

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА СОСТОЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОКРУГАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2019 г. В. Г. Бондур*, М. Н. Цидилина, Е. В. Черепанова

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва

**E-mail: vgbondur@aerocosmos.info*

Поступила в редакцию 22.04.2019 г.

Приводятся результаты анализа многолетней серии космических данных, полученных со спутников Terra/Aqua (ежемесячный продукт MCD64A1 «Burned Area» 6 коллекции) и спутников серии Landsat, для оценки динамики состояния растительного покрова, подвергшегося воздействию природных пожаров на всей территории Российской Федерации и ее отдельных регионов. Предложен подход к использованию методов дистанционного зондирования и геоинформатики для мониторинга воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова без привлечения наземных данных. Продемонстрирована возможность применения нормализованного индекса гарей для оценки степени повреждения и характера восстановления растительности по космическим данным низкого разрешения. Установлено, что в период с 2002 по 2017 гг. в целом по стране за год выгорало от 68.40 до 234.46 тыс. км² растительного покрова. Выявлены сезонные пики пожарной активности, закономерности пространственного распределения очагов пожаров и основные типы выгоревшей растительности для каждого из 8-ми федеральных округов России. Оценена точность определения площадей выгоревших территорий по данным низкого пространственного разрешения (500 м) с использованием данных среднего пространственного разрешения (30 м), которая составила 75% — 81% в зависимости от используемого информационного продукта.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический мониторинг, спутниковые данные, геоинформатика, растительный покров, природные пожары, гари

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особую актуальность приобрело решение задач, связанных с исследованием текущего состояния и динамики растительности под влиянием антропогенных и естественных факторов. Одним из таких факторов являются природные пожары, оказывающие как деструктивное влияние на состояние растительного покрова, так и приводящие к постпирогенным сукцессиям растительности (Лукина и др., 2015; Ильина, 2011; Chu T., Guo X., 2014). Причиной большинства природных пожаров является деятельность человека (~79%), из них сельскохозяйственные палы, сжигание порубочных остатков, пожары от транспортных систем составляют лишь ~9.1% и около 70% пожаров — неосторожное обращение граждан с огнем (Воробьев и др., 2004; Бондур, 2011).

Природные пожары подразделяются на лесные, торфяные и степные/травяные (сельхозпалы) (Воробьев и др., 2004). Леса занимают около 69% территории суши Российской Федерации, что составляет 1.2 млрд. га. Каждый год

природные пожары уничтожают тысячи гектаров леса на всей территории России. Поэтому мониторинг пожаров и состояния растительного покрова является актуальным для всех регионов нашей страны. Естественные степные пожары являются одним из условий нормального функционирования степных экосистем и причиной сукцессии в структуре растительного покрова (Лукина и др., 2015; Ильина 2011). Однако, хозяйственная деятельность человека приводит к возрастанию их частоты. Степные палы на территориях, используемых в качестве пастбищных угодий, а также сельскохозяйственные палы для очистки пахотных земель от нежелательной растительности должны быть управляемыми, но на практике они часто выходят из-под контроля, распространяются на большие расстояния, нанося при этом ущерб на порядок больший, чем неконтролируемые естественные степные пожары (Лукина и др., 2015; Ильина, 2011).

В настоящее время обеспеченность объективной и регулярно обновляемой информацией о состоянии растительного покрова является недостаточной и не отвечает современным

экономическим и экологическим требованиям. Разрозненные данные отдельных федеральных ведомств и региональных административных органов не дают целостной картины об актуальном состоянии растительного покрова и часто несопоставимы. Следовательно, они не могут быть положены в основу анализа и прогнозирования динамики состояния растительного покрова (Воробьев и др., 2004; Лукина и др., 2015; Бондур, 2011, 2015; Бондур и др., 2016; Бондур, Гордо, 2018; Швиденко, Щипашенко, 2013; Барталев и др., 2012).

Учитывая огромную площадь территории Российской Федерации, удаленность и часто труднодоступность отдельных территорий, для решения задач обнаружения активных пожаров, определения выгораемых при этом площадей, оценки влияния природных пожаров на хозяйственную деятельность человека и их экологических последствий, необходимо проводить систематический космический мониторинг (Бондур 1995, 2010, 2011, 2015; Бондур и др., 2009, 2010, 2016, 2019; Бондур, Гордо, 2018; Бондур, Савин, 1992; Савин, Бондур, 2000; Аэрокосмический..., 2012; Барталев и др., 2012, 2015).

В настоящей работе приведены результаты космического мониторинга выгоревших в результате природных пожаров территорий за период с 2002 по 2017 гг. с использованием данных спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua, данных спутника Landsat.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные космического мониторинга

В настоящее время методы космического мониторинга воздействия природных пожаров на состояние растительного покрова активно развиваются (Бондур, 2010, 2011, 2015, Бондур, Гордо, 2018, Бондур и др., 2009, 2010, 2016, 2018, Барталев и др., 2012, 2015). Они позволяют решать задачи выявления и оценки площадей выгоревших территорий, определения степени повреждения растительного покрова, а также оценки объемов эмиссий вредных газов в атмосферу в результате природных пожаров (Бондур, 2015, 2016, Бондур и др., 2009, 2010, 2019, Бондур, Гинзбург, 2016, Бондур, Гордо, 2018, Bondur, Gordo, 2017). Современные системы дистанционного зондирования и методы обработки космических данных позволяют получать непрерывные временные ряды исследуемого параметра с возможностями их статистического

анализа с выделением тренда, сезонных и многолетних циклических компонент, что дает возможность решать задачи мониторинга и моделирования стадий восстановительных сукцессий растительного покрова (Бондур, 2010, 2014, Бондур и др., 2010, 2016, 2019, Бондур, Старченков, 2001, Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б, Lappalainen et al., 2016, Gonzalez et al., 2009, Chu et al., 2016, Li; 2018, Frazier, 2018).

Для выявления и оценки площадей выгоревших территорий по данным ДЗЗ используется несколько подходов: анализ активных очагов горения (Hotpoint), определяемых по тепловым каналам ДЗЗ (Бондур, 2011, 2015, Бондур и др. 2016, 2019, Бондур, Гордо, 2018, Bondur, Gordo, 2017, Барталев и др., 2012); анализ выгоревших площадей (Burned Area), определяемых по спектрально-отражательным характеристикам растительного покрова в ближней ИК области спектра (Sukhinin et al., 2005, Барталев и др., 2012), комбинированное использования первого и второго подходов (Барталев и др., 2012, Giglio et al., 2018).

Расчет площадей выгоревших территорий в результате различных видов природных пожаров проводится по спутниковым данным низкого (TERRA, AQUA, NOAA, SuomiNPP, Meteor-M, FY-3 и др.) среднего и высокого (Landsat, IRS, Канопус и др.) пространственного разрешения в зависимости от масштабов исследования. Наравне с возможностью обрабатывать отдельные изображения пользователям доступны долговременные серии информационных продуктов по выгоревшим территориям на глобальном и региональном уровне с различным пространственным разрешением, в том числе: 1 км — L3JRC и EKA GLOBCARBON SPOT-ENVISAT; 500 м — MODIS Burned Area MCD45, MCD64; 300 м — Copernicus PROBA-V Burnt Area и Fire_cci v4.1 MERIS; 250 м — Fire_cci v5.0 MERIS/MODIS (Giglio, et al., 2018) и другие (Mouillot, et al., 2014, Chu, et al.; 2014).

В настоящей работе для выявления пространственно-временных вариаций площадей участков, выгораемых в результате природных пожаров на территории России (глобальный/региональный уровень), был выбран ежемесячный продукт MCD64A1 «Burned Area» 6-й коллекции (аппаратура MODIS, спутники Terra/Aqua). В этом продукте применяется гибридный алгоритм, работающий на совместном использовании данных тепловых аномалий и измерений отражательной способности в ближних ИК-каналах (Giglio et al., 2018).

Согласно исследованию (Humber et al., 2018), в котором на глобальном уровне сравнивались продукты MCD64A1, MCD45A1, Copernicus Burnt Area и Fire CCI для различных регионов России с преобладанием облачной погоды наилучшие результаты по обнаружению выгоревших площадей продемонстрировали продукты MCD64A1 и Fire CCI. Однако, в продукте Fire CCI были выявлены крупные артефакты по краям изображений, что иногда приводило к возникновению необоснованно больших площадей горения (Humber et al., 2018). Следует отметить также, что в отличие от 5-й коллекции, данные MCD64A1 6-й коллекции менее чувствительны к облачности и аэрозольному загрязнению. Это позволяет выявить на 25% больше выгоревших территорий, включая участки с площадью менее 1 км² (Giglio et al., 2018, Humber et al., 2018).

В настоящем исследовании были использованы три производных продукта, полученных на основе данных MODIS (спутники Terra/Aqua) с пространственным разрешением 500 м за период с 2002 по 2017 гг.: ежемесячный продукт MCD64A1 «Burned Area» — «Гари», 8-дневный продукт MOD09A1 «Surface Reflectance» — «Отражательная способность поверхности» и ежегодный продукт MCD12Q1 «Land Cover» — «Почвенно-растительный покров» (Giglio, 2015, Vermote, 2015, Sulla-Menashe, 2019).

Для обработки и анализа были выбраны не только данные на пожароопасный период (с апреля по октябрь), но и на весь год в целом. Для подтверждения выгоревших площадей в результате пожаров для отдельных территорий был привлечен ежегодный продукт Global Forest Change 2000–2017 Data (Version 1.5) с пространственным разрешением 30 м, получаемый с аппаратуры спутников серии Landsat (Hansen et al., 2013).

Выбор типа классификации растительного покрова для проведения исследований

Ввиду разнообразия типов наземных экосистем на территории России и сложности их границ, актуальным становится выбор оптимальной классификации типов растительного покрова для проведения исследований с учетом пространственного масштаба и используемых исходных данных.

По данным РОСРЕЕСТРА (<https://rosreestr.ru>) в 4-х федеральных округах (ФО) значительную часть земель занимают сельхозугодья в Центральном (ЦФО), Приволжском (ПФО), Южном (ЮФО) и Северо-Кавказском (СКФО) федеральных округах (51.2%, 53.0%, 75.3% и 71.0% соответственно). Лесные земли преобладают

в оставшихся 4-х федеральных округах: в Северо-Западном (СЗФО), Уральском (УФО), Сибирском (СФО) и Дальневосточном (ДФО) (54.9%, 40.0%, 57.8%, 55.2% соответственно). В этих федеральных округах значительны территории, занимаемые болотами.

