

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНОМАЛЬНЫЕ ПОЖАРЫ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ ЛЕТОМ 2019 г.

© 2020 г. О. С. Воронова<sup>а</sup>, \*, А. Л. Зима<sup>а</sup>, В. Л. Кладов<sup>а</sup>, Е. В. Черепанова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

\*e-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

Приводятся результаты космического мониторинга природных пожаров и оценки объемов эмиссий в атмосферу вредных газов и мелкодисперсных аэрозолей на территории Сибири за период с 2001 по 2019 г. Описаны особенности методики космического мониторинга, используемой для оценки площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий в процессе природных пожаров. На основании анализа результатов обработки космических данных установлено, что суммарные площади, пройденные огнем, и объемы эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей в воздушную среду были аномально высокие в 2019 г. на территории Сибири. От природных пожаров в 2019 г. пострадали территории Сибири площадью 72.4 тыс. км<sup>2</sup>, что составило 42% от площадей природных пожаров, произошедших в этот год на всей территории России. Наиболее сильно в 2019 г. пострадала от природных пожаров территория Иркутской области в июле (11.14 тыс. км<sup>2</sup>) и августе (7.24 тыс. км<sup>2</sup>).

*Ключевые слова:* природные пожары, космические данные, космический мониторинг, эмиссии, аэрозоль, комплексные исследования

DOI: 10.31857/S0205961420010121

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов воздействия на лесные и другие типы наземных экосистем России являются пожары, которые ежегодно повреждают растительный покров на площадях, измеряемых миллионами гектаров (Kogovin, 1996; Бондур, 2011; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б; Бондур, Гордо, 2018; Томшин и др., 2012; Bondur, Gordo, 2017). Данные о площадях, пройденных огнем являются важной информацией для организации эффективной охраны лесов от пожаров, оценки их экологических и экономических последствий (Бондур, 2010, 2011; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, 2008б; Бондур, 2010; Бондур, Гордо, 2018; Бондур и др., 2016, 2019в; Барталев и др., 2012).

В результате природных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество продуктов горения – смесь различных газов, соединений углерода, аэрозольных и дымовых частиц, оказывающих значительное влияние на физические и химические процессы в атмосфере (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б; Бондур, Гордо, 2018; Вивчар и др., 2010; Bondur, Gordo, 2017; Kulmala et al., 2016). Аэрозольные частицы играют важную роль в температурном балансе атмосферы, так как способны поглощать, рассеивать, отражать солнечную радиацию и инициировать процессы облакообразования (Томшин и др., 2012; Lappalainen et al., 2014, 2016; Kulmala et al., 2016). Аэрозоль, пополняя атмосферу ядра-

ми конденсации водяного пара, приводит к образованию взвешенных мелких капель в областях ниже уровня нулевой изотермы. Если облако имеет переохлажденную вершину (именно такие облака дают интенсивные осадки), то попадание туда большого количества аэрозольных частиц с размерами более 1 мкм приводит к кристаллизации переохлажденных капель и ослаблению осадков (Андреева, 2006; Бондур, Гинзбург, 2016).

Главными факторами, определяющие эффективность борьбы с природными пожарами являются: оперативность обнаружения и предупреждения; своевременность подавления их очагов, особенно на ранних стадиях. При этом необходимо проводить детальный анализ последствий природных пожаров, прежде всего оценку площадей выгоревших территорий, потерь лесного фонда, объемов эмиссий вредных примесей в воздушную среду, а также осуществлять поиск стратегии их оперативного мониторинга. (Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б).

Одним из наиболее перспективных подходов к решению этой проблемы является использование спутниковых систем мониторинга, оснащенных широким спектром современной аппаратуры дистанционного зондирования, а также современных методов обработки и хранения поступающей информации (Бондур, Савин, 1992; Бондур, 2010, 2011, 2015; Бондур и др., 2016; 2019а, 2019б; Бондур, Воробьев, 2015; Бондур, Старченков, 2001).

В настоящей работе приведены результаты космического мониторинга природных пожаров на территории Сибирского региона, начиная с 2001 г. По космическим данным с прибора AIRS (спутник Aqua) были выявлены аномальные вариации температуры земной поверхности в 2019 г. по сравнению с 2003–2018 гг. На основе обработки данных ДЗЗ (прибор MODIS) были проанализированы площади, пройденные огнем, а также рассчитаны объемы эмиссий малых газовых компонент и мелкодисперсных аэрозолей (PM2.5) от природных пожаров.

### МЕТОДИКА КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Мониторинг природных пожаров основан на методике, разработанной ранее и описанной в работах (Бондур, 2011; Бондур, 2015; Бондур и др., 2016, 2019а, 2019б; Бондур, Гордо, 2018; Bondur, Gordo, 2017).

В качестве основных данных для проведения мониторинга очагов пожаров, выявления изменений границ природных пожаров и оценки площадей, пройденных огнем, использовался продукт MOD14 2-го уровня обработки данных с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016).

Для исследования сезонных вариаций температуры земной поверхности использованы среднемесячные данные прибора AIRS (спутник Aqua) продукт AIRS3STM v006 за 2003–2019 гг. с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  (Tain et al., 2013). Произведены расчеты аномального превышения температуры поверхности за 2019 г. по сравнению с средними температурами с 2003 по 2018 гг.

В данном исследовании для оценки объемов эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей от природных пожаров был выбран метод Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980), который учитывает площади, пройденные огнем, плотность распределения биомассы на данной площади, а также долю сгоревшей биомассы. Необходимым параметром расчета значений выбросов служит эмиссионный коэффициент, вычисляемый индивидуально для каждого типа растительности. Эмиссионный коэффициент характеризует отношение объема эмиссий конкретного вещества к количеству сгоревшей биомассы определенного типа.

Далее был произведен расчет объемов эмиссий по усовершенствованной формуле, основанной на уравнении Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980) с введением поправочного коэффициента (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016), которая имеет вид:

$$E = k \times A \times B \times C \times D,$$

где  $A$  – площадь пожара [ $\text{м}^2$ ];  $B$  – плотность биомассы на выгоревшей территории [ $\text{кг}/\text{м}^2$ ];  $C$  – полнота сгорания биомассы [%];  $D$  – коэффициент эмиссии (масса вещества, выбрасываемого в

атмосферу при сгорании 1 кг биомассы) [ $\text{г}/\text{кг}$ ];  $k$  – корректирующий коэффициент, полученный для уточнения значения площади территории, пройденной огнем;  $E$  – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу в результате пожара [ $\text{г}$ ];

Значения площадей пожаров  $A$  рассчитываются по космическим данным прибора MODIS (спутники Terra, Aqua), а значения коэффициентов  $B$ ,  $C$  и  $D$  являются табличными, соответствуют конкретным типам растительности, произрастающей на исследуемой территории (Andreae, Merlet, 2001; Wiedinmyer et al., 2010).

