Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров

С.А. Хвостиков, С.А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН Москва, 117997, Россия

Моделирование динамики развития природных пожаров позволяет оценивать вызываемые ими угрозы и может стать важным элементом поддержки принятия решений при борьбе с огнём. Современные модели развития природных пожаров способны адекватно прогнозировать распространения огня при наличии оперативно актуализируемых данных об условиях горения и текущем состоянии пожара. Многие необходимые для моделирования природных пожаров характеристики могут быть оценены методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников, вопросы применения которых в соответствующих моделях рассмотрены в статье. Представленная обзорная статья включает краткое описание методов моделирования развития природных пожаров и подходов к их дистанционному мониторингу в совокупности с оценкой условий горения. Отмечается, что данные ДЗЗ позволяют оценивать динамику пожара на любом участке земной поверхности, обеспечивая возможность построения глобальных и региональных систем прогнозирования вызываемых ими угроз. Прогресс в области моделирования и развитие систем спутникового мониторинга очагов горения существенно расширили возможности оценки точности и настройки моделей динамики пожаров. Сравнение модельных оценок и результатов фактических наблюдений лежит в основе развития перспективного подхода, основанного на ассимиляции данных ДЗЗ в модели распространения природных пожаров, способного повысить точность прогнозирования их динамики.

Ключевые слова: моделирование развития природных пожаров, очаги горения, гари, классификация, оценка точности, ассимиляция данных

> Одобрена к печати: 11.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27

Введение

Ежегодно миллионы гектаров территории России оказываются под воздействием природных пожаров (Лупян и др., 2017), приводящих к повреждению и гибели лесов, эмиссии значительного объёма продуктов горения в атмосферу, угрожающих жизни и здоровью людей, способствующих усилению климатических изменений. Организация эффективной борьбы с пожарами предусматривает набор мер по их мониторингу, оценке угрозы конкретных очагов горения и принятию решений, направленных на минимизацию потенциального ущерба.

Моделирование природных пожаров позволяет прогнозировать динамику распространения фронта горения с целью принятия необходимых мер по борьбе с огнём, планирования контролируемых выжиганий и оценки степени угрозы лесным массивам, населённым пунктам и объектам инфраструктуры. Одной из проблем, сдерживающих потенциально широкое практическое применение методов моделирования динамики развития пожаров, оказывается необходимость оперативного получения надёжных данных о состоянии горючих материалов и актуальном положении фронта горения. Это приводит к ограничению возможности построения надёжных модельных прогнозов в близком к реальному масштабу времени и оценки точности моделей.

Один из ключевых источников информации для прогностического моделирования развития пожаров — данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие получать актуальную информацию о состоянии растительного покрова, задавать стартовые условия моделирования и оценивать его точность.



Рис. 1. Схема моделирования с указанием страниц статьи, на которых описаны разные аспекты моделирования

Настоящий обзор посвящён вопросам интеграции данных ДЗЗ в модели развития очагов горения, в первую очередь для моделирования крупных пожаров на региональном или национальном уровнях. В статье даётся краткое описание методов моделирования природных пожаров, а также подходов, позволяющих наблюдать их динамику и оценивать условия горения на основе данных спутникового мониторинга. Данные о динамике пожаров и пройденной огнём территории позволяют оценивать точность модельных прогнозов и проводить их настройку, чему посвящён самостоятельный раздел статьи. В статье также представлено перспективное направление ассимиляции данных наблюдений в модели природных пожаров, позволяющих повысить точность модельных прогнозов. На *рис. 1* представлена обобщённая схема моделирования природных пожаров с указанием страниц статьи, где говорится о каждом конкретном аспекте моделирования.

Методы моделирования природных пожаров

Природный пожар представляет собой сложное явление, динамика развития которого определяется рядом химических и физических процессов. В основе распространения огня лежит химический процесс термической деградации горючих материалов, преимущественно целлюлозы, лигнина и некоторых других растительных компонентов (Гришин, 1981, с. 50). При высокой интенсивности горения разложение природных горючих материалов приводит к эмиссии летучих газов, сгорание которых сопровождается выделением большого количества энергии, затрачиваемой в том числе на сушку и зажигание нового топлива, в связи с чем пожары большой интенсивности становятся самоподдерживающимся процессом (Sullivan, 2009, с. 6, 7). Процесс переноса энергии (теплообмен) и воспламенения новых горючих материалов может осуществляться посредством явлений излучения, конвекции и физического перемещения горящих материалов, каждое из которых важно для распространения пожара (Гришин, 1981, с. 7). Стоит отметить, что нагрев воздуха в области горения влияет на динамику воздушных потоков, что, в свою очередь, оказывает обратное влияние на интенсивность и скорость распространения пожара. Поэтому для более полного описания процессов, определяющих распространение пожара, целесообразно объединять модели развития пожара и локального движения потоков воздуха в приземном слое атмосферы (Доррер, 2008, с. 38).

Дополнительную сложность в описание процессов распространения природных пожаров вносит явление переноса горючих материалов, в первую очередь искр (Sullivan, 2009, с. 11). Существует большой уровень неопределённости в траектории перемещения горящих частиц, а также вероятности возгорания в области их падения. На практике невозможно выполнить детерминистическое моделирование данного процесса, что затрудняет прогнозирование распространения интенсивных природных пожаров. Процессы, лежащие в основе распространения пожаров, могут быть формально описаны математическими формулами и уравнениями, основанные на них модели часто называются физическими или физико-химическими. В России среди таких моделей выделяется модель Гришина А.М., в которой распространение пожара воспроизводится в неоднородной, реакционно-способной многофазной среде с учётом законов сохранения и переноса массы, энергии и момента (Гришин, Пененко, 1992). Существует большое количество других физических моделей природных пожаров (Sullivan, 2009), отличающихся разной степенью детальности описания процесса. Можно отметить, что детальное моделирование динамики природного пожара и его взаимодействия с атмосферой обычно характеризуется сложными вычислениями, требующими значительного времени на построение прогнозов.

Стремление к снижению вычислительной сложности моделей приводит к необходимости их упрощения и аппроксимации части процессов, описывающих распространение огня. Крайняя степень такой аппроксимации преобразует модели в эмпирические уравнения, характеризующие скорость распространения пожара в зависимости от условий горения. Такие модели часто называют эмпирическими или имитационными, а их параметризация позволяет в неявном виде учитывать реальные физические процессы, такие как взаимодействие с атмосферой, распространение искр, сушка топлива и др. Большинство моделей занимает промежуточное положение между чистыми физическими и эмпирическими, включая элементы физического описания динамики пожара и параметризацию остальных физических и химических процессов.

Наиболее популярная из имитационных моделей развития пожара — модель Ротмеля (Rothermel, 1972), разработанная в США. Она включает физическое описание зависимости распространения огня от состояния горючих материалов, упрощая влияние рельефа и ветра до простых множителей скорости пожара. Существует множество программных пакетов, реализующих данную модель, например BEHAVE и FARSITE, которые широко применяются на территории США и за её пределами (Jahdi et al., 2015; Opperman et al., 2006; Salis et al., 2016). Другая развитая имитационная модель — канадская система Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, реализованная в программном пакете Prometheus (Tymstra et al., 2010). Данная модель основана на наборе эмпирических зависимостей между условиями горения и характеристиками пожара, полученными по данным нескольких сотен природных пожаров на территории Канады. Будучи широко используемой на территории Канады (Tymstra et al., 2010), эта модель также находит успешное применение и за её пределами (Хвостиков и др., 2012; Opperman et al., 2006). Существует множество других локальных имитационных моделей, среди которых, в частности, можно отметить подход, развиваемый в Австралии, где индивидуальные модели разрабатываются применительно к разным типам растительности и экосистем (Opperman et al., 2006). Эти модели реализуются в большом количестве программных пакетов: Australis, Phoenix, Spark (Faggian et al., 2017).

Стоит отметить эмпирическую модель низовых пожаров, разрабатываемую в Институте леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Волокитина и др., 2020), которая может использовать информацию о горючих материалах, основанную на данных лесоустройства и изображениях высокого и сверхвысокого разрешения. Также эта модель может давать оценки различных характеристик пожара, таких как вероятность перехода пожара в низовой или почвенный, возможный отпад и необходимое количество сил и средств для тушения.

