

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С 2001 ПО 2020 гг. С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

© 2021 г. О. С. Воронова^а, *, К. А. Гордо^а, А. Л. Зима^а

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

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

На основании данных космического мониторинга исследованы особенности крупных природных пожаров, произошедших на территории России в период с 2001 по 2020 гг. Оценен вклад регионов Европейской части России, а также Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов в объемы эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5}, обусловленные природными пожарами. Установлено, что вклад СФО в общие объемы эмиссий от природных пожаров был преобладающим начиная с 2011 до 2017 гг. и в отдельные годы достигал 60%. Выявлено, что в 2020 г. объемы эмиссий от природных пожаров на территории ДФО превысили 55% от общероссийских. Проведен анализ особенностей аномальных природных пожаров с учетом погодно-климатических факторов. Выявлены взаимосвязи возникновения крупных природных пожаров с погодно-климатическими факторами, в том числе блокирующими антициклонами. С использованием данных прибора OMI (спутник Aura) установлено, что аэрозольный шлейф от крупных природных пожаров на территории России может распространяться на значительные расстояния и достигать соседних континентов.

Ключевые слова: природные пожары, дистанционное зондирование, космические данные, космический мониторинг, атмосферные блокирования, эмиссии, аэрозольный индекс

DOI: 10.31857/S0205961421040072

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время природные пожары и их последствия широко изучаются во всем мире. Эти природные явления являются важным экологическим фактором, оказывающим влияние на функциональность растительных экосистем (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2016). Кроме нарушения целостности растительного покрова в результате природных пожаров (Бондур, Чимитдоржиев, 2008) в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения, в том числе аэрозольных частиц, а также углеродсодержащих (CO, CO₂) и других малых газовых компонент, что приводит к загрязнению воздушной среды и оказывает влияние на климат (Lappalainen et al., 2014, Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2020б).

Различными исследованиями подтверждается рост частоты, пространственной протяженности и интенсивности природных пожаров в различных регионах планеты (Lappalainen et al., 2014; Бондур и др., 2016, 2021а; Bondur et al., 2021). Для оценки продолжительности сезона пожаров и пространственно-временных тенденций этих явлений с 1979 по 2013 гг. в работе (Jolly et al., 2015)

использовано три ежедневных набора глобальных климатических данных и три индекса пожарной опасности. Исследования показали, что пространственная протяженность природных пожаров на планете увеличилась на 29.6 млн км², что в свою очередь привело к увеличению средней продолжительности сезона пожаров в мире на 18.7% (Jolly et al., 2015). Подобные изменения обусловлены в том числе влиянием различных климатических факторов. Из работы (Crockett et al., 2018; Trauernicht, 2019) следует, что повышение температуры в сезон пожаров, уменьшение количества осадков и усиление засушливых условий в предшествующий сезоны значительно повышают вероятность возникновения природных пожаров. Высокие температуры и низкая относительная влажность, сопровождающиеся сильным ветром, создают необходимые условия для быстрого распространения огня (Бондур, 2011, Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б, 2020а, 2020б, 2021а; Мохов и др., 2003).

Режимы природных пожаров реагируют на изменчивость атмосферы в различных временных масштабах, от межгодовых колебаний засухи до суточных колебаний влажности и ветра (Zhong et al., 2020). При этом климатические аномалии,

вызывающие засушливые погодные условия и повышающие вероятность возникновения природных пожаров, связаны с блокирующими антициклонами в тропосфере. Следует отметить, что глобальное потепление может значительно увеличить продолжительность атмосферных блокировок, способствующих формированию природных пожаров (Бондур и др., 2020б; Мохов, 2020; Мохов и др., 2020). В условиях изменяющегося климата мониторинг пожарной активности имеет важное значение для понимания динамики таких природных явлений, как реакции на трансформацию погодных условий (Earl, Simmonds, 2018). Поэтому очень важно изучить изменения распределения природных пожаров за последние десятилетия и оценить взаимосвязь их возникновения с погодно-климатическими факторами, связанными с блокирующими антициклонами.

Для Российской Федерации, имеющей значительные площади лесных территорий, исследование из космоса многолетней динамики природных пожаров является особенно актуальным. Учитывая взаимосвязь с погодно-климатическими факторами, исследование изменения повторяемости природных пожаров на территории России и в конкретных ее регионах является важной практической задачей (Кононова, 2009).

Учитывая труднодоступность исследуемых территорий для решения задач мониторинга природных пожаров, определения выгораемых при этом площадей территорий и оценки влияния природных пожаров на состав атмосферы наиболее перспективным подходом является использование космических методов и технологий (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016)

В настоящей работе по космическим данным, полученным со спутников Terra и Aqua (прибор MODIS), были оценены площади, пройденные огнем, а также объемы эмиссий углеродсодержащих газов (CO , CO_2) и мелкодисперсного аэрозоля ($\text{PM}_{2.5}$), обусловленных сгоранием биомассы при природных пожарах, на всей территории Российской Федерации и отдельных ее регионов за период времени с 2001 по 2020 гг. Кроме того, была проведена оценка вклада каждого региона в общие объемы эмиссий, возникающих в результате природных пожаров на территории России. Также по данным космического мониторинга были выявлены взаимосвязи возникновения крупных природных пожаров с погодно-климатическими факторами.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения космического мониторинга очагов природных пожаров и выявления измене-

ний границ площадей, пройденных огнем, использовалась методика, разработанная ранее и описанная в работах (Бондур, 2011; Бондур, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018; Бондур и др., 2021б). В качестве основных данных использовался продукт MOD14 2-го уровня обработки с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016). Для расчета объемов эмиссий использовался модифицированный метод Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980), который учитывает площади, пройденные огнем, с введением поправочного коэффициента, полученного по данным более высокого пространственного разрешения (Бондур, 2015, Бондур, Гордо, 2018), плотность распределения биомассы на данной площади, а также долю сгоревшей биомассы.

В статье рассматриваются изменения природно-климатических условий, при которых увеличивается вероятность возникновения и скорость распространения природных пожаров. Одним из таких условий, сопутствующих возникновению крупных природных пожаров, считается практически неподвижный блокирующий антициклон, который обладает способностью не пропускать другие воздушные массы на занятую собой территорию (Кононова, 2009).

Для обнаружения блокирующих антициклонов в период крупных природных пожаров на территории России применялись данные прибора AIRS (спутник Aqua). С помощью данного прибора осуществляется регистрация значений геопотенциальных высот, которые являются аналогами верхних уровней поверхностных циклонов и антициклонов. Использовался продукт AIRS3STD 3 уровня обработки с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013), содержащий ежедневные данные изменения геопотенциальных высот на уровне давления 500 гПа, где происходит формирование погодно-климатической обстановки. Построение карт изменения геопотенциальных высот осуществлялось с помощью сервиса Giovanni (Ackert, 2007) в текущий месяц, когда происходили крупные пожары на территории исследования. Анализировался каждый день выбранного периода. В результате анализа выявлены периоды, в которые наблюдалось наиболее сильное преобладание антициклона.

Еще один фактор, влияющий на увеличение количества очагов природных пожаров и на их быстрое распространение — низкий уровень влажности в пожароопасном регионе. Важную роль играет именно относительная влажность, измеряемая в процентах и указывающая на текущее состояние абсолютной влажности относительно максимальных значений при той же температуре и давлении (Hamadeh et al., 2017). Сухостой, как горючий материал, и воздух всегда обмениваются влагой. Низкая влажность забирает влагу из го-

рющего материала, а он, в свою очередь, забирает влагу из воздуха при высокой влажности. Легковоспламеняющийся лесной материал, такой как трава и хвоя, быстро набирает и теряет влагу при изменении относительной влажности. Когда относительная влажность падает ниже 30%, горючесть увеличивается, потому что легковоспламеняющийся лесной материал становится более сухим (Eric et al., 2009).