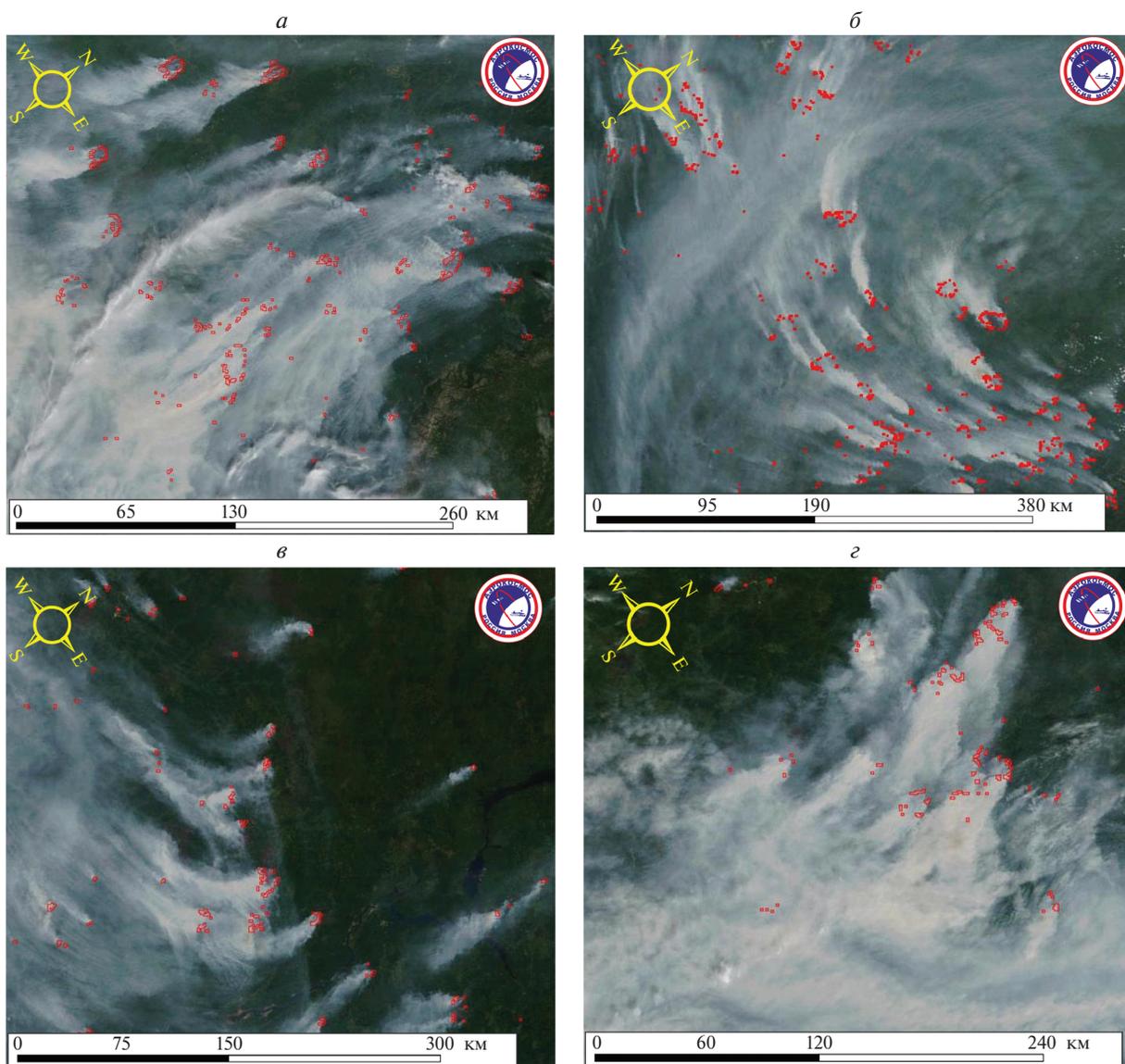
Коэффициенты  $B$ ,  $C$  и  $D$  взяты из работ (Akagi et al., 2011; Wiedinmyer et al., 2010; Andreae, Rosenfeld, 2008) для разных типов преобладающей растительности. Если тип растительности в ячейке не определен или определен как водная поверхность, постоянный снег и лед, пустошь, городская или промышленная застройка, то значения коэффициентов в формуле для данной ячейки полагались равными нулю (Вивчар, 2010).

Коэффициент  $k$  получен на основании результатов сравнительного анализа значений площадей природных пожаров, полученных по спутниковым данным низкого (прибор MODIS, спутники Terra, Aqua) и среднего пространственного разрешения (спутник Landsat) (Бондур, 2015; Бондур и др., 2016).

Для определения типов и характеристик растительного покрова на выбранном участке территории исследования используется карта, полученная по космическим данным прибора MODIS (спутники Terra и Aqua). Продукт Land Cover Type 1 (MCD12Q1) International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) Classification 6 версии, представляет собой ежегодные глобальные карты почвенно-растительного покрова (2001–2018 гг.) с пространственным разрешением 500 м (Friedl et al., 2010).

### ИССЛЕДУЕМЫЙ РЕГИОН

Бореальные леса занимают около 47% площади Сибири и почти на 90% состоят из лиственных. На юге Сибири в бореальной зоне к лиственным породам могут подмешиваться пихта и сосна. Плотность древостоя и сомкнутость крон лесного полога низкая, что способствует просушке сухостоя, валежника и лесной подстилки. Отсюда низовые пожары являются наиболее распространенными в лиственных лесах. Низкий уровень осадков и высокие летние температуры воздуха, обусловленные резко континентальным климатом, способствуют высокому риску возникновения крупномасштабных лесных пожаров. Основными причинами возникновения лесных пожаров в регионе являются человеческий фактор и грозная активность. В районах с более высокой плотностью населения высокая доля “антропоген-