Отдельно нужно сказать о вероятностном подходе к моделированию динамики пожаров. Высокий уровень неопределённости в ряде процессов распространения пожара (например, переносе искр) и в используемых данных (особенно при прогнозировании метеоусловий) делает привлекательными методы стохастического моделирования. Один из возможных подходов предполагает интерпретацию самого распространения пожара как случайного процесса, например как клеточного автомата с определённой вероятностью перехода пожара из одной клетки в другую. В других работах применяется метод Монте-Карло, который предполагает многократное моделирование развития пожаров с варьированием параметров и входных данных. Агрегации множества реализаций динамики фронта горения при разных значениях параметров позволяют оценить вероятность достижения пожаром близлежащих объектов и построить вероятностный прогноз его динамики. Такой подход находит применение в долгосрочном прогнозировании пожара и при построении краткосрочных прогнозов при высокой степени неопределённости входных данных и параметров модели (Хвостиков et al., 2016; Allaire et al., 2020; Finney et al., 2011).

При решении практических задач имитационные модели применяются для обучения пожарных, планирования контролируемых выжиганий и постпожарного анализа (Andrews, 2010; Tymstra et al., 2010), а также для оценки потенциальных повреждений от действующих пожаров и принятия оперативных решений о противопожарных мерах (Kalabokidis et al., 2016; Noonan-Wright et al., 2011).

Как упоминалось ранее, пожар представляет собой сложную комбинацию химических и физических процессов, происходящих в неоднородной среде и находящихся во взаимообратной связи с движением воздушных потоков, что затрудняет получение высокоточных прогнозов распространения огня. Считается, что допустимый уровень ошибки моделирования развития пожаров составляет 30–35 % (Доррер и др., 2011; Cruz, Alexander, 2013), а повышение точности прогнозов может быть достигнуто путём экспертной настройки параметров модели и анализа возможных сценариев развития пожара.

Подводя итог данному разделу обзора, отметим, что моделирование природных пожаров является развитой научной областью, обладающей широким и проработанным инструментарием. К числу проблем при прогнозном моделировании развития пожара следует отнести необходимость оперативного сбора актуальной информации о динамике фронта огня и условиях горения (Cruz et al., 2014; Finney, 2000), для получения которой в последнее время всё чаще используются данные ДЗЗ.

Методы дистанционного зондирования природных пожаров

Получение объективной и своевременной информации о положении фронта горения критически важно для принятия решений по мерам борьбы с пожаром, оценки и прогнозирования его дальнейшей динамики. Спутниковый мониторинг оказывается практически безальтернативным источником информации о пожарах ввиду возможности регулярного и оперативного получения требуемых данных о действующих очагах горения и пройденной огнём территории.

Спутниковые методы оперативного детектирования очагов горения основаны на контрасте значений температуры пожара (типично свыше 600–800 К) и окружающей его земной поверхности (около 300 К). Различия спектра излучения пожара и земной поверхности особенно сильно проявляются в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн. Большинство методов детектирования очагов горения используют фиксированные или адаптивные пороговые критерии, применяемые к значениям радиояркостной температуры в средней и дальней инфракрасной частях спектра, дополняя их данными измерения отражательной способности подстилающей поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн с целью исключения влияния облачности, а также водной или безрастительной территории (Giglio et al., 2016; Oliva, Schroeder, 2015).

Существуют спутниковые системы ДЗЗ, позволяющие детектировать действующие очаги горения, данные которых свободно распространяются в виде стандартных, оперативно формируемых продуктов. К их числу относится установленный на спутниках Terra и Aqua инструмент MODIS (*анел*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), обеспечивающий детектирование пожаров с пространственным разрешением 1 км и позволивший сформировать

к настоящему времени 20-летний глобальный архив данных (Giglio et al., 2016). В последние годы для мониторинга действующих пожаров широко используется инструмент VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), установленный на спутниках Suomi-NPP (*англ*. Suomi National Polar-orbiting Partnership) и NOAA-20 (*англ*. National Oceanic and Atmospheric Administration), с пространственным разрешением 750 или 375 м (Oliva, Schroeder, 2015).

Детектирование пожаров может проводиться и на основе данных систем Д33 более высокого пространственного разрешения, например спутников серии Landsat. Исследования, в частности, показывают, что данные спутников серии Landsat позволяют детектировать небольшие интенсивные (950 K) пожары площадью около 1 м² и пожары меньшей интенсивности при больших размерах (например, пожар площадью 150 м² при температуре 500–700 K) (Schroeder et al., 2016). Но спутники высокого пространственного разрешения обычно позволяют проводить не более одного наблюдения в несколько дней, что с учётом наличия облачности не позволяет осуществлять мониторинг динамики развития пожара.

Использование геостационарных спутников потенциально позволяет увеличить частоту наблюдения динамики развития пожаров до нескольких раз в час. Существует множество алгоритмов получения данных об очагах горения с помощью инструмента SEVIRI (*англ.* Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager, спутники Meteosat) (Amraoui et al., 2010; Filizzola et al., 2016), а также инструмента AHI (*англ.* Advanced Himawari Imager, спутник Himawari). Методы детектирования пожаров по данным геостационарных спутников могут основываться на пороговых критериях, аналогичных используемым для данных MODIS и VIIRS (Amraoui et al., 2010). Фиксированная точка обзора и большая частота наблюдения позволяют также использовать методы, основанные на статистической оценке временных рядов характеристик излучения подстилающей поверхности в каждом пикселе и детектировании пожаров на основе выявления аномальных отклонений (Filizzola et al., 2016). Следует отметить, что геостационарные спутниковые инструменты обладают низким пространственным разрешением (2–3 км в надире) и дают возможность наблюдать преимущественно крупные пожары с увеличением порога детектирования по мере удаления от экватора.

Спутниковые данные позволяют детектировать не только действующие очаги горения, но и пройденные огнём территории. Многие методы детектирования повреждений растительного покрова пожарами основаны на использовании данных спутниковых измерений отражённого излучения в видимой и ИК-областях спектра (Барталев и др., 2010). Для решения такого рода задач часто используются многолетние значения спектральных вегетационных индексов для поиска их аномальных отклонений, вызванных повреждениями растительного покрова пожарами (Барталев и др., 2012). Для многих типов наземных экосистем восстановление растительного покрова на пройденных пожарами участках занимает достаточно продолжительное время (от нескольких недель до нескольких лет), что позволяет использовать данные низкого временного и высокого пространственного разрешения для их детектирования и точной оценки площади (Барталев и др., 2014). Подробный обзор развития методов детектирования пройденных пожарами территорий, основных подходов и существующих спутниковых информационных продуктов представлен в статье (Chuvieco et al., 2019).

При рассмотрении проводимых в России исследований в области дистанционного мониторинга природных пожаров наряду с вышеупомянутыми работами Института космических исследований РАН следует отметить также и разработанные методы спутниковой оценки степени пирогенного повреждения лесов (Стыценко и др., 2013). В Институте леса им. В. Н. Сукачева разрабатываются методы спутникового мониторинга лесных пожаров (Пономарев и др., 2017; Ponomarev et al., 2021), позволяющие оценивать интенсивность горения и степень повреждения лесов на основе регистрируемой мощности теплоизлучения. Можно отметить работу по оценке потерь от лесов и ветровалов на северо-востоке европейской части России на основе данных высокого пространственного разрешения (Шихов, Зарипов, 2018). Ещё в одном исследовании оценивается степень повреждения лесов после пожаров 2010 г. на основе данных высокого разрешения (Кигbanov et al., 2017).

Спутниковые данные ДЗЗ позволяют оценивать динамику и последствия пожаров с различным временным и пространственным разрешением, для чего применяются как оперативно выявляемые очаги горения по данным низкого пространственного разрешения, так и результаты детального картографирования контуров гарей по изображениям, получаемым в течение нескольких недель после окончания пожара. Эти оценки могут использоваться для инициализации стартовых условий при моделировании динамики развития пожаров и для определения точности модельных прогнозов.

