

Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения)

Е. А. Лупян¹, С. А. Барталев¹, И. В. Балашов¹, В. А. Егоров¹, Д. В. Ершов^{1,2},
Д. А. Кобец¹, К. С. Сенько¹, Ф. В. Стыщенко¹, И. Г. Сычугов¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Москва, 117997, Россия*

Для изучения различных процессов, связанных с возникновением и действием лесных пожаров, значительный интерес представляют объективные данные о площадях, пройденных огнём, полученные за достаточно продолжительный период. Подобную информацию по территории России, в силу её протяжённости и разнородности, можно получить только с использованием спутниковых наблюдений. Одним из достаточно надёжных источников такой информации являются данные, получаемые на основе наблюдений активного горения. Эти данные имеют свои недостатки, связанные в первую очередь с низким пространственным разрешением (от сотен метров до километра). В то же время они обеспечивают приемлемую для контроля распространения лесных пожаров частоту наблюдений (несколько раз в сутки). И что наиболее важно для подобных данных, уже накоплены достаточно большие, однородные (сопоставимые по пространству и времени) ряды данных. Это позволяет использовать их не только для оперативного анализа лесопожарной ситуации, но и для получения информации о долговременной динамике пирогенной обстановки на больших территориях. В настоящей работе представлена методика оценки и анализа площадей, пройденных лесными пожарами, на основе данных спутниковых наблюдений активного горения, разработанная в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Данная методика более десяти лет используется в различных научных и прикладных системах, в том числе в Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации (ИСДМ-Рослесхоз, <https://nffc.aviales.ru>). Особое внимание в работе уделяется вопросам, связанным с обсуждением точности получаемых оценок. Также в работе кратко представлены возможности различных инструментов, реализованных в системе ВЕГА-Science (<http://sci-vega.ru/>), для анализа долговременных рядов данных о лесных пожарах. Основное внимание уделено вопросам представления и обсуждения данных о лесных пожарах, действовавших на территории России в пожароопасные сезоны 2001–2016 гг. В работе представлены оценки площадей, пройденных лесными пожарами в этот период. При этом приводится информация не только о суммарных площадях, пройденных лесными пожарами на территории страны, но и в каких типах лесов они возникали и распространялись и в какие периоды пожароопасных сезонов. В работе, в частности, показано, что хотя в общей площади лесных пожаров не наблюдается существенных трендов, площади пожаров на покрытых лесом территориях в 21 столетии в среднем заметно выросли. В работе также приводится информация о частоте возникновения пожаров на различных территориях и её изменениях в различные периоды 21 столетия.

Ключевые слова: спутники наблюдения Земли, информационные технологии, дистанционный мониторинг, лесные ресурсы, мониторинг лесных пожаров, площади, пройденные лесными пожарами в РФ

Одобрена к печати: 15.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175

Введение

Мониторинг лесных пожаров важен для изучения различных природных и антропогенных процессов, в том числе в связи с изменениями климата и экологического состояния окружающей среды. Традиционно для решения различных научных и прикладных задач особый интерес представляет информация, на каких территориях возникали и развивались лесные пожары. То есть информация о площадях, пройденных лесными пожарами за разные годы в различных регионах, данные о возникновении и действии пожаров на территориях,

заняты различными типами лесов, распределение частоты возникновения пожаров по времени (сезону), регионам и типам территорий. Именно обсуждению таких характеристик пожаров, наблюдавшихся на территории России в 21 веке (в период с 2001 по 2016 г.), и посвящена настоящая работа. Отметим, что особый интерес представляет объективная и однородная информация, позволяющая сопоставлять наблюдения в различные моменты времени, что делает возможным анализ долговременных рядов данных. Подобную информацию о пожарах, действовавших на территории России, в силу её протяжённости, в настоящее время можно получать только с использованием спутниковых наблюдений. Не случайно данному вопросу посвящено значительное число работ (Анисимов и др., 2012; Буряк и др., 2011; Пономарёв, Швецов, 2015; Пономарев, Харук, 2016; Харук, Пономарев, 2017; Швиденко, Щепаченко, 2013; Loupian et al., 2006; Roy et al., 2008; Sukhinin et al., 2003, 2005; Tansey et al., 2008). В то же время, практически отсутствуют работы, которые представляли бы информацию по всей территории России за указанный период времени.

Следует отметить, что основными способами получения информации о площадях лесных пожаров в настоящее время являются оценки на основе детектирования:

- 1) повреждений лесного покрова по спутниковым данным высокого пространственного разрешения (30 м и лучше);
- 2) повреждений лесного покрова по спутниковым данным среднего пространственного разрешения (порядка 100–300 м);
- 3) активного горения (до последнего времени для решения данной задачи использовалась информация с пространственным разрешением от сотен метров до километра).

Все эти способы имеют свои преимущества и недостатки.

Первый способ оценки площади, безусловно, даёт наиболее точные результаты для отдельных пожаров. Однако в настоящее время нет полностью автоматизированных методов обработки таких данных, позволяющих достаточно надёжно получать информацию о площадях гарей, возникших на больших территориях. Поэтому для массовой обработки информации на уровне крупных регионов или страны в целом приходится использовать методы, требующие участия операторов (см. например, (Барталев и др., 2012, 2014; Кашницкий и др., 2015)). Это приводит с одной стороны к достаточно большим затратам и времени обработки данных, а с другой — вносит определённую субъективность в процесс обработки. Всё это затрудняет получение однородных долговременных рядов данных по всей территории России. Поэтому в настоящее время однородных рядов такой информации по всей территории России за рассматриваемый период фактически не существует.

Второй способ оценки площади лесных пожаров в настоящее время основывается на достаточно хорошо разработанных, проверенных и полностью автоматизированных методах обработки спутниковых данных, позволяющих выделять и картографировать участки леса, повреждённые огнём (см. например, (Барталев и др., 2015; Стыценко и др., 2013)). Данные методы позволяют получить долговременные однородные ряды данных о площадях, на которых возникли повреждения лесного покрова. В то же время, поскольку для получения оценок нужны полностью свободные от облачности спутниковые данные, которые могут в ряде случаев получаться со значительной временной задержкой после окончания пожара, то часть площадей, на которых произошли незначительные повреждения, могут не детектироваться. Это приводит к занижению получаемых оценок. Отметим, что таким же недостатком обладает и первый способ. Кроме этого, ни первый, ни второй способ не могут дать ответа на вопрос, на какой территории возник пожар.

Третий способ основывается на достаточно устойчивых и также полностью автоматизированных методах детектирования участков активного горения (см., например, Giglio et al., 2006). Недостатки данного способа в первую очередь связаны с низким пространственным разрешением используемых данных (от сотен метров до километров). В то же время, частота получения таких данных хотя и не очень высокая (несколько раз в сутки), но приемлемая для контроля распространения лесных пожаров, которые в основном имеют не очень высокую скорость распространения, в отличие от степных и других травяных пожаров. Это позволяет достаточно быстро обнаруживать пожары, определять территории, на которых они возникли, объединять информацию о конкретном пожаре, получаемую в различные моменты времени,

контролировать территорию, по которой распространяется огонь, и оценивать её площадь. Для целей настоящей работы наиболее важно, что к настоящему времени накоплены достаточно большие однородные (сопоставимые по пространству и времени) ряды наблюдений. Это позволяет использовать результаты, получаемые на основе данного метода, не только для оперативного анализа ситуации, но и для получения информации о долговременной динамике пирогенной обстановки на больших территориях.

Естественно, что для анализа долговременных рядов характеристик лесных пожаров на основе данных активного горения необходимо было создать специальную технологию работы с такой информацией. Обсуждению данного вопроса посвящён отдельный раздел настоящего исследования, в котором будет кратко изложена технология работы с данными долговременных наблюдений лесных пожаров, реализованная в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б). В следующем разделе работы мы остановимся на вопросах оценки точности характеристик лесных пожаров, получаемых на основе детектирования активного горения. В последнем разделе приведём и обсудим различную статистику по лесным пожарам, действовавшим на территории России в период с 2001 по 2016 г.

1. Метод оценки площадей, пройденных лесными пожарами, на основе детектирования активного горения по данным спутниковых наблюдений

Детектирование активного горения по данным спутниковых наблюдений — достаточно традиционная задача. Наиболее часто при организации мониторинга природных пожаров используется информация, получаемая с низкоорбитальных спутниковых систем, таких, например, как NOAA (прибор AVHRR), Terra, Aqua (прибор MODIS), Suomi NPP (прибор VIIRS), которые в основном ориентированы на решение метеорологических задач. Для детектирования пожаров обычно используются ИК-каналы 3,7 и 11–12 мкм. Как уже отмечалось, в настоящее время имеются достаточно надёжные алгоритмы автоматизированного выделения на спутниковых изображениях «горячих точек» (пикселов, далее ГТ), соответствующих участкам, на которых расположены высокотемпературные объекты. При этом наряду с пожарами детектируются и некоторые антропогенные объекты (например, трубы или факелы от отжига попутного газа), а также сильно нагретые участки земной поверхности. Для выделения из обнаруженных ГТ точек, соответствующих природным пожарам, также существуют различные подходы и технологии (см., например, (Флитман и др., 2011)). Таким образом, сегодня имеется возможность регулярно получать набор ГТ, соответствующих участкам горения природных пожаров.