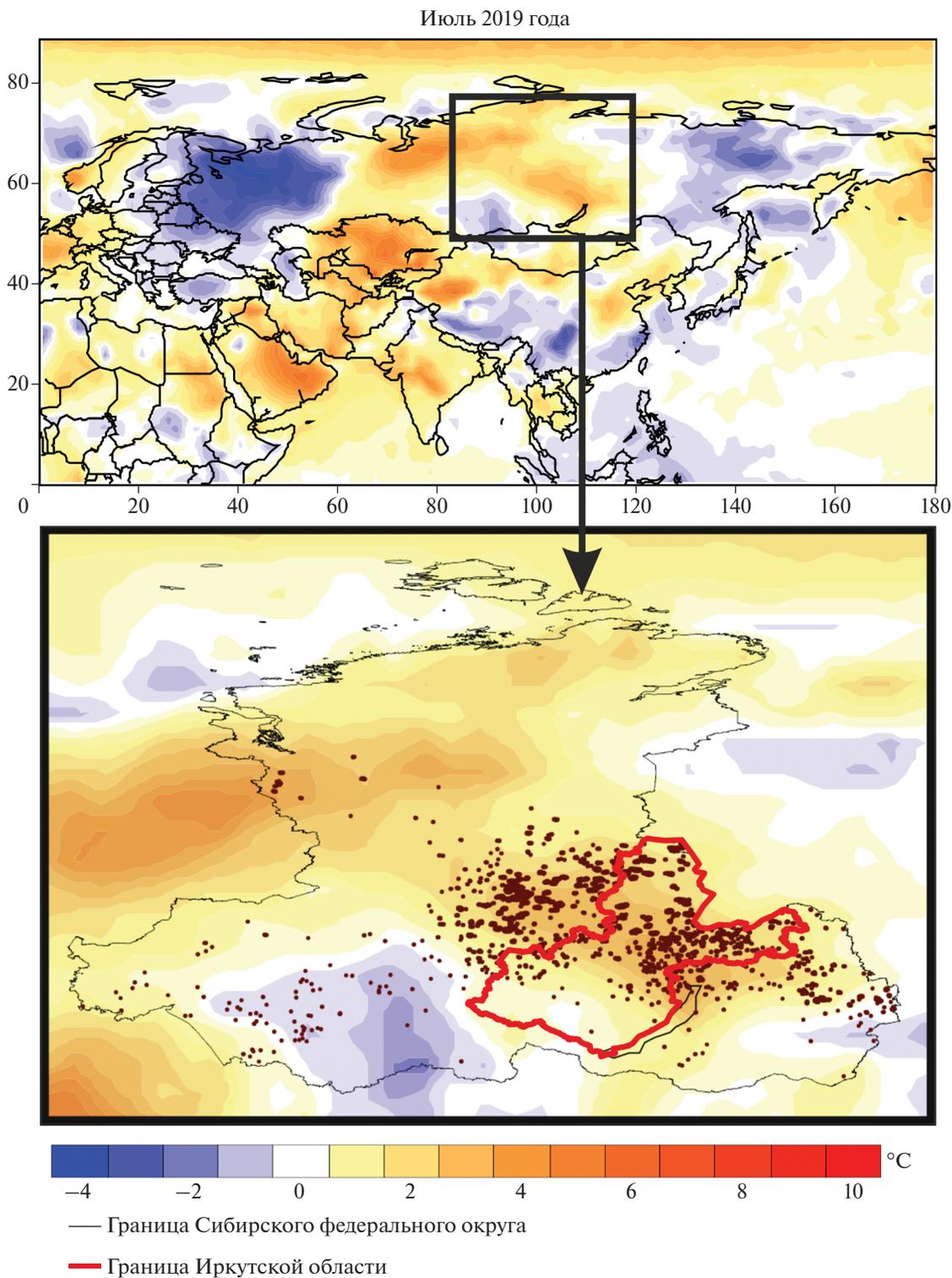
**Рис. 1.** Очаги природных пожаров и дымовые шлейфы, обнаруженные в Сибирском регионе по данным спутника Terra (MODIS). *а* – Иркутская область, 23.07.2019; *б* – Иркутская область, 05.08.2019; *в* – Красноярский край, 04.07.2019; *г* – Красноярский край, 13.07.2019.

ных” пожаров, тогда как на периферии доминирует природный фактор (Соловьев и др., 2009).

По данным дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз ФБУ “Авиалесоохрана” (<https://aviales.ru/>), ежегодно на территории Сибирского федерального округа регистрируется приблизительно от 150 до 2000 лесных пожаров общей площадью примерно от 0.1 до 4 млн га. Многолетние наблюдения показывают, что лесные пожары на территории Сибири наблюдаются с мая по сентябрь, в основном в течение трех летних месяцев с максимумом во второй половине лета (Соловьев, Будищев, 2010; Соловьев и др., 2009). Растущая антропогенная нагрузка на окружающую среду и климатические изменения за-

метно повышают уровень пожарной активности, что в результате наносит больший ущерб лесной экологии, экономике региона и в целом ухудшает качество жизни населения (Добрых, Захарычева, 2009; Королева и др., 2015; Liu et al., 2015; Томшин, Соловьев, 2018).

В 2019 г. в Сибирском федеральном округе наиболее сильно пострадали от природных пожаров Иркутская область и Красноярский край. На рис. 1 приведены примеры синтезированных изображений с очагами пожаров и дымовыми шлейфами, полученные со спутника Terra (прибор MODIS). На приведенных изображениях наглядно показаны примеры наиболее сильного задымления от пожаров, зарегистрированных в Иркут-



**Рис. 2.** Изменения температуры поверхности и пространственное распределение очагов пожаров в июле 2019 г.

ской области 23.07.2019 г. и 05.08.2019 г. Дымовые шлейфы от пожаров в Красноярском крае представлены на рис. 1*в*, *г* 4 и 13 июля 2019 г.

По данным прибора AIRS (спутник Aqua) были рассчитаны среднемесячные июльские темпе-

ратуры за период 2003–2018 гг. и за 2019 г. соответственно. Было установлено, что в июле 2019 г. на территории Иркутской области температурные аномалии земной поверхности (рис. 2) превышали значения многолетних наблюдений на 4°C.