Применение данных Д33 в моделировании природных пожаров

Оценка условий горения на основе данных ДЗЗ

Возможность регулярного получения актуальных данных об условиях горения для любого участка земной поверхности делает спутниковый мониторинг практически незаменимым источником информации для моделирования динамики природных пожаров. ДЗЗ может использоваться для получения данных о типах и объёмах горючих материалов и их состоянии, информации о локальном рельефе, а также для инициализации исходного положения фронта горения.

Для получения точных прогнозов динамики распространения огня критически важно наличие объективной информации о параметрах и состоянии горючих материалов. Горючие материалы отличаются рядом характеристик, влияющих на распространение огня, таких как размер элементов горючих материалов, соотношение их поверхности к объёму, их расположение, наличие разных вертикальных уровней с разными значениями параметров и структурой, например мох и лишайники, валеж, подлесок, кроны деревьев. Некоторые из параметров горючих материалов могут быть напрямую оценены по данным дистанционных наблюдений, например высота кроны, её плотность и высота нижней точки кроны (Reeves et al., 2009).

Распространённый на данный момент подход предполагает выделение классов растительного покрова, на которых природные пожары распространяются схожим образом, и построение на их основе карт горючих материалов. Часто системы классификации горючих материалов изначально ориентированы на определённую модель распространения пожара, используемые в них классы характеризуются одинаковыми значениями параметров этой модели. Такие схемы классификации горючих материалов также называют комплексами горючих материалов или моделями топлива (*англ.* fuel model). Среди моделей горючих материалов можно отметить американскую систему классификации, включающую 40 классов и предназначенную для работы с моделью распространения пожара Ротмеля (Reeves et al., 2009), канадскую модель, являющуюся частью канадской системы прогнозирования поведения пожара (Тутяtra et al., 2010) и европейскую многоуровневую модель топлива (Toukiloglou et al., 2013).

Применение данных ДЗЗ для картографирования земной поверхности зарекомендовало себя как объективный и эффективный подход к оценке состояния растительности, особенно на больших территориях (Барталев и др., 2015). Для картографирования земного покрова применяются методы классификации, использующие репрезентативную опорную выборку и информативные признаки распознавания классов покрова также могут применяться и для построения картографирования земного покрова также могут применяться и для построения карт природных горючих материалов. Прямая оценка типов горючих материалов лесных экосистем методами ДЗЗ может быть затруднена ввиду маскирующего влияния крон деревьев, скрывающих нижние ярусы растительного покрова, которые часто играют основную роль при низовом горении. В этом случае характеристики горючих материалов могут быть определены косвенно по характеристикам верхнего яруса лесов с использованием инструментов ДЗЗ, позволяющих проводить измерения излучения, проникающего сквозь древесный полог (радары и лидары), или различных методов моделирования потенциальных типов растительности с учётом локального климата. Более детально методы построения карт горючих материалов воборной работе (Szpakowski, Jensen, 2019). В рамках проекта LANDFIRE (*анел.* Landscape Fire and Resource Management Planning Tools Project) созданы детальные карты горючих материалов для всей территории США. При этом использовались данные ДЗЗ, карты растительности, наземные данные и различные климатические индикаторы, что позволило построить карты для двух моделей горючих материалов (Reeves et al., 2009). На построение карт горючих материалов на основе данных о типах растительности и лесов, рельефе, проективном покрытии растительного покрова и данных ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения направлен проект ArcFuel (Toukiloglou et al., 2013). Можно также отметить разработанные Институтом леса им. В. Н. Сукачева методы детальной оценки растительных горючих материалов с использованием спутниковых изображений высокого и сверхвысокого разрешения (Волокитина и др., 2020).

Данные Д33 могут служить и для получения информации о рельефе местности как важнейшей составляющей информационного обеспечения, необходимого для моделирования динамики развития пожаров. Рельеф оказывает влияние как на распространение пожаров, так и на динамику воздушных потоков в области горения. Наиболее часто при моделировании пожаров используются цифровые модели рельефа, полученные на основе спутниковых данных, например системами Д33 ASTER (*англ*. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и SRTM (*англ*. Shuttle Radar Topographic Mission).

Получаемая по данным спутникового мониторинга информация о местоположении фронта горения может использоваться для задания исходного периметра пожара при его прогнозном моделировании. Использование оперативных и регулярно обновляемых данных для инициализации моделей позволяет избегать накопления ошибок при прогнозировании динамики пожара (Хвостиков и др., 2012; Anderson et al., 2009).

Системы моделирования природных пожаров

Возможности получения по данным ДЗЗ информации о пожаре и условиях горения на любом участке земной поверхности создают необходимые предпосылки для разработки и практического применения прогностических моделей динамики распространения огня. Исследования показывают, что системы моделирования, основанные на данных ДЗЗ и метеорологических наблюдений, способны адекватно оценивать развитие реальных пожаров (Хвостиков и др., 2012; Anderson et al., 2009).

Такие системы моделирования природных пожаров, как FARSITE, Prometheus и некоторые другие, а также реализующее их программное обеспечение часто представляют собой полнофункциональные геоинформационные системы, включающие возможности моделирования, визуализации и анализа прогнозов. Существующая для этих систем общая проблема получения данных для моделирования и необходимости приведения их в заданный формат до недавнего времени могла служить препятствием для их практического применения.

Для решения данной проблемы в последнее десятилетие всё более активно внедряются системы, основанные на модели «клиент – сервер». В таких системах пользователь взаимодействует с моделью через веб-интерфейс в браузере (клиент), пользовательский компьютер только отправляет запросы на удалённый сервер и выполняет визуализацию данных, полученных от него. Удалённый сервер обычно хранит регулярно обновляемый архив необходимой для моделирования информации и берёт на себя операции по подготовке данных и моделированию. Существующие системы такого рода используют уже зарекомендовавшие себя модели природных пожаров, типично предназначены для применения на национальном уровне и могут использовать как данные спутникового мониторинга, так и более детальные наземные или воздушные наблюдения.

Специализированные системы поддержки принятия решений по борьбе с пожарами или их мониторинга также могут строиться по схеме «клиент – сервер». Обычно они предоставляют доступ к широкому набору информации о текущей пожарной ситуации и включают инструментарий для поддержки принятия решений по организации и проведению противопожарных мероприятий. В последнее время такие системы включают в себя модели динамики природных пожаров. Например, модель FARSITE была успешно интегрирована в греческую систему поддержки принятия решений по борьбе с пожарами AEGIS (Kalabokidis et al., 2016).

Модели распространения пожаров используются в составе российской системы ИСДМ-Рослесхоз (Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства) (Лупян и др., 2015), обеспечивающей получение оперативной однородной информации, необходимой для мониторинга лесных пожаров и их последствий на территории России. Система получает данные более чем от 15 спутниковых аппаратов и использует их для наблюдений действующих пожаров, уточнения их площади и оценки последствий. На данный момент ИСДМ-Рослесхоз используется более чем двумя тысячами учреждений и организаций. Она включает в себя возможность краткосрочного прогноза развития пожаров с помощью детерминистической и вероятностной моделей их динамики (Хвостиков и др., 2012, 2016). На основе данных спутникового мониторинга модели получают информацию об исходном периметре горения, типах растительного покрова и рельефе. Прогнозы, основанные на данных ДЗЗ, показали способность адекватно оценивать динамику природных пожаров. Также можно отметить систему «Каскад», разработанную Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) и включающую функционал по мониторингу природных пожаров на основе данных ДЗЗ, и разработки МЧС по моделированию динамики распространения огня (Акимов и др., 2016).

Ещё одним примером успешной интеграции моделей природных пожаров является американская система принятия решений по пожарам WFDSS (англ. Wildland Fire Decision Support System) (Noonan-Wright et al., 2011). Система поддерживает процесс принятия решений с помощью пользовательского интерфейса с визуализацией пожаров и информацией о статистике пожаров за прошлые годы, текущих и прогнозных метеорологических условиях, с картами горючих материалов, а также с возможностями моделирования распространения дыма и оценки экономического ущерба от огня. В систему интегрированы две пожарные модели: краткосрочная детерминистическая модель FARSITE и долгосрочная вероятностная модель FSPro (Finney et al., 2011). Реализованные в рамках системы возможности прогнозирования динамики пожаров находят всё большее применение в оценке угрозы распространения огня. За несколько лет с момент ввода системы в эксплуатацию число запрошенных модельных прогнозов увеличилось в несколько раз.

