

## Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны

Р. В. Котельников<sup>1</sup>, Е. А. Лупян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», Красноярск, 660062, Россия  
E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

В последние годы для обеспечения работ, связанных с мониторингом и тушением лесных пожаров, активно используются спутниковые методы и технологии. В настоящее время имеются однородные архивы данных наблюдений лесных пожаров на всей территории Российской Федерации за период с 2001 г. по настоящее время. Такие однородные архивы данных имеются, в частности, в системе ИС «ВЕГА-Лес» (<http://forest.geosmis.ru/>). В России с 2005 г. функционирует Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз, <https://nffc.aviales.ru>). В процессе работы системы в ней фиксировались различные характеристики пожаров, детектированные на основе спутниковых данных, в том числе для пожаров, зарегистрированных в ИСДМ-Рослесхоз. В этой системе имеется информация о том, на территориях с каким уровнем охраны действовали данные пожары и тушение каких пожаров не производилось или было прекращено. В настоящей работе на основе имеющихся однородных архивов наблюдений лесных пожаров и информации о том, на каких территориях они были зарегистрированы, а также данных об их тушении были сформированы выборки пожаров, на которые производилось или не проводилось воздействие. С использованием этих выборок было проведено исследование особенностей распределений пожаров по площадям в зависимости от уровня охраны территорий и информации о тушении/не тушении конкретных пожаров. Результаты данного исследования представлены в настоящей работе. Установлено, что распределение пожаров по площадям действительно зависит от уровня организации тушения конкретных территорий. Выявлено, что чем выше уровень охраны, тем больше отличаются распределения площадей пожаров в этой зоне от распределения пожаров, тушение которых не производилось. Также показано, что такие закономерности наблюдаются как в годы высокой, так и низкой горимости. В заключение кратко обсуждаются возможные пути использования полученных результатов для создания объективных критериев оценки эффективности работ по охране лесов от пожаров.

**Ключевые слова:** лесные пожары, статистические методы обработки данных, ДЗЗ, лесопожарное зонирование, зоны охраны лесов от пожаров, оценка эффективности охраны лесов от пожаров, информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров

Одобрена к печати: 19.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87

### Введение

Природные (в первую очередь лесные) пожары считаются достаточно опасным явлением, влияющим на состояние окружающей среды и во многих случаях угрожающим различным природным и антропогенным объектам. Такие пожары вносят значительный вклад в выбросы парниковых газов, поэтому организация борьбы с ними имеет большое значение для снижения бюджета таких газов. При этом следует учитывать, что на природные пожары ежегодно приходится значительное количество площадей. Так, в России, по информации, получаемой на основе данных спутниковых наблюдений, ежегодно лесные пожары могут проходить от 5 до 25 млн га (Лупян и др., 2017). Поэтому для минимизации потерь от столь масштабных явлений в подавляющем большинстве стран действуют специализированные службы и/или схемы охраны лесов от пожаров (Брюханов, Коршунов, 2017). Следует также отметить, что в последние десятилетия, в том числе из-за происходящих климатических изменений, наблюдается

рост как числа лесных пожаров, так и площадей, проходимых огнём (Flannigan et al., 2009; IPCC..., 2020). Это влечёт за собой необходимость повышения эффективности организации охраны лесов от пожаров и развития методов контроля проводимых в этом направлении работ. При этом для выбора оптимальных форм охраны требуется контролировать не только эффективность принятия мер по тушению конкретных пожаров, но и общую организацию и эффективность работ, выполняемых на охраняемых территориях.

Следует отметить, что оценка эффективности работы на конкретных территориях только на основе суммарной площади, пройденной пожарами в конкретном году, в подавляющем числе случаев не является информативной, поскольку не учитывает особенности горимости территорий в различные годы (в первую очередь метеорологическую ситуацию). Одним из путей решения задачи получения объективной информации о качестве охраны конкретных территорий может быть анализ особенностей распределения пожаров, возникших на этих территориях в конкретные годы, по площадям, которые они прошли. Работы в этом направлении уже выполнялись разными авторами (Коморовский, 2012; Pereira Jr. et al., 2014; Taylor et al., 2013; Torres-Rojo, 2020). В ряде исследований было показано, что распределение пожаров, тушение которых проводилось, может значительно отличаться от распределения пожаров, тушение которых не велось. При этом распределение пожаров, тушение которых не велось, обычно близко к логнормальному распределению, а распределение пожаров, на которые оказывалось воздействие, может существенно отличаться от него. В то же время следует отметить, что ведение подобных работ достаточно сильно ограничено наличием достоверной информации о реальных площадях, пройденных огнём, и о том, проводилось или нет тушение конкретного пожара.

В последние годы для обеспечения работ, связанных с мониторингом и тушением лесных пожаров, активно используются спутниковые методы и технологии. На текущий момент существуют однородные архивы данных наблюдений лесных пожаров на всей территории Российской Федерации за период с 2001 г. по настоящее время. Такие однородные архивы данных имеются, в частности, в информационной системе (ИС) «ВЕГА-Лес» (<http://forest.geosmis.ru/>) (Балашов и др., 2020). В России с 2005 г. функционирует Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз, <https://nffc.aviales.ru>). Достаточно подробно возможности данной системы описаны в работах (Беляев и др., 2005; Ершов и др., 2004; Ковалев и др., 2020; Котельников и др., 2019; Лупян и др., 2017). В процессе работы системы были зафиксированы различные характеристики пожаров, детектированных на основе спутниковых данных, в том числе для пожаров, зарегистрированных в ИСДМ-Рослесхоз. В ИСДМ-Рослесхоз имеется информация о том, на территориях с каким уровнем охраны действовали данные пожары (Шпаковский, 2018), а также о том, тушение каких пожаров не производилось или было прекращено.