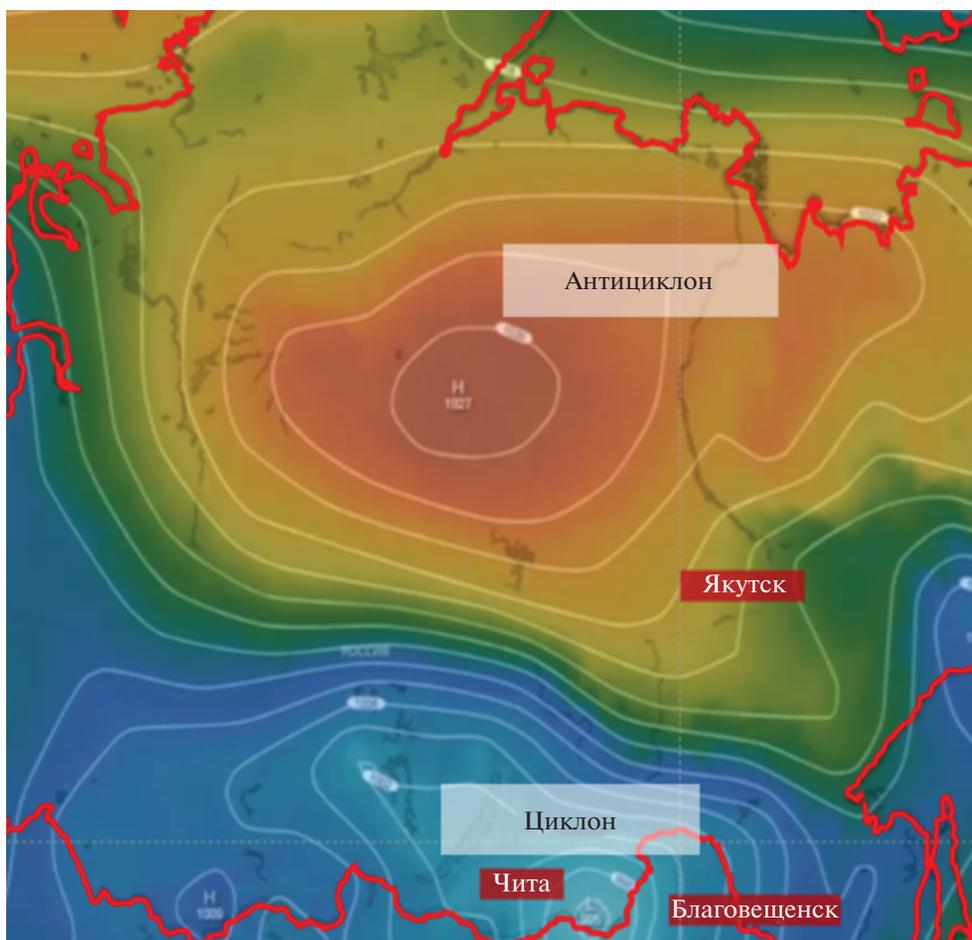


Рис. 3. Расположение циклона и антициклона на территории Сибири в июле 2019 г. (данные “Росгидромет”).

Следует отметить, что в июле 2019 г. на территории Сибири сложилась уникальная природная аномалия: зона мощного антициклона, в которой бушевали лесные пожары, блокировала зону циклона с обильным количеством осадков (рис. 3), вследствие чего продолжительность лесных пожаров значительно увеличилась (<http://www.meteorf.ru/>).

Значительного помутнения атмосферы, связанного со смещением гари и продуктов горения от природных пожаров, над западной частью округа не отмечалось, хотя дым от сибирских пожаров затронул даже смежные территории Уральского федерального округа (<http://www.meteorf.ru/press/news/19555/>). Однако, скопление продуктов горения в нижних слоях атмосферы привело к формированию устойчивой мглы в северной части Иркутской области с видимостью менее 500 м (например, на 03:00 UTC 25 и 26 июля), и как следствие, значительному снижению освещенности и поступления ультрафиолетовой радиации к поверхности. Поэтому в качестве объекта для проведения расчета эмиссий от природных пожа-

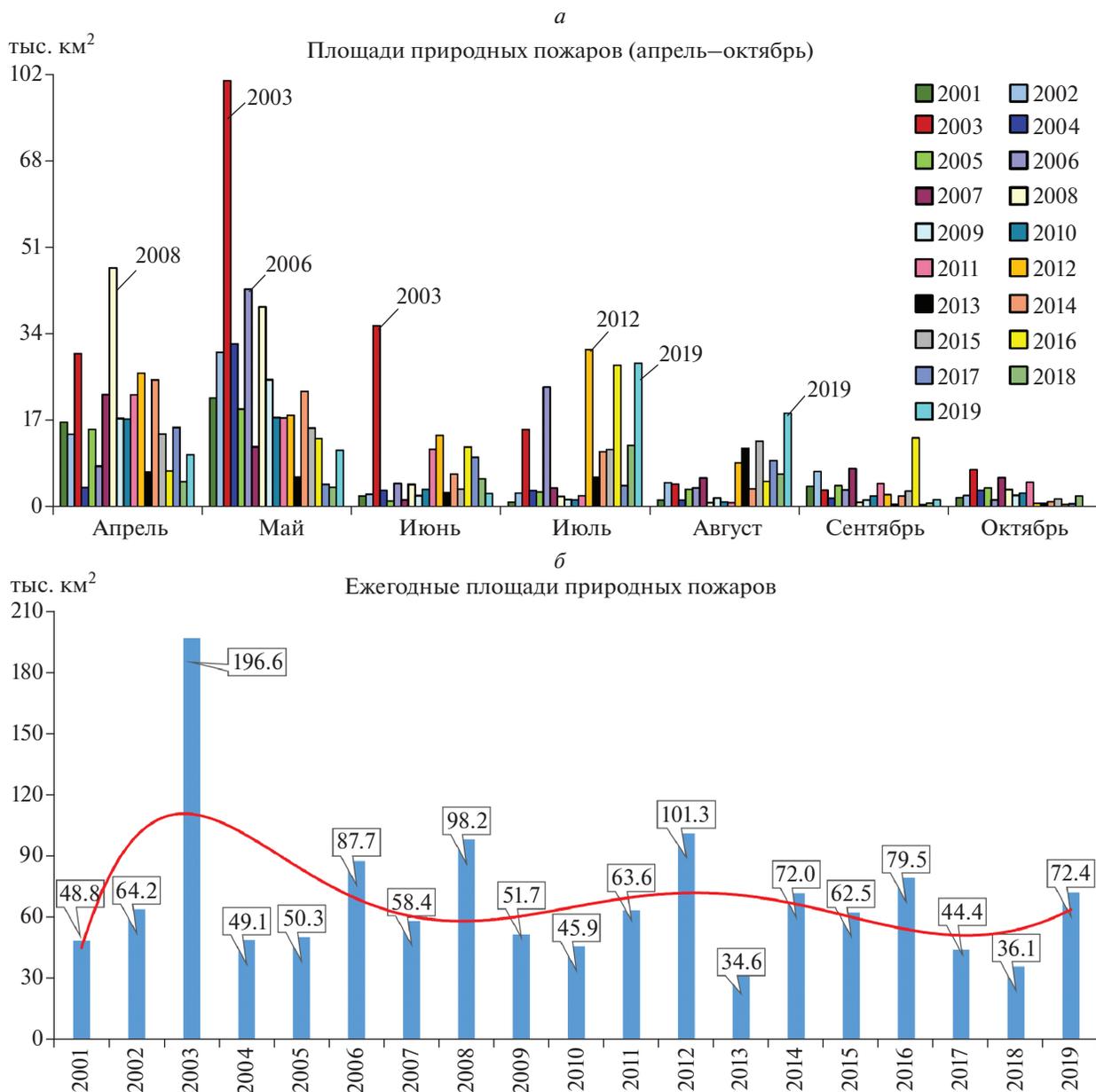
ров за 2019 г. была выбрана территория Иркутской области как наиболее пострадавшая от гарей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ

На первом этапе проведения исследований были рассчитаны значения площадей природных пожаров, а также объемов эмиссий газовых примесей от различных типов растительного покрова, выгоревших на территории Сибирского региона в период с 2001 по 2019 гг.

На рис. 4 приведены распределения ежемесячных и ежегодных значений площадей, пройденных огнем за исследуемый период с апреля по октябрь 2001–2019 гг. Из рис. 4а видно, что наибольшие значения площадей природных пожаров в период с 2001 по 2019 гг. были зафиксированы в апреле и мае.

Максимальная площадь пожаров в апреле зарегистрирована в 2008 г. (47.02 тыс. км<sup>2</sup>), огнем были охвачены зоны лиственных лесов и лесостепи в юго-западной и юго-восточной части Сибир-



**Рис. 4.** Площади природных пожаров на территории Сибирского федерального округа: *a* – распределение площадей природных пожаров по месяцам (с апреля по октябрь) и *б* – ежегодные площади природных пожаров.