С учётом того, что природный, в особенности лесной, пожар может быть достаточно протяжённым и длиться значительное время, ему обычно соответствует не одна ГТ, а некоторое их множество, которые могут быть детектированы разными спутниками в различное время. При этом площадь лесного пожара, как правило, не соответствует сумме площадей детектированных ГТ, что может быть вызвано следующими основными причинами:

- обычно горение занимает не всю площадь ГТ;
- горячие точки, обнаруженные в разные моменты времени, могут полностью или частично перекрываться.

Поэтому для того, чтобы определить площадь, пройденную конкретным пожаром, необходимо объединить все наблюдавшиеся ГТ, соответствующие пожару, в один объект и построить контур территории, на которой он действовал. Отметим, что, имея такой контур, можно не только оценить площадь пожара, но и провести его совместный анализ с различными картами, определяя, например, на территории какого региона действовал пожар, по каким типам растительности он прошёл и т.д. Хотя задача построения таких контуров, особенно при обработке больших объёмов данных наблюдений, в целом является не тривиальной, в настоящее время имеются хорошо проработанные методы её решения. Достаточно подробно вопросы, связанные с решением данной задачи, рассмотрены в ряде работ (Барталев и др., 2012; Флитман и др., 2011; Bartalev et al., 2013). Предложенная в этих работах схема построения общего контура пожара основана на том, что по мере поступления новых данных наблю-

дений (ГТ) по району действия пожара они добавляются в ранее сформированный полигон пожара. Общая схема такого добавления представлена на *рис. 1*. При этом с использованием различной картографической информации происходит аннотация отдельных ГТ, сформированных на их основе полигонов в конкретном сеансе наблюдения, а также результирующего текущего полигона пожара, получаемого на основе объединения данных, полученных в различные моменты времени. Под аннотированием понимается процедура сравнения полигонов с различными картами для определения, на каких территориях действовали пожары, и какая площадь была ими пройдена. В частности, получаемая информация позволяет выделить из всех наблюдаемых пожаров именно лесные. Обычно ими считаются пожары, которые затронули покрытые лесом территории. Таким образом, по завершению пожара мы имеем его окончательный контур (финальный полигон) с различными атрибутами: в каком регионе действовал, какую площадь прошёл (в том числе покрытую и не покрытую лесом), суммарные площади типов лесов, пройденных огнём, тип территории, на которой возник пожар и т.д. Вся эта информация для дальнейшего анализа сохраняется в специализированной базе данных. Отметим, что для аннотирования пожаров по типам лесных территорий используются ежегодно обновляемые карты лесного покрова, формируемые в ИКИ РАН на основе данных прибора MODIS для всей территории страны (Барталев и др., 2011, 2016).

На основе описанного подхода реализованы технологии работы с информацией об активном горении, получаемой на основе спутниковых данных в различных информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров. В том числе, она используется в Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Возможности данной системы подробно описаны в ряде ранее опубликованных работ (Барталев и др., 2008, 2010; Лупян и др., 2015а). Данный подход лежит и в основе функционирования блоков дистанционного мониторинга природных пожаров, реализованных в системе ФГБУ «НИЦ «Планета» Росгидромета (Лупян и др., 2014) и спутникового сервиса ВЕГА-Sience (Лупян и др., 2011), развиваемого ИКИ РАН в Центре коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б) для решения научных задач.

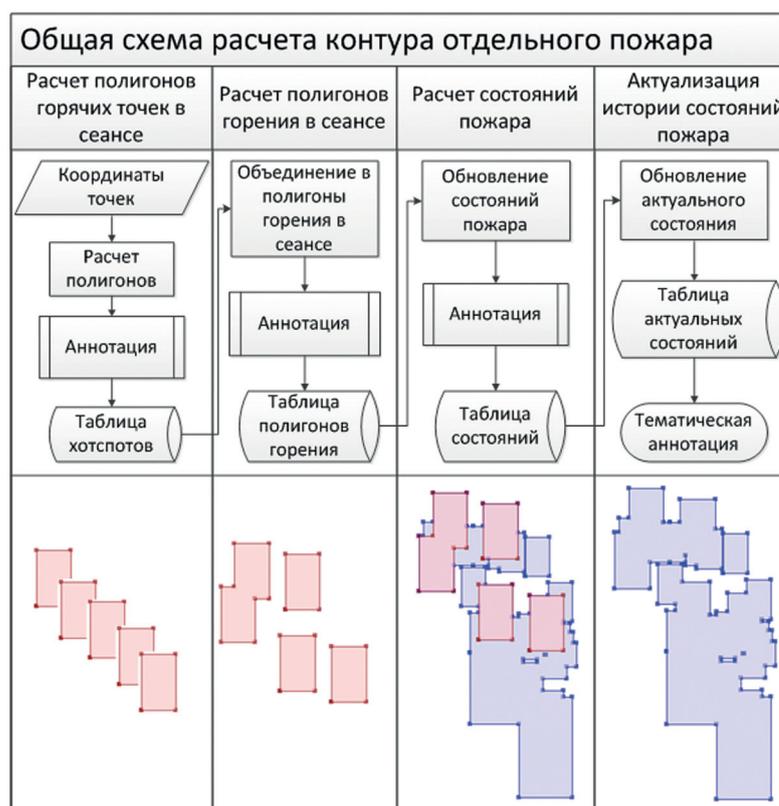


Рис. 1. Общая схема актуализации контура пожара при поступлении новых данных спутниковых наблюдений

Многие из этих систем работают уже более десяти лет. Столь долгий срок эксплуатации показал стабильность и надёжность его работы. В то же время нами проводилось постоянное совершенствование методов как оценки пройденных огнём площадей, так и картографирования лесного покрова. Поэтому с использованием разработок в данных направлениях, выполненных в последние годы в ИКИ РАН, в 2017 г. на базе архивов данных детектирования активного горения, накопленных в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» был проведён реанализ данных и построены актуальные однородные долговременные базы данных с информацией о лесных пожарах, действовавших на территории России в период с 2001 по 2016 г.

Отметим также, что для анализа долговременных рядов данных наблюдений за лесными пожарами в рамках спутникового сервиса ВЕГА-Sience разработаны специальные инструменты, достаточно подробно описанные, в частности, в ряде работ (например, (Кобец и др., 2015)). Эти инструменты были использованы для подготовки информации о лесных пожарах, действовавших на территории России в 21 веке, которая будет представлена в третьем разделе настоящей работы.

2. Точность оценки площадей, пройденных лесными пожарами

Перед тем как представить результаты анализа информации о лесных пожарах, действовавших на территории России в 21 веке, остановимся на вопросе точности рассматриваемых данных. В первую очередь на вопросе точности оценки площадей, пройденных лесными пожарами, получаемых на основе анализа данных об активном горении. Следует отметить, что для анализа информации, представляемой в данной работе, особой интерес представляет не точность оценки площадей отдельных пожаров, а точность оценки интегральных площадей пожаров, действующих на значительных территориях, в первую очередь, на территории России. Этот вопрос достаточно подробно рассмотрен в ранее опубликованной работе (Стыценко и др., 2016), в которой при сравнении площадей, получаемых на основе данных об активном горении, и оценок по данным Landsat, была построена зависимость относительных ошибок определения интегральной площади, пройденной лесными пожарами в анализируемых регионах, от пройденной огнём площади. Данная зависимость приведена на *рис. 2*. Точками на представленном графике отмечены наблюдавшиеся относительные ошибки оценки площади в различных регионах в различные годы.