Цель настоящей работы состоит в выявлении особенностей распределения пожаров по площадям в зависимости от уровня охраны территорий и информации о тушении/не тушении конкретных пожаров. Для достижения этой цели были проанализированы данные однородных архивов наблюдений лесных пожаров, включая информацию о том, на каких территориях они были зарегистрированы. Также были сформированы выборки пожаров, на которые проводилось или не проводилось воздействие. С использованием данных выборок было выполнено исследование особенностей распределения пожаров по площадям в зависимости от уровня охраны территорий и информации о тушении/не тушении конкретных пожаров. Результаты данного исследования представлены в настоящей работе. Установлено, что распределение пожаров по площадям действительно зависит от уровня их тушения и уровня организации тушения конкретных территорий. Также показано, что такие закономерности наблюдаются как в годы высокой, так и в годы низкой горимости. В заключение кратко обсуждаются возможные пути использования полученных результатов для создания объективных критериев оценки эффективности работ по охране лесов от пожаров.

## Данные

Отметим, что сегодня существует ряд методов и подходов к оценке площадей лесных пожаров, краткий анализ которых приведён, например, в работе (Лупян и др., 2021). Учитывая специфику поставленной задачи, за основу был выбран метод, основанный на анализе результатов детектирования активного горения (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2017, 2021; Пономарёв, Иванов, 2012; Bartalev et al., 2016; Loboda, Csiszar, 2005; Loupian et al., 2006; Tansey et al., 2008). Это, в частности, позволяет учитывать и те пожары, которые в результате своего воздействия не повредили лесной покров.

Для количественного учёта пожаров в настоящее время в основном используются данные, полученные от приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra и Aqua) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) (спутник NPP (*англ.* National Polar-orbiting Partnership)), хотя для детектирования горения используется также информация и других спутниковых систем, имеющих каналы наблюдения в районе 3,7–3,9 мкм или близкие к ним. Для работы с такими данным созданы полностью автоматизированные технологии обработки, обеспечивающие не только детектирование горения на отдельных сеансах наблюдения, но и временное отслеживание развития пожаров и анализ их особенностей (в том числе контроль типов территорий, на которых они развиваются). В нашей стране такие решения созданы, в частности, в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Барталев и др., 2012; Егоров и др., 2006; Лупян и др., 2017; Bartalev et al., 2016).

С учётом того, что природный, в особенности лесной, пожар может быть достаточно протяжённым и длиться значительное время, ему обычно соответствует не одна горячая точка (выявленная по спутниковым данным автоматическими алгоритмами температурная аномалия, далее — ГТ), а некоторое их множество (в том числе детектированные разными спутниками в различное время). При этом площадь лесного пожара, как правило, не соответствует сумме площадей детектированных ГТ. Обычно это связано с тем, что горение занимает не всю площадь ГТ или обнаруженные в разные моменты времени ГТ могут полностью или частично перекрываться (подробнее это обсуждалось в публикациях (Барталев и др., 2012, 2014; Пономарёв, Иванов, 2012; Пономарёв, Швецов, 2015; Стыщенко и др., 2013; Loboda, Csiszar, 2005)).

Для исключения такого рода ошибок проводится объединение всех наблюдающихся ГК, соответствующих одному пожару, в единый объект (Барталев и др., 2012; Флитман и др., 2011; Bartalev et al., 2016). Далее используются специальные подходы, обеспечивающие коррекцию (перенормировку) этих оценок (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др., 2021).

Использование таких подходов позволяет получать достаточно адекватные оценки площадей, пройденных огнём, и формировать базы данных (далее — БД) долговременных наблюдений их динамики на территории России. Такие БД сегодня созданы в различных российских информационных системах. Одна из наиболее полных по покрываемому периоду БД имеется в упомянутой выше системе ИСДМ-Рослесхоз. В то же время следует отметить, что происходит активное и практически непрерывное развитие системы ИСДМ-Рослесхоз, в том числе заключающееся в неоднократном совершенствовании алгоритмов корректировки данных, что привело к неоднородности многолетних архивов, связанных с постепенным внедрением в систему как новых источников данных, так и новых схем их обработки. Вместе с тем для выявления различных закономерностей, связанных с действием лесных пожаров и воздействиями на них, необходимо анализировать максимально однородные ряды данных обработки, которая проводилась одними и теми же алгоритмами на всём периоде анализируемых данных. Поэтому в настоящей работе для анализа площадей, пройденных огнём, использовалась сформированная БД пожаров (далее — БДП «ВЕГА-Лес») на основе упомянутых выше подходов в ИС «ВЕГА-Лес» (<http://forest.geosmis.ru/>) (Балашов и др., 2020). Она формировалась на основе данных, полученных с помощью прибора MODIS (шестая коллекция — МС6), установленного на спутниках Terra и Aqua (Louis, 2015). Полученный из БДП «ВЕГА-Лес» набор данных был также объединён с базой данных ИСДМ-Рослесхоз для получения атрибутов,

характеризующих уровень охраны и воздействия на конкретный пожар. Это позволило в том числе сопоставить каждому пожару (объединению ГТ, которые были детектированы за весь период его действия) данные лесопожарного зонирования и информацию о том, принимались или нет меры по его тушению (в рамках законодательства и, возможно, по решению Комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности субъекта Российской Федерации (КЧС) о непроведении тушения конкретного пожара, если угрозы населённым пунктам и объектам экономики нет, а потенциальные затраты на тушение существенно превысят возможный ущерб (Об утверждении..., 2022)).