Большую часть угодий на всей территории России занимают леса — 8707.1 тыс. км² (<https://rosreestr.ru>). Доля хвойных пород в разных частях таежной зоны и зоны смешанных лесов изменяется, в основном, вследствие хозяйственной деятельности и природных пожаров. Основную массу хвойных лесов составляют сосновые, еловые, лиственничные, пихтовые и кедровые леса. Среди лиственных лесов наиболее распространены березовые леса, затем осиновые, дубовые и буковые леса (<https://biogeo.ru/index.php/poleznye-ssylki-i-fajlovyj-arkhiv/fajlovyj-arkhiv>).

Травяно-кустарниковая растительность включает в себя луговую, степную растительность и хвойные вечнозеленые кустарники (<https://biogeo.ru/index.php/poleznye-ssylki-i-fajlovyj-arkhiv/fajlovyj-arkhiv>). Как лесостепная, так и степная зоны практически полностью культивируются.

В исследованиях состояния растительного покрова по данным ДЗЗ преимущественно используются карты земного покрова, основанные на легенде IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), которая содержит 17 классов растительности, пять из которых относятся к лесному покрову (Belward, 1996). Однако, глобальные карты земного покрова, созданные на основе данных прибора MODIS (спутники Terra/Aqua) и использующие легенду IGBP имеют тематическую точность, не превышающую в среднем 70–75%, которая может быть существенно ниже для отдельных территорий (Hua et al., 2018).

В настоящей работе, для выявления типов экосистем использован ежегодный продукт MCD12Q1 6-й коллекции с легендой, построенной в соответствии с системой классификации типов земного покрова ФАО (FAO LCCS — Land Cover Classification System) (Friedl et al., 2015). В отличие от продукта MCD12Q1 5-й коллекции, основанного на легенде IGBP, в 6-й коллекции используется модель иерархической классификации, в которой классы, включенные в каждый уровень иерархии, отражают структурированные различия между свойствами земного покрова. Применение нового алгоритма, основанного на скрытых марковских моделях, позволило сократить обнаружение ложных изменений различных типов земного покрова, вызванных неопределенностью классификации в отдельные годы (Sulla-Menashe et al., 2019).

В ходе выполнения настоящей работы было проведено выборочное изучение трех типов легенд, основанных на классификации FAO LCCS: почвенно-растительный покров (land cover, LCCS1); землепользование (land use, LCCS2), гидрография (surface hydrology, LCCS3). Данные с классификацией почвенно-растительного покрова LCCS1 основаны на типизации растительного покрова с различной плотностью проективного покрытия: густые леса (проективное покрытие >60%), которые в свою очередь делятся на несколько категорий; разреженные леса (проективное покрытие 30–60%), редколесья (проективное покрытие 10–30%), густая и разреженная травяная растительность, густая и разреженная кустарниковая растительность.

Предварительный анализ пространственной структуры размещения различных типов растительного покрова в соответствии с классификацией LCCS1 показал, например, что лесные территории, которые в классификации IGBP идентифицировались как темнохвойные вечнозеленые леса (Evergreen Needleleaf Forests), в классификации LCCS1 могут определяться как разреженные леса (Open Forests) с неравномерными вкраплениями участков темнохвойных вечнозеленых лесов (Evergreen Needleleaf Forests). Поэтому, для целей настоящего исследования наиболее оптимальным является использование данных с типами землепользования (LCCS2), в которых пространственная структура и размещение границ между лесами, сельхозугодьями, степями и кустарниками соответствуют масштабу исследования.

Селективный анализ временной серии данных продукта MCD12Q1 (LCCS2), показал, что выгоревшие лесные территории идентифицируются, как правило, как редкие леса в лесной зоне. Два типа лесов (высокоплотные/dense (проективное покрытие >60%) и редкие/open (проективное покрытие 10–60%) нами были объединены в один класс при расчете площадей, выгоревших на покрытых лесом территориях. Необходимо отметить, что для оценки возможности идентификации болот в лесной зоне (woody wetlands) рассматривались данные классификации LCCS3. Выборочное исследование показало, что крупные заболоченные территории достоверно определяются в центральной и южной части Западносибирской равнины, в тоже время обнаруженные заболоченные участки севера Восточно-европейской равнины необходимо дополнительно верифицировать.

Исследуемые территории

Количественные оценки в исследованиях, связанных с анализом влияния природных

пожаров на состояние растительности, могут существенно различаться в зависимости от рассматриваемых географических районов и их границ. Это затрудняет фактическое сопоставление результатов исследований и их практическое применение.

Существует несколько подходов при выборе границ для анализа космических данных в масштабе исследования всей территории Российской Федерации: административно-территориальное деление; комбинация административно-территориального деления и природных границ; природные границы различных зон земного покрова (Швиденко, Щипашенко, 2013, Вивчар и др., 2010, Барталев и др., 2012). Каждый из подходов имеет свои недостатки, которые могут повлиять на результаты интерпретации данных космического мониторинга и сопоставление информации из разных источников, но в целом, на федеральном уровне порядка значений выгоревших площадей должны совпадать.

В настоящей работе для анализа космических данных MODIS (спутники Terra/Aqua) и расчета площадей выгоревших территорий использовался подход к определению границ на основе административно-территориального деления Российской Федерации на уровне страны в целом и отдельно в пределах каждого из 8-ми федеральных округов. Представление результатов исследования в границах федеральных округов является наиболее рациональным подходом. Это связано с тем, что большая часть исполнительных мероприятий, в том числе по пожаротушению, по разработке мер по снижению выгораемых площадей и проведению лесовосстановления принимаются на федеральном уровне и уровне субъектов Федерации.

Для оценки точности расчета выгоревших площадей, а также выявления динамики и характера восстановления растительного покрова на выгоревших территориях по данным космического мониторинга низкого разрешения были отобраны тестовые территории в пределах республики Марий Эл и Нижегородской области.

Используемые методы обработки данных космического мониторинга

На первом этапе исследования исходные данные космического мониторинга MCD64A1 «Burned Area» были приведены к единой проекции Albers Equal Area, затем путем геоинформационного анализа, включающего пространственное слияние, пересечение и объединение, были проведены расчеты, обеспечивающие получение значений ежегодно выгораемых

площадей для всей территории России и в границах отдельных федеральных округов. В результате пространственного слияния ареалов выгоревших территорий (MCD64A1) и различных типов подстилающей поверхности (MCD12Q1) площади выгоревших территорий были дифференцированы в соответствии со следующими типами растительности: леса, пахотные земли, кустарники, древесная растительность/пахотные земли, луга/степи, прочие угодья. Графики сезонной изменчивости площадей выгоревших территорий за период 2002–2017 гг. строились на основе ежедневных данных, входящих в состав ежемесячных продуктов MCD64A1.

На втором этапе для отдельных выгоревших лесных территорий была проведена оценка точности определения выгоревших площадей по продуктам MODIS путем сопоставления с данными ежегодного продукта Global Forest Change 2000–2017 Data Forest Loss (GFCDFL Version 1.5), полученного по данным спутника Landsat. Следует отметить, что продукт MODIS с пространственным разрешением ниже 500 м не подходит для надежного мониторинга на региональном и локальном уровнях и точного расчета площадей палов сельскохозяйственных земель, которые характеризуются небольшими площадями, скоротечностью пожаров и сложным мозаичным характером границ участков (Hall et al., 2016). Поэтому для проведения исследования были выбраны лесные территории. Выбор продукта GFCDFL в качестве референсного источника обосновывается тем, что он, во-первых, получен по космическим данным более высокого пространственного разрешения – 30 м, что почти в 17 раз лучше данных MODIS, во-вторых, это готовый синтезированный глобальный продукт, содержащий информацию об исчезнувших лесных территориях за каждый год, что соответствует временному диапазону нашего исследования.

Необходимо подчеркнуть, что в продукте GFCDFL под исчезновением леса понимается нарушение восстановления коренных насаждений или полное исчезновение древесного покрова. С другой стороны, границы полигонов гарей по MCD64A1 включают в себя не только полностью исчезнувшие насаждения, но в целом территорию, пройденную огнем, с сохранившимся составом древесных насаждений. Предварительное сопоставление данных MCD64A1 с GFCDFL показало, что в случае обнаружения выгоревших территорий на обоих продуктах внешние границы ареалов гарей могут быть практически идентичными. Однако данные GFCDFL отличаются мозаичной внутренней структурой из-за

лучшего пространственного разрешения, и как следствие, меньшими площадями полностью исчезнувших насаждений.

Для оценки точности определения площадей, полученных по данным MODIS, был выбран подход, при котором выгоревшие территории классифицировались и объединялись в ареалы гарей в зависимости от степени повреждения растительного покрова. Хорошие результаты по выделению участков с различной степенью повреждения растительного покрова дает использование спектральных индексов, получаемых по данным космического мониторинга, в том числе таких как NDVI (нормализованный вегетационный индекс) и NBR (нормализованный индекс гари) и их модификаций (dNDVI, dNBR и др.) (Бондур, 2010, Бондур, Воробьев, 2015, Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б, Аэрокосмический..., 2012, Бондур и др., 2016, 2019, Воробьев и др., 2014, Ryu et al., 2018, Jin et al., 2012).

Предварительно все данные были перепроецированы в проекцию UTM, и подготовлены маски с границами полигонов гарей по MCD64A1, включающие буферные зоны в 2.5 км, чтобы можно было классифицировать отдельно территории, пострадавшие от пожара и фоновые. Затем, по данным продукта MOD09A1 для выбранных участков гарей рассчитывались нормализованные индексы гарей (NBR) и разностные нормализованные индексы гарей (dNBR).

Расчет индекса NBR производится по разности спектральных яркостей в ближних ИК-каналах, нормализованной на их сумму (Бондур, Гордо, 2018, Бондур и др., 2016, Bondur, Gordo, 2017):

$$NBR = (Band2 - Band7) / (Band2 + Band7)$$

где Band2 и Band7 — спектральные яркости в каналах аппаратуры MODIS спутника TERRA/AQUA с длинами волн в диапазоне 0.841–0.876 и 2.10–2.15 мкм соответственно.

Разностной индекс гарей dNBR вычислялся на основании разности индексов NBR, полученных в пред- и постпожарный периоды по двум разновременным изображениям. Полученные значения dNBR для каждого участка были переклассифицированы в двух вариантах: 1) 1-й класс — фон, 2-й класс — гари, со степенью повреждения пожаром от низкого до высокого уровня (dNBR47); 2) 1-й класс — фон, 2-й класс — гари, со степенью повреждения пожаром от умеренно-низкого до высокого уровня (dNBR57).

