в данном районе, а вероятно связано с ошибками в алгоритме восстановления данных прибора AIRS.

Различия в данных об общем содержании CO, полученные с помощью приборов AIRS и TROPOMI, требуют более детального изучения с применением результатов численного моделирования и данных наземных наблюдений для исключения ложных аномалий.

Республика Саха (Якутия) ежегодно подвергается воздействию природных пожаров, которые продолжают длительное время (недели, даже месяцы). Некоторые участки территории подвергались сжиганию повторно. Сезоны пожаров 2019 и 2020 гг. были особенно экстремальными в тундровых регионах Якутии, к северу от Полярного круга, тогда как в 2021 г. природные пожары распространялись южнее. Природные пожары не просто распространяются по ландшафту, но и участвуют в процессах подтаивания вечной мерзлоты, прожигают слои торфа в некоторых областях и высвобождают запасы углерода и метана,

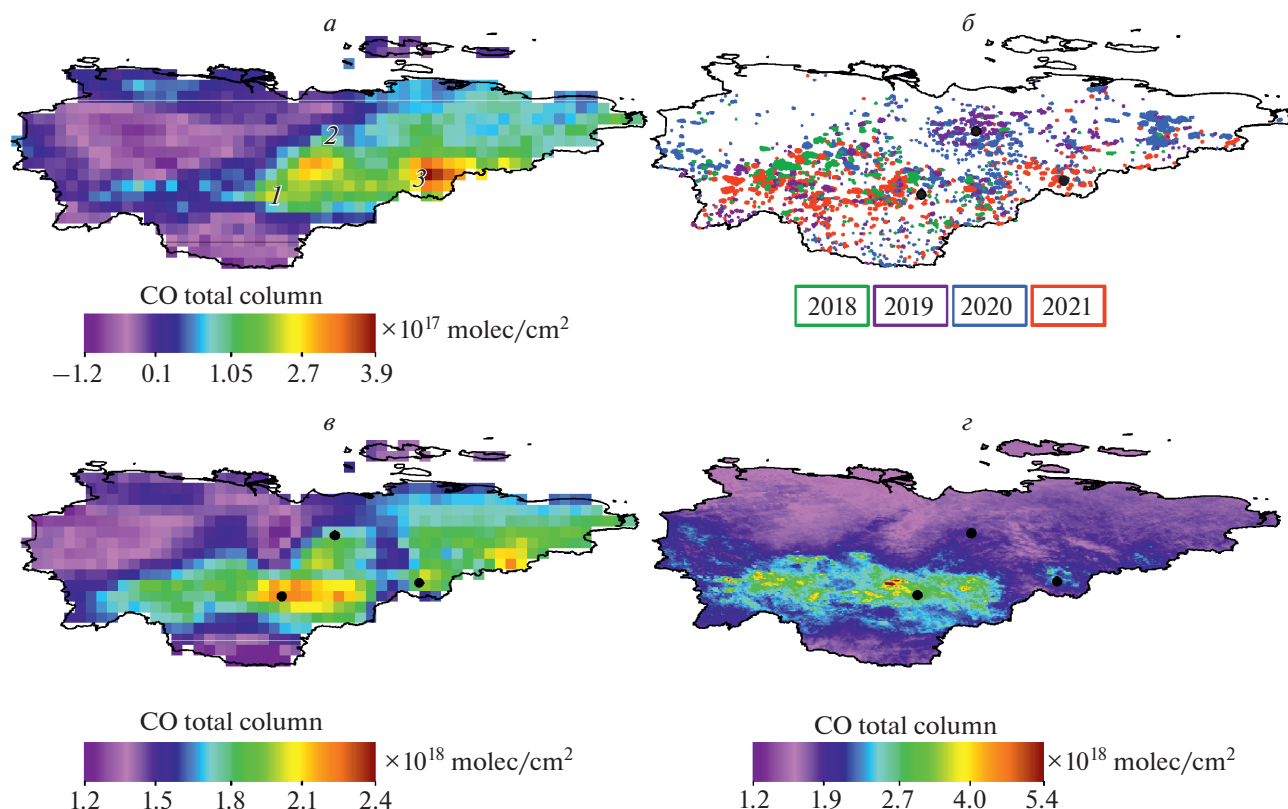


Рис. 5. Изменения концентрации оксида углерода (CO) на территории республики Саха (Якутия): *а* – превышение содержания оксида углерода (CO) в июле 2021 г. (по сравнению с 2018–2020 гг.), где 1 – Якутск, 2 – Верхоянск, 3 – Оймякон; *б* – пространственное распределение площадей, пройденных огнем в июле 2018–2021 гг.; *в* – содержание CO по данным Aqua (AIRS) в июле 2021 г.; *з* – содержание CO по данным Sentinel-5P (TROPOMI) в июле 2021 г.