Анализ результатов моделирования на основе данных фактических наблюдений

Современные методы дистанционного мониторинга природных пожаров позволяют наблюдать их динамику в оперативном режиме и выполнять оценку пройденной ими территории с высоким уровнем точности. Полученные на основе ДЗЗ данные могут использоваться для оценки точности моделей природных пожаров.

Для оценки точности моделей часто используются данные об итоговом периметре пожара (Finney et al., 2011; Milne et al., 2014; Salis et al., 2016). Они могут основываться в том числе и на данных ДЗЗ, особенно для удалённых труднодоступных территорий, где затруднительно осуществлять наземные измерения.

При оценке точности пожарных моделей часто сравниваются два контура: результат моделирования и данные фактических наблюдений. В литературе приводятся различные критерии близости двух контуров, которые могут быть основаны на анализе площадей, расстояний между контурами, их объединений и пересечений. Если обозначить площадь, пройденную огнём по данным наблюдений как S_{obs} , а по модельным оценкам как S_{model} , то тогда их пересечение $S_{obs} \cap S_{model}$ — это точки, которые пройдены огнём по обоим источникам данных; их объединение $S_{obs} \cup S_{model}$ — точки, которые пройдены огнём хотя бы по одному из источников данных; и их разность $S_{obs} \setminus S_{model}$ и $S_{model} \setminus S_{obs}$ — площадь, пройденная огнём только по данным наблюдений и только по модели соответственно. Можно отметить ряд простых метрик совпадения двух областей (Anderson et al., 2009), таких как процент совпадений (*англ*. hit rate) — $(S_{obs} \cap S_{model})/S_{obs}$, оценивающий полноту заполнения фактического контура модельным прогнозом и варьирующийся от 0 (нет совпадения) до 1 (прогнозирует весь фактический прирост). Или, например, процент ложных детектирований (*англ*. false alarm rate) — $(S_{model} \setminus S_{obs})/S_{obs}$, дающий характеристику переоценки и изменяющийся от 0 (идеальное совпадение) и до бесконечности. Каждая из этих метрик характеризует результат моделирования только с точки зрения недооценки или переоценки, не давая полной картины. Можно отметить простые суммарные оценки, такие как смещение (*англ*. bias) — S_{model} / S_{obs} , принимающее значения от 0 (максимальная недооценка) к 1 (идеальное совпадение) и до бесконечности (переоценка). Ещё один простой критерий — ошибка, делённая на площадь наблюдения ($S_{model} \setminus S_{obs} + S_{obs} \setminus S_{model})/S_{obs}$, который изменяется от 0 (идеальное совпадение) до бесконечности (высокий уровень погрешности). Последние две метрики дают общую характеристику погрешности, но при этом показывают более высокие значения для переоценки. При моделировании природных пожаров переоценка может быть предпочтительнее недооценки, что делает эти метрики менее привлекательными и несколько ограничивает их применение. Приведённые метрики полезны для оценки структуры ошибки, но редко используются для оценки общей точности моделей.

Одна из самых популярных метрик для сравнения результатов моделирования и фактических наблюдений — коэффициент Сёренсена (Cardil et al., 2019; Filippi et al., 2014; Jahdi et al., 2015; Salis et al., 2016), который рассчитывается по следующей формуле:

$$S = 2 \left(S_{obs} \cap S_{model} \right) / \left(S_{obs} + S_{model} \right),$$

т.е. как площадь области совпадения, делёная на суммарную площадь модели и наблюдений. Индекс изменяется от 0 (нет совпадения) до 1 (идеальное совпадение). Другой похожий на него критерий — это коэффициент Жаккара, подсчитываемый по формуле

$$S = (S_{obs} \cap S_{model}) / (S_{obs} \cup S_{model}).$$

(Faggian et al., 2017) и также варьирующийся от 0 до 1. Эти два индекса одинаково характеризуют переоценку и недооценку, давая сбалансированную оценку точности моделей.

В ряде работ используется индекс каппа (Jahdi et al., 2015; Milne et al., 2014). Его суть состоит в сравнении результатов моделирования с гипотетической моделью, в которой прохождение пиксела пожаром является случайным. В литературе встречается большое количество вариаций метода подсчёта этого индекса. Стоит отметить, что существуют сомнения в полезности индекса каппа как в задачах классификации земного покрова, так и для оценки точности пожарных моделей (Finney, 2000).

В большинстве работ, оценивающих точность пожарных моделей, считается, что значение коэффициента Сёренсена (и индекса каппа) от 0,8 и выше говорит о высокой степени оправдываемости модельных прогнозов. Значения свыше 0,5 часто считаются приемлемыми для задач пожарного моделирования. Коэффициент Жаккара обычно показывает значения несколько ниже, чем коэффициент Сёренсена (при высокой степени совпадения — приблизительно на 0,1–0,2 ниже). На *рис. 2* (см. с. 18) приведены значения описанных выше критериев для разных модельных прогнозов.

Существует большое количество других методов сравнения результатов моделирования с фактическим периметром пожара, например расстояние Хаусдорфа, посекторные оценки или специализированные индексы, разработанные для анализа точности пожарных моделей (Filippi et al., 2014; Zhang et al., 2019). Но эти индексы более сложны в описании и на данный момент не получили широкого распространения.

Стоит отметить, что практически во всех работах, сравнивающих модельные и фактические контуры пожара, также проводится их визуальный анализ, позволяющий оценить степень совпадения и идентифицировать основные области модельных ошибок.

Отдельно можно упомянуть проблему оценки точности вероятностных моделей (Хвостиков и др., 2016; Allaire et al., 2020; Finney et al., 2011), предполагающих оценку вероятности достижения пожаром каждой из точек в области исследования. Детальный анализ проблемы приведён в работе (Allaire et al., 2020), описывающей набор метрик для анализа точности, в число которых входит показатель Бриера, оцениваемый по формуле $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (p_{\text{факт}} - p_{\text{модель}}),$ где $p_{\text{факт}} = 1$ для пройденного пожаром пикселя и $p_{\text{факт}} = 0$ для непройденного, $p_{\text{модель}}$ — веро-

ятность по оценке модели. Эта метрика может быть нормирована на показатель данной метрики для вероятностной модели, которая даёт во всех пикселах одинаковое значение вероятности.



Рис. 2. Пример оценки точности модельного прогноза: *а* — прогноз приемлемой точности; *б* — пример недооценки; *в* — пример переоценки

При оценке точности вероятностной модели также можно оценить частоту фактического прохождения пожаром точек с разными значениями вероятности. В идеале частота фактического прохождения должна совпадать со значением вероятности, при нанесении на диаграмму рассеивания они должны образовывать линию 1:1 (Хвостиков и др., 2016; Allaire et al., 2020). Также можно использовать вероятности только на итоговом периметре пожара (Finney et al., 2011), таким образом получая критерий для наиболее неблагоприятного сценария. Для вероятностных моделей также используется визуализация карт вероятности и фактического контура пожара.

Использование данных высокого временного и низкого пространственного разрешения позволяет лучше оценить способность модели воспроизводить динамику пожара, но затрудняет сравнение с модельными оценками из-за высокой погрешности определения местоположения его контура (до сотен метров). Естественный подход сравнения может быть основан на использовании моделей переноса излучения для создания симулированного спутникового снимка по прогнозу динамики пожара и сравнения их с реальным спутниковым изображением. Но большое количество параметров моделей переноса излучения делает затруднительным его применение на практике. Альтернативно можно огрубить разрешение модели до уровня спутникового снимка с помощью некоторых эмпирических порогов (Хвостиков и др., 2012) или оценивать близость модельного фронта и выявленных по данным ДЗЗ очагов горения (Sá et al., 2017).