Таким образом, появилась возможность разделить пожары на следующие группы, существенно различающиеся по уровню воздействия (уровню охраны):

- зона наземной охраны (далее обозначим как «Н»);
- зона лесоавиационных работ (далее — «А»);
- зона контроля лесных пожаров (далее — «ЗК»);
- лесные пожары, по которым есть достоверные сведения, что пожар не тушился по решению КЧС (далее — «КЧС»).

В зонах наземной и авиационной охраны лесов осуществляется тушение всех обнаруженных пожаров. В то же время очевидно, что в наземной зоне охраны, прежде всего в силу хорошей доступности её территорий, тушение обычно осуществляется более оперативно, чем в авиационной зоне. Это в основном позволяет ликвидировать возникающие в наземной зоне пожары на относительно меньших площадях по сравнению с зоной авиационной охраны. К зоне контроля (до 2015 г. она фактически состояла из зон космического мониторинга первого и второго уровней) относятся территории, на которых осуществляется тушение лишь отдельных пожаров, угрожающих объектам инфраструктуры. Значительная часть пожаров в этой зоне развивается под воздействием только естественных природных условий, и горение их ограничивается либо естественными преградами (например, водными объектами), либо выпадением интенсивных осадков. Естественно, что такие пожары в этой зоне могут иметь большую площадь по сравнению с пожарами, тушение которых производилось.

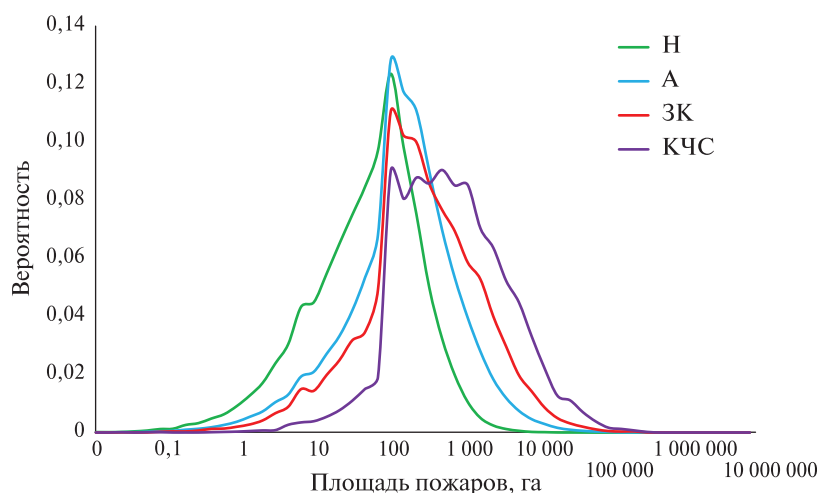
## **Обработка и анализ данных**

В работе был проведён анализ данных, направленный на выявление особенностей различных статистических характеристик пожаров, которые могут быть связаны с воздействием на них (проведением работ по тушению). Для этого из всех имеющихся наблюдений были выбраны данные только о лесных пожарах, т. е. пожарах, которые действовали на территории, хотя бы частично покрытой лесом. Для получения информации о лесном покрове использовался ряд ежегодно обновляемых карт по всей территории Российской Федерации, содержащих данные об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016). Полученная на основе этих карт информация для каждого лесного пожара имеется в БДП «ВЕГА-Лес». Именно для таких пожаров в настоящее время существуют достаточно надёжные методы оценки площадей, пройденных огнём (см. например, работы (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др., 2021)). На основе этих данных были сформированы выборки пожаров по территориям с различными уровнями охраны («Н», «А», «ЗК», «КЧС»). При этом в данные выборки вошло значительное число пожаров («Н» — 144 344, «А» — 231 164, «ЗК» — 24 687, «КЧС» — 9350). Таким образом, в целом анализировалась информация о 461 353 пожарах, которые действовали на территории Российской Федерации в период с 2001 по 2021 г. Кроме того, после сортировки всех лет по пройденной огнём площади они были разделены медианой на две группы: «годы высокой горимости» и «годы низкой горимости». Соответствующий признак также был добавлен в анализируемую выборку.

Для каждой из обсуждаемых групп были построены плотности вероятности их распределения по площадям. При этом учитывалось, что распределение числа пожаров по площадям происходит неравномерно и пожаров с малой площадью гораздо больше, чем с большой. Поэтому величина интервалов для расчёта плотности вероятности, по которым производи-

лось накопление данных, логарифмически увеличивалась при увеличении площадей лесных пожаров. Такой подход обеспечивал примерно равную статистическую ошибку плотности вероятности для пожаров различной площади.

Графики плотности вероятностей распределения пожаров по площадям для каждой зоны охраны представлены на *рис. 1*. Следует также обратить внимание на следующую особенность, которая наблюдается на представленных графиках: пик, появляющийся в районе площади в 100 га. Он возникает из-за того, что при построении контуров пожаров используются данные прибора MODIS, минимальное пространственное разрешение которого примерно  $1 \times 1$  км (площадь пикселя порядка 100 га). В результате в распределение этой площади попадает значительное число пожаров, площадь которых меньше 100 га. Поэтому данный пик не следует считать значимым. Площадь, «аккумулированную» в нём, следует «распределить» по диапазону пожаров с площадью менее 100 га. Также следует учитывать, что область площадей менее 100 га формируется за счёт пересечения областей горения с масками территорий, покрытых лесом, т.е. в основном определяется не столько особенностями конкретных пожаров, сколько переходом их между участками, покрытыми и не покрытыми лесом. Учитывая эти особенности, при проведении анализа полученных плотностей вероятностей распределения пожаров в основном стоит анализировать данные в области более 100 га.