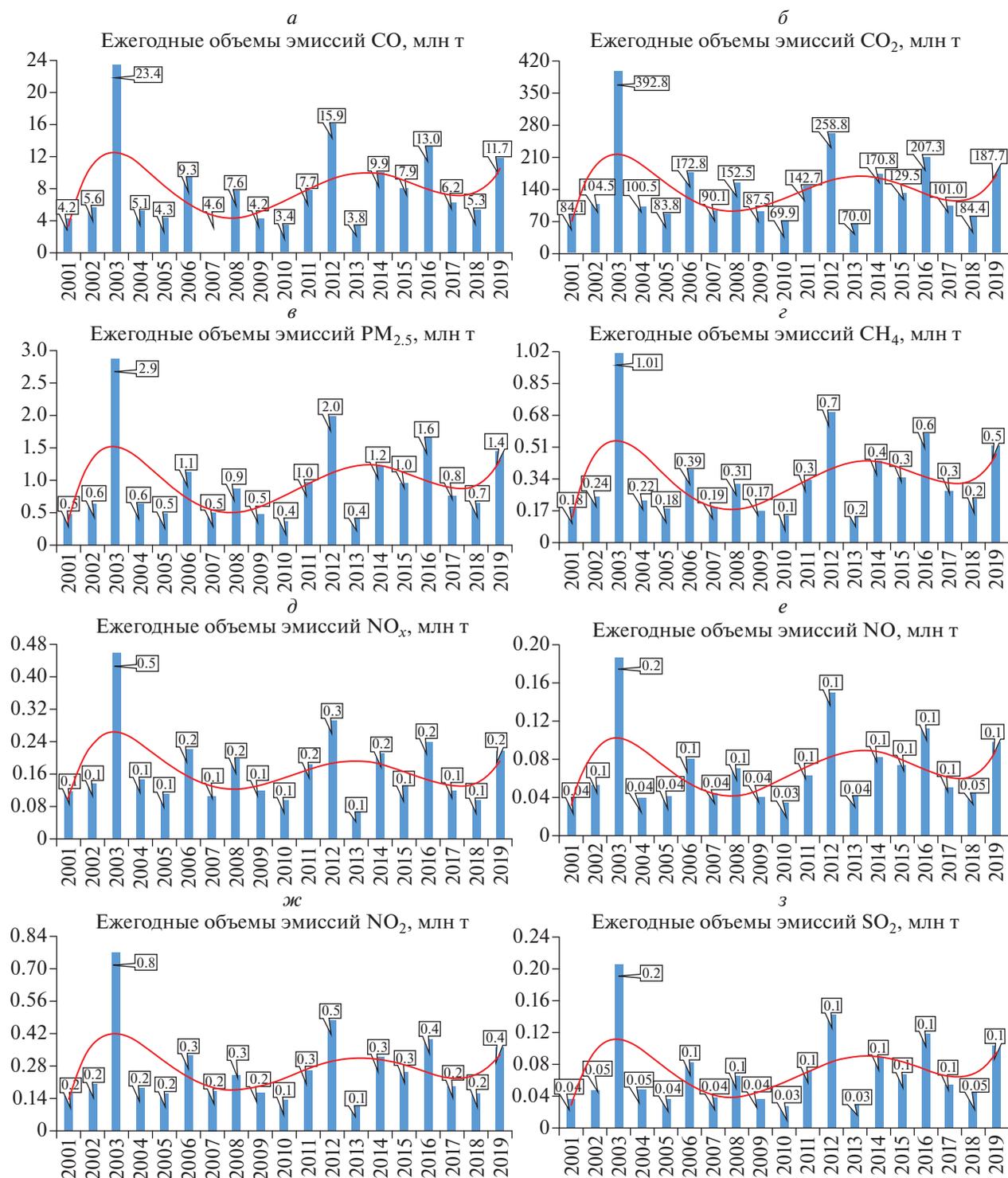
ского региона. В среднем в апреле на территории Сибири с 2001 по 2019 гг. выгорало до 15 тыс. км<sup>2</sup>.

В мае 2003 г. подверглась интенсивному воздействию пожаров южная часть Сибирского региона, горели в основном степи, луга и сельскохозяйственные земли, суммарные площади пожаров превысили 100 тыс. км<sup>2</sup>, что является максимум для всего периода наблюдений. Минимальные площади пожаров наблюдались в 2017 и 2018 гг., когда выгорело не более 4 тыс. км<sup>2</sup>.

В летние месяцы в СФО преобладают лесные пожары. Так, на исследуемой территории с 2001

по 2019 гг. в июле от пожаров наиболее сильно пострадали: хвойные леса в 2012 г. (30.89 тыс. км<sup>2</sup>), широколиственные и смешанные леса в восточной части Сибири в 2019 г. (28.31 тыс. км<sup>2</sup>), широколиственные леса на территории Красноярского края в 2016 г. (27.86 тыс. км<sup>2</sup>), а также смешанные леса Красноярского края и Иркутской области (23.55 тыс. км<sup>2</sup>) в 2006 г.

Суммарные объемы эмиссий от природных пожаров на территории Сибирского федерального округа с 2001 по 2019 г. представлены на рис. 5. Тенденция динамики эмиссий вредных примесей



**Рис. 5.** Суммарные объемы эмиссий от природных пожаров на территории Сибирского федерального округа с 2001 по 2019 г.: а – эмиссии CO, б – эмиссии CO<sub>2</sub>, в – эмиссии PM<sub>2.5</sub>, г – эмиссии CH<sub>4</sub>, д – эмиссии NO<sub>x</sub>, е – эмиссии NO, ж – эмиссии NO<sub>2</sub>, з – эмиссии SO<sub>2</sub>.

в атмосферу (CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> и др.) с 2001 по 2019 г. по территории Сибирского федерального округа коррелирует с динамикой площадей, пройденных огнем при пожарах. Однако, в 2019 г. объем вы-

бросов возрос, несмотря на меньшие значения площадей пройденных огнем по сравнению с прошлыми годами, что свидетельствует о преобладании пожаров в зонах хвойных и смешанных лесов.