которые накапливались годами (Черепанова и др., 2020; Froitzheim et al., 2021).

Пространственное распределение крупных площадей природных пожаров, полученных по данным анализа информационных продуктов MOD14 в июле 2021 г. на территории западной части республики Саха (Якутия), представлено на рис. 6, *а*. По данным TROPOMI зафиксирована концентрация метана над территорией Якутии в период сильных пожаров в июле 2021 г. (рис. 6, *б*).

Анализ пространственного распределения среднемесячных концентраций метана, полученных по спутниковым данным TROPOMI (рис. 6, *б*) в июле 2021 г. позволил выявить устойчивые области повышенных концентраций метана до 1895 ppb над выгоревшими площадями (рис. 6, *а*).

Наряду с CO и CH₄, в процессе природных пожаров выделяются и аэрозоли, но распространяются на большие расстояния и имеют более короткий срок существования в атмосфере. Комбинированный анализ тенденций измерения CO и аэрозольного индекса по космическим данным помогает диагностировать факторы региональных различий в тренде CO.

Вариации индекса аэрозоля (AI) анализировались по космическим данным прибора TROPOMI (Sentinel-5P) с пространственным разрешением 7 км. Аэрозольный индекс, регистрируемый TROPOMI, указывает на присутствие в атмосфере поглощающих аэрозолей. Произведено осреднение композитов аэрозольного индекса (AI) за период 8 и 6 дней (рис. 7), которое продемонстрировало более полную картину распространения аэрозолей по сравнению с использованием суточных спутниковых данных.

Анализ результатов, представленных на рис. 4 показал, что июль 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) характеризовался аномально высокими площадями, пройденными огнем, которые явились источником выброса в атмосферу большого количества мелкодисперсных частиц, в связи с чем повышенные значения AI сохранялись на протяжении всего месяца пожарной активности в данном регионе, а в период с 25 по 31 июля 2021 г. достигли максимальных 3.7.

Анализ изменения AI (см. рис. 5) на территории республики Саха (Якутия) показал, что крупномасштабные природные пожары являлись основным фактором, определяющим простран-