*Рис. 1.* График плотности распределения лесных пожаров по площадям в зонах с разным уровнем охраны

В целом на данных, представленных на *рис. 1*, достаточно хорошо видно, что распределения пожаров по площадям заметно различаются для зон с разным уровнем охраны. Так, чем ниже в зоне уровень охраны (воздействия на пожары), тем больше распределения сдвигаются в область пожаров с большой площадью. Наибольший сдвиг в область больших площадей имеет распределение, соответствующее выборке пожаров, тушение которых не проводилось или было прекращено (пожары КЧС). Также хорошо видно, что распределения, соответствующие зонам с более низким уровнем охраны, «приближаются» к пожарам группы КЧС и имеют высокие значения в области больших площадей. Такое поведение полученных распределений полностью соответствует общей логике развития пожаров в зонах с различным уровнем охраны.

Для более детальной оценки различий в распределениях для разных зон охраны может быть использован график «квантиль — квантиль» (Q–Q) (Wilk, Gnanadesikan, 1968). Он строится следующим образом: по одной оси (как правило,  $x$ ) откладывается интеграл плотности вероятности распределения, с которым происходит сравнение в диапазоне значений от 0 до 1, обычно с равномерным шагом. Для каждого значения  $a$  интеграла данного распределения вычисляется значение параметра  $b$ , по которому это распределение строилось

(в нашем случае — площадь пожара) и при котором интеграл плотности вероятности принял значение  $a$ . Далее вычисляется интеграл плотности вероятности у распределения, сравнение которого производится по интервалу  $0-b$ . Это значение принимает график в точке на оси  $x$ . Как распределение, с которым проводилось сравнение, нами было выбрано распределение пожаров, закрытых решением КЧС. Для него были построены графики «вероятность/вероятность» для распределений, полученных в зонах «Н», «А», «ЗК». Графики представлены на *рис. 2*, где явно заметно их различие. При этом видно, что чем выше уровень охраны в анализируемой зоне, тем больше график Q–Q отличается от зависимости  $x = y$ , которая соответствует распределению пожаров, закрытых по решению КЧС. Отметим, что если сравниваемый график идёт над прямой  $y = x$ , то это означает, что в сравниваемом распределении имеется большее число пожаров меньшей площади, чем в распределении пожаров, закрытых по решению КЧС. Вид представленных на *рис. 2* графиков позволяет предположить, что различные меры отличия подобных зависимостей, построенных для пожаров на разных территориях, от функции  $y = x$  могут рассматриваться как характеристики уровня охраны лесов от пожаров на исследуемой территории.

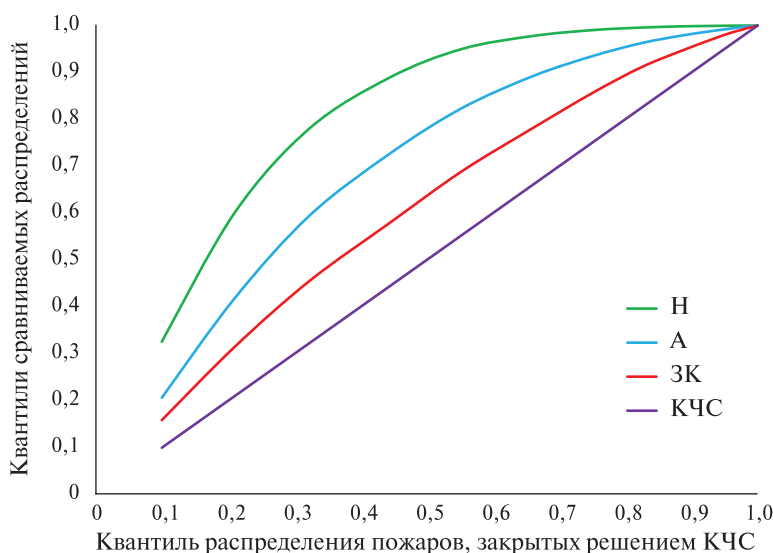


Рис. 2. График Q–Q сравнения распределений площадей лесных пожаров в зонах с различным уровнем охраны с распределением пожаров, закрытых по решению КЧС