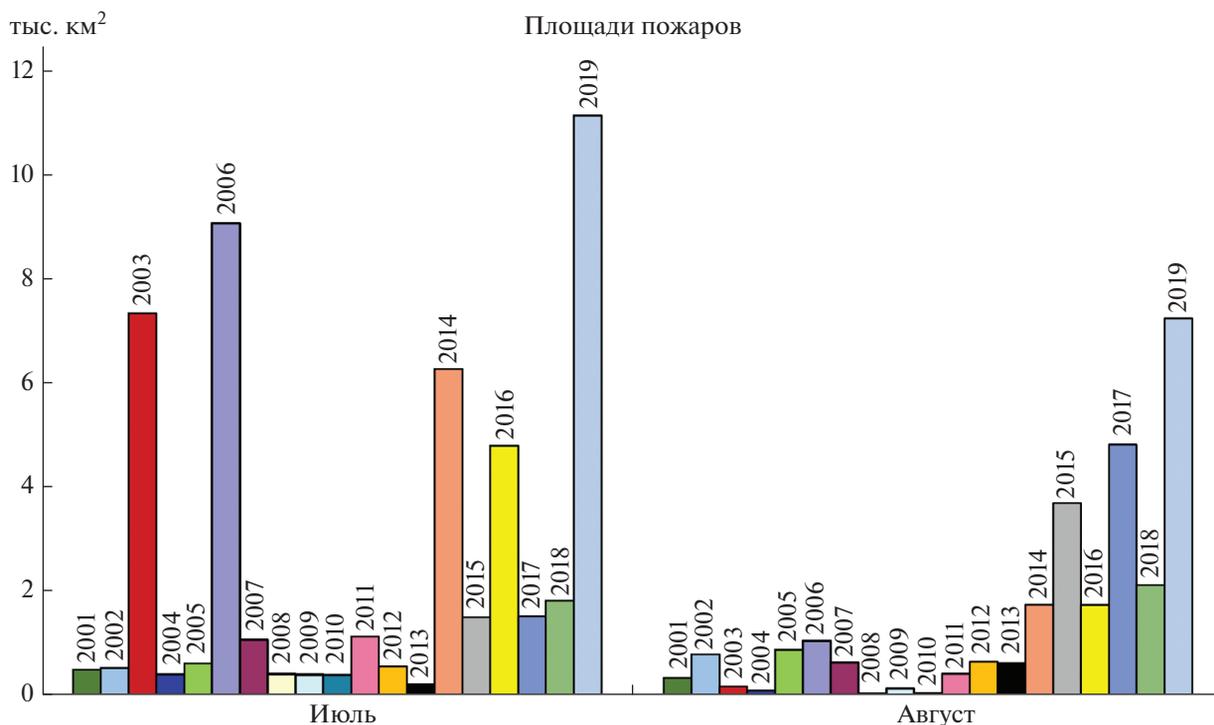


Рис. 6. Площади пожаров на территории Иркутской области в июле–августе с 2001 по 2019 гг.

На втором этапе проведения исследований анализировались пожары 2019 г. на территории Иркутской области СФО.

Из рис. 6 видно, что максимальные площади пожаров на территории Иркутской области за 18-летний период были зафиксированы в 2019 г. (11.14 тыс. км<sup>2</sup>). Наиболее сильно от пожаров пострадали хвойные и смешанные леса, расположенные в центральной часть области (5.31 тыс. км<sup>2</sup>).

Превышающие средние значения площадей пожаров за июль (рис. 6) были выявлены в 2006 г. (9.07 тыс. км<sup>2</sup>), в 2003 г. (7.34 тыс. км<sup>2</sup>), 2014 г. (6.27 тыс. км<sup>2</sup>) и 2016 г. (4.79 тыс. км<sup>2</sup>).

В отличие от июля, в августе наблюдается тенденция к ежегодному росту площадей, пройденных огнем на территории Иркутской области, начиная с 2014 г. Площади лесных пожаров, выявленных в августе 2019 г. (7.24 тыс. км<sup>2</sup>), превышают показатели предыдущих лет в несколько раз.

Июль–август 2019 г. стал рекордным не только по площадям, пройденным огнем, но и по объемам эмиссий от них (CO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) в Иркутской области, по сравнению с предыдущими годами (рис. 7).

Рассчитанные на основе данных космического мониторинга значения объемов эмиссий за июль 2019 г. на территории Иркутской области составляли (рис. 7): CO ~ 3.08 млн т; CO<sub>2</sub> ~ 46.35 млн т; мелкодисперсные аэрозоли PM<sub>2.5</sub> ~ 0.39 млн т;

CH<sub>4</sub> ~ 0.14 млн т; NO<sub>x</sub> ~ 0.05 млн т; NO ~ 0.03 млн т; NO<sub>2</sub> ~ 0.09 млн т; SO<sub>2</sub> ~ 0.03 млн т.

Наибольшие значения объемов эмиссий в августе также зафиксированы в 2019 г. и составили: CO ~ 1.85 млн т; для CO<sub>2</sub> ~ 28.44 млн т; для мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2.5</sub> ~ 0.24 млн т; для CH<sub>4</sub> ~ 0.08 млн т; для NO<sub>x</sub> ~ 0.03 млн т; для NO ~ 0.01 млн т; для NO<sub>2</sub> ~ 0.05 млн т; для SO<sub>2</sub> ~ 0.02 млн т (рис. 7).

Высокие значения объемов эмиссий 2019 г. напрямую связаны с значительными площадями природных пожаров в хвойных и смешанных лесах на территории Иркутской области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы ежегодные серии данных космического мониторинга, получаемые со спутников Terra/Aqua в период с 2001 г. по 2019 г. По результатам обработки космических данных были выявлены ареалы, пройденные огнем, рассчитаны площади и объемы эмиссии от природных пожаров для территории Сибири.

Анализ результатов космического мониторинга природных пожаров на территории Сибири показал, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров за исследуемый период времени, определяемых по данным MOD14, были зафиксированы в апреле 2008 г. (47.02 тыс. км<sup>2</sup>), мае 2003 г.