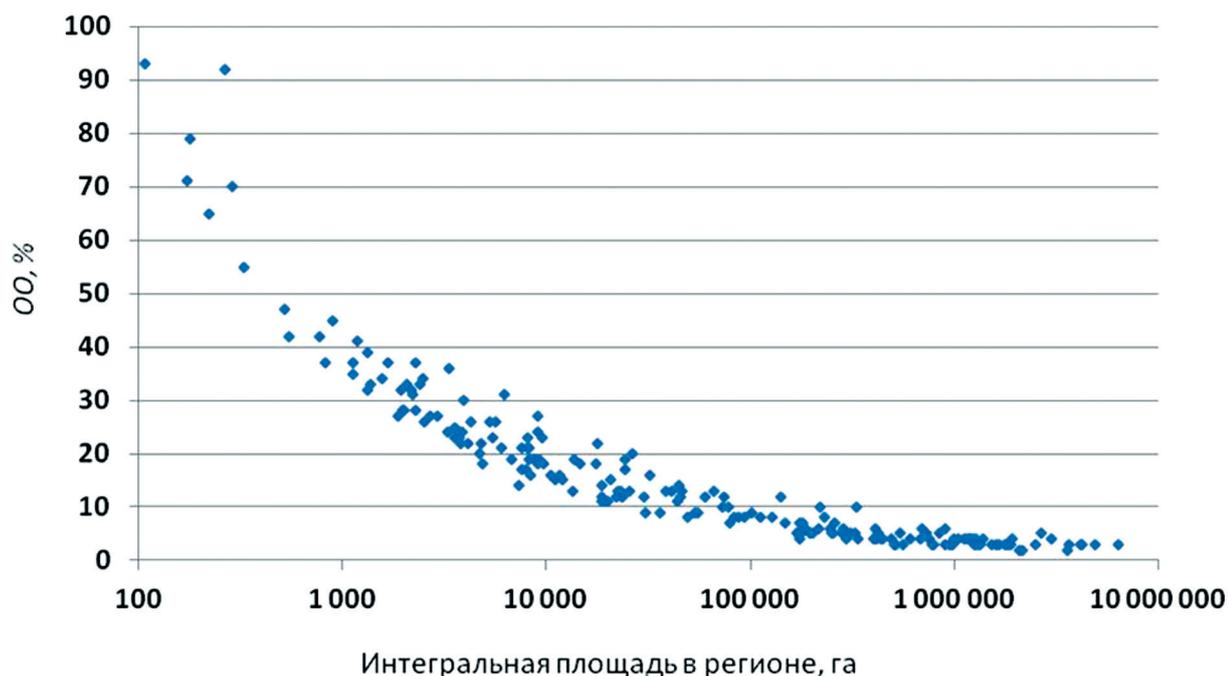


Рис. 2. Зависимость относительных ошибок оценки интегральной площади, пройденной лесными пожарами в анализируемых регионах, от площади, пройденной огнём (Стыценко и др. 2016)

Представленные зависимости показывают, что в случае, когда площадь, пройденная лесными пожарами в анализируемом регионе, превышает 7000 га, ошибка её оценки, получаемой на основе информации о детектировании активного горения по спутниковым данным, не превышает 30%. В регионах с высоким уровнем горимости лесов (более 100 000 га) ошибка оценки площади, пройденной лесными пожарами в регионе, не превышает 10%. В ситуациях, когда интегральная площадь лесных пожаров на исследуемой территории превышает 1 млн га, ошибки её оценки падают до 2–3%. На всей территории России, как будет показано ниже, в среднем за пожароопасный сезон, даже без учёта годов аномального горения, общая площадь лесных пожаров составляет около 8 млн га. Таким образом, если мы строим такие оценки для всей территории России, их ошибка будет составлять несколько процентов.

3. Анализ данных наблюдений лесных пожаров на территории России в 21 веке

Настоящий раздел посвящён представлению информации о лесных пожарах, действовавших на территории России в пожароопасные сезоны 2001–2016 гг., полученной на основе анализа результатов детектирования активного горения по спутниковым данным. В настоящей работе мы также отметим отдельные особенности, наблюдающиеся в рядах различных характеристик лесных пожаров.

Также особо отметим, что приводимые в данной работе данные могут существенно отличаться от информации, предоставляемой системой ИСДМ-Рослесхоз (Барталев и др., 2010; Лупян и др., 2015а). Связано это, в частности, с тем, что они получены по всей территории России, а ИСДМ-Рослесхоз, в основном, в обсуждаемый период была ориентирована на сбор и представление информации по территориям лесного фонда, входящим в зоны охраны.

Начнём с представления информации о *числе лесных пожаров*, зарегистрированных на территории России в пожароопасные сезоны 2001–2016 гг. Эти данные приведены на *рис. 3*. Число наблюдающихся пожаров в различные годы может достаточно сильно изменяться год от года (примерно от 8 до 20 тысяч в различные годы). В среднем за анализируемый период наблюдалось примерно 15 тысяч лесных пожаров в год. Следует отметить, что также наблюдается достаточно сильный отрицательный тренд уменьшения ежегодного числа регистрируемых по спутниковым данным лесных пожаров в период с 2001 по 2016 г.

В то же время, *общая площадь, проходимая лесными пожарами (рис. 4)*, не имеет явно выраженных трендов. Общая площадь лесных пожаров год от года также имеет значительные вариации (от 5 до 25 млн га). В среднем за анализируемый период лесными пожарами проходит площадь около примерно 10 млн га. Если в расчёте среднего не учитывать годы аномального горения (в которых общая площадь лесных пожаров превышала более 15 млн га), то средняя общая площадь лесных пожаров составляет 8 млн га. Необходимо, однако, отметить, что если среднесуточная площадь, проходимая лесными пожарами, в среднем достаточно стабильна, то *площади, проходимые пожарами по различным территориям, занятым разными типами растительного покрова*, могут иметь свою, порою разнонаправленную, динамику. Так, на *рис. 5* видно, что в период с 2001 по 2016 г. наблюдается достаточно устойчивый тренд увеличения покрытой лесом площади, проходимой пожарами, в то время как тренд в не покрытых лесом площадях имеет выраженный отрицательный характер. При этом в среднем за анализируемый период пожаром проходит около 5,6 млн га покрытых лесом площадей и около 4,4 млн га непокрытых лесом площадей. Без учёта годов аномального горения средняя площадь территорий, покрытых лесом, проходимая лесными пожарами, составляет 4,5 млн га, а непокрытых лесом — 3,5 млн га. Также различаются и площади, которые *пожары прошли по территориям, покрытым лесами различного типа*, такая информация представлена на *рис. 6*. Хорошо видно, что в хвойных вечнозелёных, лиственных и смешанных лесах нет существенных трендов в наблюдаемых площадях пожаров. В то же время на территориях хвойных листопадных лесов в период с 2001 по 2016 г. наблюдается существенный положительный тренд. Отметим также, что если рассматривать не абсолютные значения площади, проходимой пожарами в различных типах лесов, а относительные (отнесённые к площади, занятой лесами соответствующего типа на территории России), то видим заметные положительные

тренды не только для хвойных листопадных, но и для хвойных вечнозелёных лесов (рис. 7). При этом в среднем за анализируемый период пожаром проходило в хвойных листопадных лесах ~2,5 млн га, в хвойных вечнозелёных лесах ~1,1 млн га, в лиственных лесах ~1 млн га, в смешанных лесах ~0,3 млн га. Что составляет для хвойных листопадных лесов ~1,5%, хвойных вечнозелёных лесов ~1%, лиственных лесов ~1%, смешанных лесов ~0,4% занимаемой данными типами лесов площади.

На наш взгляд, интерес также представляет информация о *средней площади пожаров*, наблюдавшихся в анализируемый период. Такая информация представлена на рис. 8. Хорошо видно, что наблюдаются положительные тренды как в общей, так и лесной площади, проходимой лесными пожарами. В то же время в нелесной площади наблюдается отрицательный тренд. Отметим также, что достаточно хорошо видна корреляция средней площади пожаров, наблюдаемых в конкретном году, от общей площади, пройденной лесными пожарами в том же году (рис. 9).

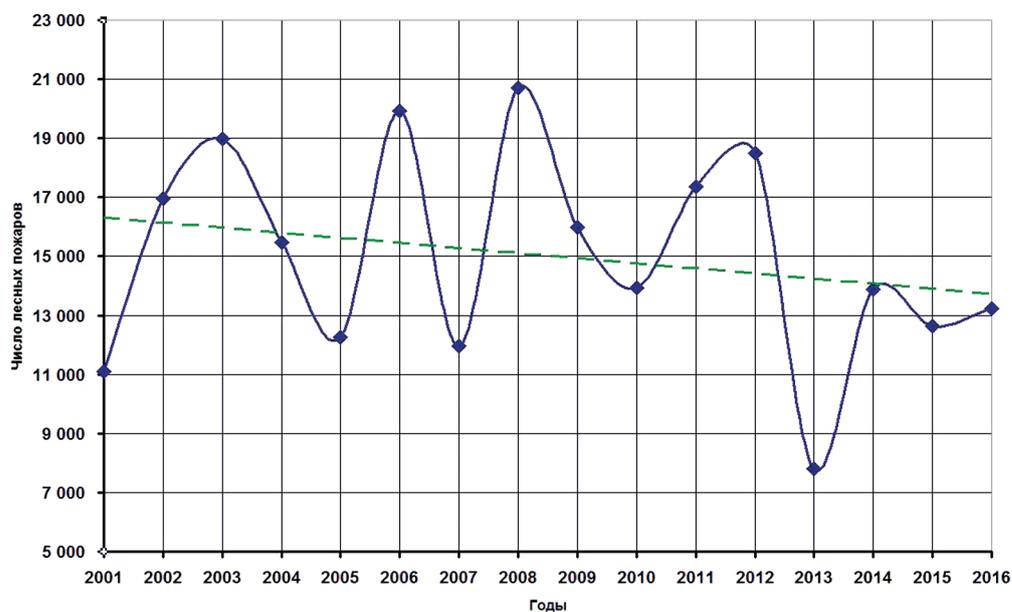


Рис. 3. Число лесных пожаров, ежегодно регистрируемых на территории России в период с 2001 по 2016 г. (синяя линия). Зелёной линией показана линия тренда