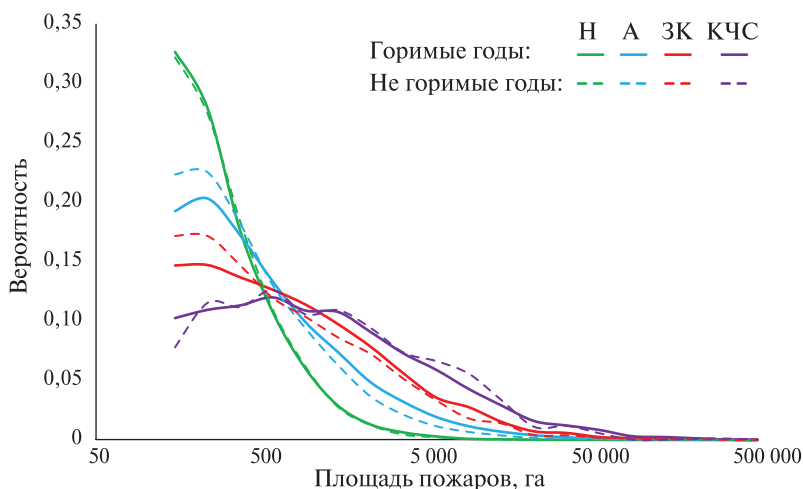
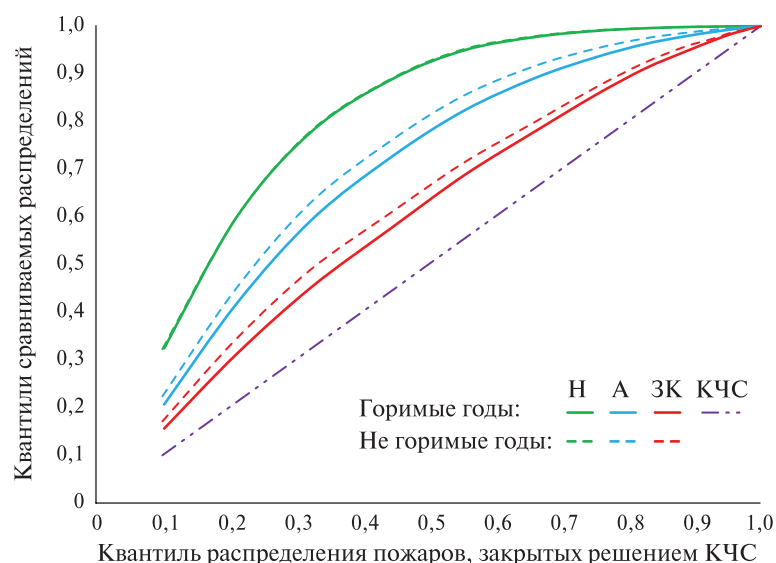


Рис. 3. Распределения пожаров по площадям в различных зонах охраны и пожаров, закрытых по решению КЧС, построенные для групп годов высокой и низкой горимости

Для того чтобы оценить, изменяются ли вид и характеристики распределений пожаров по площадям для территорий с различными уровнями лесопожарной охраны при разных условиях возникновения и действия пожаров, были проанализированы распределения пожаров по площадям в годы высокой и низкой горимости. К годам высокой горимости были отнесены: 2002, 2003, 2008, 2011, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019, 2020, 2021 гг. Остальные годы были отнесены к годам низкой горимости. Для этих групп годов были построены распределения пожаров по площадям для каждой из анализируемых зон охраны и для группы пожаров, закрытых по решению КЧС. Графики этих распределений приведены на *рис. 3* (см. с. 80). Также были построены графики Q–Q сравнения распределений пожаров в зонах с различным уровнем охраны с распределением пожаров, закрытых по решению КЧС (*рис. 4*). На графиках показана только значимая часть распределений в области более 100 га.



*Рис. 4.* Графики Q–Q сравнения распределений пожаров по площадям в различных зонах охраны для годов высокой и низкой горимости с распределением, полученным по выборке пожаров, закрытых по решению КЧС, во все годы, для которых проводился анализ

Представленная на *рис. 3* и *4* информация позволяет сделать следующие основные заключения:

1. Распределения выборки пожаров, закрытых по решению КЧС, практически не меняются в годы высокой и низкой горимости. Это, видимо, объясняется тем, что особенности действия (в том числе и пройденные площади) данных пожаров зависят в конечном итоге только от естественных факторов, которые определяются локальными условиями в области распространения конкретного пожара. При этом следует учитывать, что в данную группу пожаров во многом попадают случаи, развивающиеся в «экстремальных» локальных условиях. Зоны с такими условиями возникают как в годы высокой, так и низкой горимости лесов. Поэтому можно предположить, что пожары данной группы в годы с разным уровнем горимости действуют в среднем в сопоставимых условиях. Это в том числе может определять одинаковые зависимости плотности вероятности их распределения по площадям для годов с различными уровнями горимости. Отметим также, что такое поведение распределения пожаров, закрытых решением КЧС в годы с различным уровнем горимости, предоставляет возможность использовать интегральное распределение пожаров, закрытых по решению КЧС во все годы анализа, для оценки поведения распределения пожаров в зонах с различными уровнями охраны в годы низкой и высокой горимости. Это позволяет обеспечить единую базу для сравнения разных распределений. Именно этот подход был использован при построении графиков Q–Q, представленных на *рис. 4*.

2. Для годов как низкой, так и высокой горимости сохраняются общие закономерности распределения пожаров по площадям в зонах с разным уровнем охраны. Связано это с тем, что при понижении уровня охраны повышается относительное число пожаров с большой площадью и графики Q–Q «приближаются» к графику пожаров, закрытых по решению КЧС.
3. В то же время следует отметить, что в годы высокой горимости графики Q–Q для всех зон лежат «ближе» к графику пожаров, закрытых по решению КЧС. Особенно хорошо это выражено для зоны авиационной охраны и зоны контроля. Для этих зон также заметно уменьшается процент пожаров малой площади и увеличивается процент пожаров большой площади. Это может быть объяснено в первую очередь тем, что в годы высокой горимости на большем числе территорий имеются неблагоприятные условия для развития пожаров и большее число пожаров (по сравнению с годами низкой горимости) фактически не контролируются.
4. Обратим также внимание на заметное увеличение процента пожаров, проходящих достаточно большие площади, и смещение графика Q–Q в сторону графика пожаров, закрытых по решению КЧС, для зоны авиационной охраны. Это может свидетельствовать о том, в годы высокой горимости недостаточно ресурсов, необходимых для организации и проведения эффективного тушения лесных пожаров в данной зоне.
5. Нельзя также не отметить, что как распределения пожаров, так и графики Q–Q для зоны наземной охраны в годы высокой и низкой горимости мало различаются. Это может свидетельствовать, в частности, о том, что даже при ухудшении лесопожарной обстановки в данной зоне действия по предупреждению и тушению лесных пожаров, видимо, не теряют эффективности.