Все приведённые ранее критерии сравнения, а также визуальный анализ регулярно применяются для оценки точности моделей природных пожаров. Большинство работ ограничивается анализом 1–2 пожаров, часто используя только визуальное сравнение. Существует ограниченное количество исследований (Faggian et al., 2017; Sá et al., 2017; Salis et al., 2016), в которых с использованием различных критериев анализировалось по крайней мере 9–12 пожаров. Авторам известна только одна работа, в которой точность моделирования оценивалась на большом наборе данных: 80 природных пожаров Средиземноморского региона (Filippi et al., 2014). Исследователи отмечают, что при анализе пожарных моделей возникает большая проблема со сбором достоверной и актуальной информации, особенно при оценке условий горения и состояния горючих материалов (Cruz et al., 2014; Finney, 2000). Данные ДЗЗ потенциально могут предоставить необходимую для оценки точности информацию об условиях горения и периметре пожаров.

Приведённые критерии могут применяться для сравнения точности нескольких моделей или разных версий одной модели (Faggian et al., 2017; Filippi et al., 2014). Можно отметить отдельные примеры, в которых анализ точности использовался для коррекции параметров модели природных пожаров. Такая коррекция, например, была успешно проведена для пожаров в лесах Китая (Cai et al., 2014). С помощью анализа чувствительности модели авторы выбрали ключевые параметры горючих материалов, а затем выполнили их экспертную коррекцию, значительно увеличив качество модельных прогнозов (критерий процента совпадений (англ. hit rate) увеличился с 0,17 до 0,64). В работе (Salis et al., 2016) приведён ещё один пример экспертной настройки модельных параметров для условий юга Европы с последующей проверкой модели топлива на 12 пожарах. Настройка привела к увеличению значения критерия Сёренсена на 0,09–0,33 и позволила для большинства пожаров получить высокий уровень точности — порядка 0,7-0,8. Другой подход к адаптации модели FARSITE был применён для условий Ирана (Jahdi et al., 2015). В работе было установлено несколько вариантов соответствия между имеющимися на территории Ирана типами растительного покрова и классами горючих материалов, разработанными для территории США. Затем на основе оценки точности моделирования динамики пожаров была выбрана оптимальная модель горючих материалов, которая дала значение критерия Сёренсена 0,7–0,8; другие модели приводили к существенно более низким значениям критерия — до 0,3. Стоит отметить, что во всех приведённых работах такая настройка проводилась при адаптации существующих моделей динамики пожаров для применения в других странах.

В приведённых работах анализ точности моделей использовался для выбора оптимальной модели топлива, параметры горючих материалов задавались экспертами вручную. Автоматические методы оптимизации также могут использоваться для настройки параметров моделей. Например, они были успешно применены для адаптации канадской модели CFFBPS (*англ.* Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) для условий России (Хвостиков и др., 2012). Итоговая модель показала способность адекватно прогнозировать динамику природных пожаров, уменьшив погрешность (модифицированный bias) с 300 до 50 %. Отдельно можно отметить возможность настройки параметров модели для конкретного пожара с использованием данных ДЗЗ, но данная группа методов, скорее, относится к теме ассимиляции данных ДЗЗ в модели природных пожаров и будет обсуждаться в следующем разделе.

Таким образом, можно заключить, что модели всё чаще анализируются с точки зрения их способности воспроизводить динамику крупных природных пожаров. Для оценки используется большое количество критериев, дающих разностороннее описание точности моделей. Анализ точности может использоваться для сравнения разных моделей между собой или при адаптации моделей к новым условиям и настройке их параметров. В силу трудоёмкости сбора

данных, необходимых для инициализации моделей, часто при оценке точности ограничиваются анализом небольшого количества пожаров. Использование спутниковых данных позволяет преодолеть эти ограничения.

Ассимиляция данных в модели природных пожаров

В последнее десятилетие всё большее развитие получают подходы, основанные на ассимиляции данных в модели развития пожаров. Ассимиляция данных позволяет повысить точность модельных оценок и прогнозов посредством коррекции состояния модели на основе оперативно поступающих наблюдений динамики пожара.

Один из подходов к ассимиляции данных состоит в настройке модельных параметров с целью повышения соответствия между наблюдениями фактической динамики пожара и результатами моделирования. С помощью различных оптимизационных методов выбираются значения параметров модели, дающие наибольшее её соответствие данным наблюдений. Такой подход к ассимиляции позволяет достаточно точно воспроизводить фактическое распространение пожара. Например, в работе (Valero et al., 2017) оптимизация параметров позволила достичь высокого уровня точности, критерий Сёренсена стал равен 0,9. Ограничение данного подхода состоит в экстраполяции предшествующей динамики пожара в будущее без учёта погрешностей, присущих спутниковым наблюдениям и самой модели. Ввиду сложности явления распространения огня и изменчивости условий горения простая настройка модели не всегда позволяет получить адекватный прогноз.

Для учёта особенностей модели и погрешностей наблюдений можно использовать другие подходы, например такие, как фильтр Калмана. Он предполагает линейную связь между текущим состоянием системы и прогнозом её динамики, а также нормальное распределение погрешностей наблюдений и модели. В таких условиях фильтр позволяет аналитически найти оптимальную оценку текущего состояния системы на основе модельных прогнозов и фактических наблюдений. Оценка состояния проводится итеративно: сначала модель строит прогноз на будущий момент времени и выполняет оценку его неопределённости, затем при поступлении данных наблюдений фильтр Калмана производит коррекцию оценки состояния системы (анализ). Относительно этого анализа можно повторно выполнить прогноз и начать новый цикл итерации.

Многие реальные явления могут быть выражены только нелинейными уравнениями, в таком случае может применяться расширенный фильтр Калмана (*англ*. Extended Kalman Filter — EKF), который основан на линеаризации модельных уравнений. Но большинство пожарных моделей невозможно представить в линейной или нелинейной форме, что приводит к целесообразности применения ансамблевого фильтра Калмана (*англ*. Ensemble Kalman Filter — EnKF), предполагающего моделирование множества элементов ансамбля, каждый из которых получен случайной пертурбацией состояния пожара. Элементы ансамбля позволяют оценить неопределённости моделирования и далее применять схему, аналогичную обычному фильтру Калмана. Существуют и другие методы ассимиляции данных, например фильтры частиц.

Можно привести несколько примеров применения фильтра Калмана в пожарных моделях. Так, стоит отметить использование фильтра Калмана для ассимиляции информации об измеряемой по данным ДЗЗ радиационной температуре в физико-химическую модель развития пожара (Mandel et al., 2009). Ассимиляция выполнялась с помощью ансамблевого фильтра Калмана на уровне клеток регулярной сетки. Так как такая схема ассимиляция приводит к сбоям при отклонении модельного распространения от факта, в работе вводится новый вариант фильтра, называемый morphing EnKF. В другой работе того же автора (Mandel et al., 2014) исследуется возможность ассимиляции данных детектирования очагов горения по данным MODIS в модель развития пожара. В статье формулируется критерий расхождения между моделью и данными ДЗЗ по времени и на основе него выполняется оптимизация положения фронта горения. Ансамблевый фильтр Калмана был успешно применён и для ассимиляции данных Д33 в эмпирическую модель развития пожара (Rochoux et al., 2014). Исследуемая модель имела векторную природу, моделирование и ассимиляция выполнялись на основе поведения нескольких элементов-маркеров, характеризующих динамику фронта. Была продемонстрирована способность метода адекватно воспроизводить контролируемые выжигания травяной растительности. Дальнейшее развитие этой работы велось в направлении улучшения критериев сходства результатов моделирования и наблюдений (Zhang et al., 2019). В обеих работах моделируется небольшой травяной пожар, погрешность модельной оценки положения контура пожара достигала 20–25 м, но при использовании ассимиляции погрешность уменьшилась до 5 м.

Приведённые примеры показали значительное увеличение точности модельных оценок и прогнозов при использовании ассимиляции данных. Однако эти исследования выполнены на ограниченном количестве пожаров (обычно одном). Ассимиляция данных выглядит перспективным направлением в развитии моделирования природных пожаров. Построение на этих принципах системы, способной работать в оперативном режиме на региональном или национальном уровне и применимой в практике борьбы с пожарами, следует рассматривать в числе перспективных, требующих своего решения задач.