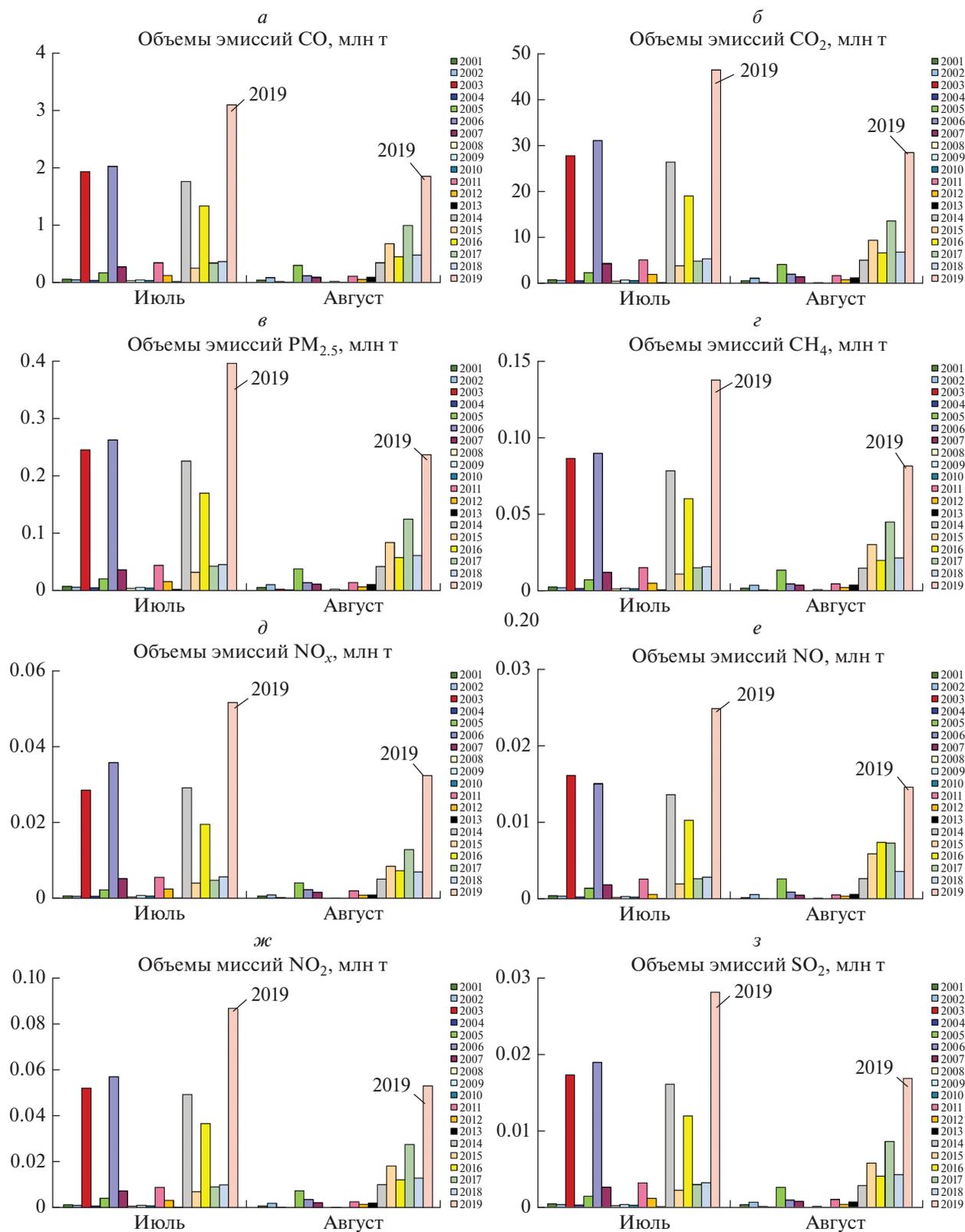


Рис. 7. Объемы эмиссий от природных пожаров на территории Иркутской области в июле–августе с 2001 по 2019 гг.: а – эмиссии CO, б – эмиссии CO<sub>2</sub>, в – эмиссии PM<sub>2.5</sub>, г – эмиссии CH<sub>4</sub>, д – эмиссии NO<sub>x</sub>, е – эмиссии NO, ж – эмиссии NO<sub>2</sub>, з – эмиссии SO<sub>2</sub>.

(100.28 тыс. км<sup>2</sup>), июне 2003 г. (35.64 тыс. км<sup>2</sup>), июле 2012 г. (30.89 тыс. км<sup>2</sup>), августе 2019 г. (18.46 тыс. км<sup>2</sup>), сентябре 2016 г. (13.6 тыс. км<sup>2</sup>), октябре 2003 г. (7.38 тыс. км<sup>2</sup>).

На основании анализа космических данных для региона Сибири получено, что суммарные площади, пройденные огнем (72.4 тыс. км<sup>2</sup>), составляют 42% площадей природных пожаров, произошедших на всей территории России в 2019 г.

Аномально высокая пирогенная активность в районе Иркутской области в июле–августе 2019 г. обусловлена климатическими особенностями, отмечавшимися в данном регионе. Многодневная адвекция тепла и дефицит осадков способствовали увеличению класса пожароопасности, и как следствие привело к аномально высоким концентрациям вредных газовых примесей и аэрозолей в атмосфере, что негативным образом отразилось на экологической обстановке региона. Выявлены рекордные по площади лесные пожары за период с 2001 по 2018 гг. на территории Иркутской области в июле – 11.14 тыс. км<sup>2</sup>, в августе – 7.24 тыс. км<sup>2</sup>. В данных условиях, благоприятных для накопления вредных примесей в атмосфере, объемы эмиссий превысили значения по сравнению с предыдущими годами в несколько раз. Максимальные значения объемов эмиссий за июль 2019 г. составляли: CO – 3.08 млн т; CO<sub>2</sub> – 46.35 млн т; PM<sub>2.5</sub> – 0.39 млн т; CH<sub>4</sub> – 0.14 млн т; NO<sub>x</sub> – 0.05 млн т; NO – 0.03 млн т; NO<sub>2</sub> – 0.09 млн т; SO<sub>2</sub> – 0.03 млн т.

Полученные результаты указывают на эффективность использования данных космического мониторинга для количественной оценки пространственно-временной динамики площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий от природных пожаров. На основании анализа результатов космического мониторинга установлены закономерности пространственного и сезонного распределения природных пожаров.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева И.С. Аэрозоли Сибири // Интеграционные проекты СО РАН. Вып. 9. 2006. С. 548.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS LANDSAT-TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
- Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов

нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

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., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24.

<https://doi.org/10.7868/S0205961415040028>

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., Савин А.И. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.

Бондур В.Г., Старченков С.А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.

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>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008 (а). № 5. С. 9–14.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008 (б). № 6. С. 64–73.

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019 (в). № 3.

- C. 92–103.  
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103>  
*Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В.* Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 307–320.
- Добрых В.А., Захарычева Т.А.* Дым лесных пожаров и здоровье [Smoke of forest fire and health], Хабаровск: Дальневосточный государственный медицинский университет, 2009. 201 с.
- Королева Т.С., Константинов А.В., Шунькина Е.А.* Угрозы и социально-экономические последствия изменения климата для лесного сектора (Threats and socio-economic consequences of climate change for the forest sector) Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 3. С. 55–71.
- Соловьев В.С., Будищев А.А.* Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 7. С. 626–629.
- Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А.* Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.
- Томишин О.А., Протопопов А.В., Соловьев В.С.* Исследование вариаций атмосферного аэрозоля и угарного газа в области лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 145–150.
- Томишин О.А., Соловьев В.С.* Особенности лесопожарной активности в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 261–271.
- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crouse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmos. Chem. Phys., 2011. V. 11. P. 4039–4072. [www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/](http://www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/)  
[doi:10.5194/acp-11-4039-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011)
- Andreae M.O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, Global Biogeochem. Cy., 2001. V. 15. № 4. P. 955–966.
- Andreae M.O., Rosenfeld D.* Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. Earth Sci. Rev. 89. 13–41.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.001>
- Bondur V.G., Gordo K.A.* Satellite monitoring of wildfires and their effects in the Northern Eurasia // 17-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July. 2017. Albena, Bulgaria. P. 227–238.
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. Remote Sensing of Environment, 2010. V. 114. P. 168–182.
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41.
- Korovin G.N.* Analysis of the Distribution of Forest Fires in Russia, in Fire in ecosystem of boreal Eurasia // Forestry Sciences. 1996. V. 48. P. 112.
- 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.
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., ... Bondur V. et al.* 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. V. 16. P. 14421–14461.  
<https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Liu J.C., Pereira G., Uhl S.A., Bravo M.A., Bell M.L.* A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke // Environmental Research, 2015. V. 136. P. 120–132.
- Markku K., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S.* 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](https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01)
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Climate Change. 1980. V. 2. 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.
- Wiedinmyer C., Akagi S.K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J.* The Fire INventory from NCAR (FINN) – a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. Geosci. Model Dev. Discuss., 2010. V. 3. P. 2439–2476.