Для каждого участка были отобраны значения для оценки точности по данным MCD64A1/dNBR47/dNBR57 (результаты классификации) и по данным GFCDFL (опорные точки), по

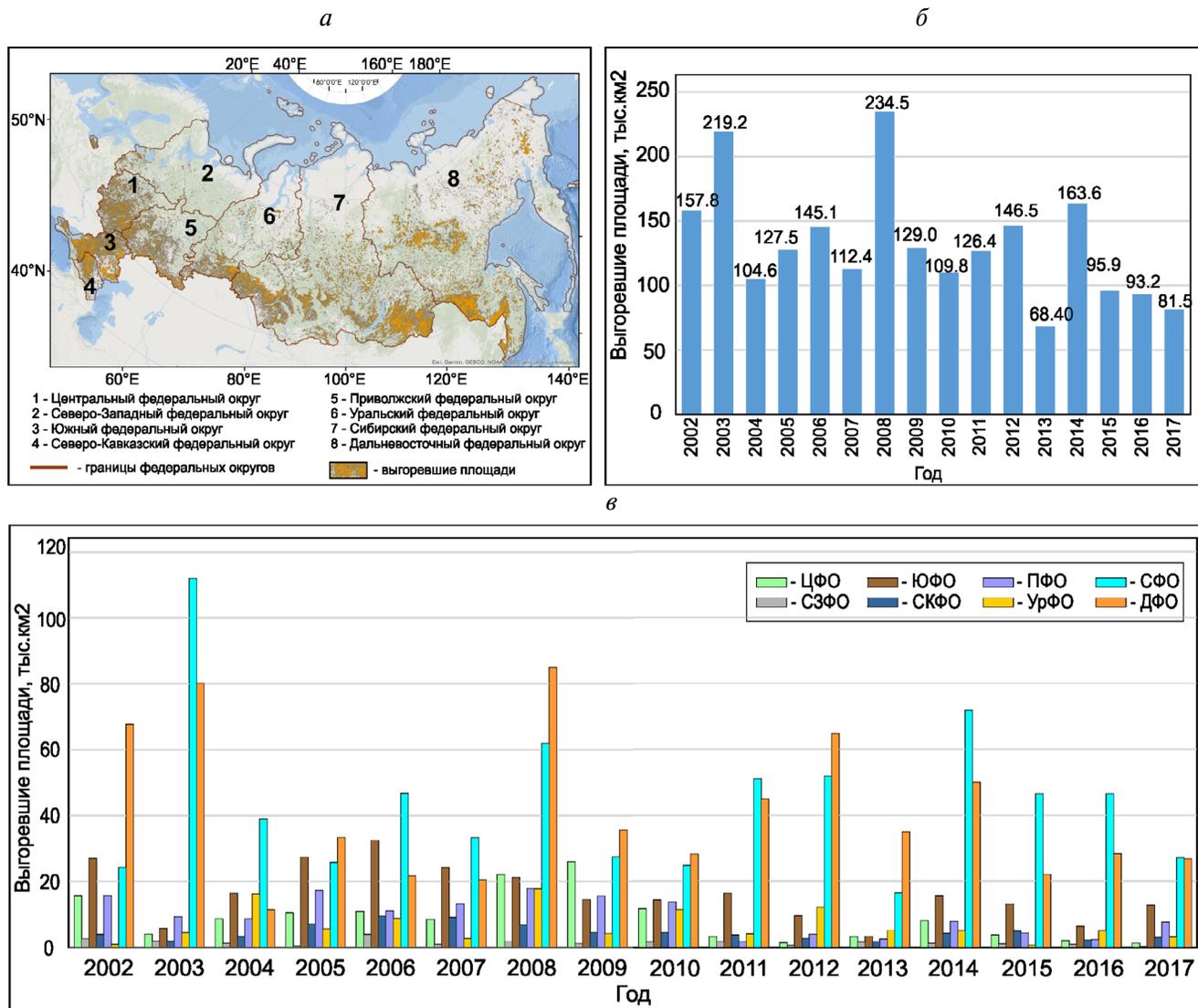


Рис. 1. Выгоревшие от природных пожаров площади на территории России в 2002–2017 гг. по данным MCD64A1: *а* — карта распределения по федеральным округам; *б* — суммарные значения для всей территории России; *в* — суммарные значения гарей в различных федеральных округах.

результатам была построена матрица ошибок и получены оценки точности.

На третьем этапе, на основе рассчитанных индексов гарей NBR и dNBR были построены графики, отражающие динамику и характер восстановления растительного покрова на выгоревших территориях по космическим данным низкого разрешения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведены распределения суммарных значений площадей, выгоревших от природных пожаров федеральных округах и в целом для территории России, полученных по

данным MCD64A1 за исследуемый период. Анализ полученных результатов показал, что по данным MCD64A1 наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров в период с 2002 по 2017 гг., были зафиксированы в 2003 г. (219.21 тыс. км²), 2008 г. (234.46 тыс. км²) и 2014 г. (163.5 тыс. км²). В целом по стране за год выгорало от 68.40 до 234.46 тыс. км².

В исследуемый период времени суммарные значения выгоревших за год площадей для каждого из 8-ми федеральных округов (ФО) составили: для Центрального федерального округа (ЦФО) от 4.02 тыс. км² (в 2003 г.) до 26.03 тыс. км² (в 2009 г.), для Северо-Западного федерального округа (СЗФО) от 0.16 тыс. км² (2017 г.)

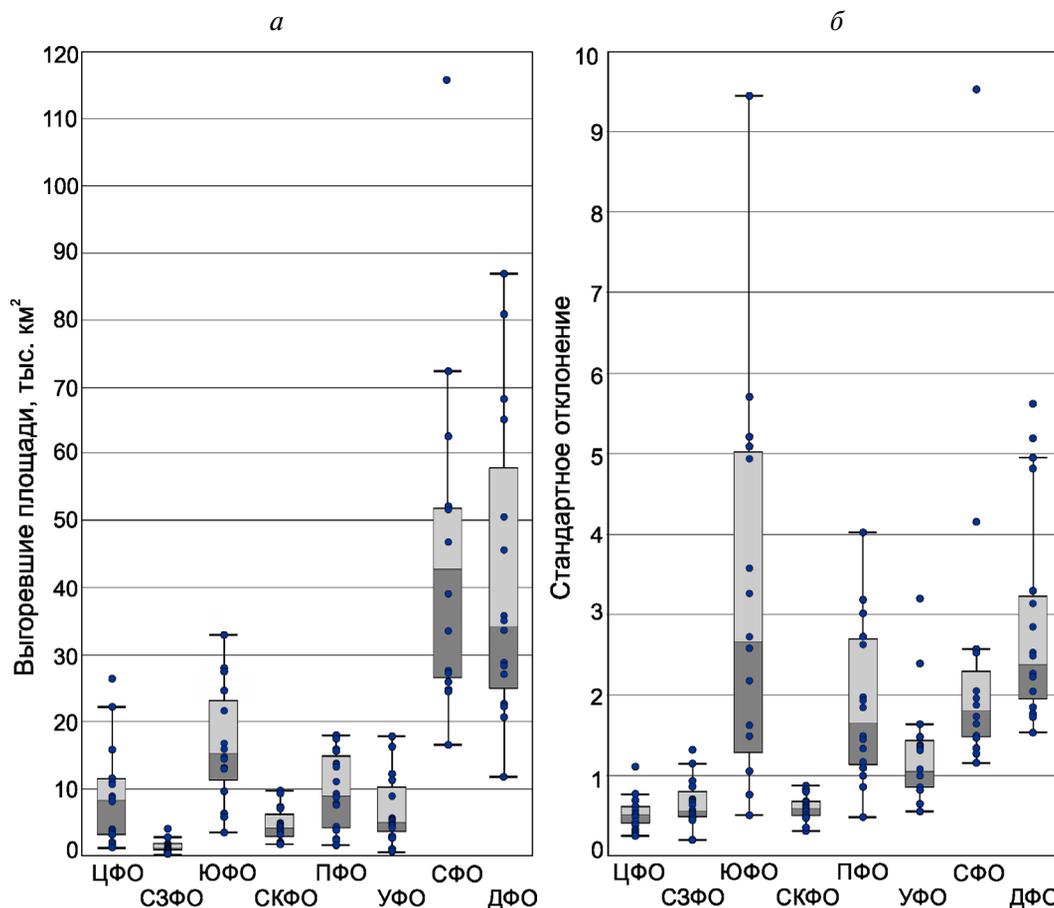


Рис. 2. Распределение размеров суммарных площадей (а), выгораемых ежегодно в различных ФО России, и стандартные отклонения (б), рассчитанные для периода с 2002–2017 гг.

до 3.93 тыс. км² (2006 г.), для Южного федерального округа (ЮФО) от 3.30 тыс. км² (2013 г.) до 32.5 тыс. км² (2006 г.), для Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) от 1.65 тыс. км² (2013 г.) до 9.49 тыс. км² (2006 г.), для Приволжского федерального округа (ПФО) от 1.62 тыс. км² (2011 г.) до 17.88 тыс. км² (2008 г.), для Уральско-го федерального округа (УрФО) от 0.89 тыс. км² (2002 г.) до 17.78 тыс. км² (2008 г.), для Сибирского федерального округа (СФО) от 16.40 тыс. км² (2013 г.) до 111.94 тыс. км² (2003 г.), Дальневосточный федеральный округ (ДФО) от 11.37 тыс. км² (2004 г.) до 84.87 тыс. км² (2008 г.).

На рис. 2 представлены значения суммарных площадей, выгораемых ежегодно в различных ФО, и стандартные отклонения за период с 2002–2017 гг. Анализ рис. 2 показал, что наименьшие ежегодно выгораемые площади зарегистрированы в СЗФО и СКФО, а наибольшие — в СФО и ДФО (см. рис. 2а). При этом наибольшая вариабельность значений наблюдалась в ЮФО, а наименьшая в ЦФО, СЗФО и СКФО (рис. 2б).

На рис. 3 приведены результаты оценок площадей, выгоревших от природных пожаров на

всей территории России, полученные по данным дистанционного зондирования в различных исследованиях (Бондур, 2011, Бондур, Гордо, 2018, Bondur, Gordo, 2017, Барталев и др., 2015, Стыценко, 2016, Вивчар и др., 2010, Швиденко, Щепашенко, 2013).

Сравнение результатов, полученных в настоящей работе с ранее опубликованными результатами не может быть объективным из-за различий в рассматриваемых географических районах, характеристиках исходных данных (тип, временное и пространственное разрешение, полнота покрытия исследуемых районов и периодов), алгоритмах выделения пройденных пожарами территорий, способах выборки результатов в зависимости от типа подстилающей поверхности, методах дополнительной коррекции результатов. В то же время, во всех исследованиях прослеживаются схожие тенденции в ежегодных изменениях площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров (см. рис. 3).