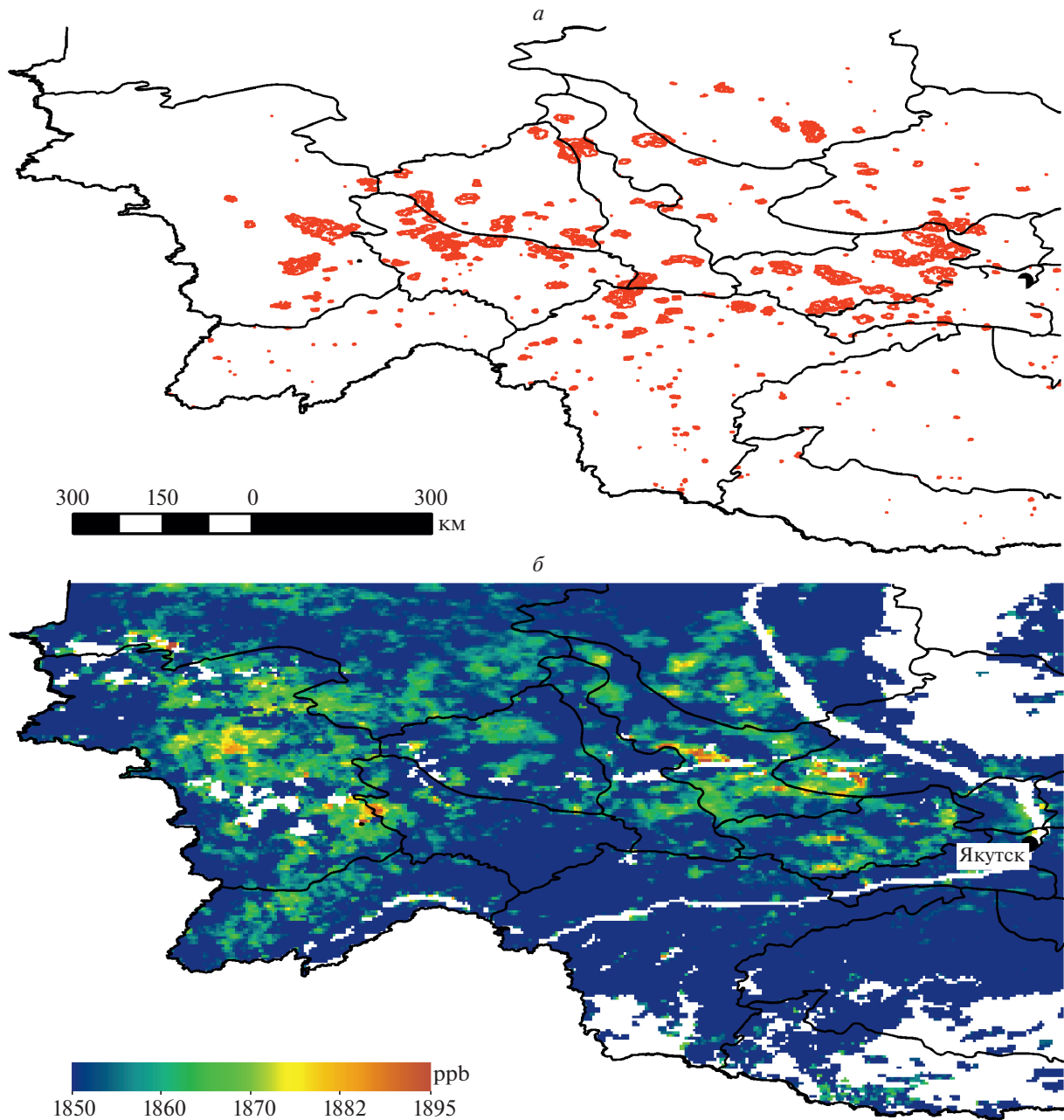


Рис. 6. Территория западной части республики Саха (Якутия) в период сильных пожаров в июле 2021 г.: *а* – пространственное распределение площадей, пройденных огнем по данным MODIS (Terra/Aqua); *б* – концентрация метана по данным TROPOMI (Sentinel-5P).

ственное и временное распределение индекса аэрозоля. Крупномасштабные природные пожары приводят к массовому загрязнению воздуха с высокими значениями AI, что означает высокое содержание вредных для окружающей среды и здоровья человека веществ в атмосфере.

Образование крупномасштабных неоднородностей в распределении AI возможно при соответствующих метеорологических условиях (низкое давление, низкая скорость ветра и т.д.), кото-

рые приводят к образованию областей застоя, где накапливаются аэрозольные частицы (Tomshin and Solovyev, 2014). Эти районы с высокими значениями AI могут существовать в течение примерно недели после прекращения природных пожаров. Аэрозольное загрязнение от сильных лесных пожаров может переноситься на большие расстояния от места пожара (Бондур, 2015; Бондур и др., 2021a Tomshin and Solovyev, 2014; Bondur et al., 2021; Воронова и др., 2021). В частности,