## Anomalous Wildfires in Siberia in Summer 2019

O. S. Voronova<sup>1</sup>, A. L. Zima<sup>1</sup>, V. L. Klodov<sup>1</sup>, and E. V. Cherepanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we provide the results of satellite wildfire monitoring and assessment of harmful gas and fine aerosol emission volumes in Siberia between 2001–2019. The features of the space monitoring method used to assess the areas of burned-out territories and the volumes of emissions due to wildfires are described. The analysis of satellite data processing results has allowed us to find out that total burned-out areas and harmful gas and fine aerosol emission volumes in Siberia were anomalously high in 2019. In 2019, 72.4 thousand km<sup>2</sup> of Siberian territories were affected by wildfires, which accounted for 42% of the areas of wildfires that had occurred throughout Russia this year. In 2019, the territory of the Irkutsk region suffered the most from wildfires in July (11.14 thousand km<sup>2</sup>) and in August (7.24 thousand km<sup>2</sup>).

**Keywords:** wildfires, satellite data, satellite monitoring, emissions, aerosol, comprehensive study

## REFERENCES

- Akagi S.K., Yokelson R.J., Wiedinmyer C., Alvarado M.J., Reid J.S., Karl T., Crounse J.D., Wennberg P.O.* Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4039–4072, 2011. [www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/](http://www.atmos-chem-phys.net/11/4039/2011/)doi: 10.5194/acp-11-4039-2011
- Andreae M.O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cy.*, 2001. V. 15. № 4. P. 955–966.
- Andreae M.O., Rosenfeld D.* Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Sci. Rev.*, 2008. V. 89. P. 13–41. doi: 10.1016/j.earscirev.03.001
- Andreeva I.S.* Aerозоли Сибири [Aerosols of Siberia] // *Integratsionnye proekty SO RAN*, 2006. № 9. 548 p. (In Russian).
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V.* Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyx dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS LANDSAT-TM [Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012. V. 9. № 2. P. 9–6 (In Russian).
- Bondur V.G.* Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. doi: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G.* Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091. doi: 10.1134/S0001433816090103
- Bondur V.G.* Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. doi: 10.1134/S0001433811090040
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. № 5. P. 9–14 (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distantsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. № 6. P. 64–73 (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Spatial anisotropy Assessment of the Forest Vegetation Heterogeneity at Different Azimuth Angles of Radar Polarimetric Sensing // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019c, V. 55. № 9. P. 926–934. doi: 10.1134/S0001433819090093
- 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.* Satellite monitoring of wildfires and their effects in the Northern Eurasia // 17-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, 29 June – 5 July, 2017. Albena, Bulgaria. P. 227–238.
- 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., Savin A.I.* Conception on forming systems for the remote monitoring of the environment for the purpose of ecologic and natural resources // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 1992. № 6. P. 70–78.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Space Monitoring of the Effect of Natural Fires on the State of Different Types of Vegetation Cover in 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. Part 2. P. 461–464. doi: 10.1134/S1028334X19040202
- Bondur V.G., Vorobev V.E.* Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015. V. 51. № 9. P. 949–968. doi: 10.1134/S0001433815090054
- Dobrykh V.A., Zakharycheva T.A.* Dym lesnykh pozharov i zdorovie [Smoke of forest fire and health]. Khabarovsk: The Far Eastern State Medical University Publ., 2009. 201 p. (In Russian).
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*. 114. 168–182.
- Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment Volume 178*, 1 June 2016, Pages 31–41.
- Koroleva T.S., Konstantinov A.V., Shunkina E.A.* Ugrozy i sotsialno-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata dlya lesnogo sektora (Threats and socio-economic consequences of climate change for the forest sector) // *Proceedings of the Saint-Petersburg Forestry Research Institute*, 2015. № 3. P. 55–71 (In Russian).
- Korovin G.N.* Analysis of the Distribution of Forest Fires in Russia, in Fire in ecosystem of boreal Eurasia // *Forestry Sciences*. 1996. V. 48. P. 112.
- 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 chal-

lenges of the changing environment of the northern pan-eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.

*Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., ... Bondur V. et al.* 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. 14 421–14 461. doi: 10.5194/acp-16-14421-2016, 2016.

*Liu J.C., Pereira G., Uhl S.A., Bravo M.A., Bell M.L.* A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke // *Environmental Research*. 2015. V. 136. P. 120–132.

*Markku K., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Matvienko G., Melnikov V., Baklanov A., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // *Geography. Environment. Sustainability*. 2016. № 2(9). P. 5–18. doi: 10.15356/2071-9388\_02v09\_2016\_01

*Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // *Climate Change*. 1980. V. 2. P. 207–247.

*Solovyev V.S., Budishchev A.A.* Vozmushcheniya aerzolnoy opticheskoy tolshchiny atmosfery, vyzvannye lesnymi pozharami v Yakutii [Disturbances of aerosol optical thickness of the atmosphere caused by forest fires in Yakutia] // *Optika atmosfery i okeana*. 2010. V. 23. № 7. P. 626–629 (In Russian).

*Solovyev V.S., Kozlov V.I., Mullayarov V.A.* Distantionny monitoring lesnykh pozharov i groz v Yakutii [Remote monitoring of forest fires and thunderstorms in Yakutia] // Yakutsk: FRC YaSC SB RAS Publ. 2009. 108 p. (In Russian).

*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.

*Tomshin O.A., Protopopov A.V., Solovyev V.S.* Issledovanie variatsiy atmosfernogo aerolya i ugarного gaza v oblasti lesnykh pozharov [Study of atmospheric aerosol and carbon monoxide variations over forest fires] // *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012. V. 9. № 1. P. 145–150 (In Russian).

*Tomshin O.A., Solovyev V.S.* Osobennosti lesopozharnoy aktivnosti v boreal'nykh lesakh merzlotnogo regiona Vostochnoy Sibiri [Features of forest fire activity in boreal forests of the permafrost region of Eastern Siberia] // *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. V. 15. № 1. P. 261–271 (In Russian).

*Vivchar A.V., Moiseenko K.B., Pankratova N.V.* Estimates of carbon monoxide emissions from wildfires in northern Eurasia for airquality assessment and climate modeling // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. V. 46. № 3. P. 281–293.

*Wiedinmyer C., Akagi S. K., Yokelson R.J., Emmons L.K., Al-Saadi J.A., Orlando J.J., Soja A.J.* The Fire INventory from NCAR (FINN) – a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2010. V. 3. P. 2439–2476.