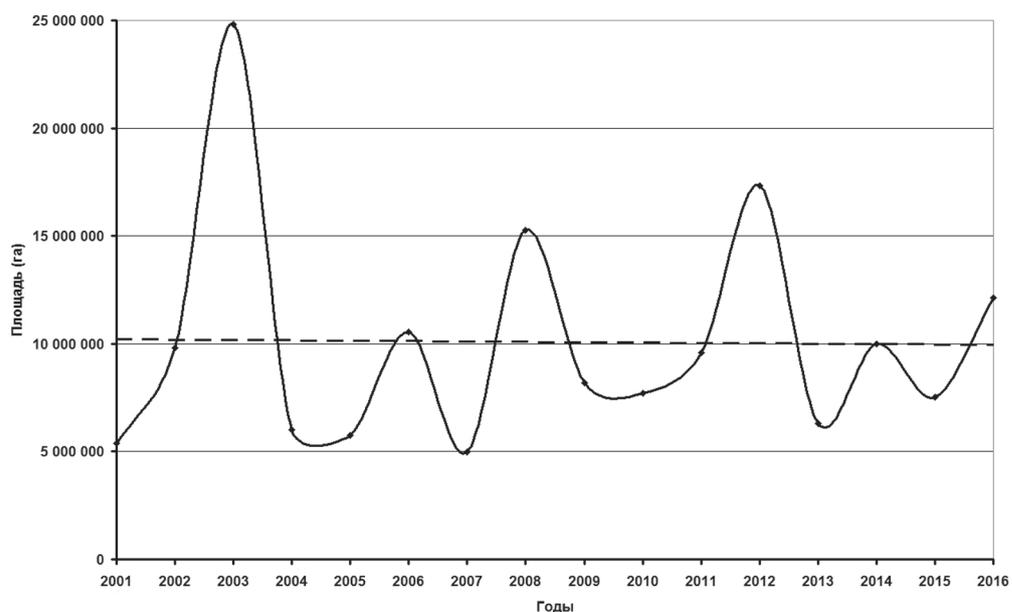


Рис. 4. Общая площадь, ежегодно проходимая лесными пожарами на территории России в период с 2001 по 2016 г. Прерывистая линия — линия тренда

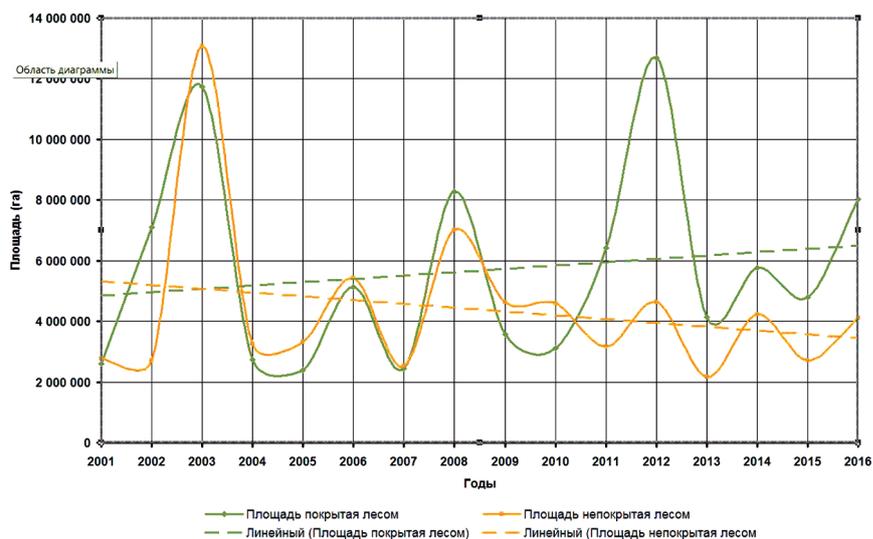


Рис. 5. Покрытая и непокрытая лесом площадь, пройденная лесными пожарами на территории России в период с 2001 по 2016 г.

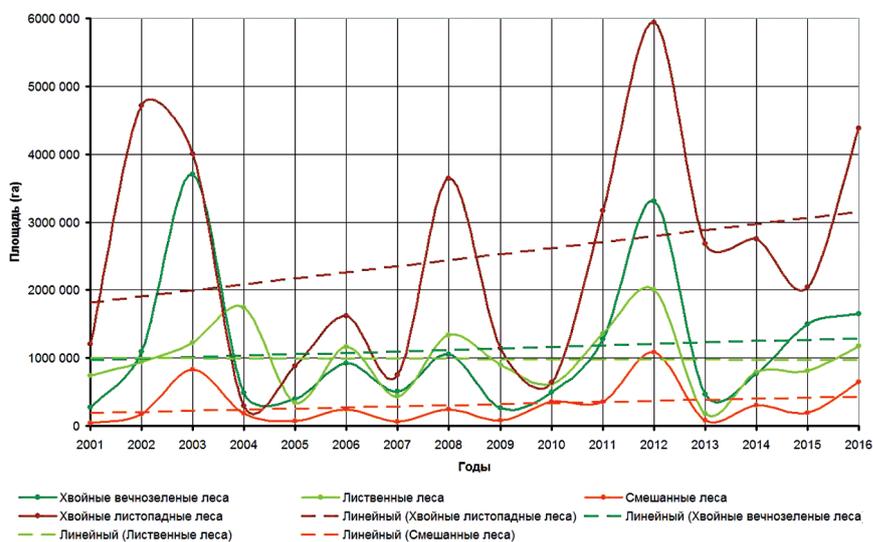


Рис. 6. Площадь лесных пожаров, зарегистрированных на территории России в период с 2001 по 2016 г. в различных типах лесов

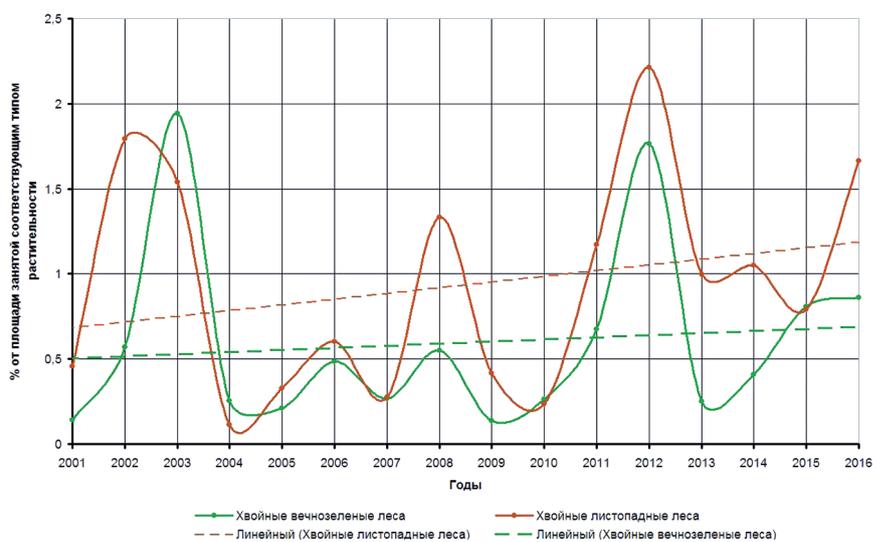


Рис. 7. Площадь лесных пожаров, зарегистрированных на территории России в период с 2001 по 2016 г. в различных типах лесов в % к площади соответствующего типа

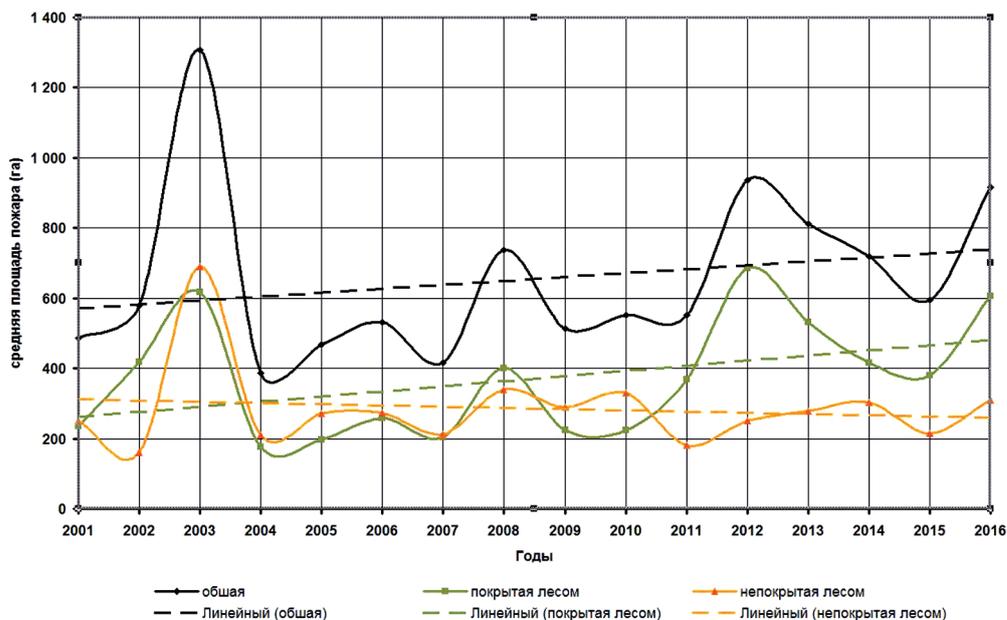


Рис. 8. Средняя площадь лесных пожаров на территории России в период с 2001 по 2016 г.