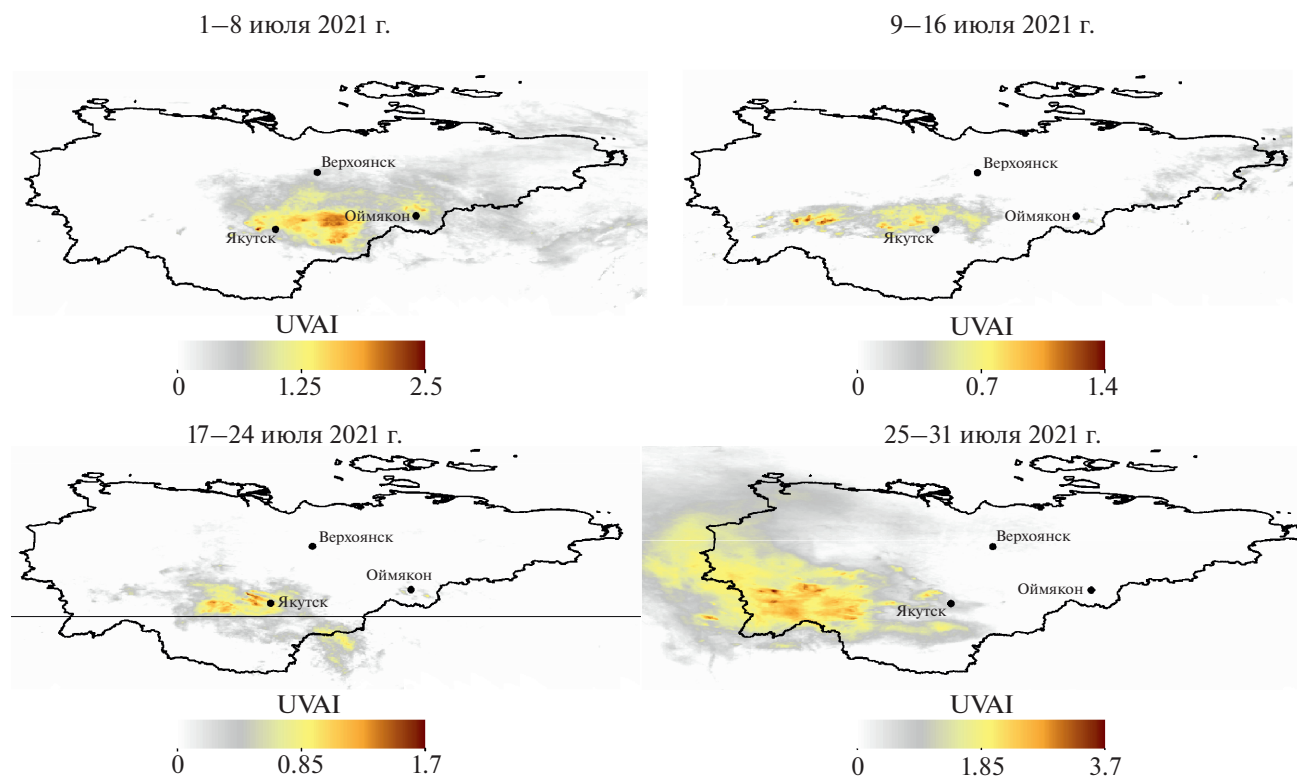


Рис. 7. Распределение среднесуточных значений аэрозольного индекса на территории республики Саха (Якутия) в июле 2021 г. по данным Sentinel-5P (TROPOMI).

аэрозольные облака, образовавшиеся в результате природных пожаров, произошедших на территории ДФО в июле 2020 г. распространились в восточном направлении и достигли за 8 дней территории Аляски (Воронова и др., 2021). Также в период сильных пожаров на территории австралийского штата Новый Южный Уэльс в декабре 2019 г. и январе 2020 г., аэрозольное облако достигло Новой Зеландии, преодолев расстояние более чем 3000 км. (Bondur et al., 2021; Бондур и др., 2021a).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов космического мониторинга природных пожаров, происходивших на территории России в 2021 г., проанализированы пространственные распределения очагов возгорания, площади, пройденные огнем, и объемы эмиссий углеродсодержащих газов от них на всей территории континента и его отдельных регионов относительно пожароопасного сезона 2020 г. Выявлены превышения суммарных площадей, пройденных огнем на территории крупных регионов Российской Федерации в 2021 г. по сравнению с 2020 г.: в апреле на территории Европейской части России (на 2.1 тыс. км²), в мае на территории Уральского федерального округа (на 6.7 тыс. км²) и

Сибирского федерального округа (на 8.4 тыс. км²), в июле и августе в районе Дальневосточного федерального округа (на 18.4 и 27 тыс. км²).

Был проведен анализ вклада объемов эмиссий CO, CO₂, PM_{2.5}, обусловленных сгоранием биомассы на территориях крупных регионов в статистику общероссийских выбросов по всем месяцам пожароопасного периода с апреля по октябрь, а также произведено сравнение данных 2021 г. с прошлым 2020 г. Выявлено, что в апреле 2021 г. вклад эмиссий на территории СФО в ежегодные общие выбросы от природных пожаров снизился на 32%, в то время как в ЕЧР произошло увеличение вклада эмиссий в общероссийские на 21%. В мае 2021 г. на территории УрФО вклад эмиссий вырос на 44.9%. Для территории СФО в 2021 г. характерна тенденция к снижению объемов эмиссий, исключением стал июнь, когда вклад объемов выбросов вырос на 23.5%. Вклад эмиссий на территории ДФО в июле и августе 2021 г. вырос на 9–27% в сравнении с прошлогодним пожарным периодом.

В результате анализа изменений температур земной поверхности, зарегистрированных по данным прибора AIRS (спутник Aqua) с марта по июнь 2021 г., выявлены тепловые аномалии, для которых превышения значений температур на

территории УрФО достигали 8 К, а в районе республики Саха (Якутия) до 6.5 К по сравнению с данными 2003–2020 гг. Такие высокие температуры, преобладавшие на данной территории, привели к аномальному увеличению числа очагов природных пожаров и их быстрому распространению в мае на территории УрФО и в июле-августе на территории республики Саха (Якутия), что в свою очередь свидетельствует о взаимосвязи тепловых аномалий с обострением пожароопасной ситуации.

Анализ данных общего содержания СО по данным прибора AIRS и прибора TROPOMI показал различную чувствительность к изменениям СО от сжигания биомассы в июле 2021 г., требующую более детальное изучение с применением численного моделирования и данных наземных наблюдений.