Заключение

В последние десятилетия наблюдалось активное развитие как методов моделирования природных пожаров, так и подходов к их мониторингу на основе данных ДЗЗ. Современные модели способны прогнозировать динамику распространения огня на больших территориях и находят применение при решении практических задач по борьбе с природными пожарами. Данные ДЗЗ широко используются для задания начальных условий при моделировании динамики пожаров, особенно в качестве источника информации о типах горючих материалов, их характеристиках и рельефе местности. Данные ДЗЗ также представляют большой набор детальной и оперативной информации о динамике природных пожаров, которая может использоваться для инициализации начальных условий моделирования, оценки точности прогнозов и с целью их ассимиляции в модели.

Можно отметить целый ряд перспективных направлений в области пожарного моделирования, например всё большее применение моделей для оценки динамики крупных природных пожаров, появление систем прогнозирования, работающих по схеме «клиент – сервер», развитие работ по ассимиляции данных в модели. Но сложность сбора достоверных данных о динамике пожаров и условиях горения всё ещё приводит к ограничению практического применения моделей для задач борьбы с природными пожарами. Дальнейшее усиление интеграции моделей и данных ДЗЗ может позволить частично решить эту проблему и расширить область применения модельных прогнозов на практике.

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

- 1. Акимов В.А., Алексеенко Я.В., Епихин А.В., Карташев В.И., Краминцев А.П., Кудинов А.А., Курбатов М.Ю., Леденцев С.А., Ротару А.Н., Савельев М.И., Шабуневич А.В, Шабуневич В.И. Наземнокосмический мониторинг чрезвычайных ситуаций. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. 128 с.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
- 3. 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.

- 4. 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.
- 5. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д. Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
- 6. *Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А.* Прогнозирование поведения пожаров растительности // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2020. № 1. С. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-9-25.
- *Гришин А. М.* Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981. 278 с.
 Гришин А. М., *Пененко В. В.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы
- борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
- 9. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния РАН, 2008. 403 с.
- 10. Доррер Г.А., Коморовский В.С., Якимов С.П. Методика оценки и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров на основе спутниковой информации // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. 28. № 1–2. С. 18–26.
- 11. 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., Крашениникова 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. 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.
- 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. Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 5. С. 25–36. DOI: 10.15372/ SJFS20170503.
- 14. 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.
- 15. *Хвостиков С.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А.* Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 91–100.
- 16. *Хвостиков С.А., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте-Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутни-кового детектирования очагов горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 145–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-145-156.
- 17. Шихов А. Н., Зарипов А. С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128.
- 18. *Allaire F., Filippi J.-B., Mallet V.* Generation and evaluation of an ensemble of wildland fire simulations // Intern. J. Wildland Fire. 2020. V. 29. No. 2. P. 160–173. DOI: 10.1071/WF19073.
- Amraoui M., DaCamara C. C., Pereira J. M. C. Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. No. 5. P. 1038–1052. DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.019.
- 20. Anderson K. R., Englefield P., Little J. M., Reuter G. An approach to operational forest fire growth predictions for Canada // Intern. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. No. 8. P. 893–905. DOI: 10.1071/WF08046.
- Andrews P.L. Do you BEHAVE? Application of the BehavePlus fire modeling system // Proc. 3rd Fire Behavior and Fuels Conf. 25–29 Oct. 2010 / eds. Wade D.D., Robinson M.L. Spokane; Birmingham: Intern. Association of Wildland Fire, 2010. 17 p.
- 22. *Cai S., Liu D., Sulla-Menashe D., Friedl M.A.* Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 147. P. 243–255. DOI: 10.1016/j. rse.2014.03.012.

- Cardil A., Monedero S., Ramírez J., Silva C. A. Assessing and reinitializing wildland fire simulations through satellite active fire data // J. Environmental Management. 2019. V. 231. P. 996–1003. DOI: 10.1016/j. jenvman.2018.10.115.
- Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G. R., San Miguel J., Tanase M., Koutsias N., García M., Yebra M., Padilla M., Gitas I., Heil A., Hawbaker T.J., Giglio L. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 45–64. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
- 25. *Cruz M. G., Alexander M. E.* Uncertainty associated with model predictions of surface and crown fire rates of spread // Environmental Modelling and Software. 2013. V. 47. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.04.004.
- 26. Cruz M. G., Sullivan A. L., Leonard R., Malkin S., Matthews S., Gould J. S., McCaw W. L., Alexander M. E. Fire Behaviour Knowledge in Australia: A synthesis of disciplinary and stakeholder knowledge on fire spread prediction capability and application. CSIRO Ecosystems Sciences and CSIRO Digital Productivity and Services Flagship Client Report No. EP145189. Canberra, Australia, 2014. 171 p.
- 27. *Faggian N., Bridge C., Fox-Hughes P., Jolly P., Jacobs H., Ebert B., Bally J.* Final Report: An evaluation of fire spread simulators used in Australia. Melbourne, Australia: Bureau of Meteorology, 2017. 92 p.
- 28. *Filippi J. B., Mallet V., Nader B.* Evaluation of forest fire models on a large observation database // Natural Hazards and Earth System Science. 2014. V. 14. No. 11. P. 3077–3091. DOI: 10.5194/nhess-14-3077-2014.
- Filizzola C., Corrado R., Marchese F., Mazzeo G., Paciello R., Pergola N., Tramutoli V. RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: description, implementation, and field validation in the case of the MSG-SEVIRI sensor // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 186. P. 196–216. DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.008.
- 30. *Finney M.A.* Efforts at Comparing Simulated and Observed Fire Growth Patterns: Final Report. 2000. 20 p. URL: https://www.firelab.org/sites/default/files/2021-05/Finney_2000_FarsiteValidation_FinalReport.pdf.
- Finney M.A., Grenfell I.C., McHugh C.W., Seli R.C., Trethewey D., Stratton R.D., Brittain S. A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation // Environmental Modeling and Assessment. 2011. V. 16. No. 2. P. 153–167. DOI: 10.1007/s10666-010-9241-3.
- 32. *Giglio L., Schroeder W., Justice C. O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 178. P. 31–41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
- 33. Jahdi R., Salis M., Darvishsefat A.A., Mostafavi M.A., Alcasena F., Etemad V., Lozano O., Spano D. Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2015. V. 15. No. 3. P. 443–459. DOI: 10.5194/nhess-15-443-2015.
- Kalabokidis K., Ager A., Finney M., Athanasis N., Palaiologou P., Vasilakos C. AEGIS: a wildfire prevention and management information system // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2016. V. 16. No. 3. P. 643–661. DOI: 10.5194/nhess-16-643-2016.
- 35. *Kurbanov E., Vorobyev O., Leznin S., Polevshikova Y., Demisheva E.* Assessment of burn severity in Middle Povozhje with Landsat multitemporal data // Intern. J. Wildland Fire. 2017. T. 26. No. 9. C. 772–782. DOI: 10.1071/WF16141.
- Mandel J., Beezley J. D., Coen J. L., Kim M. Data Assimilation for Wildland Fires Ensemble Kalman filters in coupled atmosphere-surface models // IEEE Control Systems Magazine. 2009. V. 29. Iss. 3. P. 47–65. DOI: 10.1109/MCS.2009.932224.
- 37. *Mandel J., Kochanski A. K., Vejmelka M., Beezley J. D.* Data Assimilation of Satellite Fire Detection in Coupled Atmosphere-Fire Simulation by WRF-SFIRE // arXiv preprint. arXiv:1410.6948. 2014. 9 p.
- Milne G. J., Kelso J. K., Mellor D., Murphy M. E. Evaluating wildfire simulators using historical fire data // Advances in Forest Fire Research / Imprensa da Universidade de Coimbra. 2014. P. 1366–1375. DOI: 10.14195/978-989-26-0884-6_150.
- Noonan-Wright E. K., Opperman T. S., Finney M.A., Zimmerman G. T., Seli R. C., Elenz L. M., Calkin D. E., Fiedler J. R. Developing the US Wildland Fire Decision Support System // J. Combustion. 2011. V. 2011. P. 1–14. DOI: 10.1155/2011/168473.
- 40. *Oliva P., Schroeder W.* Assessment of VIIRS 375m active fire detection product for direct burned area mapping // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 160. P. 144–155. DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.010.
- Opperman T., Gould J., Finney M., Tymstra C. Applying Fire Spread Simulators in New Zealand and Australia: Results from an International Seminar // Fuels Management-How to Measure Success: Proc. Conf. Portland. 28–30 March 2006. Fort Collins, U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006. P. 201–212.
- 42. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S. G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // Atmosphere. 2021. V. 12. No. 5. Art. No. 559. 15 p. DOI: 10.3390/ atmos12050559.
- 43. *Reeves M. C., Ryan K. C., Rollins M. G., Thompson T. G.* Spatial fuel data products of the LANDFIRE Project // Intern. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. No. 3. P. 250. DOI: 10.1071/WF08086.
- 44. *Rochoux M. C., Emery C., Ricci S., Cuenot B., Trouvé A.* Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread. Part 2: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire

spread // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. 2014. V. 2. No. 5. P. 3769–3820. DOI: 10.5194/nhessd-2-3769-2014.