Для выявления экстремально низких областей относительной влажности поверхностного слоя (RelHumSurf) использовался информационный продукт AIRS3STD, в состав которого входят ежедневные данные с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ (Tain et al., 2013). Строились карты изменения значений относительной влажности поверхностного слоя и сопоставлялись с очагами природных пожаров.

В результате сильных природных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество аэрозолей, которые могут не только ухудшить качество воздушной среды, приводящее к негативному влиянию на здоровье людей (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б, 2021а), но и значительно влиять на климат планеты (Бондур, Гинзбург, 2016; Lappalainen et al., 2014). Наличие аэрозоля в атмосфере регистрируется с помощью аэрозольного индекса, 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). Распространение аэрозоля от сжигания биомассы может отслеживается путем регистрации из космоса, в отличие от наземных измерений, ограниченных в пространстве и времени (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б; Бондур и др., 2021а, 2021б).

Анализ содержания аэрозолей производился на основании данных прибора OMI (спутник Aura), которые находятся в открытом доступе с 2004 г. по настоящее время. Обнаружение аэрозолей осуществлялось путем обработки данных продукта OMAERUV v003 (Torres, 2006), на основе аэрозольного индекса в УФ-диапазоне спектра (UVAerosolIndex), данные которого имеют пространственное разрешение 13×24 км. Если выявленные значения этого индекса положительные, то это указывало на присутствие УФ-поглощающих аэрозолей, таких как пыль и дым. В отличие от измерений оптической толщины аэрозоля, спутниковые измерения аэрозольного индекса можно рассчитать также при наличии облаков, что обеспечивает возможность получения ежедневного глобального покрытия (Ahmad, 2006; Бондур и др., 2021а).

Для проведения настоящего 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). Это позволило учитывать природно-климатические особенности каждого региона при интерпретации полученных результатов исследования. Кроме того, значительная часть исполнительных мероприятий по разработке мер для снижения рисков возникновения природных пожаров и смягчению их последствий принимается на региональном уровне (Бондур и др., 2019б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены результаты космического мониторинга природных пожаров на территории России в пожароопасный сезон с апреля по октябрь 2001–2020 гг. Из анализа рис. 1, а следует, что наибольшие площади природных пожаров выявлены в 2003 г. (365.5 тыс. км²).

На рис. 1, б представлен вклад регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в объемы эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5}, обусловленные природными пожарами в период с 2001 по 2020 гг. Из анализа рис. 1, б следует, что до 2010 г. вклад ЕЧР в эмиссии CO, CO₂ и PM_{2.5} достигал 40% от суммарных объемов эмиссий для всей территории Российской Федерации. Начиная с 2011 г. и до 2020 г. наблюдается снижение объемов эмиссий в пределах 10–20% от общероссийских. Вклад СФО в объемы эмиссий CO, CO₂ и PM_{2.5} был преобладающим в 2003, 2007, 2012, 2014–2016 гг. и в отдельные годы достигал 60% (2003, 2012, 2015, 2016 гг.). Согласно рис. 1, б, наблюдается постепенная тенденция к усилению роста влияния ДФО в объемы эмиссий начиная с 2017 г., которая в 2020 г. достигла 65% от общероссийских.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показал, что наибольшие площади природных пожаров на территории Европейской части России были зафиксированы в апреле 2009 г. (54.27 тыс. км²), в Уральском федеральном округе в апреле 2008 г. (21.71 тыс. км²), на территории Сибирского федерального округа в мае 2003 г. (100.28 тыс. км²), а в Дальневосточном федеральном округе максимум площадей природных пожаров пришелся на июль 2020 г. (35.76 тыс. км²). Выявленные месяцы и год с максимальными площадями были выбраны для дальнейшего детального анализа распределения очагов природных пожаров, а также погодноклиматической обстановки в этот период.

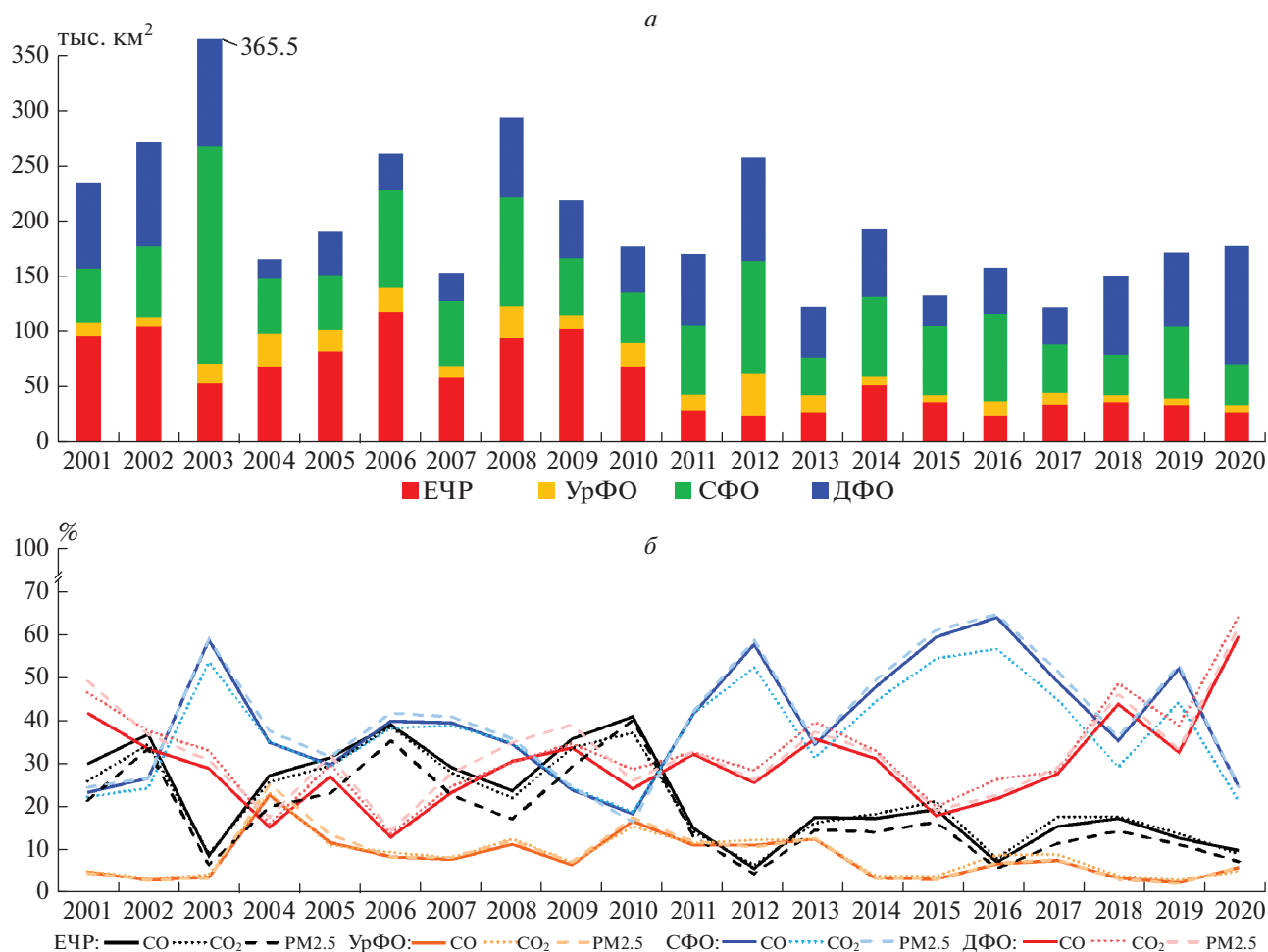


Рис. 1. Результаты космического мониторинга площадей природных пожаров на территории России за период 2001–2020 гг.: *а* – ежегодные распределения площадей природных пожаров на всей территории России с разделением по округам; *б* – распределение вклада регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО в эмиссии CO, CO₂, PM_{2.5}.