В качестве примера сложности сопоставления результатов различных исследований в табл. 1 приведены оценки выгоревших площадей

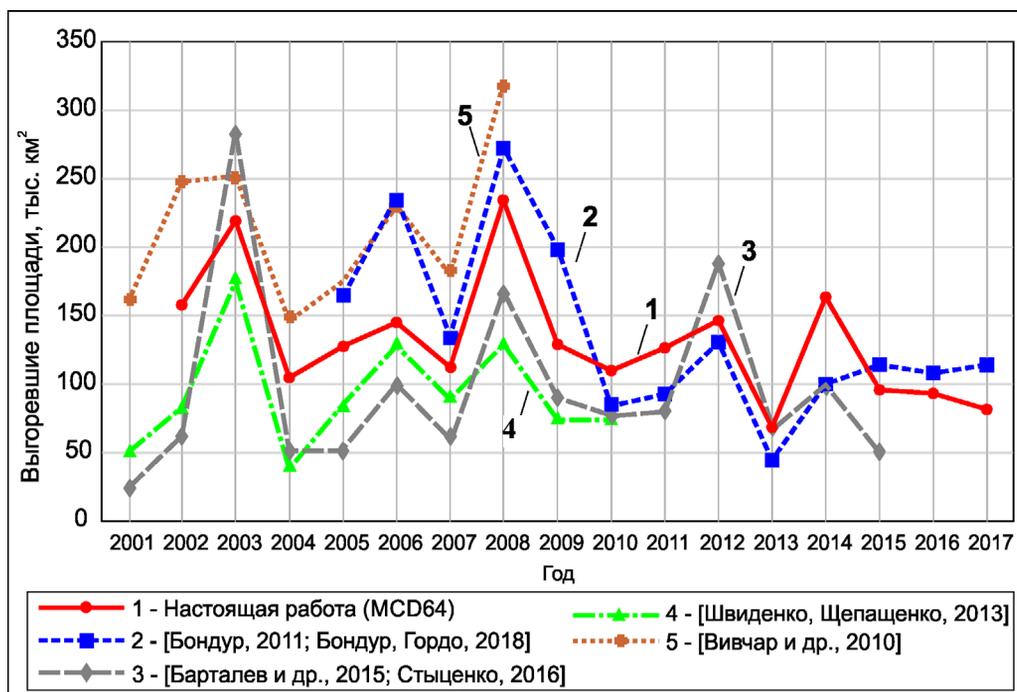


Рис. 3. Результаты оценок выгоревших от природных пожаров площадей, полученные по данным дистанционного зондирования в результате различных исследований: 1 — настоящая работа; 2 — (Бондур, 2011, Бондур, Гордо, 2018); 3 — (Барталев и др., 2015, Стыценко, 2016); 4 — (Швиденко, Щипащенко, 2013); 5 — (Вивчар и др., 2010).

Таблица 1. Оценка площадей, выгоревших в результате природных пожаров в 2011 г. в различных федеральных округах

Федеральный округ	Настоящая работа	(Барталев и др., 2012)
	продукт MCD64, км ²	продукт SRBA, км ²
ЦФО	3122.60	8372.72
СЗФО	1649.20	2678.39
ЮФО	16346.00	8554.24
СКФО	3686.60	2474.88
ПФО	1616.10	7078.92
УФО	4001.40	8083.06
СФО	51040.00	26607.64
ДФО	44978.00	40230.00
Всего по РФ	126439.90	104079.85

в 2011 г. в различных федеральных округах, полученные в настоящей работе и работе (Барталев и др., 2012). Значения площадей получены на основе результатов измерений тепловых аномалий и отражательной способности в ближних ИК-каналах аппаратурой MODIS, но с использованием разных гибридных алгоритмов обработки данных (Giglio et al., 2018, Барталев и др., 2012).

Анализ табл. 1 показал, что максимальное совпадение площадей, выгоревших в результате

природных пожаров, полученных в настоящей работе и работе (Барталев и др., 2012) характерно для всей территории России и ДФО. Для остальных федеральных округов значения выгоревших площадей различаются в 1.5–4 раза (см. табл. 1).

Сезонная изменчивость площадей выгоревших территорий за период 2002–2017 гг. по данным MCD64 показана на рис. 4. Из этого рисунка следует, что для разных округов характерны различные сезонные максимумы.

Максимальные площади выгорают: в СФО в период с марта по май (см. рис. 4а); в ДФО с марта по май, в июле и в октябре (см. рис. 4б); в ЮФО с июня по август (см. рис. 4ж); в ПФО с июля по октябрь (см. рис. 4д); в СЗФО в марте, апреле и июле (см. рис. 4з); в СКФО в марте, апреле, с июля по сентябрь и в ноябре (см. рис. 4з); в ЦФО в апреле и июле–августе (см. рис. 4е); в УрФО в апреле, мае, июле, августе и октябре (см. рис. 4е). Анализ рис. 4 показал, что порядка 1% выгоревших за год площадей приходится на период с ноября по март, большая часть из них связана с палами сельхозугодий в ДФО и ЮФО, также выгоревшие территории обнаруживаются по данным MCD64 в ЦФО (Брянская и Смоленская области), в СЗФО (Калининградская область) и СКФО.

На рис. 5 приведено распределение повторно выгоревших в результате природных пожаров

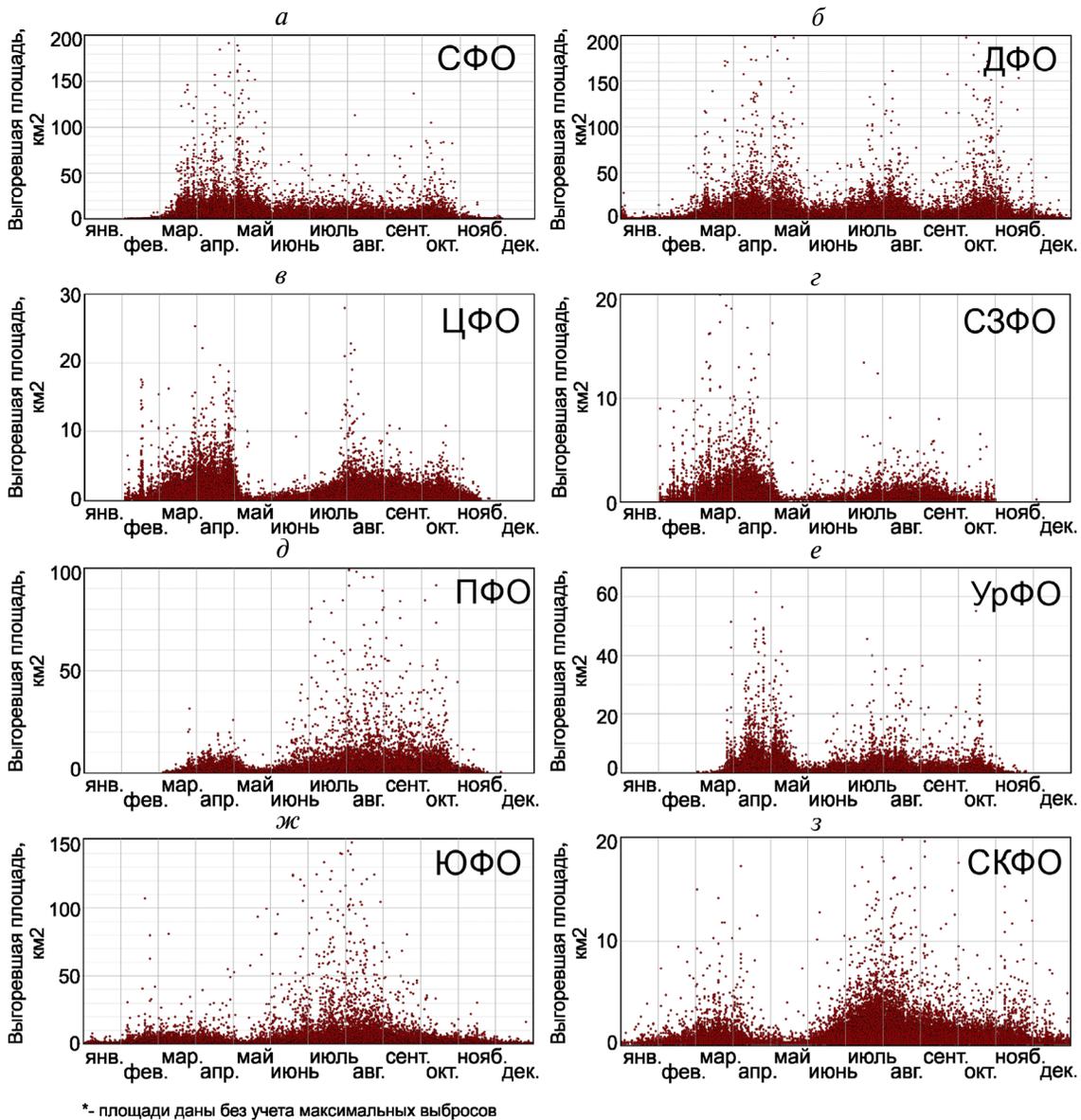


Рис. 4. Сезонная изменчивость площадей выгоревших территорий в различных ФО за период 2002–2017 гг. (данные MCD64) в СФО (а), ДФО (б), ЦФО (в), СЗФО (з), ПФО (д), УрФО (е), ЮФО (ж), СКФО (з).

площадей на территории Российской Федерации за период 2002–2017 гг. по данным MCD64.

Анализ рис. 5 показал, что за 16-летний период наблюдений большая часть исследуемой территории подвергалась воздействию природных пожаров 1 раз. Около 20% преимущественно лесных территорий выгорало 2–3 раза за рассматриваемый период. Менее 10% площадей, в основном культивируемые и расположенные в степной и лесостепной зонах РФ подвергались выгоранию до 9 раз.

Интересно отметить, что на участке границы Дальневосточного федерального округа с Китаем в 250 км буферной зоне по данным космического мониторинга выявляются регулярно

горимые в период февраль–апрель и сентябрь–ноябрь участки сельхозугодий и лугов общей площадью более 7500 км², возникших на месте дубовых и кедрово-широколиственных лесов. Вероятной причиной этих пожаров могут быть нелегальные сельхозпалы.