*Результаты расчёта критерия близости распределений  
к объединённой выборке пожаров, которые не тушились*

Критерий	Зона наземной охраны («Н»)	Зона авиационной охраны («А»)	Зона космического мониторинга (зона контроля лесных пожаров) («ЗК»)
<i>Годы низкой горимости</i>			
Объём выборки	<b>24973</b>	<b>59647</b>	<b>6958</b>
Критерий серий Вальда – Вольфовица, $Z$	61,047	32,102	7,223
Критерий Колмогорова – Смирнова, $D_n^+ - D_n^-$	0,470	0,324	0,175
<i>Годы высокой горимости</i>			
Объём выборки	<b>20999</b>	<b>76555</b>	<b>10477</b>
Критерий серий Вальда – Вольфовица, $Z$	56,011	19,105	4,772
Критерий Колмогорова – Смирнова, $D_n^+ - D_n^-$	0,471	0,264	0,126
<i>Все годы</i>			
Объём выборки	<b>45972</b>	<b>136202</b>	<b>17435</b>
Критерий серий Вальда – Вольфовица, $Z$	68,718	21,208	6,105
Критерий Колмогорова – Смирнова, $D_n^+ - D_n^-$	0,470	0,290	0,142

Примечание: все указанные в таблице значения являются статистически значимыми на уровне  $p < 0,05$ . Учитывались только пожары с покрытой лесом площадью более 100 га.



Данные заключения в целом согласуются как с логикой изменения лесопожарной обстановки в годы низкой и высокой горимости, так и особенностями пожаров на территориях с различным уровнем охраны. Обобщив вышеизложенное, можно сказать, что при оценке эффективности работ по воздействию на лесные пожары (тушению) может в том числе использоваться анализ особенностей распределения пожаров по площадям. При этом одним из подходов к проведению такого анализа может стать сравнение наблюдаемых распределений пожаров по площадям с распределением, характерным для пожаров, воздействие на которых не проводилось. При этом представленный выше графический анализ может, безусловно, быть дополнен численным анализом близости наблюдаемых распределений к заданному (в рассматриваемом случае — к распределению пожаров, тушение которых не проводилось). Пример использования таких возможных критериев для выборок данных, полученных в настоящей работе, показан в *таблице*. Отметим, что поведение представленных в таблице значений критериев в целом соответствует заключениям, которые сделаны выше.

## Заключение

Таким образом, с учётом проведенного выше анализа можно сделать следующие выводы:

- Имеющиеся в настоящий момент базы данных о лесных пожарах, действовавших на территории в период с 2001 по 2021 г., позволяют проводить анализ особенностей распределения лесных пожаров по площадям, пройденным огнём.
- Наблюдаются изменения данных распределений как для зон с различным уровнем охраны, так и для годов высокого и низкого уровня горимости.
- Анализ таких изменений может позволить делать выводы об эффективности противопожарных мероприятий, выполняемых на различных территориях. В перспективе на основе такого анализа, видимо, могут быть разработаны численные критерии для оценки эффективности мероприятий охраны лесов от пожаров.

Авторы благодарны ФБУ «Авиалесоохрана», предоставившей Центру лесной пирологии доступ к информационным ресурсам ИСДМ-Рослесхоз, который позволил получить необходимую для проведения настоящей работы информацию о лесных пожарах, действовавших на территории России в период с 2001 по 2021 г.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8), в рамках темы № 21 госзадания, утверждённого приказом Рослесхоза № 9756 от 23.12.2021, а также с помощью ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019; Loupian et al., 2021).

## Литература

1. Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А., Барталев С. С., Бурцев М. А., Ворушилов И. И., Егоров В. А., Жарко В. О., Кобец Д. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Сайгин И. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г., Хвостиков С. А., Ховратович Т. С. Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. 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. 9–26.
3. 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.
4. 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.