Для анализа динамики очагов природных пожаров использованы данные прибора MODIS (спутники Terra/Aqua) и получена информация за апрель 2009 г. Построены графики очагов природных пожаров на территории Европейской части России (рис. 3, *а*), анализ которых позволил выявить дни, в которые обнаружено наибольшее количество очагов (12 апреля и с 26 по 29 апреля 2009 г.).

По данным прибора AIRS (спутник Aqua) построены карты изменения геопотенциальных высот на уровне 500 гПа, а также относительной влажности в период сильных пожаров в апреле 2009 г. на территории Европейской части России (рис. 3, *б*, *в*).

Анализ полученных результатов изменения геопотенциальных высот позволил выявить периоды, в которые присутствие блокирующего антициклона с 1–11 и с 19–25 апреля 2009 г. явилось

одной из причин интенсивных пожаров в дни 12 апреля и с 26 по 30 апреля 2009 г. (рис. 3, *б*).

Построенные карты изменения относительной влажности сопоставлены с очагами природных пожаров, обнаруженными в этот период. Из анализа рис. 3, *в* следует, что распределение очагов природных пожаров наблюдалось в области низкой относительной влажности (до 30%), которая способствовала увеличению количества очагов 12 апреля и в период с 26 по 30 апреля 2009 г.

Максимум площадей, пройденных огнем на территории Уральского федерального округа за период с 2001 по 2020 гг., пришелся на апрель 2008 г. (21.71 тыс. км²). Детальный анализ данного месяца проведен по данным прибора MODIS (спутники Terra/Aqua). Количество очагов, зафиксированных ежедневно в апреле 2008 г., представлено в виде графика на рис. 4, *а*.

Из анализа рис. 4, *а* можно выделить дни с 10 по 13 и 19, 21 апреля 2008 г., в которые количество

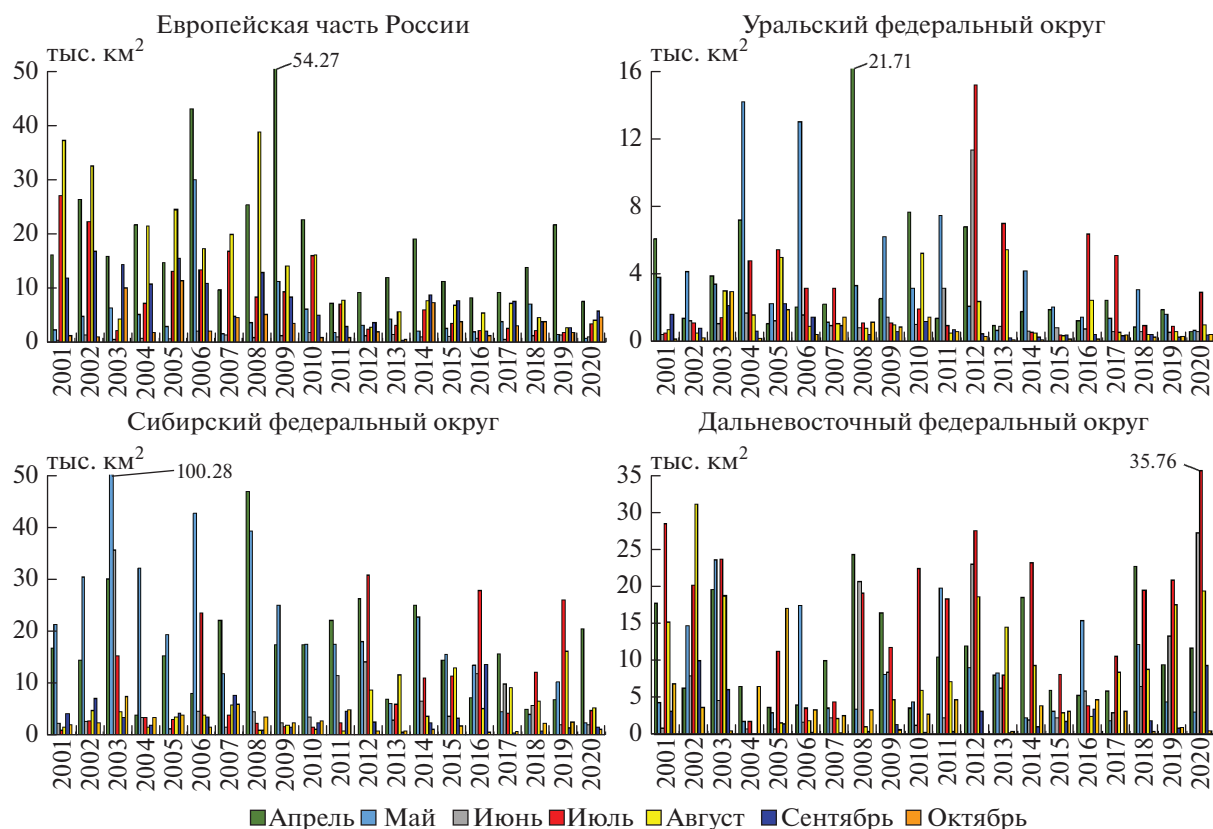


Рис.2. Распределения площадей природных пожаров по месяцам в федеральных округах ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО.

новых очагов природных пожаров превысило 2000 за сут.

Построенные карты изменения геопотенциальных высот по данным прибора AIRS (спутник Aqua) выявили области повышенного давления на территории Уральского федерального округа (рис. 4, б) в дни с 1 по 9 апреля, а также с 14 по 18 апреля 2008 г., следствием которых стали интенсивные природные пожары с 10–13 и 19, 21 апреля 2008 г. Анализ рис. 4, в демонстрирует распределение очагов природных пожаров в области относительной влажности с низкими показателями (от 25 до 30%), которая способствовала их увеличению.

Сибирский федеральный округ чаще всего подвергается природным пожарам. По результатам космического мониторинга в период с 2001 по 2020 гг. рекордное значение площадей природных пожаров выявлено в мае 2003 г. (100.28 тыс. км²).

Проанализировано количество очагов природных пожаров, обнаруженных с помощью прибора MODIS (спутники Terra/Aqua) в мае 2003 г. на территории СФО (рис. 5, а).

Анализ рис. 5, а позволил выявить увеличение количества очагов природных пожаров практически каждый день от 2000 и более.

Исследования погодно-климатических особенностей на территории Сибирского федерального округа по данным прибора AIRS (спутник Aqua) позволили оценить влияние блокирующих антициклонов, с положительными аномалиями геопотенциала (рис. 5, б), которое способствовало увеличению очагов природных пожаров от 6000 и более каждый день в период с 7 по 9 мая 2003 г.