По данным TROPOMI выявлены значения концентраций метана в период сильных пожаров (июль 2021 г.) на территории республики Саха (Якутия) до 1895 ppb.

Вариации индекса аэрозоля (AI) по данным прибора TROPOMI в июле 2021 г. на территории республики Саха (Якутия) позволили обнаружить наличие и распространение мелкодисперсных частиц, выброшенных в атмосферу в результате горения биомассы.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности использования космических данных для оценки пространственно-временной динамики очагов возгорания, площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных газов от природных пожаров, а также для проведения исследований изменения газового состава атмосферы в период распространения сильных пожаров и их влияния на климат планеты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академику РАН В.Г. Бондуре за научное руководство, полезные обсуждения и советы при проведении исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. 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., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Космический мониторинг изменчивости площадей природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России за 20-летний период // Докл. АН. 2021 (6). Т. 500. № 2. С. 106–112.

<https://doi.org/10.31857/S2686739721100042>

Бондур В.Г., Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л., Феоктистова Н.В. Космический мониторинг многолетних природных пожаров и объемов вызываемых ими эмиссий вредных примесей в воздушную среду Австралии // Исслед. Земли из космоса. 2021(а). № 1. С. 1–16.

<https://doi.org/10.31857/S0205961421010048>

Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2020(а). № 4. С. 3–17.

<https://doi.org/10.31857/S0205961420040028>

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(б). 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>

Воронова О.С., Гордо К.А., Зима А.Л. Исследование динамики природных пожаров на территории Российской Федерации с 2001 по 2020 гг. с учетом воздействия климатических факторов // Исслед. Земли из космоса.

2021. № 4. С. 1–15

<https://doi.org/10.31857/S0205961421040072>

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Климатический центр Росгидромета. СПб. 2017. 106 с.

Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокировками // Докл. РАН. Науки о Земле 2020. Т. 495. № 2. С. 61–66. <https://doi.org/10.31857/S2686739720120087>

Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценки возможных региональных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. АН, Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.

Мохов И.И., Чернокульский А.В., Школьник И.М. Региональные модельные оценки пожароопасности при глобальных изменениях климата // Докл. АН. 2006. Т. 11. № 6. С. 808–811.

Черепанова Е.В., Феоктистова Н.В., Чудакова М.А. Анализ по космическим данным ТРОПОМИ аномалий концентраций метана над выгоревшими в 2018–2019 гг. территориями бореально-арктической зоны Восточной Сибири // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 63–77.

<https://doi.org/10.31857/S0205961420050048>

Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L. Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // Front. Earth Sci. 2021. 8:617252.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>

Bowman K., Henze D.K. Attribution of direct ozone radiative forcing to spatially resolved emissions // Geophys. Res. Lett. 2012. 39 (22), L22704.

<https://doi.org/10.1029/2012GL053274>

Bradstock R., Davies I., Price O., Cary G. Effects of Climate Change on Bushfire Threats to Biodiversity, Ecosystem Processes and People in the Sydney Region. Final Report to the New South Wales Department of Environment and Climate Change: Climate Change Impacts and Adaptation Research Project 50831. 2008, p. 65.

Buchholz R.R., Worden H.M., Park M., Francis G., Deeter M.N., Edwards D.P., ... Kulawik S.S. Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions // Remote Sensing of Environment. 2021. 256, 112275.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112275>

Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review // Oecologia 143, 1–10 (2005).

<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>

Crockett J.L., Leroy Westerling, A. Greater temperature and precipitation extremes intensify Western, U.S. droughts, wildfire severity, and sierra Nevada tree mortality // J. Clim. 2018, 31, 341–354.

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>

Ding K., Liu J., Ding A., Liu Q., Zhao T.L., Shi J., Han Y., Wang H., Jiang F. Uplifting of carbon monoxide from biomass burning and anthropogenic sources to the free troposphere in East Asia. Atmos. Chem. Phys. 2015, 15, 2843–2866.

<https://doi.org/10.5194/acp-15-2843-2015>

Edwards D.P., Emmons L.K., Hauglustaine D.A., Chu D.A., Gille J.C., Kaufman Y.J., Pétron G., Yurgano, L.N., Giglio V.L.,

Deeter M.N., Yudi V., Ziskin N.D.C., Warner J., Lamarque J.-F., Francis G.L., Ho S.P., Mao D., Chen J., Grech E.I., Drummond O.J.R. Observations of carbon monoxide and aerosols from the terra satellite: northern hemisphere variability // J. Geophys. Res.-Atmos. 2004. 109 (D24) /

<https://doi.org/10.1029/2004JD004727>

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.

Froitzheim N., Majka J., Zastrozhnov D. Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021; 118 (32): e2107632118.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2107632118>

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.