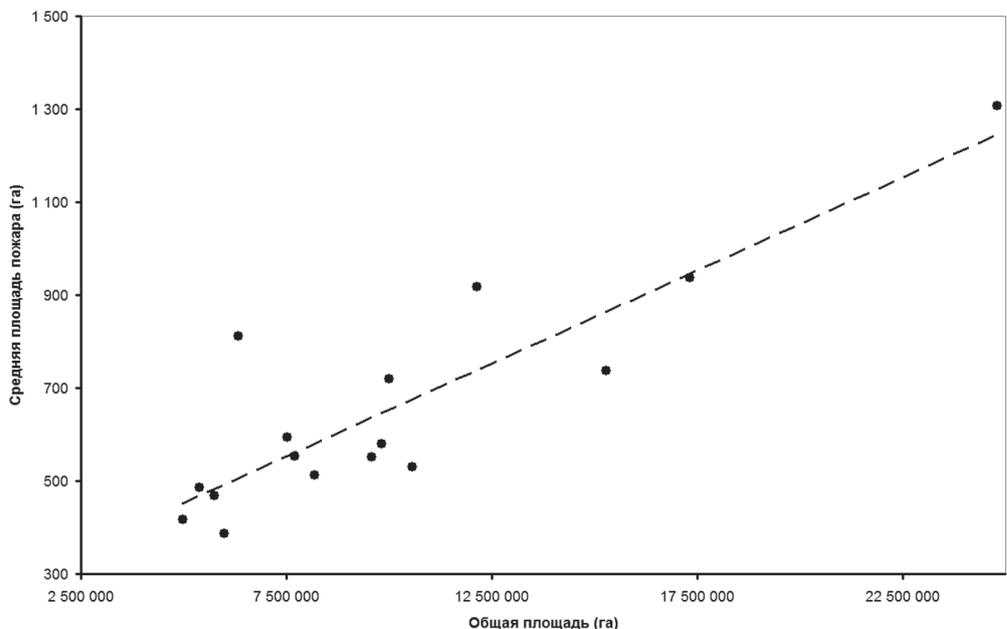


Рис. 9. Зависимость средней площади пожаров в сезоне от общей площади, пройденной лесными пожарами в том же сезоне (наблюдения за период с 2001 по 2016 г.)

Имеющаяся информация позволяет также анализировать *действие лесных пожаров в течение пожароопасного сезона*. На рис. 10 приведено среднее распределение площадей, покрытых лесом, проходимых пожарами в различные дни года, полученное на основе данных за 2001–2016 гг. На распределении хорошо видны два основных пика горимости (весенний и летний), а также небольшой пик, который наблюдается осенью. Природа такого распределения достаточно хорошо известна и обсуждалась различными авторами, в частности, она описывается в работах (Коровин, Андреев, 1988). В то же время достаточно интересны такие распределения, построенные для лесов различных типов (рис. 11). Хорошо видно, что для разных типов лесов такие распределения могут сильно отличаться. Так пожары, действующие на территории лиственных лесов, имеют только один явно выраженный пик горения — весенний, а летний пик горения для хвойных листопадных лесов существенно выше весеннего пика. Подобная информация обычно используется для планирования мероприятий по организации охраны лесов от пожаров на конкретных территориях.

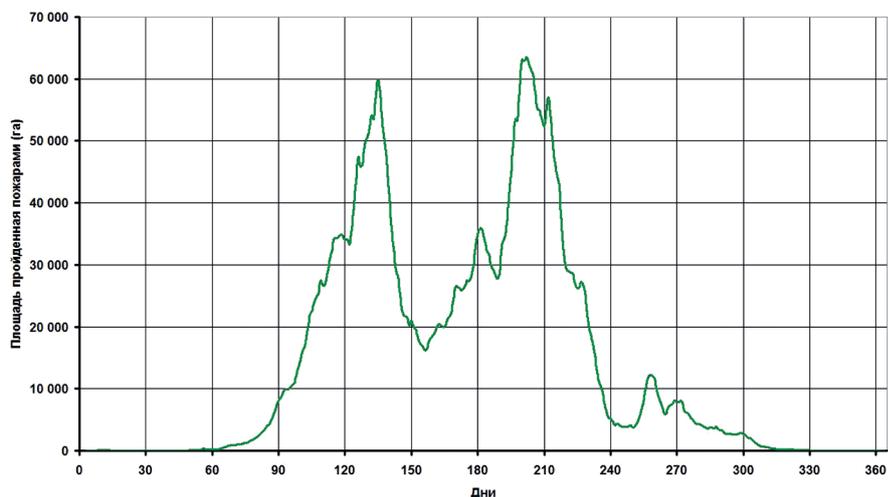


Рис. 10. Лесная площадь, проходимая пожарами за день. Средние значения за семь дней по данным, накопленным по территории России в период с 2001 по 2016 г.

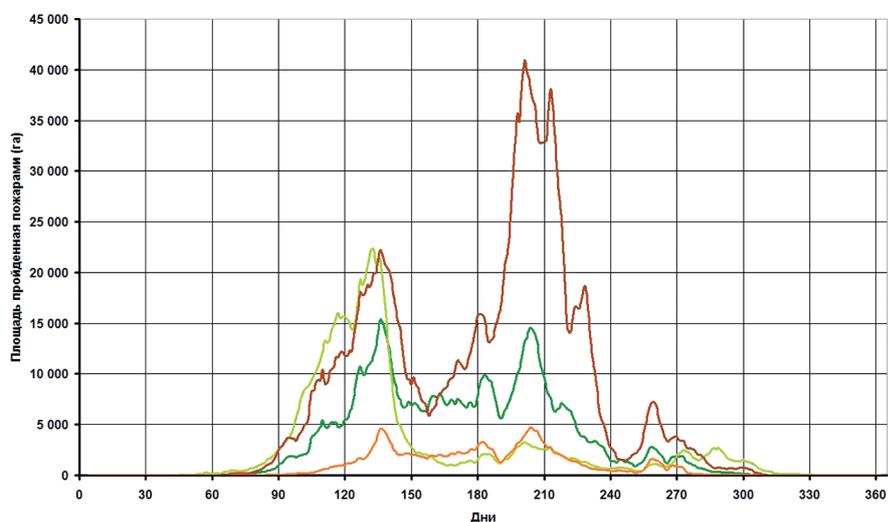


Рис. 11. Лесная площадь, проходимая пожарами за день (по типам леса). Средние значения за семь дней по данным, накопленным по территории России в период с 2001 по 2016 г.

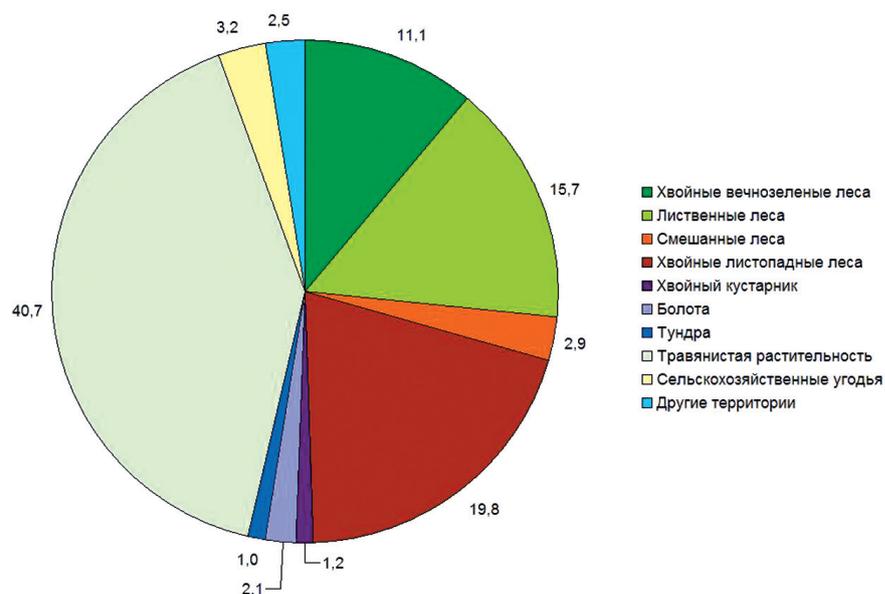


Рис. 12. Распределение числа точек регистрации (возникновения) пожаров по разным типам территорий (%)