Для выявления типов экосистем, подвергшихся воздействию природных пожаров, использована временная серия ежегодных карт растительного покрова MCD12Q1 (классификация LCCS2), сформированных за период с 2002 по 2017 гг. на основе данных MODIS (пространственное разрешение 500 м). Совместный анализ данных космического мониторинга, выполненный на основе продуктов MCD64A1 и MCD12Q1, позволил

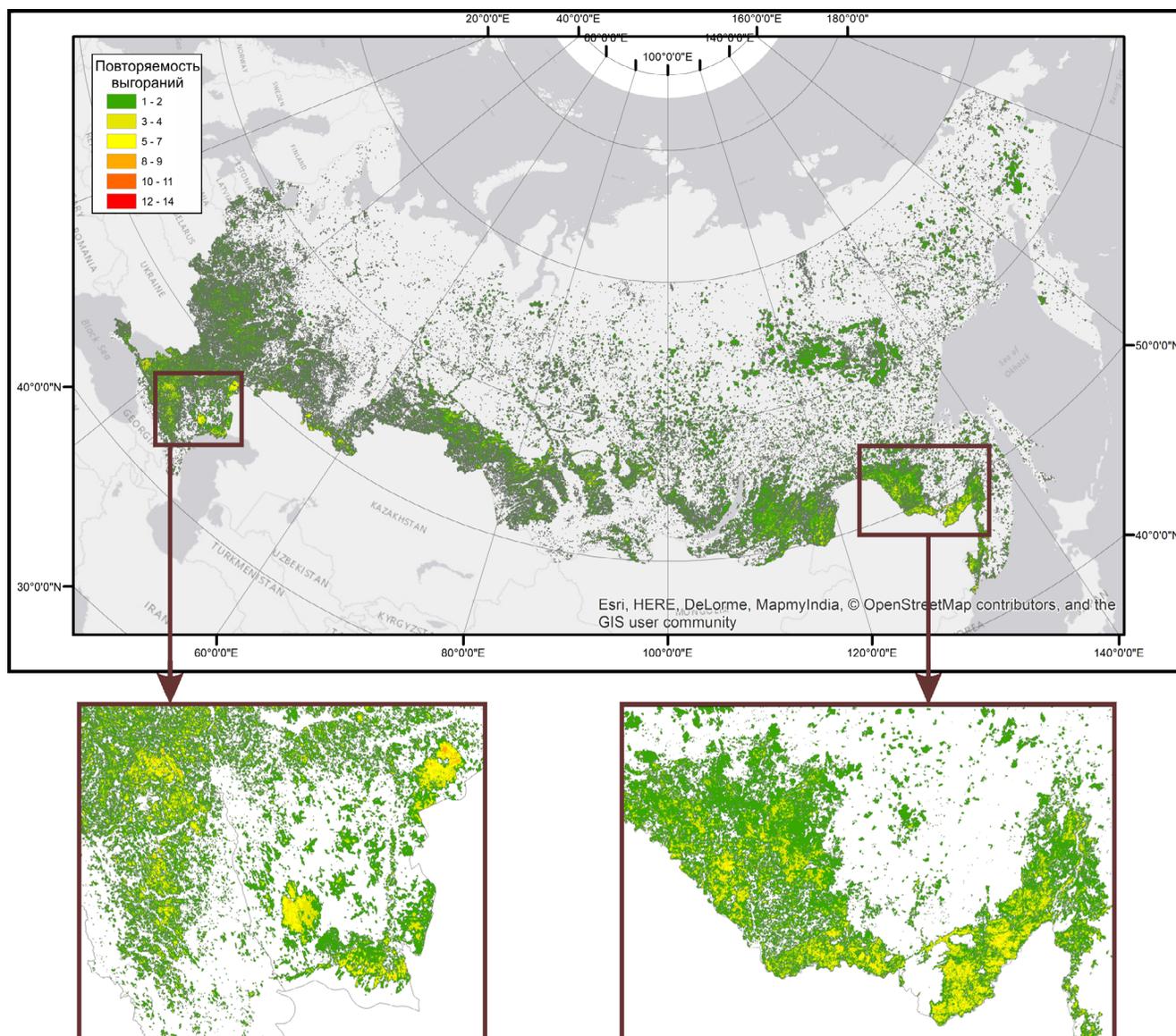


Рис. 5. Распределение выгоревших в результате природных пожаров площадей на территории Российской Федерации за период 2002–2017 гг. по данным MCD64.

сопоставить выгоревшие площади и преобладающие типы растительного покрова для каждого ФО (см. рис. 6).

В табл. 2 приведены суммарные значения выгоревших площадей с различным типом растительности и доля этих площадей от общей выгоревшей площади в ФО за период с 2002 по 2017 гг.

Анализ рис. 6 и табл. 2 показал, что в СФО наибольшая доля выгоревшей растительности приходится на леса (64%). Вариации изменения суммарных значений площадей выгоревших лесов почти полностью совпадает с вариациями суммарных площадей выгоревших территорий. Вторым классом по площади выгораний является луговая/степная растительность (22%) и третьим

(12%) — пахотные земли (см. рис. 6а, табл. 2). Похожая картина наблюдается и в СЗФО и УрФО (см. рис. 6д, з). Однако в УрФО в 2016 г. зафиксировано выгорание кустарниковой растительности.

В ДФО так же, как и в СФО основная доля выгораний приходится на леса (81%), на втором месте кустарниковая растительность (10%). Доля остальных классов незначительна (см. рис. 6б).

В ЮФО и ПФО значительные площади выгораний характерны для пахотных земель (54% и 59% соответственно) и луговой/степной растительности (43% и 34%). Однако в ПФО в 2010 г. зафиксированы также значительные выгорания лесов (рис. 6в, г).

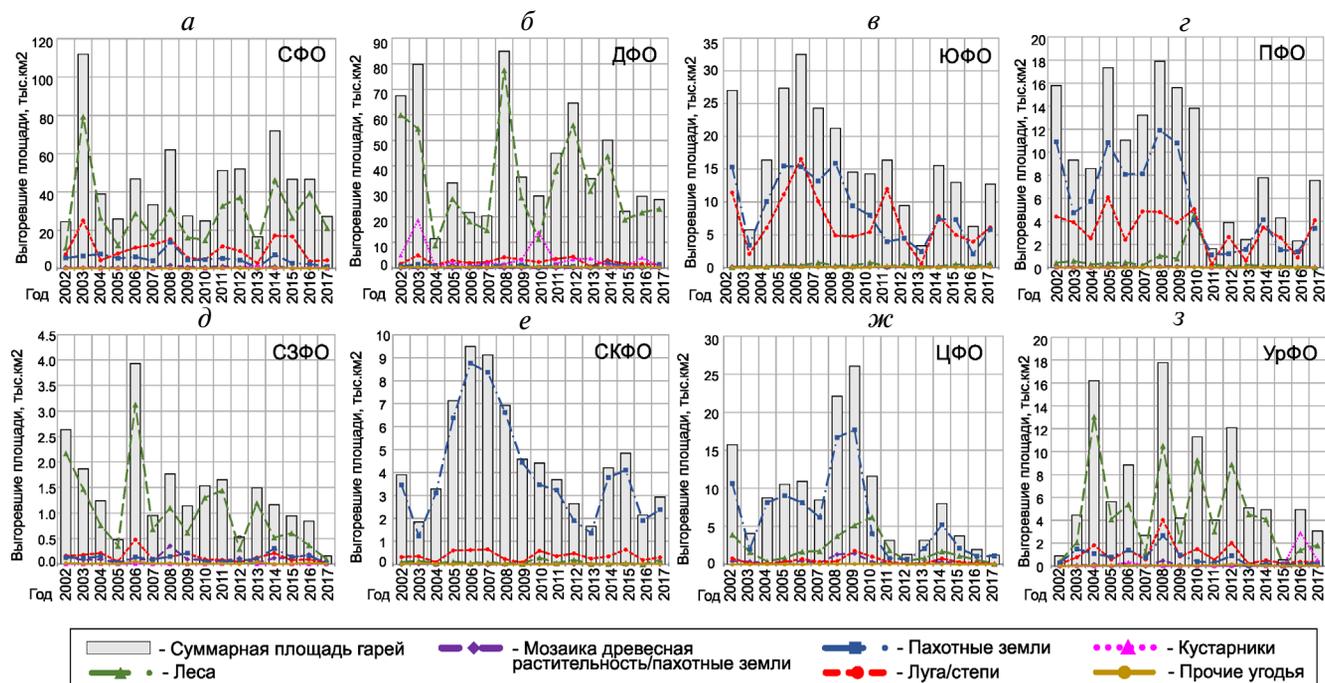


Рис. 6. Сопоставление площадей выгоревших территорий (продукт MCD64A1) и типов подстилающей поверхности (продукт MCD12Q1, классификация FAO LCCS2) для СФО (а), ДФО (б), ЮФО (в), ПФО (г), СЗФО (д), СКФО (е), ЦФО (ж), УрФО (з).

Таблица 2. Суммарные значения выгоревших площадей с различным типом растительности и доля этих площадей от общей выгоревшей площади в ФО за период с 2002 по 2017 гг. (продукт MCD64A1, MCD12Q1 — классификация LCCS2)

Тип растительности (MCD12Q1, классификация LCCS2)	ЦФО		СЗФО		ЮФО		СКФО	
	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%
Леса	31.70	23	16.13	72	5.70	2	1.52	2
Луга/степи	7.05	5	2.30	10	112.11	43	6.13	8
Пахотные земли	95.33	68	1.93	9	139.33	54	64.51	89
Кустарники	—	—	0.03	—	—	—	—	—
Мозаика древесная расти- тельность/пахотные земли	5.87	4	1.69	8	1.72	1	0.25	0.4
Прочие	0.35	0.25	0.22	1	1.08	-	0.28	0.4

Тип растительности (MCD12Q1, классификация LCCS2)	ПФО		УрФО		СФО		ДФО	
	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%	тыс. км ²	%
Леса	9.59	6	72.02	68	450.32	64	531.51	81
Луга/степи	52.40	34	15.96	15	157.75	22	40.63	6
Пахотные земли	89.48	59	11.99	11	80.88	12	14.59	2
Кустарники	—	—	4.26	4	5.22	1	61.95	10
Мозаика древесная расти- тельность/пахотные земли	0.66	0.4	1.36	1	9.83	1	0.34	—
Прочие	0.16	0.1	0.96	1	2.27	—	4.66	1

Для СКФО характерны сельхозпалы, основная доля выгораний приходится на пахотные земли (89%), также выгорают луга/степи (8%) (см. рис. 6е, табл. 2).

В ЦФО большая часть площадей, пройденных огнем, относится к пахотным землям (68%), в то же время часть выгораний приходится на леса (23%). В 2008–2010 гг. выгоревшие площади зафиксированы на участках луговой/степной растительности и мозаичных участках, включающих древесную растительность и пахотные земли (см. рис. 6ж).

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ВЫГОРЕВШИХ ТЕРРИТОРИЙ

Существуют различные подходы к валидации результатов, получаемых при космическом мониторинге. Большинство из них основаны на сопоставлении с наземными данными. Однако, такой подход требует значительных временных и трудовых затрат на получение и обработку информации, а получение наземных данных зачастую просто невозможно. При проведении работ по валидации результатов мониторинга на глобальном и региональном уровне дополнительного решения требует вопрос сопоставления масштабов данных, так как наземные данные локальны, более детальны и дискретны, чем космические данные.