<https://doi.org/10.1071/WF03054>

He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G. Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.

<https://doi.org/10.3390/rs12111700>

Holloway T., Levy II, H., Kasibhatla P. Global distribution of carbon monoxide // J. Geophys. Res. 2000. 105 (D10), 12, 123–12, 147.

<https://doi.org/10.1029/1999JD901173>

Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nat. Commun. 2015, 6, 1–11.

<https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich. Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // Geography. Environment. Sustainability. 2016. № 2(9). P. 5–18.

https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01

Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari S., Bäck J., Bondur V., Kasimov, N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S.: Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // Atmos. Chem. Phys., 2015.15, 13085–13096.

<https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>

Lappalainen Hanna K., Tuukka Petäjä, Timo Vihma, ..., Valery Bondur, Marina Tsidilina, ... Overview: Recent advances on the understanding of the Northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – Pan Eurasian Experiment (PEEX) program perspective // Preprint Atmos. Chem. Phys., ACP-2021-341.

<https://doi.org/10.5194/acp-2021-341>

Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A., ... Bondur V., Zilitinkevich S., Kulmala M.: Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a

- holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016. 16, 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Relievel J., Gromov S., Pozzer A., Taraborrelli D.*, Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. 16, 12477–12493.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016>
- Li K., Jacob D.J., Liao H., Shen L., Zhang Q., Bates K.H.* Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2019. U. S. A. 116, 422–427.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al.* Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. *Ecol. Evol.* 2017; 7: 6220–6230.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S.* Trends in global wildfire potential in a changing climate. *For. Ecol. Manag.* 2010, 259, 685–697.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>
- McClure C.D., Jaffe D.A.* US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone Areas // *P. Natl. Acad. Sci.* 2018. USA 115 (31), 7901–7906.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>
- Myhre G., Shindell D., Br'eon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Narita D., Gavrilieva T., Isaev A.* Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // *Polar Science.* 2020. 100573.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100573>
- Pellegrini A., Ahlström A., Hobbie S. et al.* Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature* 553, 194–198 (2018).
<https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Prather M.J.*, Lifetimes and time scales in atmospheric chemistry // *Phil. Trans. R. Soc. A* 2007. 365, 1.705–1.726.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2040>
- Ramanathan V., Carmichael G.* Global and regional climate changes due to black carbon // *Nat. Geosci.* 2008. 1, 221–227.
<https://doi.org/10.1038/ngeo156>
- 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.
- Shirazi Z., Wang L. and Bondur V.G.* Modeling Conditions Appropriate for Wildfire in South East China – A Machine Learning Approach. *Front. Earth Sci.* 2021. 9:622307.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.622307>
- Tian B., Manning E., Fetzer E.J., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L.* 2013: AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide. NASA JPL Tech. Rep., 40 pp.
https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedocs-1/V6_L3_User_Guide.pdf.
- Tomshin O.A., Solov'yev V.S.* Aerosol index variations caused by severe forest fires in Siberia // 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2014.
<https://doi.org/10.1117/12.2074610>
- Trauernicht C.* Vegetation–Rainfall interactions reveal how climate variability and climate change alter spatial patterns of wildland fire probability on Big Island, Hawaii. *Sci Total Environ.* 2019 Feb 10;650(Pt 1): 459–469.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.347>
- Zhong S., Yu L., Heilman W.E. et al.* Synoptic weather patterns for large wildfires in the northwestern United States—a climatological analysis using three classification methods // *Theor Appl Climatol.* 2020. 141, 1057–1073.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03235-y>
- Zweers Stein D.C.* Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor of the UV Aerosol Index // SRON. 2018. 30 p.

Strong Wildfires in Russia in 2021 Detected Using Satellite Data

O. S. Voronova¹, K. A. Gordo¹, A. L. Zima¹, and N. V. Feoktistova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

The features of large wildfires and CO, CO₂, and PM_{2.5} emissions due to them in Russia on the whole and in its individual regions were studied on the base of satellite monitoring data for the periods from April to October in 2001–2021. It has been found that in July and August 2021 monthly average values of the burnt areas for the whole territory of Russia exceeded similar values registered for those months for the period between 2001 and 2020 by 25 and 24.5 thousand km², respectively. The areas of burned-out territories in large Russian regions in 2021 were greater than those in 2020 as follows: April - in the European part of Russia (by 2.1 thous. km²); May - in the Ural (by 6.7 thous. km²) and Siberian (8.4 thous. km²) federal regions, June and July - in the Far East Federal Region (by 18.4 and 27 thous. km², respectively). It has been found that in some months of 2021 an increase in the contribution of emissions caused by wildfires in the territories of these regions into the total emissions in the country reached 44.9% compared to 2020. An analysis of the atmospheric composition during strong wildfires in the Sakha Yakutia Republic in July 2021 was carried out using satellite data. This analysis have allowed us to detect the regions of extra high CO and CH₄ concentrations as well as of AI aerosol index increase from 1.4 to 3.7.