Построенные карты относительной влажности по данным прибора AIRS (спутник Aqua) выявили экстремально низкие значения (от 16%) в период сильных пожаров на территории Сибирского федерального округа в мае 2003 г. (рис. 5, в). Расположение очагов природных пожаров совпадает с областями низких значений относительной влажности. В период с 13 по 20 мая в присутствии области повышенного давления, расположенной в северной части Сибирского федерального округа, а также в условиях засухи, когда процент относительной влажности ниже 20%, появление новых очагов природных пожаров только усилилось и 19 мая доходило до 12000.

Основными причинами возникновения лесных пожаров на территории Сибирского федерального округа являются неосторожное обращение с огнем, сухие грозы в условиях длительной засухи

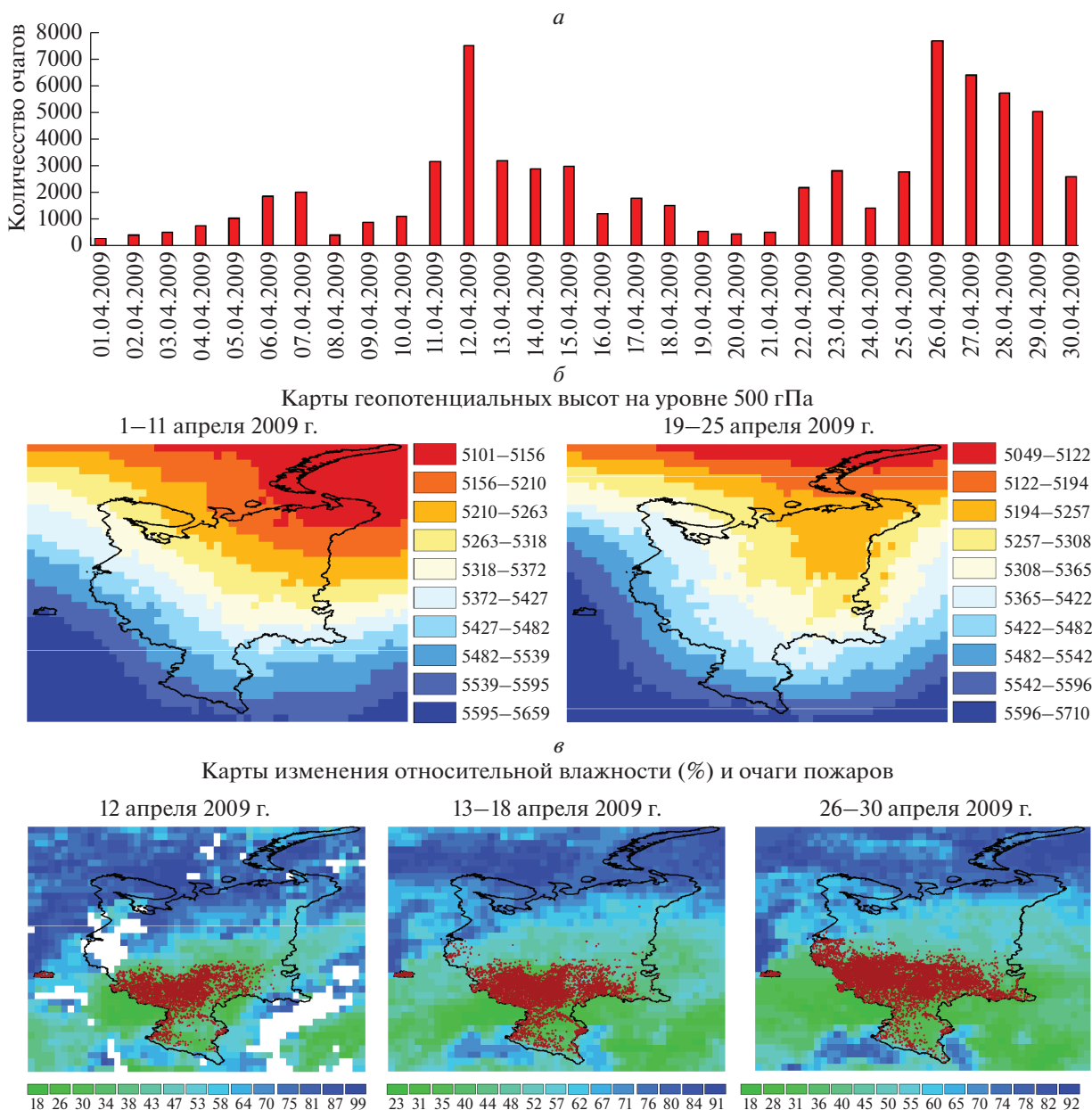


Рис. 3. Исследования погодно-климатических особенностей на территории Европейской части России в апреле 2009 г.: *а* – график очагов природных пожаров; *б* – карты изменения геопотенциальных высот; *в* – карты изменения относительной влажности с наложением очагов пожаров.

и аномально жаркой и ветреной погоды, которые наблюдаются в области влияния блокирующего антициклона с положительными аномалиями геопотенциала (Ситнов и др., 2017; Бондур и др., 2020б).

Детальный анализ природных пожаров на территории Дальневосточного федерального округа в июле 2020 г. продемонстрирован на рис. 6. Количество очагов, зафиксированных в данный период с помощью прибора MODIS (спутники Тер-

га/Aqua), представлено в виде графика на рис. 6, *а*.

В результате анализа рис. 6, *а* выявлено, что количество очагов природных пожаров, обнаруженных 1, 2, 12 и с 21 по 26 июля 2020 г. увеличилось в эти дни и доходило до 4000 и более.

По данным прибора AIRS (спутник Aqua) построены карты изменения геопотенциальных высот на уровне 500 гПа, а также относительной влажности в период сильных пожаров в июле 2020 г.