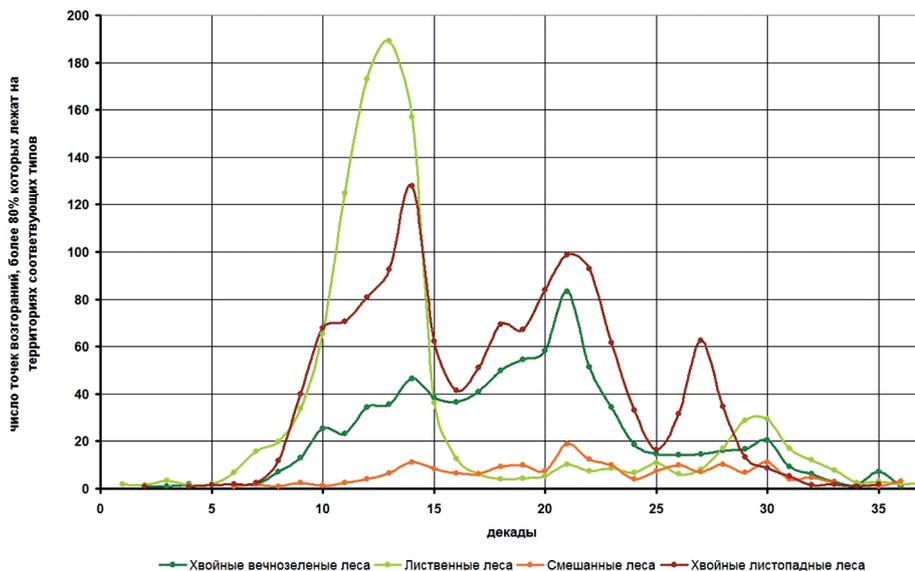


Рис. 13. Распределение числа точек регистрации (возникновения) пожаров по сезону для разных типов леса

Отдельное внимание уделим также вопросам, связанным с анализом информации о *точках регистрации (возникновения) пожаров*. На рис. 12 представлено распределение точек возникновения пожаров по типам территорий. Для построения данного распределения выбирались только точки возникновения пожаров, более 80 % площади которых находится на территории, покрытой одним типом растительности. То есть точки, для которых тип территории, на котором они расположены, определяется практически однозначно. При построении распределения использовались данные с 2001 по 2016 г. за исключением данных аномального 2003 г. Следует обратить внимание, что только около 50 % пожаров возникает на покрытых лесом территориях. При этом только около 3 % лесных пожаров возникает из-за сельскохозяйственных палов (под сельскохозяйственными землями мы понимаем земли, на которых за последние пять лет проводились операции по их обработке). В то же время около 44 % лесных пожаров начинается в результате пожаров на территории, занятой травянистой растительностью (включая сельскохозяйственные земли). При этом 80 % таких пожаров возникает в период с 6 по 17 декаду (с начала марта по начало июня), при этом пик распределения числа возникающих пожаров по декадам приходится на конец апреля – начало мая. На рис. 13 приведено распределение точек возникновения пожаров в лесах различного типа в течение года. Представленное распределение достаточно хорошо коррелируется с распределением площадей, проходимых лесными пожарами в различные дни года (см. рис. 11). Можно также обратить внимание на следующую особенность для пожаров, возникших в хвойных листопадных лесах. Хотя весенний и летний пики в распределении точек возникновения имеют практически одинаковую величину (возникает одинаковое количество пожаров), в распределении площадей, проходимых за день пожарами на этом типе территории, летний пик фактически в два раза выше весеннего.

В заключение раздела кратко остановимся на анализе *пространственного распределения лесных пожаров по территории России*. Для расчёта такого распределения анализируемая территория разбивалась нами на ячейки $0,1 \times 0,1^\circ$ и в них считались различные характеристики пожаров. На рис. 14 приведены построенные на основе данных наблюдений за период с 2001 по 2015 г. распределения по территории России следующих характеристик пожаров: средняя площадь, проходимая пожарами в анализируемых ячейках, среднее число дней горения в году, число возгораний (попавших в ячейку точек возникновения пожаров). На распределении видно, что лесные пожары в основном возникают на территориях, на которых, безусловно, присутствует человек, но плотность населения на них достаточно низка (в основном некоторый «коридор» вокруг транссибирской магистрали в Сибири и на Дальнем Востоке). Это, видимо, объясняется тем, что на этих территориях недостаточно сил и средств для обеспечения надлежащей охраны лесов.

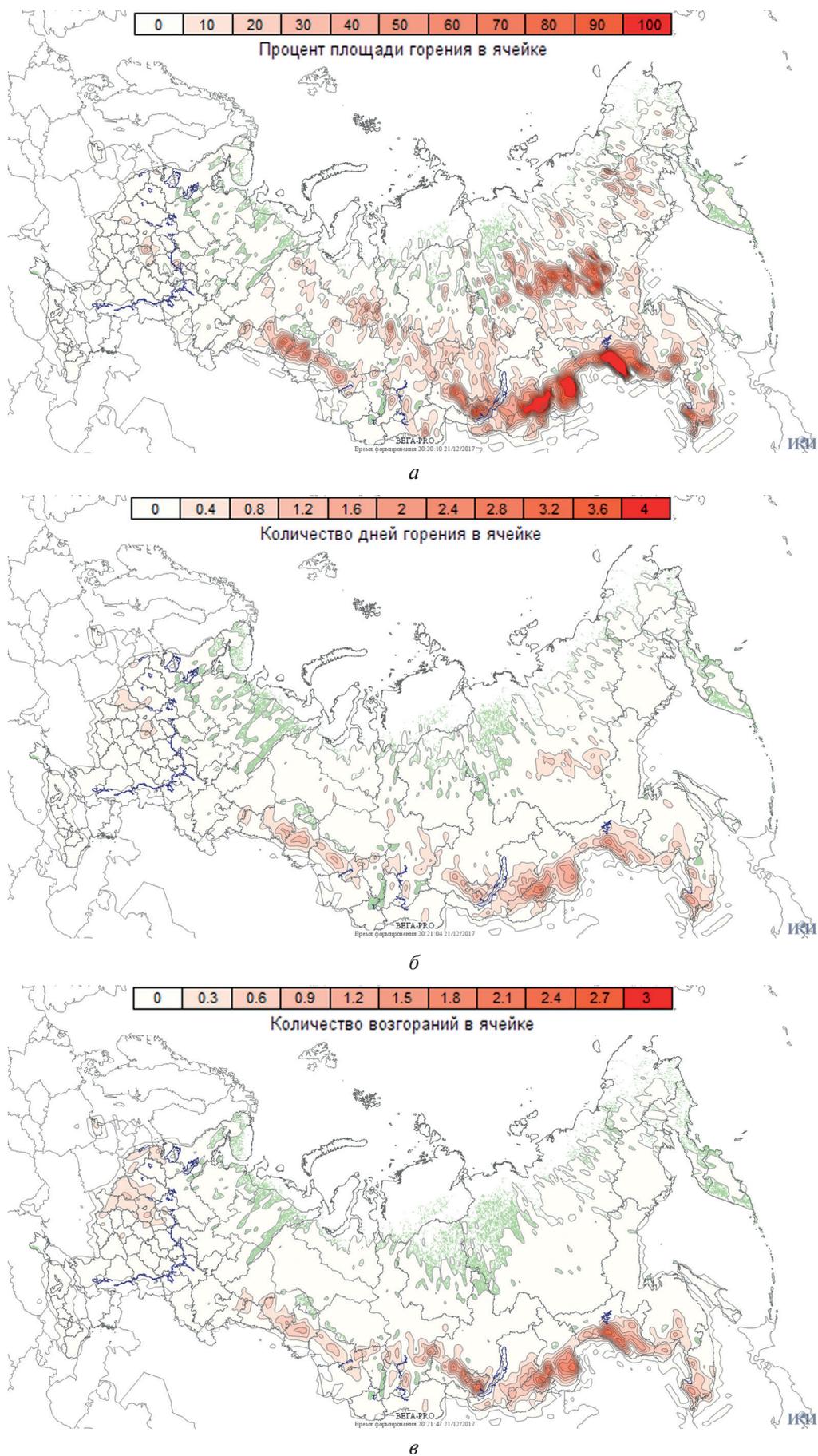


Рис. 14. Распределение пожаров по территории России за 2001–2015 гг.: *а* — средняя площадь, проходящая пожарами за сезон; *б* — среднее число дней горения за сезон; *в* — количество возгораний в среднем за сезон