Keywords: remote sensing, satellite data, satellite monitoring, wildfires, emissions, aerosol index, thermal anomalies

REFERENCES

- 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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/10.1134/S0001433817090055>
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Front. Earth Sci.* 2021. 8: 617252.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- 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.
<https://doi.org/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.
<https://doi.org/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*, 2019. V. 485. Part 2. P. 461–464.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19040202>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Cherepanova E.V., Tsidilina M.N., Zima A.L.* Spatiotemporal Analysis of Multi-Year Wildfires and Emissions of Trace Gases and Aerosols in Russia, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020. V. 56. № 12. P. 1457–1469.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820120348>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L.* Satellite Monitoring of the Variability of Wildfire Areas and Emissions of Harmful Gas Components into the Atmosphere for Various Regions of Russia over a 20-Year Period // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 500. Part 2. P. 890–894.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21100044>
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L., Feoktistova N.V.* Kosmicheskiy monitoring mnogoletnikh prirodnykh pozharov i obyemov vyzhyvayemykh imi emissiy vrednykh primesey v vozdushnuyu sredu Avstralii (Satellite Monitoring of Multiannual Wildfires and Related Harmful Trace Gas Emissions into the Air Environment of Australia) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021. № 1. P. 25–40.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421010048> (In Russian)
- Bowman, K., Henze, D.K.* Attribution of direct ozone radiative forcing to spatially resolved emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2012. 39 (22), L22704.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053274>
- Bradstock R., Davies I., Price O., Cary G.* Effects of Climate Change on Bushfire Threats to Biodiversity, Ecosystem Processes and People in the Sydney Region. Final Report to the New South Wales Department of Environment and Climate Change: Climate Change Impacts and Adaptation Research Project 50831. 2008, p. 65.
- Buchholz R.R., Worden H.M., Park M., Francis G., Deeter M.N., Edwards D.P., ... Kulawik S.S.* Air pollution trends measured from Terra: CO and AOD over industrial, fire-prone, and background regions // *Remote Sensing of Environment*. 2021. 256, 112275.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112275>
- Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: a review // *Oecologia* 143, 1–10 (2005).
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Cherepanova E.V., Feoktistova N.V., Chudakova M.A.* Analysis of Methane Concentration Anomalies over Burned Out Territories of the Boreal and Arctic Zone of Eastern Siberia in 2018–2019 Based on TROPOMI Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1470–1481.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820120385>
- Crockett J.L., Leroy Westerling A.* Greater temperature and precipitation extremes intensify Western, U.S. droughts, wildfire severity, and sierra Nevada tree mortality // *J. Clim.* 2018, 31, 341–354.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>
- Ding K., Liu J., Ding A., Liu Q., Zhao T.L., Shi J., Han Y., Wang H., Jiang F.* Uplifting of carbon monoxide from biomass burning and anthropogenic sources to the free troposphere in East Asia. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15, 2843–2866.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-2843-2015>
- Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii (Report on Climate Risks in the Territory of the Russian Federation) / Klimaticheskii tsentr Rosgidrometa.* SPb. 2017. 106 p.
- Edwards D.P., Emmons L.K., Hauglustaine D.A., Chu D.A., Gille J.C., Kaufman Y.J., Petron G., Yurgano L.N., Giglio V.L., Deeter M.N., Yudi V., Ziskin N.D.C., Warner J., Lamarque J.-F., Francis G.L., Ho S.P., Mao D., Chen J., Grech E.I., Drummond O.J.R.* Observations of carbon monoxide and aerosols from the terra satellite: northern hemisphere variability // *J.*