- 45. *Rothermel R. C.* A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels / USDA Forest Service. Research paper INT-115. 1972. 48 p.
- 46. Sá A. C. L., Benali A., Fernandes P. M., Pinto R. M. S., Trigo R. M., Salis M., Russo A., Jerez S., Soares P. M. M., Schroeder W., Pereira J. M. C. Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 190. P. 302–317. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.023.
- Salis M., Arca B., Alcasena F., Arianoutsou M., Bacciu V., Duce P., Duguy B., Koutsias N., Mallinis G., Mitsopoulos I., Moreno J. M., Pérez J. R., Urbieta I. R., Xystrakis F., Zavala G., Spano D. Predicting wildfire spread and behaviour in Mediterranean landscapes // Intern. J. Wildland Fire. 2016. V. 25. No. 10. P. 1015– 1032. DOI: 10.1071/WF15081.
- 48. *Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F.* Active fire detection using Landsat-8/OLI data // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 210–220. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.032.
- 49. *Sullivan A. L.* A review of wildland fire spread modelling, 1990-present, 1: Physical and quasi-physical models // Intern. J. Wildland Fire. 2009. V. 18. No. 4. P. 349–368. DOI: 10.1071/WF06143.
- 50. *Szpakowski D. M., Jensen J. L. R.* A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 22. Art. No. 2638. DOI: 10.3390/rs11222638.
- Toukiloglou P., Eftychidis G., Gitas I., Tompoulidou M. ArcFuel methodology for mapping forest fuels in Europe // Proc 1st Intern. Conf. Remote Sensing and Geoinformation of Environment. 2013. V. 8795. Art. No. 87951J. 19 p. DOI: 10.1117/12.2028213.
- 52. *Tymstra C., Bryce R., Wotton B. M., Armitage O. B.* Development and structure of Prometheus the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. Information Report NOR-X-417. Edmonton: Northern Forestry Centre, 2010. 102 p.
- 53. Valero M. M., Rios O., Mata C., Pastor E., Planas E. An integrated approach for tactical monitoring and data-driven spread forecasting of wildfires // Fire Safety J. 2017. V. 91. P. 835–844. DOI: 10.1016/j. firesaf.2017.03.085.
- Zhang C., Collin A., Moireau P., Trouvé A., Rochoux M. C. Front shape similarity measure for data-driven simulations of wildland fire spread based on state estimation: Application to the RxCADRE fieldscale experiment // Proc. Combustion Institute. 2019. V. 37. No. 3. P. 4201–4209. DOI: 10.1016/j. proci.2018.07.112.

Use of remote sensing data in wildfire modelling

S.A. Khvostikov, S.A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia

Wildfire modelling can be used to evaluate fire threat level and support fire related decisions. State-ofthe-art wildfires model produce accurate forecast of fire spread if provided with timely and accurate input data. Model input data can be provided by remote sensing (RS). This article gives short summary on wildfire modelling methods, methods to evaluate fire and fuel characteristics from RS and reviews multiple applications of RS data in wildfire modelling. RS data provides information on fire characteristics for every point on Earth, forming the basis for global or regional (national) wildfire modelling systems. Development of wildfire modelling and RS methods expanded opportunities for model accuracy estimation and model parameters evaluation. Joint use of RS data and model forecast form the basis for data assimilations methods which can further increase model accuracy.

Keywords: wildfire modelling, hotspots, burns, classification, accuracy estimation, data assimilation

Accepted: 11.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27

References

- Akimov V.A., Alekseenko Ya.V., Epikhin A.V., Kartashev V.I., Kramintsev A.P., Kudinov A.A., Kurbatov M.Yu., Ledentsev S.A., Rotaru A.N., Savel'ev M.I., Shabunevich A.V., Shabunevich V.I., *Nazemnokosmicheskii monitoring chrezvychainykh situatsii* (Remote and ground monitoring of emergency situations), Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs), 2016, 128 p. (in Russian).
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Khovratovich T.S., Krylov A.M., Stytsenko F.V., The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 215–225 (in Russian).
- 3. 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. 9–27 (in Russian).
- 4. 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).
- 5. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221 (in Russian).
- 6. Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A., Vegetation fire behavior prediction, *Lesnoi Zhurnal* (*Russian Forestry J.*), 2020, No. 1, pp. 9–25 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-9-25.
- 7. Grishin A. M., *Matematicheskie modeli lesnykh pozharov* (Mathematical wildfire models), Tomsk, 1981, 278 p. (in Russian).
- 8. Grishin A. M., Penenko V. V., *Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi* (Mathematical modelling of wildfires and new ways of firefighting), Novosibirsk: Nauka, 1992, 404 p. (in Russian).
- 9. Dorrer G.A., *Dinamika lesnykh pozharov* (Dynamic of forest fires), Novosibirsk: Izd. Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2008, 403 p. (in Russian).
- 10. Dorrer G.A., Komorovskii V.S., Yakimov S.P., Method for evaluation and forecast of big wildfires based on remote sensing data, *Khvoinye boreal'noi zony*, 2011, Vol. 28, No. 1, pp. 18–26 (in Russian).
- Loupian E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V., Kotelnikov 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., Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250 (in Russian).
- 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., Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsi*onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
- 13. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Yakimov N. D., Current results and perspectives of wildfire satellite monitoring in Siberia, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 5, pp. 25–36 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170503.
- 14. 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).
- 15. Khvostikov S.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Regional scale optimization of wildfire model parameters and modelling of wildfire dynamic using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 91–100 (in Russian).
- Khvostikov S.A., Bartalev S.A., Loupian E.A., Stochastic wildfire model based on Monte-Carlo method and remote sensing data integration, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 145–156 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-145-156.
- 17. Shihov A. N., Zaripov A. S., Long-term dynamics of fire- and wind-related forest losses in northeast European Russia from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 114–128 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128.
- Allaire F., Filippi J.-B., Mallet V., Generation and evaluation of an ensemble of wildland fire simulations, *Intern. J. Wildland Fire*, 2020, Vol. 29, No. 2, pp. 160–173, DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.019 DOI: 10.1071/ WF19073.
- Amraoui M., DaCamara C. C., Pereira J. M. C., Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 5, pp. 1038–1052, DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.019.