5. *Беляев И. М., Коровин Г. Н., Лупян Е. А.* Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров МПР РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 1. С. 20–29.
6. *Брюханов А. В., Коришунов Н. А.* Авиационное тушение природных пожаров: история, современное состояние, проблемы и перспективы // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 37–54. DOI: 10.15372/SJFS20170504.
7. *Егоров В. А., Барталев С. А., Лупян Е. А., Уваров И. А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2006. С. 98–109.
8. *Ершов Д. В., Коровин Г. Н., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Таццилин С. А.* Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 47–57.
9. *Ковалев Н. А., Лупян Е. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Бурцев М. А., Ершов Д. В., Кривошеев Н. П., Мазуров А. А.* ИСДМ-Рослесхоз: 15 лет эксплуатации и развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 283–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283-291.
10. *Коморовский В. С.* Модели организации и управления при борьбе с лесными пожарами: учеб. пособие. М.: НИЦ Инфра-М, 2012. 120 с.
11. *Котельников Р. В., Лупян Е. А., Барталев С. А., Ершов Д. В.* Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // Лесоведение. 2019. № 5. С. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048.
12. *Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
13. *Лупян Е. А., Прошин А. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Толпин В. А., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (организация распределенной работы со сверхбольшими архивами спутниковых данных для решения научных и прикладных задач) // Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли — RORSE 2018. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 380–387. DOI: 10.21046/rorse2018.380.
14. *Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Сенько К. С., Балашов И. В., Мазуров А. А.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
15. Об утверждении Правил тушения лесных пожаров. Приказ Минприроды России № 244 от 01.04.2022. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208120026?ysclid=16utqjnm3394457136> (дата обращения: 18.08.2022).
16. *Пономарёв Е. И., Иванов В. А.* Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 304–311.
17. *Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г.* Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
18. *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.
19. *Флитман Е. В., Балашов И. В., Бурцев М. А., Галеев А. А., Егоров В. А., Котельников Р. В., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Матвеева 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. № 3. С. 127–138.
20. *Шпаковский Ю. Г.* Современные проблемы правового регулирования охраны лесов от пожаров // Lex russica (Русский закон). 2018. № 1(134). С. 43–56. DOI: 10.17803/1729-5920.2018.134.1.043-056.
21. *Bartalev S., Egorov V., Efremov V., Flitman E., Loupian E., 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. 2016. P. 245–271. DOI: 10.1201/b13040-14.
22. *Flannigan M., Krawchuk M., Wotton M., Johnston L.* Implications of changing climate for global Wildland fire // Intern. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. P. 483–507. DOI: 10.1071/WF08187.
23. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / eds. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak,

- J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissic, M. Belkacemi, J. Malley, Switzerland, 2020, 41 p.
24. Loboda T., Csiszar I. Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error // Contemporary Earth Remote Sensing from Space. 2005. V. 2. P. 415–421.
  25. Louis G., MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision A / Department of Geographical Sciences University of Maryland, 2015. 64 p.
  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., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Loboda T. Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal and Regional Levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. No. 1. P. 113–145. DOI: 10.1007/s11027-006-1013-7.
  27. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2021. V. 14. Art. No. 77. 19 p. DOI: 10.3390/rs14010077.
  28. Pereira Jr. A. C., Oliveira S. L. J., Pereira J. M. C., Turkman M. A. A. Modelling fire frequency in a Cerrado savanna protected area // PLoS ONE. 2014. V. 9. No. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0102380.
  29. Tansey K., Grégoire J.-M., Defourny P., Leigh R., Pekel J.-F., Bogaert E., Bartholomé E. A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. P. 1–6. DOI: 10.1029/2007GL031567.
  30. Taylor S. W., Woolford D. G., Dean C. B., Martell D. L. Wildfire prediction to inform fire management: Statistical science challenges // Statistical Science. 2013. V. 28. No. 4. P. 586–615. DOI: 10.1214/13-STS451.
  31. Torres-Rojo J. M. Index for the estimation of the occurrence of forest fires in large areas (*ucn*. Índice para la estimación de ocurrencia de incendios forestales en superficies extensas) // Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 2020. V. 26. No. 3. P. 433–449 (in Spanish). DOI: 10.5154/rchscfa.2019.11.082.
  32. Wilk M. B., Gnanadesikan R. Probability plotting methods for the analysis of data // Biometrika. 1968. V. 55. No. 1. P. 1–17.

## Features of remotely estimated distributions of forest fire areas for territories with different levels of fire protection

R. V. Kotelnikov<sup>1</sup>, E. A. Loupian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Center of Forest Pyrology, Branch of the All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Krasnoyarsk 660062, Russia  
E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

<sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

In recent years, satellite methods and technologies have been actively used to support forest fires monitoring and extinguishing measures. At present there are homogeneous archives of forest fire observation data on the whole territory of the Russian Federation for the period from 2001 to the present. Such homogeneous archives of data are available, in particular, in the VEGA-Les information system (<http://forest.geosmis.ru/>). In Russia, the Forest Fires Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency (ISDM-Rosleskhoz, <https://nffc.aviales.ru>) has been in operation since 2005. During the operation of the system various characteristics of fires detected from satellite data were recorded in it. For those fires, which have been registered by ISDM-Rosleskhoz there is recorded information about territories where these fires were active and their level of protection, and information on which fires were not attempted to be extinguished or extinguishing was terminated for them. In the present work on the basis of available forest fires observation homogeneous archives and information about territories fires have been registered on and extinguishing measures for them, samples of fires action on which was or was not taken were formed. Using these samples, a study was conducted on the characteristics of fire area distribution, depending on the level of protection of the territory and information

on extinguishing/not extinguishing specific fires. The results of this study are presented in this paper. It is determined that distribution of fire areas really depends on the quality of the firefighting measures organization on given territories. It was found that higher levels of protection provide larger difference of fire areas distributions from the distribution of non-extinguished fires. It is also shown that such trends are observed both for high and low flammability years. In conclusion, possible ways of the received results application for creation of objective criteria for assessment of forest fires protection measures efficiency are briefly discussed.