- Geophys. Res.-Atmos. 2004. 109 (D24).
<https://doi.org/10.1029/2004JD004727>
- 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.
- Froitzheim N., Majka J., Zastozhnov D.* Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021; 118 (32): e2107632118
<https://doi.org/10.1073/pnas.2107632118>
- 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.
<https://doi.org/10.1071/WF03054>
- He Y., Chen F., Jia H., Wang L., Bondur V.G.* Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 11. P. 1700.
<https://doi.org/10.3390/rs12111700>
- Holloway T., Levy II, H., Kasibhatla P.* Global distribution of carbon monoxide // J. Geophys. Res. 2000. 105 (D10), 12, 123–12, 147.
<https://doi.org/10.1029/1999JD901173>
- Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S.* Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nat. Commun. 2015, 6, 1–11.
<https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // Geography. Environment. Sustainability. 2016. № 2(9). P. 5–18.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari, S., Bäck J., Bondur V., Kasimov N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo, H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S.* Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // Atmos. Chem. Phys., 2015.15, 13085–13096.
<https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>
- Lappalainen Hanna K., Tuukka Petäjä, Timo Vihma, ..., Valery Bondur, Marina Tsidilina,* Overview: Recent advances on the understanding of the Northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – Pan Eurasian Experiment (PEEX) program perspective // Preprint Atmos. Chem. Phys., ACP-2021-341.
<https://doi.org/10.5194/acp-2021-341>
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A., ... Bondur V., Zilitinkevich S., Kulmala M.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region, Atmos. Chem. Phys., 16, 14421–14461.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>, 2016
- Lelieveld J., Gromov S., Pozzer A., Taraborrelli D.* Global tropospheric hydroxyl distribution, budget and reactivity // Atmos. Chem. Phys. 2016. 16, 12477–12493.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-12477-2016>
- Li K., Jacob D.J., Liao H., Shen L., Zhang Q., Bates, K.H.* Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China // Proc. Natl. Acad. Sci. 2019. U. S. A. 116, 422–427.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- Liu W., Lu F., Luo Y. et al.* Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. Ecol Evol. 2017; 7: 6220–6230.
<https://doi.org/10.1002/ece3.3188>
- Liu Y., Stanturf J., Goodrick S.* Trends in global wildfire potential in a changing climate. For. Ecol. Manag. 2010, 259, 685–697.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>
- McClure C.D., Jaffe D.A.* US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone Areas // P. Natl. Acad. Sci. 2018. USA 115 (31), 7901–7906.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>
- Mokhov I.I., Bondur V.G., Sitnov S.A., Voronova O.S.* Satellite Monitoring of Wildfires and Emissions into the Atmosphere of Combustion Products in Russia: Relation to Atmospheric Blockings // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 495. Part 2. P. 921–924.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X20120089>
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch.* Estimates of possible regional hydrologic regime changes in the 21st century based on global climate models // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2003. T. 39. № 2. C. 130–144.
- Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Shkolnik I.M.* Regional model assessments of fire risks under global climate changes. Doklady Earth Sciences. 2006. 411(2), 1485–1488.
<https://doi.org/10.1134/s1028334x06090340>
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Narita D., Gavrilyeva T., Isaev A.* Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem // Polar Science. 2020. 100573.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100573>
- Pellegrini A., Ahlström A., Hobbie S. et al.* Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. Nature 553, 194–198 (2018).
<https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Prather M.J.* Lifetimes and time scales in atmospheric chemistry // Phil. Trans. R. Soc. A 2007. 365, 1.705–1.726.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2040>
- Ramanathan V., Carmichael G.* Global and regional climate changes due to black carbon // Nat. Geosci. 2008. 1, 221–227.
<https://doi.org/10.1038/ngeo156>

- 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.
- Shirazi Z., Wang L. and Bondur V.G.* Modeling Conditions Appropriate for Wildfire in South East China – A Machine Learning Approach. *Front. Earth Sci.* 2021. 9:622307. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.622307>
- Tian B., Manning E., Fetzer E.J., Olsen E., Wong S., Susskind J., Iredell L.* 2013: AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide. NASA JPL Tech. Rep., 40 p., https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedocs-1/V6_L3_User_Guide.pdf.
- Tomshin O.A., Solovyev V.S.* Aerosol index variations caused by severe forest fires in Siberia // 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2074610>
- Trauernicht C.* Vegetation–Rainfall interactions reveal how climate variability and climate change alter spatial patterns of wildland fire probability on Big Island, Hawaii. *Sci Total Environ.* 2019 Feb 10; 650(Pt 1): 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.347>.
- Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L.* Issledovaniye dinamiki prirodnykh pozharov na territorii Rossiyskoy Federatsii s 2001 po 2020 gody s uchotom vozdeystviya klimaticheskikh faktorov (Studying the Dynamics of Wildfires in Russia in 2001–2020 Taking into Account Climatic Factors) // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. № 4. P. 1–15 <https://doi.org/10.31857/S0205961421040072>.
- Zhong S., Yu L., Heilman W.E. et al.* Synoptic weather patterns for large wildfires in the northwestern United States—a climatological analysis using three classification methods // *Theor Appl Climatol.* 2020. 141, 1057–1073. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03235-y>
- Zweers Stein D.C.* Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor of the UV Aerosol Index // *SRON*. 2018. 30 p.L