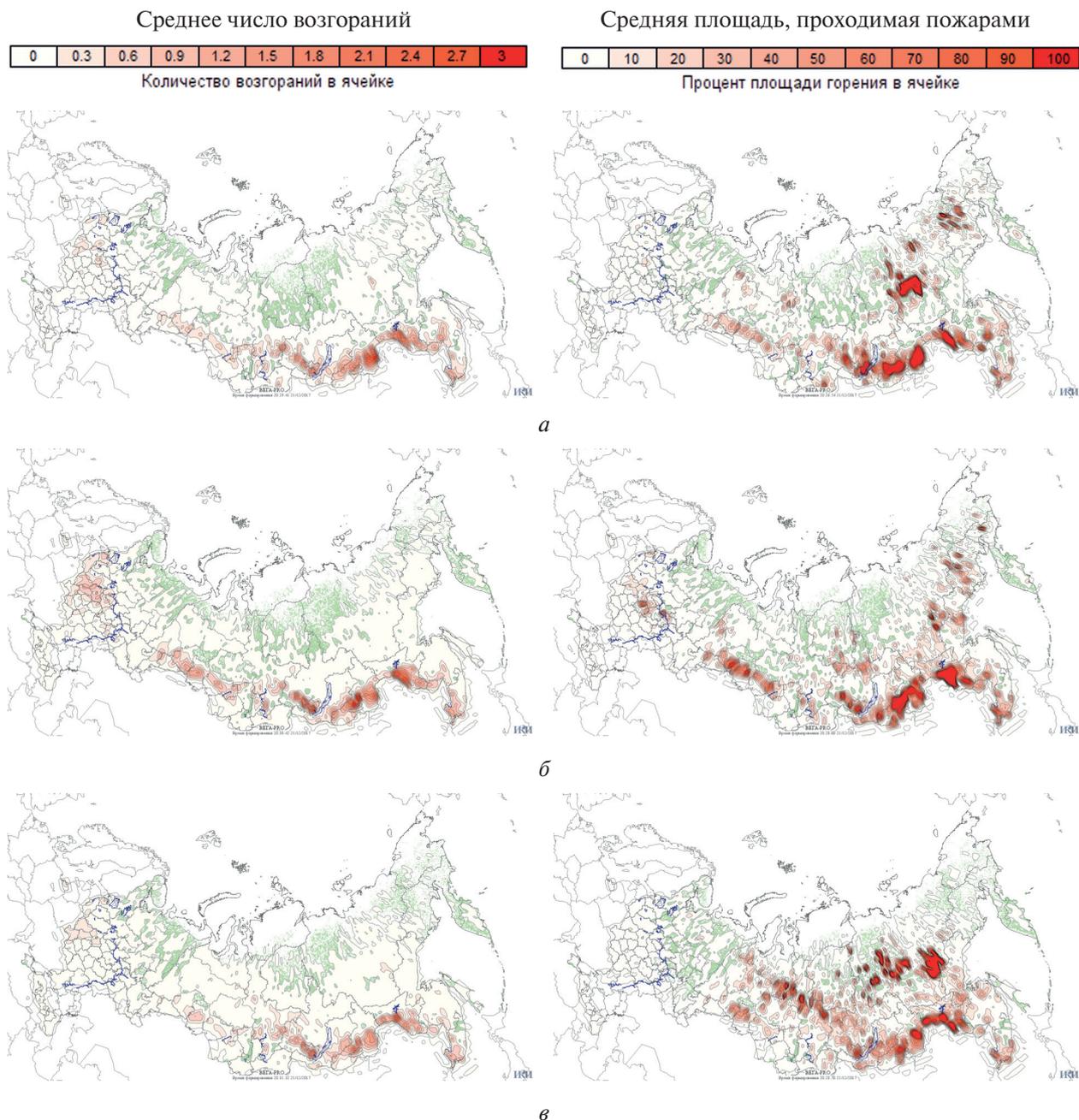


Рис. 15. Распределение пожаров по территории России за периоды:
 а — 2001–2005 гг.; б 2006–2010 гг.; в — 2011–2015 гг.

Отметим, что такого не наблюдается в достаточно густо населённых европейских территориях России. Имеющаяся информация также позволяет провести некоторый анализ, как менялось распределение пожаров по территории в период с 2001 по 2015 г. На рис. 15 приведены распределения числа точек возникновения пожаров и площади, проходимой пожарами за периоды: с 2001 по 2005 г., с 2006 по 2010 г. и с 2011 по 2015 г. На представленных иллюстрациях, в частности, хорошо видно, что распределение точек возгорания по территории России меняется в эти периоды незначительно, а распределение площадей, пройденных огнём, на ряде территорий имеет значительные вариации. Это, в частности, может быть связано как с изменениями условий распространения пожаров (например, погодных условий), так и с изменением схем и правил охраны лесов.

Заключение

Таким образом, видно, что в настоящее время в ИКИ РАН накоплена обширная база данных наблюдений за лесными пожарами, которая позволяет проводить достаточно детальный анализ различных характеристик горимости. В перспективе имеющаяся информация и инструменты для её анализа, реализованные в рамках системы ВЕГА-Science, позволят более детально изучить различные особенности лесных пожаров на территории как всей страны, так и её регионов, в которых наблюдается значительное число лесных пожаров.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (Государственный контракт 14.607.21.0122, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI60715X0122) с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2015б).

Литература

1. Анисимов О. А., Борщ С. В., Георгиевский В. Ю., Инсаров Г. Э., Кобышева Н. В., Костяной А. Г., Кренке А. Н., Семенов С. М., Сиротенко О. Д., Фролов И. Е., Хлебникова Е. И., Шерстюков Б. Г. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. 509 с.
2. Барталев С. А., Еришов Д. В., Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Щетинский В. Е. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.
3. Барталев С. А., Еришов Д. В., Коровин Г. Н., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Щетинский В. Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
4. Барталев С. А., Егоров В. А., Еришов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
5. Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян 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.
6. Барталев С. А., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Панова О. Ю., Ефремов В. Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
7. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
8. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
9. Буряк Л. В., Сухинин А. И., Каленская О. П., Пономарёв Е. И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 3. С. 331–339.
10. Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Барталев С. А., Барталев С. С., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Стыценко Ф. В. Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
11. Кобец Д. А., Балашов И. В., Данилов И. Д., Лупян Е. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А. Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
12. Коровин Г. Н., Андреев Н. А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
13. Лупян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
14. Лупян Е. А., Милехин О. Е., Антонов В. Н., Крамарева Л. С., Бурцев М. А., Балашов И. В., Толпин В. А., Соловьев В. И. Система работы с объединёнными информационными ресурсами, получаемыми на

- основе спутниковых данных в центрах НИЦ «Планета» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97.
15. Лупян Е. А., Барталев С. А., Ершов Д. В., Котельников Р. В., Балашов И. В., Бурцев М. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Жарко В. О., Ковганко К. А., Колбудаев П. А., Крашенинникова Ю. С., Прошин А. А., Мазуров А. А., Уваров И. А., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Флитман Е. В., Хвостиков С. А., Шуляк П. П. (2015а) Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 222–250.
 16. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
 17. Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журн. 2016. № 1. С. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104.
 18. Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054.
 19. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
 20. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Иванова А. А., Лупян Е. А., Сычугов И. Г. Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 189–298. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
 21. Флитман Е. В., Балашов И. В., Бурцев М. А., Галеев А. А., Егоров В. А., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Прошин А. А. Построение системы работы с данными прибора MODIS для решения задач мониторинга лесных пожаров и их последствий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 127–138.
 22. Харук В. И., Пономарев Е. И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413–419. DOI:10.7868/S0367059717060026.
 23. Швиденко А. З., Шенащенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
 24. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Flitman E. V., Loupian E. A., Stytsenko F. V. Assessment of Burned Forest Areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ Imagery // Global Forest Monitoring from Earth Observation / eds. F. Achard, M. C. Hansen; CRC Press, Taylor and Francis Group. CRC Press, 2013. P. 259–286.
 25. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 87. P. 273–282.
 26. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altynsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Loboda T., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G. Satellite monitoring of forest fires in Russia at regional levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. No. 1. С. 113–145.
 27. Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J. The Collection 5 MODIS Burned Area Product — Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 3690–3707.
 28. Sukhinin A. I., Ivanov V. V., Ponomarev E. I., Slinkina O. A., Cherepanov A. V., Pavlichenko E. A., Romasko V. Y., Miskiv S. I. The 2002 Fire season in the Asian part of the Russia Federation: A view from space // International Forest Fire News. 2003. V. 28. P. 18–28.
 29. Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S., Hewson J. H., Soja A. J., Csiszar I., Hyer E. J., Loboda T., Conard S. G., Romasko V. I., Pavlichenko E. A., Miskiv S. I., Slinkina O. A. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 94. P. 546–564.
 30. Tansey K., Gregoire J. M. C., Defourny P., Leigh R. J., Van Bogaert E., Bartholomé E., Bontemps S. A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. P. L01401.

Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)

E. A. Loupian¹, S. A. Bartalev¹, I. V. Balashov¹, V. A. Egorov¹, D. V. Ershov^{1,2},
D. A. Kobets¹, K. S. Senko¹, F. V. Stytsenko¹, I. G. Sychugov¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia
E-mail: smis@smis.iki.rssi.ru

² Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia

Objective data on the burnt forest areas obtained over a long observation period are urgently needed for the studies of various processes connected with the occurrence and consequences of forest fires. This kind of information for the territory of Russia can only be obtained with the use of satellite observations because of its large area and heterogeneity. One of the most trusted sources of this information is based on the observations of active burning. These data have their drawbacks caused primarily by the low spatial resolution of the data used (from hundreds of meters to kilometers). At the same time they provide an acceptable frequency of observations to monitor the spreading of forest fires (several times a day). And what is most important about these data, the large, homogeneous (comparable in space and time) data sets have already been accumulated. It makes it possible to use the data not only for real-time monitoring of forest fire status, but also to obtain information about the long-term dynamics of the forest fires distribution in large areas. This paper presents the methodology of assessment and analysis of the forest burnt areas based on satellite observations of active burning developed at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS). This methodology has been used for more than ten years in a number of scientific and applied systems, including the Information System for Remote Monitoring of Forest Fires, the Federal Forestry Agency of the Russian Federation (ISDM Rosleskhoz, <https://nffc.aviales.ru>). Particular attention is paid to the issues of accuracy assessment of the obtained estimates. The paper also summarizes the capabilities of various tools implemented in the VEGA-Science system (<http://sci-vega.ru/>) for analysis of long time series on forest fires accumulated in the system. The main focus is presentation and discussion of data on forest fires, that occurred in the territory of Russia during the fire seasons of the years 2001–2016. The paper presents estimates of the areas, burnt by forest fires during this period. It should be noted, that the information given not only concerns the total burnt forest areas estimates in the territory of the country, but also the particular burnt area distribution between certain forest types and between specific periods of fire seasons. In particular, the paper concludes that although the dynamics of total burnt forest area did not demonstrate any significant trends, it is still notable that the average burnt forest areas have been considerably increased during the 21st century. The paper also provides information about the frequency of the fires occurrence in different areas and how it changed in specific periods of the 21st century.

Keywords: Earth observation satellites, information technologies, remote monitoring, forest resources, forest fires monitoring, forest burnt area in Russia

Accepted: 15.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175

References

1. Anisimov O. A., Borshch S. V., Georgievskii V. Yu., Insarov G. E., Kobysheva N. V., Kostyanoi A. G., Krenke A. N., Semenov S. M., Sirotenko O. D., Frolov I. E., Khlebnikova E. I., Sherstyukov B. G., *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system* (Methods of assessing the effects of climate change on physical and biological systems), Moskva, Roshydromet, 2012, 509 p.
2. Bartalev S. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Shchetinskii V. E., *Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva RF (sostoyaniye i perspektivy razvitiya)* (Forest fires remote monitoring information system of the Russian Federal Agency for Forestry (status and development prospects)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, Vol. 2, pp. 419–429.
3. Bartalev S. A., Ershov D. V., Korovin G. N., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Shchetinskii V. E., *Osnovnyye vozmozhnosti i struktura informatsionnoi sistemy distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM Rosleskhoz)* (The Main Functionalities and Structure of the Forest Fire Satellite Monitoring Information System of Russian Federal Forestry Agency (ISDM-Rosleskhoz)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 97–105.

4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Lopian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometrii MODIS (Mapping of Russia's Vegetation Cover Using MODIS Satellite Spectroradiometer Data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
5. 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 dannyykh 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), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–27.
6. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Yu., Efremov V. Yu., Ekspres-kartografirovaniye povrezhdenii lesov Rossii pozharami po sputnikovym dannym Landsat (Rapid Mapping of Forest Burnt Areas over Russia Using Landsat Data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 9–20.
7. 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, No. 2, pp. 83–94.
8. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow, IKI RAN, 2016, 208 p.
9. Buryak L. V., Sukhinin A. I., Kalenskaya O. P., Ponomarev E. I., Posledstviya pozharov v lentochnykh borakh yuga Sibiri (Consequences of the fires in the along-river pine forests in South Siberia), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2011, Vol. 18, No. 3, pp. 331–339.
10. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Stytsenko F. V., Optimizatsiya interaktivnykh protsedur kartografirovaniya garei v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa prirodnykh pozharov (Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 7–16.
11. Kobets D. A., Balashov I. V., Danilov I. D., Loupian E. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Ispol'zovanie VI-tekhnologii dlya sozdaniya instrumentov dlya analiza dannyykh sputnikovogo monitoringa (The BI technologies use to create tools for data analysis of satellite remote sensing), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 17–27.
12. Korovin G. N., Andreev N. A., *Aviatsionnaya okhrana lesov* (Aerial safeguarding of forest), Moskva, Agropromizdat, 1988, 223 p.
13. Loupian E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Kotel'nikov R. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Zharko V. O., Kovganko K. A., Kolbudaev P. A., Krasheninnikova Yu. S., Proshin A. A., Mazurov A. A., Uvarov I. A., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Flitman E. V., Khvostikov S. A., Shulyak P. P., Organizatsiya raboty so sputnikovymi dannymi v informatsionnoi sisteme distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM-Rosleskhoz) (Satellite data processing management in framework of Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250.
14. Loupian E. A., Milekhin O. E., Antonov V. N., Kramareva L. S., Burtsev M. A., Balashov I. V., Tolpin V. A., Solov'ev V. I., Sistema raboty s ob"edinennymi informatsionnymi resursami, poluchaemymi na osnove sputnikovyykh dannyykh v tsestrakh NITs "PLANETA" (System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 89–97.
15. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentral'nogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannyykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
16. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., Sputnikovyy servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti ("VEGA") (Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
17. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Gorimost' lesov Altae-Sayanskogo regiona Sibiri v usloviyakh nablyudemykh izmenenii klimata (Combustibility of the forests in the Altai-Sayan region of Siberia in the conditions of the detected climate change), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2016, No. 1, pp. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104.

18. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Sputnikovoe detektirovanie lesnykh pozharov i geoinformatsionnye metody kalibrovki rezul'tatov (Satellite detection of forest fires and GIS techniques for calibration of results), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054.
19. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharami na osnove sputnikovykh dannykh MODIS (Post-Fire Forest Tree Mortality Assessment Method Using MODIS Satellite Data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266.
20. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Ivanova A. A., Loupian E. A., Sychugov I. G., Vozmozhnosti otsenki ploshchadei lesnykh pozharov v regionakh Rossii na osnove dannykh sputnikovogo detektirovaniya aktivnogo goreniiya (Forest burnt area assessment possibilities in regions of Russia based on active fires detection by satellites), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 189–298. DOI:10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
21. Flitman E. V., Balashov I. V., Burtsev M. A., Galeev A. A., Egorov V. A., Kotel'nikov R. V., Loupian E. A., Mazurov A. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Postroenie sistemy raboty s dannymi pribora MODIS dlya resheniya zadach monitoringa lesnykh pozharov i ikh posledstviy (Organization of the MODIS Instrument Data Processing System for the Tasks of Monitoring Forest Fires and Their Aftereffects), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 127–138.
22. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Prostranstvenno-vremennaya gorimost' listvennichnikov Tsentral'noi Sibiri (Spatio-temporal combustibility of the larch forests of Central Siberia), *Ekologiya*, 2017, No. 6, pp. 413–419. DOI:10.7868/S0367059717060026.
23. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii (Climate change and forest fires in Russia), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61.
24. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Flitman E. V., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Assessment of Burned Forest Areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ Imagery, *Global Forest Monitoring from Earth Observation*, CRC Press, 2013, pp. 259–286.
25. Giglio L., Descloitres J., Justice C. O., Kaufman Y. J., An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 87, pp. 273–282.
26. Loupian E. A., Mazurov A. A., Flitman E. V., Ershov D. V., Korovin G. N., Novik V. P., Abushenko N. A., Altyntsev D. A., Koshelev V. V., Tashchilin S. A., Tatarnikov A. V., Csiszar I., Loboda T., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Satellite monitoring of forest fires in Russia at regional levels, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, No. 1, pp. 113–145.
27. Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J., The Collection 5 MODIS Burned Area Product — Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 3690–3707.
28. Sukhinin A. I., Ivanov V. V., Ponomarev E. I., Slinkina O. A., Cherepanov A. V., Pavlichenko E. A., Romasko V. Y., Miskiv S. I., The 2002 Fire season in the Asian part of the Russia Federation: A view from space, *International Forest Fire News*, 2003, Vol. 28, pp. 18–28.
29. Sukhinin A. I., French N. H. F., Kasischke E. S., Hewson J. H., Soja A. J., Csiszar I., Hyer E. J., Loboda T., Conard S. G., Romasko V. I., Pavlichenko E. A., Miskiv S. I., Slinkina O. A., Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 94, pp. 546–564.
30. Tansey K., Gregoire J. M. C., Defourny P., Leigh R. J., Van Bogaert E., Bartholomé E., Bontemps S., A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, pp. L01401.