**Keywords:** forest fires, statistical methods of data processing, Earth remote sensing, forest fire zoning, forest fire protection zones, assessment of the effectiveness of forest fire protection, information system for remote monitoring of forest fires

Accepted: 19.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87

## References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A., Bartalev S. S., Burtsev M. A., Vorushilov I. I., Egorov V. A., Zharko V. O., Kobets D. A., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Saigin I. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Khvostikov S. A., Khovratovich T. S., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Flitman E. V., Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–26 (in Russian).
3. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Yu., Efremov V. Yu., Rapid mapping of forest burnt areas over Russia using Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 9–20 (in Russian).
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
5. Belyaev I. M., Korovin G. N., Loupian E. A., Use of satellite data in the system of remote monitoring of forest fires of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 1, pp. 20–29 (in Russian).
6. Bryukhanov A. V., Korshunov N. A., Aerial wildfire fighting: history, current situation, problems and perspectives, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 37–54 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170504.
7. Egorov V. A., Bartalev S. A., Loupian E. A., Uvarov I. A., Monitoring of damage to vegetation cover by fires according to satellite observations, *Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"*, 2006, pp. 98–109 (in Russian).
8. Ershov D. V., Korovin G. N., Loupian E. A., Mazurov A. A., Tashchilin S. A., Russian satellite monitoring system for forest fires, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 47–57 (in Russian).
9. Kovalev N. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Burtsev M. A., Ershov D. V., Krivosheev N. P., Mazurov A. A., ISDM-Rosleskhoz: 15 years of operation and evolution, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 283–291 (in Russian).
10. Komorovskii V. S., *Modeli organizatsii i upravleniya pri bor'be s lesnymi pozharemi* (Models of organization and management in the fight against forest fires), Moscow: NITs Infra-M, 2012, 120 p. (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-283-291.
11. Kotel'nikov R. V., Lupyana E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Space Monitoring of Forest Fires: History of Creation and Development of ISDM-Rosleskhoz, *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 399–409 (in Russian), DOI: 10.1134/S0024114819050048.
12. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Egorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Senko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Satellite monitoring of forest fires in the 21<sup>st</sup> century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on active gorenje detection data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian).
13. Loupian E. A., Proshin A. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Kashnitskiy A. V., Tolpin V. A., Mazurov A. A., Matveev A. M., Uvarov I. A., Center for Collective Usage "IKI-Monitoring" (Organization of Distributed Work with Extra Large Archives of Satellite Data for Solving Scientific and Applied Tasks), *Information Technologies in Remote Sensing of the Earth – RORSE 2018*, Moscow, IKI, 2019, pp. 380–387 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/rorse2018.380>.

14. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S., Balashov I. V., Mazurov A. A., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
15. *Minprirody of Russia: Order No. 224, Date 08.04.2022* (in Russian), available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202208120026?ysclid=16butqrjnm3394457136> (accessed 18.08.2022).
16. Ponomarev E. I., Ivanov V. A., Satellite monitoring of the dynamics of extreme fires, *Khvoynye Boreal'noi Zony*, 2012, Vol. 30, No. 3–4, pp. 304–311 (in Russian).
17. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite Detection of Forest Fires and Geoinformation Methods for Calibrating of the Result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
18. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Post-fire forest tree mortality assessment method using MODIS satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 254–266 (in Russian).
19. 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., Matveeva A. M., Proshin A. A., Organization of the MODIS instrument data processing system for the tasks of monitoring forest fires and their aftereffects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 127–138 (in Russian).
20. Shpakovskii Yu. G., Modern problems of legal regulation of forest protection from fires, *Lex russica (Russkii zakon)*, 2018, No. 1(134), pp. 43–56 (in Russian), DOI: 10.17803/1729-5920.2018.134.1.043-056.
21. Bartalev S., Egorov V., Efremov V., Flitman E., Loupian E., Stytsenko F. V., Assessment of Burned Forest Areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+ Imagery, In: *Global Forest Monitoring from Earth Observation*, 2016, pp. 245–271, DOI: 10.1201/b13040-14.
22. Flannigan M., Krawchuk M., Wotton M., Johnston L., Implications of changing climate for global Wildland fire, *International J. Wildland Fire*, 2009, Vol. 18, pp. 483–507, DOI: 10.1071/WF08187.
23. IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissic, M. Belkacemi, J. Malley. (eds.), Switzerland, 2020, 41 p.
24. Loboda T., Csiszar I., Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error, *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, Vol. 2, pp. 415–421.
25. Louis G., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide, Revision A*, Department of Geographical Sciences University of Maryland, 2015, 64 p.
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., Sukhinin A. I., Ponomarev E. I., Afonin S. V., Belov V. V., Matvienko G. G., Loboda T., Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal and Regional Levels, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, Vol. 11, No. 1, pp. 113–145, DOI: 10.1007/s11027-006-1013-7.
27. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 14, Art. No. 77, 19 p., DOI: 10.3390/rs14010077.
28. Pereira Jr. A. C., Oliveira S. L. J., Pereira J. M. C., Turkman M. A. A., Modelling fire frequency in a Cerrado savanna protected area, *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, No. 7, DOI: 10.1371/journal.pone.0102380.
29. Tansey K., Grégoire J.-M., Defourny P., Leigh R., Pekel J.-F., Bogaert E., Bartholomé E., A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, pp. 1–6, DOI: 10.1029/2007GL031567.
30. Taylor S. W., Woolford D. G., Dean C. B., Martell D. L., Wildfire prediction to inform fire management: Statistical science challenges, *Statistical Science*, 2013, Vol. 28, No. 4, pp. 586–615, DOI: 10.1214/13-STS451.
31. Torres-Rojo J. M., Index for the estimation of the occurrence of forest fires in large areas (*span. Índice para la estimación de ocurrencia de incendios forestales en superficies extensas*), *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2020, Vol. 26, No. 3, pp. 433–449 (in Spanish), DOI: 10.5154/r.rchscfa.2019.11.082.
32. Wilk M. B., Gnanadesikan R., Probability plotting methods for the analysis of data, *Biometrika*, 1968, Vol. 55, No. 1, pp. 1–17.