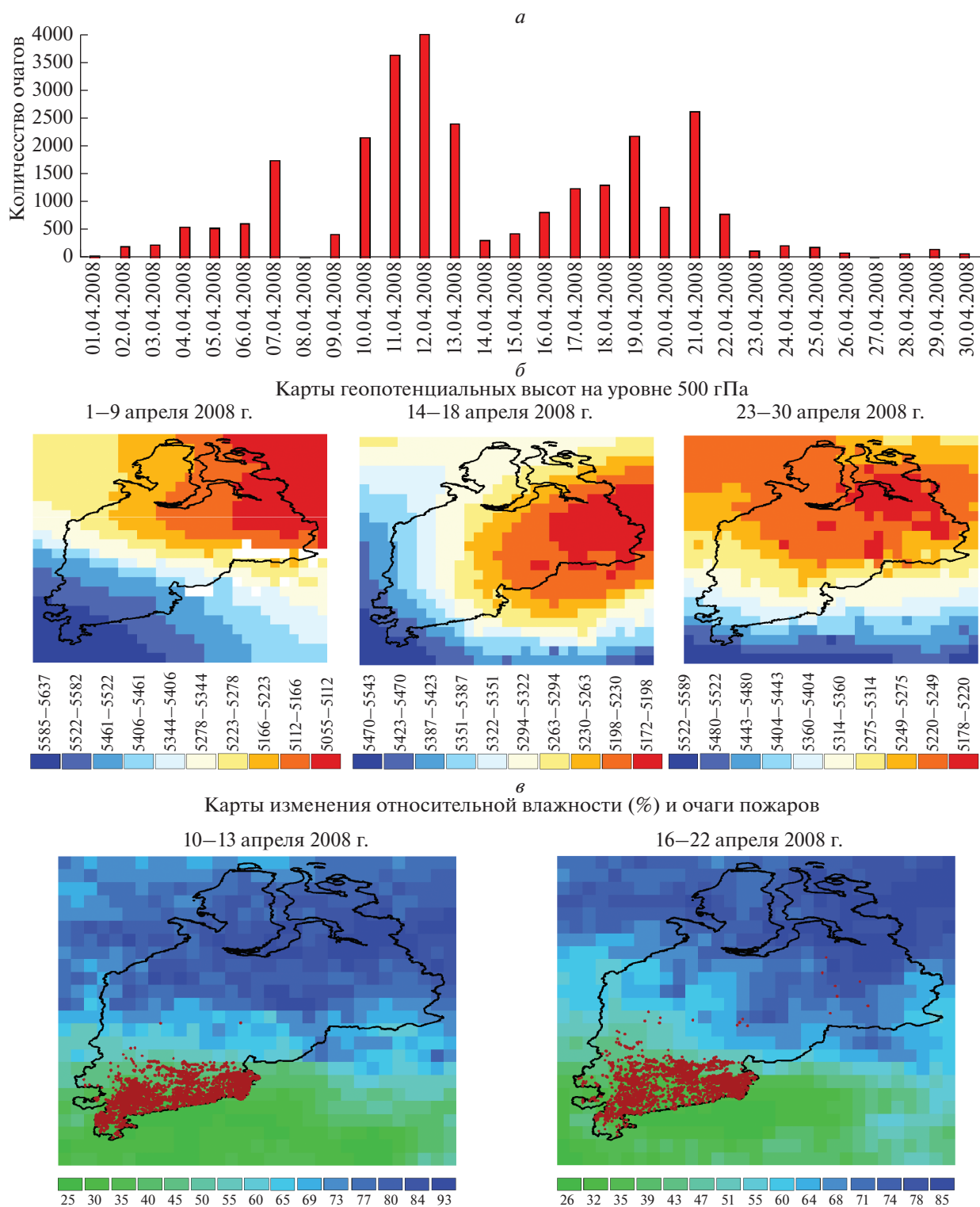


Рис. 4. Исследования погодно-климатических особенностей на территории Уральского федерального округа в апреле 2008 г.: *a* – график очагов природных пожаров; *b* – карты изменения геопотенциальных высот; *в* – карты изменения относительной влажности с наложением очагов пожаров.

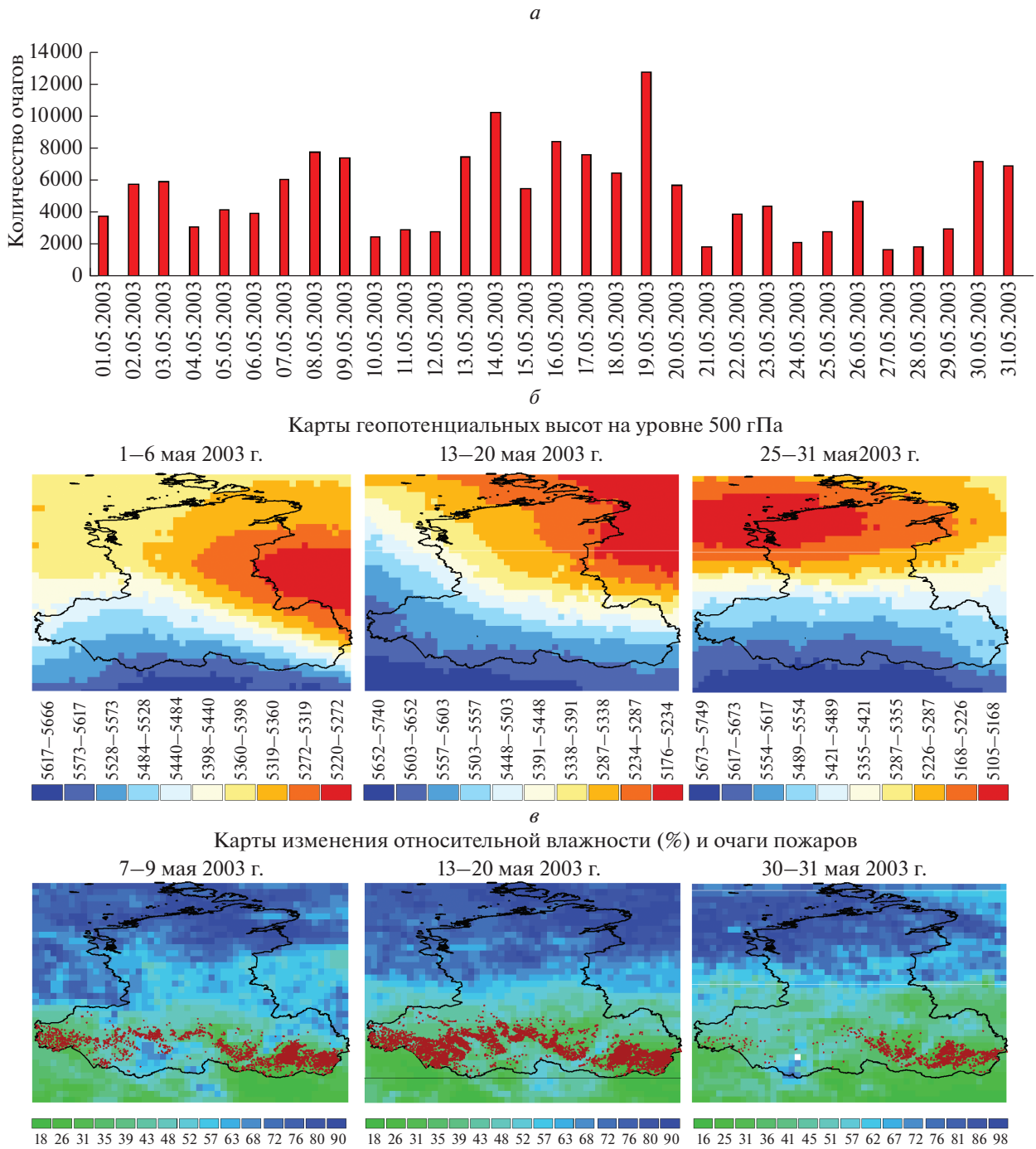


Рис. 5. Исследования погодно-климатических особенностей на территории Сибирского федерального округа в мае 2003 г.: *a* – график очагов природных пожаров; *b* – карты изменения геопотенциальных высот; *в* – карты изменения относительной влажности с наложением очагов пожаров.

на территории Дальневосточного федерального округа (рис. 6, б, в).

Анализ погодно-климатической обстановки в июле 2020 г. позволил зафиксировать барический максимум в период с 3 по 10 июля 2020 г. (рис. 6, б). С 20 по 26 июля 2020 г. влияние антициклонов с запада и востока ограничило распространение

очагов природных пожаров. В период с 1–3 и 10–16 июля 2020 г. очаги природных пожаров располагались в основном в зоне низкой относительной влажности (от 16%).