В настоящей работе для валидации использовался подход, при котором космические данные низкого пространственного разрешения (MCD64A1, MOD09A1, 500 м) сравнивались с данными более высокого пространственного разрешения (GFCDL, 30 м). Преимуществом рассматриваемого подхода является общий/единый пространственно-временной охват и сопоставимый масштабный ряд сопоставляемых

данных. При выполнении анализа рассчитывались площади полигонов выгоревших территорий, полученные по данным:

- MCD64A1 (аппаратура MODIS, 500 м, спутники Terra/Aqua);
- по индексу dNBR (dNBR47) со значениями 0.1–0.66 и выше (аппаратура MODIS, 500 м, спутники Terra/Aqua);
- по индексу dNBR (dNBR57) со значениями 0.27–0.66 и выше (аппаратура MODIS, 500 м, спутники Terra/Aqua);
- GFCDL (аппаратура ETM, 30 м, спутники Landsat).

Значения и характеристики разностного индекса гарей dNBR представлены в табл. 3 (Бондур, 2015, Бондур, Гордо, 2018, Bondur, Gordo, 2017, Бондур и др., 2016).

На рис. 7 приведены карта с расположением исследуемых участков и графики изменений индекса NBR с 2009 по 2017 гг., а также индекса dNBR в 2011 и 2017 гг.

Оценка точности определения площадей по данным продуктов MODIS проводилась с использованием индекса dNBR, рассчитанного для 7-ми участков с площадью от 85 до 1000 км², выгоревших в 2010 г. и расположенных в Европейской части России преимущественно на территории республики Марий Эл и частично в Нижегородской области в подтаежной зоне сосновых и смешанных лесов (см. рис. 7а).

Предварительно для каждого участка был рассчитан нормализованный индекс гари NBR (см. рис. 7б) за период 2009–2017 гг. Отметим, что со временем наблюдается отчетливая тенденция к восстановлению растительного покрова на всех участках (см. рис. 7в, 6з). Значение индекса NBR для участка № 5 фактически сравнялось с фоновым, что указывает на хороший темп восстановления за 9 лет (см. рис. 7б).

Таблица 3. Значения разностного индекса гарей dNBR

№	Значения dNBR	Характеристики индекса dNBR
1	<–0.25	Высокое пост-пожарное вегетативное возобновление/ не затронутая огнем территория
2	–0.25–(–0.1)	Низкое пост-пожарное вегетативное возобновление/ не затронутая огнем территория
3	–0.1–0.1	Не затронутая огнем территория
4	0.1–0.27	Низкий уровень поврежденности пожаром
5	0.27–0.44	Умеренно-низкий уровень поврежденности пожаром
6	0.44–0.66	Умеренно-высокий уровень поврежденности пожаром
7	>0.66	Высокий уровень поврежденности пожаром

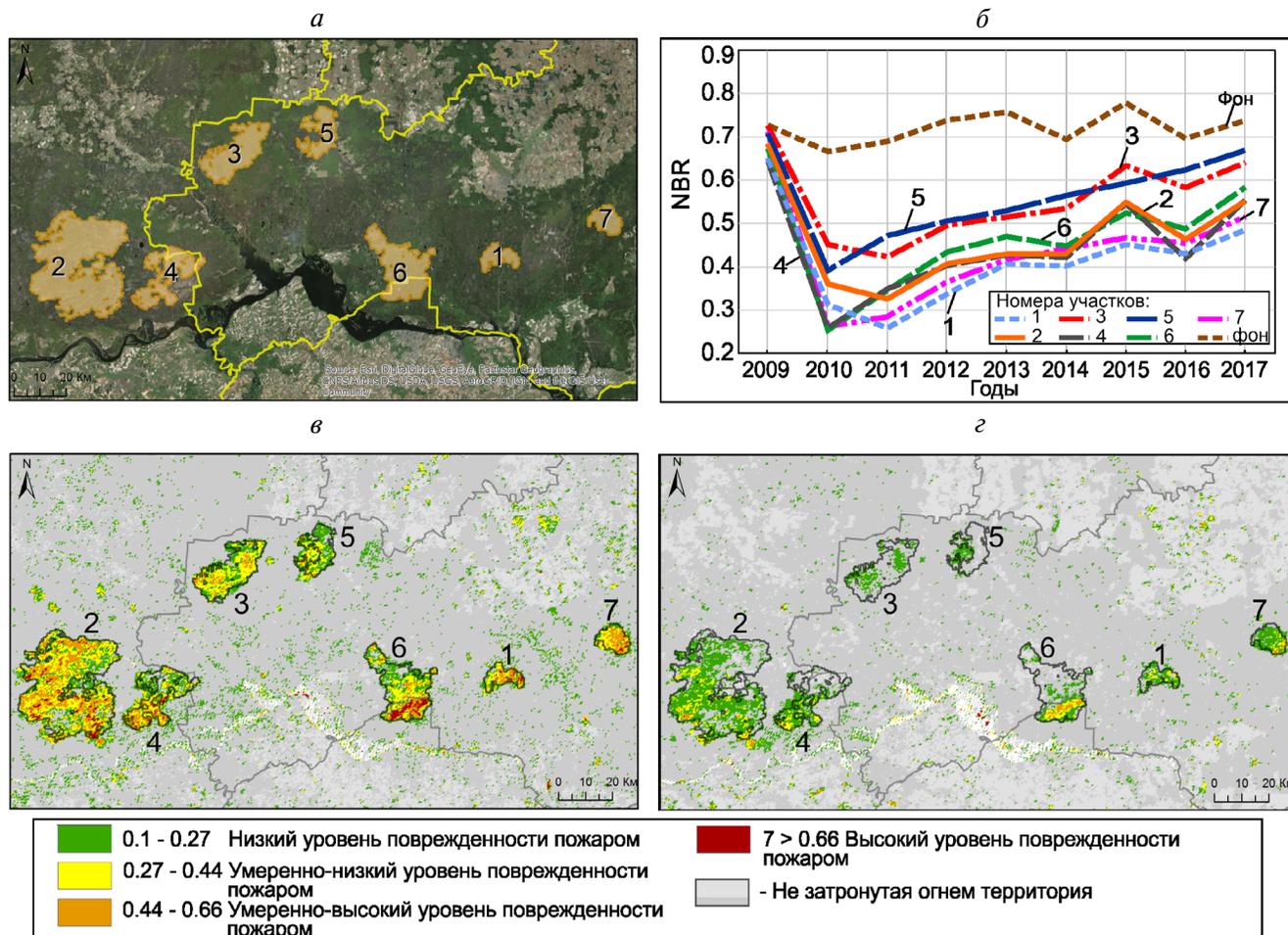


Рис. 7. Расположение участков исследований (а), графики изменения индекса NBR с 2009 по 2017 гг. (б), значения индекса dNBR в 2011 г. (в) и 2017 г. (г).

Участок № 1 характеризуется наименьшей скоростью восстановления, либо заменой коренного типа растительности, о чем говорит изменение индекса лишь на 0.2 за этот период времени.

На следующем этапе анализировался разностной индекс гарей (dNBR), вычисленный на основании разности индексов NBR, полученных для пред- и постпожарных дат с 2009–2017 гг. На рис. 7в и 7г в качестве примера приведены карты значений индекса dNBR в 2011 и 2017 гг. соответственно. Из анализа рис. 7 следует, что территории с изначально низким уровнем поврежденности пожаром за период с 2011 по 2017 гг. практически восстановились. Однако, значительная часть площадей, классифицированных по данным 2011 г., как территории с умеренным и высоким уровнем поврежденности пожаром все еще сохранилась в 2017 г. (см. рис. 7в, г).

На финальном этапе были проанализированы площади выгоревших территорий, получаемые по разным продуктам на основании данных

космического мониторинга. На рис. 8 представлены графические результаты восстановления границ выгоревших территорий на участке № 6 по данным космического мониторинга, выполненного со спутников серии TERRA/AQUA и Landsat. На примере участка № 6 видно, что непосредственное сопоставление площадей выгоревших территорий, полученных по данным MCD64A1 и GFCDFL, не даст достоверных результатов даже при совпадении внешних границ. Поэтому полученные значения dNBR для каждого участка были переклассифицированы в двух вариантах dNBR47 и dNBR57, которые и сопоставлялись с площадями GFCDFL.

В результате обработки космических данных за 2011 г. были рассчитаны выгоревшие площади для 7-ми участков тестовой территории и каждого типа информационных продуктов (см. табл. 4).

Из табл. 4 видно, что площади выгоревших территорий по данным GFCDFL и dNBR57 в среднем близки и характеризуются меньшими значениями,