- 20. Anderson K. R., Englefield P., Little J. M., Reuter G., An approach to operational forest fire growth predictions for Canada, *Intern. J. Wildland Fire*, 2009, Vol. 18, No. 8, pp. 893–905, DOI: 10.1071/WF08046.
- Andrews P. L., Do you BEHAVE? Application of the BehavePlus fire modeling system, *Proc. 3rd Fire Behavior and Fuels Conf.*, 25–29 Oct. 2010, Spokane; Birmingham: Intern. Association of Wildland Fire, 2010, 17 p.
- 22. Cai S., Liu D., Sulla-Menashe D., Friedl M.A., Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 147, pp. 243–255, DOI: 10.1016/j. rse.2014.03.012.
- 23. Cardil A., Monedero S., Ramírez J., Silva C.A., Assessing and reinitializing wildland fire simulations through satellite active fire data, *J. Environmental Management*, 2019, Vol. 231, pp. 996–1003, DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.115.
- Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G.R., San Miguel J., Tanase M., Koutsias N., García M., Yebra M., Padilla M., Gitas I., Heil A., Hawbaker T.J., Giglio L., Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 45–64, DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
- 25. Cruz M. G., Alexander M. E., Uncertainty associated with model predictions of surface and crown fire rates of spread, *Environmental Modelling and Software*, 2013, Vol. 47, pp. 16–28, DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.04.004.
- 26. Cruz M. G., Sullivan A. L., Leonard R., Malkin S., Matthews S., Gould J. S., McCaw W. L., Alexander M. E., *Fire Behaviour Knowledge in Australia, CSIRO Ecosystems Sciences and CSIRO Digital Productivity and Services Flagship Client Report No. EP145189*, 2014, 171 p.
- 27. Faggian N., Bridge C., Fox-Hughes P., Jolly P., Jacobs H., Ebert B., Bally J., *Final Report: An evaluation of fire spread simulators used in Australia*, Melbourne, Australia: Bureau of Meteorology, 2017, 92 p.
- Filippi J. B., Mallet V., Nader B., Evaluation of forest fire models on a large observation database, *Natural Hazards and Earth System Science*, 2014, Vol. 14, No. 11, pp. 3077–3091, DOI: 10.5194/ nhess-14-3077-2014.
- 29. Filizzola C., Corrado R., Marchese F., Mazzeo G., Paciello R., Pergola N., Tramutoli V., RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: description, implementation, and field validation in the case of the MSG-SEVIRI sensor, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 186, pp. 196–216, DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.008.
- 30. Finney M.A., *Efforts at Comparing Simulated and Observed Fire Growth Patterns: Final Report*, 2000, 20 p., available at: https://www.firelab.org/sites/default/files/2021-05/Finney_2000_FarsiteValidation_FinalReport.pdf.
- Finney M.A., Grenfell I.C., McHugh C.W., Seli R.C., Trethewey D., Stratton R.D., Brittain S., A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation, *Environmental Modeling and Assessment*, 2011, Vol. 16, No. 2, pp. 153–167, DOI: 10.1007/s10666-010-9241-3.
- 32. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O., The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 178, pp. 31–41, DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
- 33. Jahdi R., Salis M., Darvishsefat A.A., Mostafavi M.A., Alcasena F., Etemad V., Lozano O., Spano D., Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, Vol. 15, No. 3, pp. 443–459, DOI: 10.5194/nhess-15-443-2015.
- 34. Kalabokidis K., Ager A., Finney M., Athanasis N., Palaiologou P., Vasilakos C., AEGIS: a wildfire prevention and management information system, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, Vol. 16, No. 3, pp. 643–661, DOI: 10.5194/nhess-16-643-2016.
- 35. Kurbanov E., Vorobyev O., Leznin S., Polevshikova Y., Demisheva E., Assessment of burn severity in Middle Povozhje with Landsat multitemporal data, *Intern. J. Wildland Fire*, 2017, Vol. 26, No. 9, pp. 772–782, DOI: 10.1071/WF16141.
- Mandel J., Beezley J. D., Coen J. L., Kim M., Data Assimilation for Wildland Fires Ensemble Kalman filters in coupled atmosphere-surface models, *IEEE Control Systems Magazine*, 2009, Vol. 29, Issue 3, pp. 47–65, DOI: 10.1109/MCS.2009.932224.
- 37. Mandel J., Kochanski A. K., Vejmelka M., Beezley J. D., Data Assimilation of Satellite Fire Detection in Coupled Atmosphere-Fire Simulation by WRF-SFIRE, *arXiv preprint*, *arXiv:1410.6948*, 2014, 9 p.
- 38. Milne G.J., Kelso J.K., Mellor D., Murphy M.E., Evaluating wildfire simulators using historical fire data, *Advances in forest fire research. Imprensa da Universidade de Coimbra*, 2014, pp. 1366–1375, DOI: 10.14195/978-989-26-0884-6_150.
- Noonan-Wright E. K., Opperman T. S., Finney M. A., Zimmerman G. T., Seli R. C., Elenz L. M., Calkin D. E., Fiedler J. R., Developing the US Wildland Fire Decision Support System, *J. Combustion*, 2011, Vol. 2011, pp. 1–14, DOI: 10.1155/2011/168473.
- 40. Oliva P., Schroeder W., Assessment of VIIRS 375m active fire detection product for direct burned area mapping, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 160, pp. 144–155, DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.010.
- 41. Opperman T., Gould J., Finney M., Tymstra C., Applying Fire Spread Simulators in New Zealand and Australia: Results from an International Seminar, *Fuels Management-How to Measure Success*, Proc. Conf.,

Portland, 28–30 March 2006, Fort Collins, U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, pp. 201–212.

- 42. Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S.G., Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia, *Atmosphere*, 2021, Vol. 12, No. 5, Art. No. 559, 15 p., DOI: 10.3390/ atmos12050559.
- 43. Reeves M.C., Ryan K.C., Rollins M.G., Thompson T.G., Spatial fuel data products of the LANDFIRE Project, *Intern. J. Wildland Fire*, 2009, Vol. 18, No. 3, pp. 250, DOI: 10.1071/WF08086.
- 44. Rochoux M.C., Emery C., Ricci S., Cuenot B., Trouvé A., Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread, Part 2: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2014, Vol. 2, No. 5, pp. 3769–3820, DOI: 10.5194/nhessd-2-3769-2014.
- 45. Rothermel R. C., *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, USDA Forest Service, Research paper INT-115, 1972, 48 p.
- 46. Sá A. C. L., Benali A., Fernandes P. M., Pinto R. M. S., Trigo R. M., Salis M., Russo A., Jerez S., Soares P. M. M., Schroeder W., Pereira J. M. C., Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 190, pp. 302–317, DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.023.
- Salis M., Arca B., Alcasena F., Arianoutsou M., Bacciu V., Duce P., Duguy B., Koutsias N., Mallinis G., Mitsopoulos I., Moreno J. M., Pérez J. R., Urbieta I. R., Xystrakis F., Zavala G., Spano D., Predicting wildfire spread and behaviour in Mediterranean landscapes, *Intern. J. Wildland Fire*, 2016, Vol. 25, No. 10, pp. 1015–1032, DOI: 10.1071/WF15081.
- 48. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F., Active fire detection using Landsat-8/ OLI data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 185, pp. 210–220, DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.032.
- 49. Sullivan A. L., A review of wildland fire spread modelling, 1990-present, 1: Physical and quasi-physical models, *Intern. J. Wildland Fire*, 2009, Vol. 18, No. 4, pp. 349–368, DOI: 10.1071/WF06143.
- 50. Szpakowski D. M., Jensen J. L. R., A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 22, Art. No. 2638, DOI: 10.3390/rs11222638.
- Toukiloglou P., Eftychidis G., Gitas I., Tompoulidou M., ArcFuel methodology for mapping forest fuels in Europe, *Proc 1st Intern. Conf. Remote Sensing and Geoinformation of Environment*, 2013, Vol. 8795, Art. No. 87951J, 19 p., DOI: 10.1117/12.2028213.
- 52. Tymstra C., Bryce R., Wotton B. M., Armitage O. B., *Development and structure of Prometheus the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*, *Information Report NOR-X-417*, Edmonton: Northern Forestry Centre, 2010, 102 p.
- 53. Valero M. M., Rios O., Mata C., Pastor E., Planas E., An integrated approach for tactical monitoring and data-driven spread forecasting of wildfires, *Fire Safety J.*, 2017, Vol. 91, pp. 835–844, DOI: 10.1016/j. firesaf.2017.03.085.
- Zhang C., Collin A., Moireau P., Trouvé A., Rochoux M. C., Front shape similarity measure for data-driven simulations of wildland fire spread based on state estimation: Application to the RxCADRE field-scale experiment, *Proc. Combustion Institute*, 2019, Vol. 37, No. 3, pp. 4201–4209, DOI: 10.1016/j. proci.2018.07.112.