В процессе сильных пожаров, произошедших в апреле 2009 г. на территории Европейской части России, в апреле 2008 г. на территории Уральско-

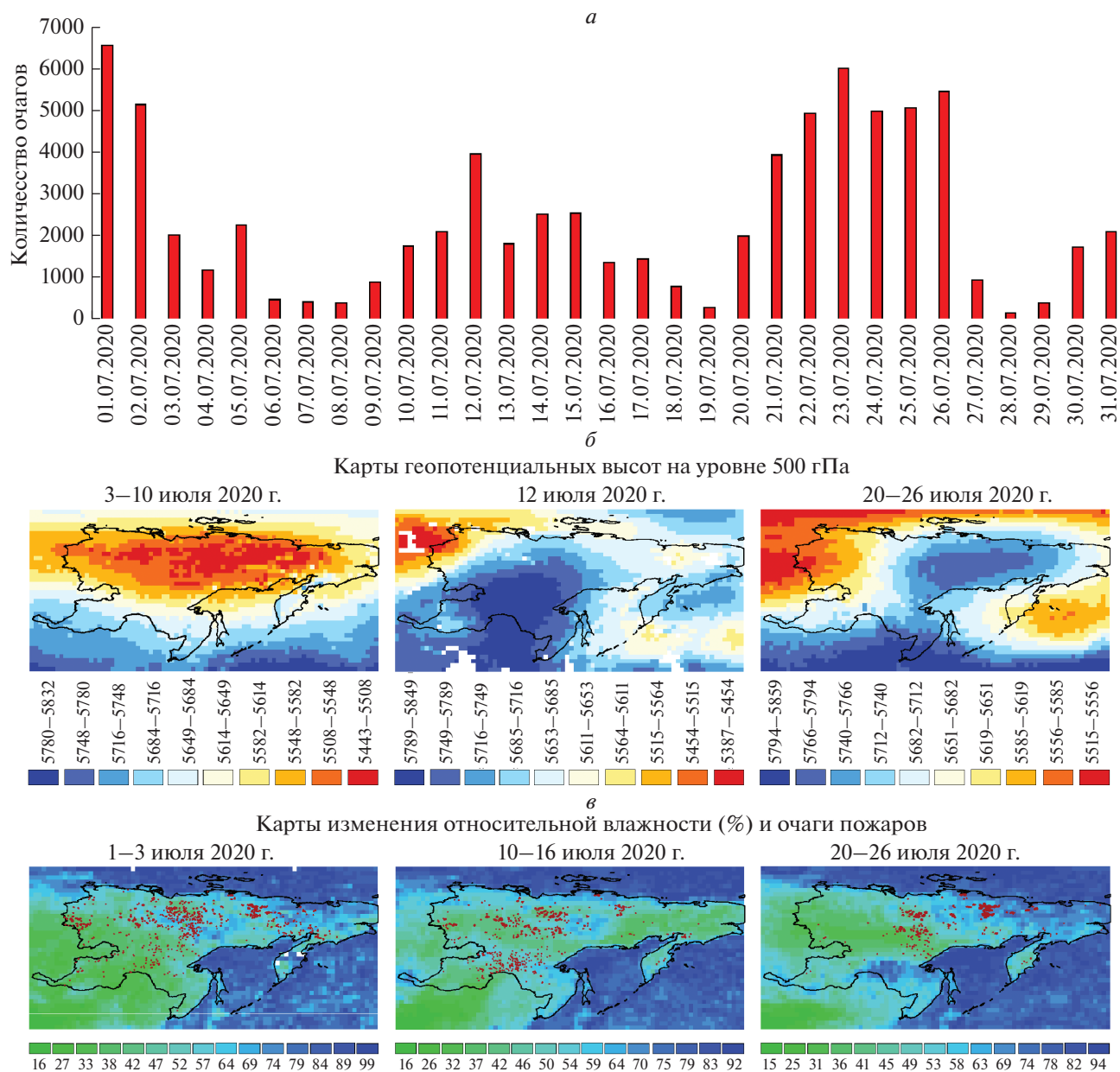


Рис. 6. Исследования погодных-климатических особенностей на территории Дальневосточного федерального округа в июле 2020 г.: *a* – график очагов природных пожаров; *b* – карты изменения геопотенциальных высот; *в* – карты изменения относительной влажности с наложением очагов пожаров.

го федерального округа и в июле 2020 г. на территории Дальневосточного федерального округа в атмосферу произошел выброс большого количества аэрозолей. По данным прибора ОМІ (спутник Aura) были построены карты распределения аэрозолей, наличие которых регистрируется с помощью аэрозольного индекса в УФ-диапазоне спектра (UVAI). Результаты представлены на рис. 7.

Распространение аэрозольного шлейфа от природных пожаров на территории Европейской части России зафиксировано с 15 апреля 2009 г. (рис. 7, *a*), который распространился в восточном направлении и за три дня достиг территории Сибирского федерального округа. На рис. 7, *b* представлен результат распространения аэрозольного шлейфа от природных пожаров на территории Уральского федерального округа. Превышение аэрозольного индекса зафиксировано 11 апреля