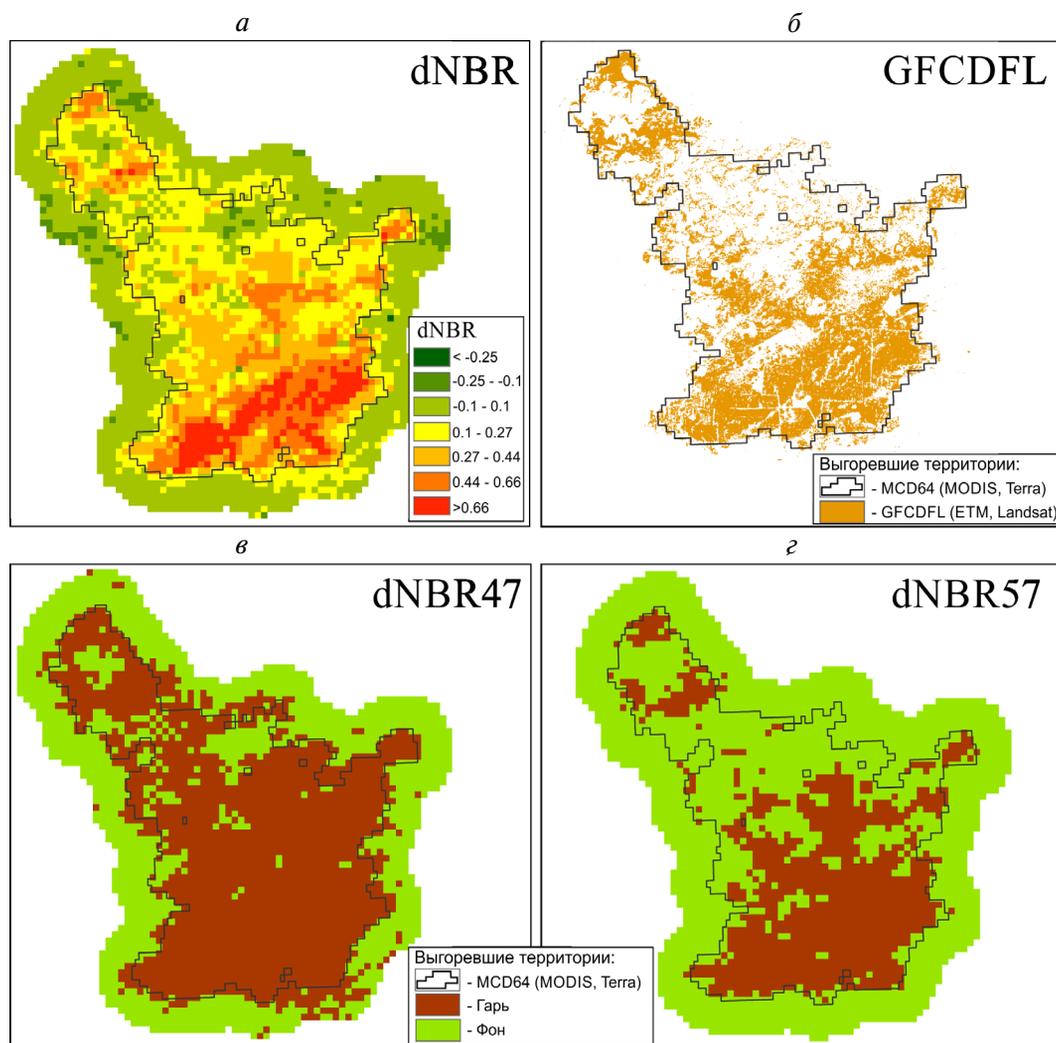


Рис. 8. Границы выгоревших территорий на участке № 6, полученные за 2011 г. с использованием продукта MCD64A1 (MODIS) — *а, в, г*, с использованием продукта GFCDFL Forest Loss (ETM) — *б*, на основе переклассификации разностного нормализованного индекса гари dNBR — *в, г*.

Таблица 4. Площади выгоревших участков тестовой территории, рассчитанные по различным продуктам на основании данных космического мониторинга в 2011 г.

Продукт	Площадь выгоревшей территории, км ²						
	Участок № 1	Участок № 2	Участок № 3	Участок № 4	Участок № 5	Участок № 6	Участок № 7
GFCDFL	61.14	486.9	166.3	123.6	125.3	165.5	82.1
MCD64 A1	85.9	988.1	290.8	244.1	146	364.4	93.5
dNBR47	126.9	1077.2	331.2	349.2	195.1	379.4	130.7
dNBR57	80.8	751.8	182	187.6	78.2	203.4	95.6

чем результаты, рассчитанные по MCD64 A1 и dNBR47, что подтверждает целесообразность выбора сопоставляемых площадей в настоящем исследовании.

Для оценки точности определения площадей выгоревших территорий (см. табл. 4) было использовано от 5000 до 1000 контрольных

точек, выбранных по dNBR47, dNBR57, MCD64 A, GFCDFL (референсные значения) для выгоревших участков и фона. В результате были получены значения точности и ошибки классификации по 2 классам (выгоревшая территория, фон) для продуктов MODIS на основе сопоставления с данными ETM, Landsat (см. табл. 5).

Таблица 5. Результаты оценки точности определения выгоревших площадей, обнаруженных по данным продуктов MODIS, и ошибки классификации по референсным данным GFCD Forest Loss (ETM, Landsat)

№ Участка	Продукты MODIS	Общая точность	Ошибка 1 рода «Ложная тревога» Commission Error	Ошибка 2 рода «Пропуск цели» Omission Error
№ 1	dNBR47	78%	0.36	0.07
	dNBR57	82%	0.20	0.28
	MCD64 A1	81%	0.26	0.25
№ 2	dNBR47	70%	0.41	0.02
	dNBR57	76%	0.32	0.20
	MCD64 A1	67%	0.42	0.13
№ 3	dNBR47	78%	0.36	0.03
	dNBR57	82%	0.17	0.31
	MCD64 A1	80%	0.32	0.10
№ 4	dNBR47	66%	0.53	0.05
	dNBR57	80%	0.36	0.29
	MCD64 A1	68%	0.51	0.33
№ 5	dNBR47	84%	0.24	0.08
	dNBR57	74%	0.14	0.57
	MCD64 A1	75%	0.30	0.33
№ 6	dNBR47	74%	0.45	0.05
	dNBR57	83%	0.24	0.31
	MCD64 A1	74%	0.44	0.08
№ 7	dNBR47	84%	0.27	0.03
	dNBR57	90%	0.10	0.13
	MCD64 A1	87%	0.13	0.18

Анализ табл. 5 показывает, что для большинства участков средняя точность определения площадей по результатам анализа продукта MCD64 A1 составляет 75%. В то же время, расчет площадей полностью выгоревших участков с использованием индекса dNBR57 позволил повысить среднюю точность до 81%.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования данных низкого пространственного разрешения для космического мониторинга территорий, подвергшихся природным пожарам, на региональном уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были проанализированы ежегодные серии данных космического мониторинга, получаемые со спутников Terra/Aqua и Landsat в период с 2002 г. по 2017 г. На основании проведенного анализа выявлены пространственно-временные вариации выгораемых площадей, а также их статистические характеристики как для всей территории России, так и для 8-ми федеральных округов.

Установлено, что наибольшие суммарные значения площадей, подвергшихся воздействию природных пожаров в исследуемый период времени, определяемых по данным MCD64A1, были зафиксированы в 2003 г. (219.21 тыс. км²), 2008 г. (234.46 тыс. км²) и 2014 г. (163.5 тыс. км²), а в целом по стране за год выгорало от 68.40 до 234.46 тыс. км². Для каждого федерального округа были выделены сезонные пики пожарной активности.

Учет выгоревших территорий вне сезона основной пожарной активности позволил выявить нелегальные с/х палы на территории ДФО и ЮФО.

Анализ частоты горимости площадей на территории России показал, что за 16-летний период порядка 20% преимущественно лесных территорий выгорало повторно.

В целом для всех федеральных округов России (начиная с 2009 г.) наблюдается тенденция к снижению выгораемых в результате природных пожаров территорий и их стабилизация (с 2016 г.). Это подтверждает результаты, представленные в работах (Бондур, 2015, Бондур, Гордо, 2018, Бондур и др., 2016, Bondur, Gordo, 2017). В последние годы

наименьшие значения выгоревших площадей были зарегистрированы: в ЮФО, СКФО и СФО в 2013 г. (3.30, 1.65 и 16.4 тыс. км² соответственно), в УрФО и ДФО в 2015 г. (0.54 и 22.09 тыс. км²), в ПФО в 2016 г. (2.29 тыс. км²), в ЦФО, СЗФО в 2017 г. (1.21 и 0.16 тыс. км²). Максимальное сокращение площадей выгорающих территорий характерно для ЦФО (с 26.03 тыс. км² в 2009 г. до 1.21 тыс. км² в 2017 г.).

На основании результатов анализа типов выгоревшей растительности в период с 2002 по 2017 гг. выявлены основные тенденции для каждого федерального округа, в том числе суммарные значения площадей и максимальные доли выгораний с определенным типом растительности от общей выгоревшей площади в федеральном округе, которые составили: для ЦФО 68% (95.33 тыс. км²) пахотные земли и 23% (31.7 тыс. км²) леса; для СЗФО 72% (16.13 тыс. км²) леса; для ЮФО 54% (139.33 тыс. км²) пахотные земли и 43% (112.11 тыс. км²) луга/степи; для СКФО 89% (64.51 тыс. км²) пахотные земли; для ПФО 59% (89.48 тыс. км²) пахотные земли, 34% (52.4 тыс. км²) луга/степи; для УрФО 68% (72.02 тыс. км²) леса; для СФО 64% (450.32 тыс. км²) леса и 22% (157.75 тыс. км²) луга/степи; для ДФО 81% (531.51 тыс. км²) леса.

Для оценки точности пространственного определения площадей полностью выгоревших лесных территорий была предложена методика, основанная на сопоставлении границ выгоревших территорий по данным космического мониторинга низкого пространственного разрешения (продукт MCD64 A1 MODIS) с данными Global Forest Change Data Forest Loss (продукт Landsat), используемых в качестве референсных данных. Установлено, что общая точность определения границ полностью выгоревших территорий по данным MCD64 A1 в среднем составляет 75% для участков с площадью от 50 км².

Полученные результаты указывают на эффективность использования данных космического мониторинга для количественной оценки пространственно-временной динамики выгоревших в результате природных пожаров участков для территории России, а также для выявления трендов и характера процессов восстановления растительного покрова на месте гарей.

Предложенные подходы позволяют получать качественное и экономически выгодное информационное обеспечение для систем принятия управленческих решений по уменьшению и предотвращению ущерба от природных пожаров на федеральном и региональном уровнях на основе результатов космического мониторинга.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0061).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса // Под редакцией Бондура В.Г. М.: Научный мир, 2012. 558 с.

Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лулян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лулян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.

Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.

Бондур В.Г. Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. doi: 10.7868/S0205961415060032

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 // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. doi: 10.7868/S0205961416060105

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 // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55. doi: 10.7868/S020596141803003X

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

Бондур В.Г., Гинзбург А.С. Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Доклады академии наук. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. doi: 10.7868/S0869565216040186

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16. doi: 10.7868/S0205961414010035

Бондур В.Г., Воробьев В.Е. Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исследование

- Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24. doi: 10.7868/S0205961415040028
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- 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 // Доклады академии наук. 2019. Т. 485. № 6.
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Лукин А.А.* Космический мониторинг состояния северных территорий, нарушенных нефтедобычей // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 35–44. doi: 10.7868/S0205961416060014
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Потапов И.И.* Методы аэрокосмической диагностики лесных экосистем // Экологические системы и приборы. 2010. № 3. С. 17–26.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с.
- 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 307–320.
- Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.Н.* Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004, 312 с.
- Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Губаев А.В., Полевщиков Ю.А., Лемешева Е.Н.* Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 217–229.
- Ильина В.Н.* Пирогенное воздействие на растительный покров. Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Самара, 2011. Т. 20. № 2. С. 4–30.
- Лукина Н.В., Исаев А.С., Крышень А.М., Онучин А.А., Сиринов А.А., Гагарин Ю.Н., Барталев С.А.* // Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами. Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–254.
- Стыценок Ф.В.* Разработка и применение методики и автоматизированной технологии оценки пирогенной гибели лесов на основе спутниковых данных / Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Москва, 2016. 131 с.
- Швиденко А.З., Щенащенко Д.Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Belward A. (ed.)* The IGBP-DIS Global 1 Km Land Cover Data Set “DISCover”: Proposal and Implementation Plans: Report of the Land Recover Working Group of IGBP-DIS. Toulouse: IGBP-DIS, 1996. 61 p.
- 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. pp. 227–238.
- Chu T., Guo X.,* Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // Remote Sens. 2014, 6, 470–520; doi:10.3390/rs6010470
- Chu T., Guo X., Takeda K.,* Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest // Ecological Indicators, 62. 2016. Pages 32–46, ISSN1470–160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026>
- Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A., Hermsilla T., White J.C.* Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series // Remote Sensing of Environment, V. 205. 2018. P. 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.007>
- Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.006.
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MCD64A1.006
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 72–85.
- Gonzalez C.M., Gerard F., Balzter H., Riaño D.* Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia