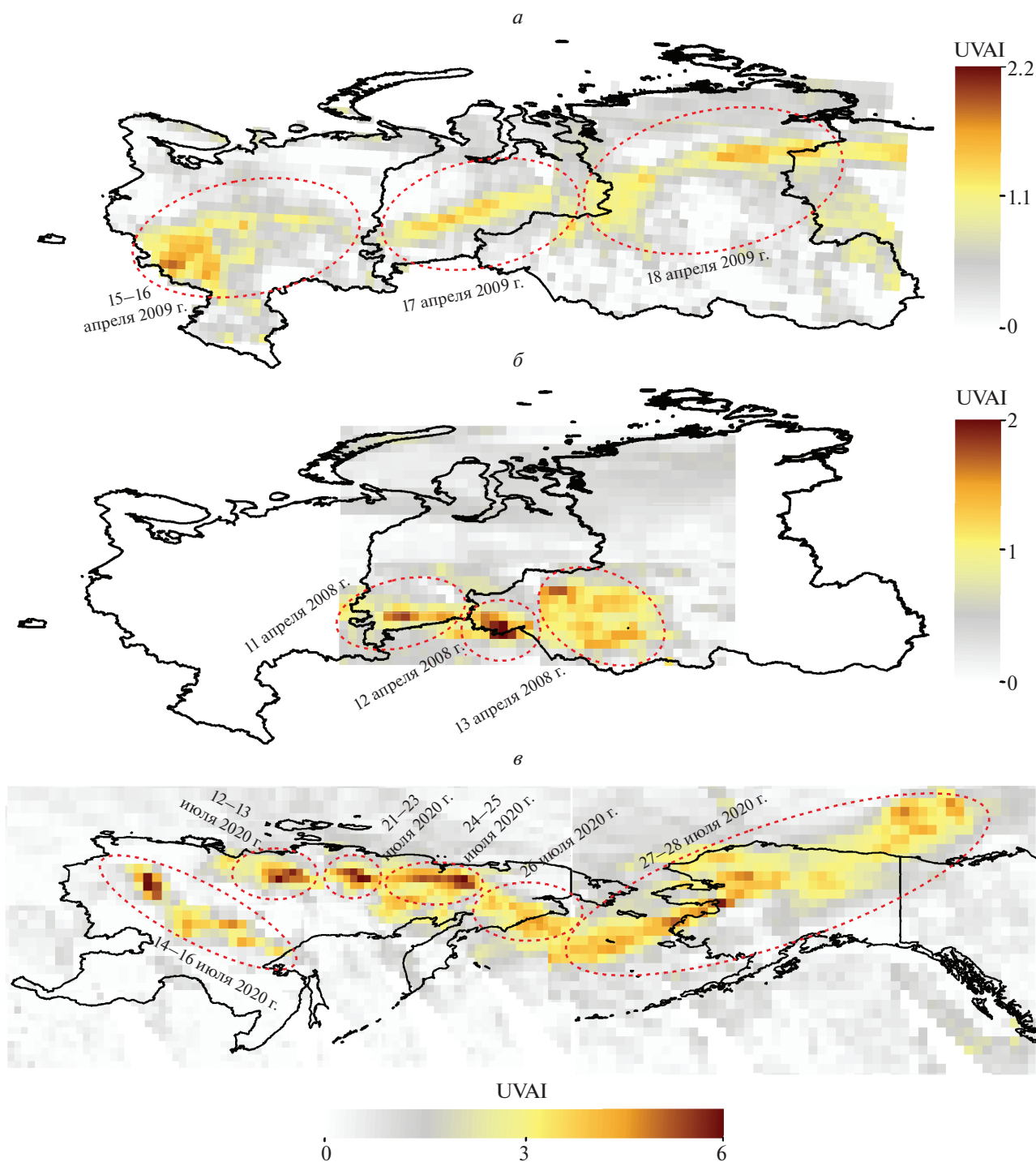


Рис. 7. Распространение аэрозольного индекса от сильных природных пожаров: *а* – на территории Европейской части России в апреле 2009 г.; *б* – на территории Уральского федерального округа в апреле 2008 г.; *в* – на территории Дальневосточного федерального округа в июле 2020 г.

2008 г., распространение которого наблюдалось на восток и достигло 13 апреля территории Сибирского федерального округа.

Распространение аэрозолей от природных пожаров, произошедших на территории Дальнево-

сточного федерального округа в июле 2020 г., представлено на рис. 7, *в*. Движение аэрозолей от природных пожаров зафиксировано в двух направлениях, сначала на запад с 12 июля, а начиная с 21 июля 2020 г. в восточном направлении.

Аэрозольный шлейф, распространившийся в восточном направлении, достиг за 8 дней территории Аляски.

Изменение концентрации мелкодисперсных аэрозолей, а также отражающей способности атмосферы, вызванных интенсивными природными пожарами, может не только ухудшить качество воздушной среды, приводящее к негативному влиянию на здоровье людей, но и значительно влиять на климат планеты. Кроме того, задымление воздушной среды может приводить к затруднениям в работе авиатранспорта в данном регионе (Бондур и др., 2021а).

В условиях изменения климата увеличивается продолжительность пожароопасного сезона, пожаров становится больше, и они намного масштабнее и интенсивнее, чем раньше. Присутствие блокирующих антициклонов, растущие температуры, сухая погода делают растительность легко воспламеняемой и способствуют распространению еще более сильных и неуправляемых пожаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проанализированы многолетние данные космического мониторинга природных пожаров, происходивших на территории Российской Федерации, выявлен ряд закономерностей пространственно-временных распределений площадей природных пожаров и связанных с ними объемов эмиссий углеродсодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей. Проанализированы особенности аномальных природных пожаров в различных регионах России с учетом погодно-климатических факторов и выявлены взаимосвязи возникновения крупных природных пожаров с блокирующими антициклонами.

Установлено, что на территории России в пожароопасный сезон с апреля по октябрь 2001–2020 гг. наибольшие площади природных пожаров выявлены в 2003 г. (365.5 тыс. км²). На территории Европейской части России наибольшие площади природных пожаров зафиксированы в апреле 2009 г. (54.27 тыс. км²), в Уральском федеральном округе в апреле 2008 г. (21.71 тыс. км²), на территории Сибирского федерального округа в мае 2003 г. (100.28 тыс. км²), в Дальневосточном федеральном округе максимум площадей природных пожаров пришелся на июль 2020 г. (35.76 тыс. км²).

На основании спутниковых данных проанализированы ежегодные среднесезонные оценки объемов эмиссий углеродсодержащих газовых примесей (СО, СО₂) и мелкодисперсных аэрозолей (PM_{2.5}) в атмосферу за 20-летний период для регионов ЕЧР, УрФО, СФО и ДФО, вносящих вклад в суммарные объемы эмиссий для всей территории России. Установлено, что до 2010 г.

вклад ЕЧР в эмиссии СО, СО₂ и PM_{2.5} достигал 40% от суммарных объемов эмиссий для всей территории Российской Федерации, а начиная с 2011 г. и до 2020 г. наблюдается снижение объемов эмиссий в пределах 10–20% от общероссийских. Вклад СФО в объемы эмиссий СО, СО₂ и PM_{2.5} был преобладающим в 2003, 2007, 2012, 2014–2016 гг. и в отдельные годы достигал 60% (2003, 2012, 2015, 2016 гг.). Наблюдается постепенная тенденция к усилению роста влияния ДФО в объемы эмиссий начиная с 2017 г., которая в 2020 г. достигла максимума 65% от общероссийских.

Анализ изменений геопотенциальных высот, а также относительной влажности, выполненный по данным прибора AIRS (спутник Aqua) в период сильных пожаров на территории Европейской части России в апреле 2009 г., позволил выявить периоды, в которые присутствие блокирующего антициклона с 1–11 и с 19–25 апреля 2009 г. явилось одной из причин интенсивных пожаров 12 апреля и с 26 по 30 апреля 2009 г. Установлено, что распределение очагов природных пожаров наблюдалось в области низкой относительной влажности (до 30%), которая способствовала увеличению количества очагов 12 апреля и в период с 26 по 30 апреля 2009 г.

В результате анализа изменений геопотенциальных высот, а также относительной влажности на территории Уральского федерального округа выявлены области повышенного давления с 1 по 9 апреля, а также с 14 по 18 апреля 2008 г., следствием которых стали интенсивные природные пожары с 10–13 и 19, 21 апреля 2008 г. Распределение очагов природных пожаров в области относительной влажности с низкими показателями (от 25 до 30%) способствовало их увеличению.

Исследования погодно-климатических особенностей на территории Сибирского федерального округа позволили оценить влияние блокирующих антициклонов с положительными аномалиями геопотенциала, которое способствовало увеличению очагов природных пожаров в период с 7 по 9 мая 2003 г. Экстремально низкие значения влажности (от 16%) выявлены в мае 2003 г. В период с 13 по 20 мая в присутствии области повышенного давления, расположенной в северной части Сибирского федерального округа, появление новых очагов природных пожаров усилилось и 19 мая доходило до 12000.

Анализ погодно-климатической обстановки на территории Дальневосточного федерального округа в период сильных пожаров в июле 2020 г. позволил зафиксировать барический максимум в период с 3 по 10 июля 2020 г. С 20 по 26 июля 2020 г. влияние антициклонов с запада и востока ограничило распространение очагов природных пожаров. В период с 1–3 и 10–16 июля 2020 г. очаги

природных пожаров располагались в основном в зоне низкой относительной влажности (от 16%).

На основании данных прибора ОМИ (спутник Aura) установлено, что аэрозольный шлейф от природных пожаров на территории Европейской части России, зафиксированный 15 апреля 2009 г., распространился в восточном направлении и за три дня достиг территории Сибирского округа. Аэрозольный шлейф от природных пожаров на территории Уральского федерального округа, зафиксированный 11 апреля 2008 г., распространился на восток и достиг 13 апреля территории Сибирского округа. Распространение аэрозолей от природных пожаров, произошедших на территории Дальневосточного федерального округа в июле 2020 г. зафиксировано в двух направлениях, сначала на запад с 12 июля, а начиная с 21 июля 2020 г. на восток. Аэрозольный шлейф, распространившийся в восточном направлении, достиг за 8 дней территории Аляски.