- using remotely sensed vegetation indices // *Glob. Chang. Biol.* 2009, V. 15, P. 561–577.
- Hall J.V. et al. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 184. P. 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.022>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853. <https://rosreestr.ru>
<https://biogeo.ru/index.php/poleznye-ssylki-i-fajlovyj-arkhiv/fajlovyj-arkhiv>
- Hua T., Zhao W., Liu Y., Wang S., Yang S. Spatial Consistency Assessments for Global Land-Cover Datasets: A Comparison among GLC2000, CCI LC, MCD12, GLOBCOVER and GLCNMO // *Remote Sens.* 2018, V. 10, P. 1846.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products, *International Journal of Digital Earth*, 2018. doi: 10.1080/17538947.2018.143372
- Jin Y., Randerson J.T., Goetz S.J., Beck P.S.A., Loranty M.M., Goulden M.L. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests. 2012. *J. Geophys. Res.* V. 117, P. G01036.
- Lappalainen H.K., Kerminen V.M., Petäjä 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, doi:10.5194/acp-16–14421–2016
- Li X., Zhang H., Yang G., Ding Y., Zhao J. Post-Fire Vegetation Succession and Surface Energy Fluxes Derived from Remote Sensing // *Remote Sens.* 2018. V. 10, P. 1000.
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E. Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing — A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 26. P. 64–79.
- Ryu J.-H., Han K.-S., Hong, S., Park N.-W., Lee Y.-W., Cho J. Satellite-Based Evaluation of the Post-Fire Recovery Process from the Worst Forest Fire Case in South Korea // *Remote Sens.* 2018. V. 10. P. 918.
- Sukhinin A.I. et al. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies // *Remote Sens. Environ.* 2005. V. 94. P. 428.
- Sulla-Menashe D., Gray J.M., Abercrombie S.P., Friedl M.A. Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 222. P. 183–194.
- Vermote E. MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006

Satellite Monitoring of Wildfire Impacts on the Conditions of Various Types of Vegetation Cover in the Federal Districts of the Russian Federation

V. G. Bondur, M. N. Tsidilina, E. V. Cherepanova

AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow

Here we present the results of the analysis of multi-year satellite data series collected by Terra/Aqua (6 collections of MCD64A1 “Burned Area” monthly product) and Landsat satellites to assess the dynamics of vegetation affected by wildfires for the whole territory of Russia and its regions. An approach to use remote sensing and geoinformatic methods to monitor wildfire impacts on the conditions of various types of vegetation without involving in-situ data has been suggested. The capability to apply the normalized burned area index for the assessment of vegetation damage degree and recovering character using low-resolution satellite data has been demonstrated. It was established that between 2002 and 2017, 68.40 to 234.46 thousand km² of vegetation cover had been burned out in Russia annually. Seasonal peaks of fire activity, laws of spatial distribution of fire sites, and main types of burned out vegetation for each of 8 Russian federal districts have been revealed. The accuracy of determination of burned out areas based on low-resolution (500 m) data using mid-resolution (30 m) data was 75–81% depending on the used data product.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring, satellite data, geoinformatics, vegetation cover, wildfires, burned areas

REFERENCES

- Aerokosmicheskiy monitoring obektov neftegazovogo kompleksa [Aerospace monitoring of objects of oil and gas facilities] // Ed. by V. Bondur. Moscow: Nauchny Mir, 2012. 558 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 sputnikovyykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ [Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data] // Sovr. Probl. DZZ Kosm. 2012. V. 9. № 2. P. 9–27. (in Russian).
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A.* Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov [Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality] // Lesovedenie. 2015. № 2. P. 83–94. (in Russian).
- Belward A.* (ed.) The IGBP-DIS Global 1 Km Land Cover Data Set “DISCover”: Proposal and Implementation Plans: Report of the Land Recover Working Group of IGBP-DIS. Toulouse: IGBP-DIS, 1996. 61 p.
- 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.* Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. doi: 10.1134/S0001433814090060
- Bondur V.G.* Printsipy postroeniya kosmicheskoy sistemy monitoringa Zemli v ekologicheskikh i prirodno-resursnykh tselyakh [Principles of construction of the Earth monitoring space system in the purposes of the environment and natural resources] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 1995. № 2. P. 14–38. (in Russian).
- 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. 1078–1090. 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.
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008. № 5. P. 9–14. (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Distsionnoe zondirovanie rastitelnosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008. № 6. P. 64–73. (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.
- 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. pp. 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., Krapivin V.F., Potapov I.I.* Metody aerokosmicheskoy diagnostiki lesnykh ekosistem [Aerospace diagnostics of the forest ecosystems] // *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2010. № 3. P. 17–26. (In Russian).
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring i prognozirovaniye prirodnykh katastrof [Monitoring and forecasting of the natural disasters]. Moscow: 2009. 692 p. (In Russian)
- Bondur V.G., Savin A.I.* Design of a system to monitor the environment for purposes relating to ecology and natural resources // *Soviet Journal of Remote Sensing*. 1993. Vol. 10. № 6. P. 1078–1093.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs of aerospace imagery processing and classification] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2001. № 3. S. 118–143. (in Russian).
- 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.
- 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
- Bondur V.G., Vorobyev V.E., Lukin A.A.* Satellite monitoring of the northern territories disturbed by oil production // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. pp. 1005–1013. doi: 10.1134/S0001433817090067
- Chu T., Guo X.* Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review // *Remote Sens*. 2014. 6. 470–520; doi: 10.3390/rs6010470
- Chu T., Guo X., Takeda K.* Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest // *Ecological Indicators*. V. 62. 2016. Pages 32–46. ISSN1470–160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.026>
- Frazier R.J., Coops N.C., Wulder M.A., Hermsilla T., White J.C.* Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. V. 205. 2018. P. 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.007>

- Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MCD12Q1.006
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MCD64A1.006
- Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. P. 72–85.
- Gonzalez C.M., Gerard F., Balzter H., Riaño D.* Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // *Glob. Chang. Biol.* 2009. V. 15. P. 561–577.
- Hall J.V. et al.* A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 184. P. 506–521. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.022>
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853. <https://biogeography.org/index.php/poleznye-ssylki-i-fajlovyj-arkhiv/fajlovyj-arkhiv>
<https://rosreestr.ru>
- Hua T., Zhao W., Liu Y., Wang S., Yang S.* Spatial Consistency Assessments for Global Land-Cover Datasets: A Comparison among GLC2000, CCI LC, MCD12, GLOBCOVER and GLCNMO // *Remote Sens.* 2018, V. 10. P. 1846.
- Humber M.L., Boschetti L., Giglio L., Justice C.O.* Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products, *International Journal of Digital Earth*, 2018. doi: 10.1080/17538947.2018.143372
- Ilina V.N.* Pirogennoe vozdeystvie na rastitelnyy pokrov [Pirogenic impact on vegetation cover] // *Samarskaya Luka: problemy regionalnoy i globalnoy ekologii*. 2011. Vol. 20. № 2. P. 4–30. (In Russian).
- Jin Y., Randerson J.T., Goetz S.J., Beck P.S.A., Loranty M.M., Goulden M.L.* The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests. 2012. *J. Geophys. Res.*, V. 117. P. G01036.
- Lappalainen H.K., Kerminen V.M., Petäjä 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. doi:10.5194/acp-16-14421-2016
- Li X., Zhang H., Yang G., Ding Y., Zhao J.* Post-Fire Vegetation Succession and Surface Energy Fluxes Derived from Remote Sensing // *Remote Sens.* 2018. V. 10. P. 1000.
- Lukina N.V., Isaev A.S., Kryshen A.M., Onuchin A.A., Sirin A.A., Gagarin Yu. N., Bartalev S.A.* Prioritetnye napravleniya razvitiya lesnoy nauki kak osnovy ustoychivogo upravleniya lesami [Research priorities in forest science — the basis of sustainable forest management] // *Lesovedenie*. 2015. No. 4. P. 243–254 (In Russian).
- Mouillot F., Schultz M.G., Yue C., Cadule P., Tansey K., Ciais P., Chuvieco E.* Ten Years of Global Burned Area Products from Spaceborne Remote Sensing — A Review: Analysis of User Needs and Recommendations for Future Developments // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 26. P. 64–79.
- Ryu J.-H., Han K.-S., Hong, S., Park N.-W., Lee Y.-W., Cho J.* Satellite-Based Evaluation of the Post-Fire Recovery Process from the Worst Forest Fire Case in South Korea // *Remote Sens.* 2018. V. 10. P. 918.
- Savin A.I., Bondur V.G.* Scientific fundamentals of creation and diversification of the global aerospace systems // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2000. V. 13. № 1. P. 38–53.
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G.* Climate change and wildfires in Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2013. V. 6. № 7. P. 683–692.
- Stytsenko F.V.* Razrabotka i primenenie metodiki i avtomatizirovannoy tekhnologii otsenki pirogennoy gibeli lesov na osnove sputnikovykh dannykh [Developing and applying the method and automatic technology for assessment of pyrogenic forest mortality based on satellite data] // PhD Thesis. Moscow, 2016. 131 p. (In Russian).
- Sukhinin A.I. et al.* Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies // *Remote Sens. Environ.* 2005. V. 94. P. 428.
- Sulla-Menashe D., Gray J.M., Abercrombie S.P., Friedl M.A.* Hierarchical mapping of annual global land cover 2001 to present: The MODIS Collection 6 Land Cover product // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 222. P. 183–194.
- Vermote E.* MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD09A1.006
- 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.
- Vorobev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.N.* Lesnye pozhary na territorii Rossii: sostoyanie i problemy [Forest fires in Russia: situation and problems]. Moscow: DEKS-PRESS, 2004. 312 p. (in Russian).
- Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Polevshikova Yu.A., Demisheva E.N.* Metodika vyyavleniya stepeni povrezhdeniya drevostoev posle pozharov 2010 goda v Srednem Povolzhe [The method of identifying burn severity of disturbed forest stands after wild fires of 2010 in Middle Povolzhje] // *Sovr. Probl. DZZ Kosm.* 2014. V. 11. № 4. P. 217–229. (in Russian).