Изучение влияния углеродосодержащих выбросов и мелкодисперсных аэрозолей от природных пожаров на общий углеродный баланс в долгосрочной перспективе имеет важное значение для понимания того, какой ущерб наносится атмосфере и климату в целом.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности и дальнейшего использования данных космического мониторинга для оценки пространственно-временной динамики площадей, пройденных огнем, а также объемов эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей от природных пожаров.

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 природных пожаров и эмиссий вредных примесей в атмосферу на территории различных регионов России в период с 2001 по 2020 гг. // Докл. АН. 2021б (в печати).
- 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. 2021а. № 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 // Доклады академии наук. 2020б. 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. 2019а. 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). № 3. С. 13–32.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.
- Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / под. ред. А.Б. Шмакина. М.: Воентехиздат, 2009. 372 с
- Мохов И.И.* Российские климатические исследования в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 1–21.
<https://doi.org/10.31857/S0002351520040069>
- 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.
- Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // Eos, Trans. AGU. V. 88. № 2 (9 January 2007). P. 14–17.
- Ahmad S.P., Torres O., Bhartia P., Leptoukh G., Kempler S.* Aerosol index from TOMS and OMI measurements // 86th AMS Annual Meeting. 2006. 5 p.

- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S and Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia. *Frontiers Earth Science*. 2021. 8: 617252. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.617252>
- 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. V. 31. P. 341–354. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>
- Earl N., Simmonds I.* Spatial and temporal variability and trends in 2001–2016 global fire activity. // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123(5). P. 2524–2536. <https://doi.org/10.1002/2017JD027749>
- Eric E.K., Becky L.E., Carl N.S.* Ecological effects of prescribed fire season: a literature review and synthesis for managers United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Southwest Research Station, General Technical Report PSW-GTR-224 September 2009. 2009.
- Hamadeh N., Karouni A., Daya B., Chauvet P.* Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices. // *Case Studies in Fire Safety*. 2017. V. 7. P. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.cfs.2016.12.001>
- Jolly W.M., Cochran 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. V. 6. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al.* Pan Eurasian Experiment (PEEX) — a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan- Eurasian arctic- boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- 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.
- Tian B., Manning E., Fetzer E., Olsen E., Wong S., Susskind J. et al.* “AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide” Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA), Tech Rep, 2013.
- Torres O.O.* OMI/Aura Near UV Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo 1-orbit L2 Swath 13 × 24 km V003, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2006. <https://doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA2004>
- 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. V. 650(Pt 1). P. 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. V. 141. P. 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.

Studying the Dynamics of Wildfires in Russia in 2001–2020 Taking into Account Climatic Factors

O. S. Voronova¹, K. A. Gordo¹, and A. L. Zima¹

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

The features of large wildfires occurred in Russia in 2001–2020 were studied on the base of satellite monitoring data. The contribution of the regions of the European part of Russia, as well as the Ural Federal District, Siberian Federal District, and Far-East Federal District into CO, CO₂, and PM_{2.5} emissions due to wildfires is estimated. It is established that the contribution of the Siberian Federal District into total emission volumes due to wildfires was prevailing from 2011 till 2017 and in some years it reached 60%. It is revealed that in 2020 wildfire emission volumes in the Far-East Federal District territory exceeded 55% of the all-Russian emissions. An analysis of the features of anomalous wildfires is performed taking into account weather and climate factors. The relationship between large wildfires and weather and climatic factors, including blocking anticyclones, has been revealed. Using OMI (Aura satellite) data, it has been found that an aerosol plume due to large wildfires in Russia can spread over long distances and reach other continents.

Keywords: wildfires, remote sensing, satellite data, satellite monitoring, atmospheric blocking, emissions, aerosol index

REFERENCES

- Acker J.G., Leptoukh G.* Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data // *Eos, Trans. AGU*. V. 88. № 2 (9 January 2007). P. 14–17.
- Ahmad S.P., Torres O., Bhartia P., Leptoukh G., Kempler S.* Aerosol index from TOMS and OMI measurements // 86th AMS Annual Meeting. 2006. 5 p.
- Bondur V.G., Gordo K.A., Voronova O.S., Zima A.L.* Satellite Monitoring of Anomalous Wildfires in Australia // *Frontiers Earth Science*. 2021. 8: 617252. DOI: 10.3389/feart.2020.617252
- 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, At-*

- mospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. DOI: 10.1134/S0001433811090040
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti (Texture analysis of radar images of vegetation) // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008. Is. 5. P. 9–14 (In Russian).
- 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*. 2020b. 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*. 2019b. 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. Pt. 2. P. 461–464. DOI: 10.1134/S1028334X19040202
- Bondur V.G., Voronova O.S., Cherepanova E.V., Tsidilina M.N., Zima A.L.* Prostranstvenno-vremennyy analiz mnogoletnykh prirodnykh pozharov i emissiy vrednykh gazov i aerozoley v Rossii po kosmicheskim dannym (The Spatiotemporal Analysis of Multiannual Wildfires and Trace Gas and Aerosol Emissions in Russia Based on Satellite Data) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020a. № 4. P. 3–17 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420040028.
- Bondur V.G., Voronova O.S., Gordo K.A., Zima A.L., Feoktistova N.V.* Kosmicheskiy monitoring mnogoletnykh prirodnykh pozharov i obyemov vyzyvayemykh 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*. 2021a. № 1. P. 25–40 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961421010048
- 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. V. 31. P. 341–354. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0254.1
- Earl N., Simmonds I.* Spatial and temporal variability and trends in 2001–2016 global fire activity. // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123(5). P. 2524–2536. DOI: 10.1002/2017JD027749
- Eric E.K., Becky L.E., Carl N.S.* Ecological effects of prescribed fire season: a literature review and synthesis for managers United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Southwest Research Station, General Technical Report PSW-GTR-224 September 2009. 2009.
- Hamadeh N., Karouni A., Daya B., Chauvet P.* Using correlative data analysis to develop weather index that estimates the risk of forest fires in Lebanon & Mediterranean: Assessment versus prevalent meteorological indices // *Case Studies in Fire Safety*. 2017. V. 7. P. 8–22. DOI: 10.1016/j.csf.2016.12.001
- 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. V. 6. P. 1–11. DOI: 10.1038/ncomms8537
- Kononova N.K.* Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B.L. Dzerdzeevskomu (Classification of the circulation mechanisms of the Northern Hemisphere according to B.L. Dzerdzeevsky) / Ed. by A.B. Shmakin. Moscow: Voentekhizdat, 2009. 372 p.
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al.* Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- Mokhov I.I.* Russian climate research in 2015–2018 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 4. P. 325–343. DOI: 10.1134/S0001433820040064
- 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. P. 130–144.
- 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. Pt. 2. P. 921–924. DOI: 10.1134/S1028334X20120089.
- 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.
- Tian B., Manning E., Fetzer E., Olsen E., Wong S., Susskind J. et al.* “AIRS/AMSU/HSB version 6 level 3 product user guide” Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA), Tech Rep, 2013.
- Torres O.O.* OMI/Aura Near UV Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo 1-orbit L2 Swath 13 × 24 km V003, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). 2006. DOI: 10.5067/Aura/OMI/DATA2004
- 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. V. 650(Pt 1). P. 459–469. DOI: 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. V. 141. P. 1057–1073. DOI: 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.