

Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте-Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутникового детектирования очагов горения

С.А. Хвостиков, С.А. Баргалева, Е.А. Лупян

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

В работе представлена вероятностная модель развития природных пожаров, основанная на методе Монте-Карло, и интеграции данных спутникового мониторинга в имитационную модель развития огня. Точность моделирования развития природных пожаров в данный момент ограничена несовершенством самих моделей, а также погрешностями и недостаточно высоким пространственным разрешением входных спутниковых и метеорологических данных. Проблема качества входных данных особенно остро стоит при оперативном моделировании развития пожаров. Вероятностный подход к моделированию позволяет учесть погрешности входных данных и модельных параметров при воспроизведении динамики пожара. Множество сценариев развития пожара, полученных методом Монте-Карло с учетом погрешностей модели, позволяют оценить вероятность достижения огнем близлежащих территорий. Проверка качества работы модели была проведена для нескольких сотен пожаров в лиственных лесах Сибири. Проверка точности модельных оценок вероятности осуществлялась путем сравнения результатов модельных расчетов для различных сценариев распространения огня с данными спутниковых наблюдений динамики горения. Проведенные сравнения показали хорошее совпадение модельных оценок и фактических данных спутникового мониторинга. В работе показано, что разработанная модель может быть использована для оценки возможных потерь лесных ресурсов, степени угроз населенным пунктам и объектам инфраструктуры в результате действия природных пожаров.

Ключевые слова: природные пожары, спутниковый мониторинг, модели развития пожаров, метод Монте-Карло

*Одобрена к печати: 11.10.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-145-156*

Введение

Природный пожар представляет собой комплексное динамическое явление, определяемое сложными химическими (пиролиз, горение) и физическими (адвекция, излучение) процессами в их взаимодействии друг с другом и с окружающей средой. Развитие пожара, как правило, происходит в неоднородной среде, представленной множеством типов природных горючих материалов с различными свойствами. Динамика развития пожара в значительной степени обусловлена влиянием различных атмосферных процессов, а также наличием, составом и состоянием горючих материалов в среде распространения огня.

В настоящее время существует большое число моделей развития природных пожаров, детально описывающих различные процессы горения и распространения огня (например, Sullivan, 2009a). Такие модели направлены на максимально точное описание различных процессов, влияющих на динамику пожара. Однако их использование сопряжено с необходимостью точного знания значительного числа характеристик (наличием, составом и состоянием горючих материалов, локальными метеоусловиями, рельефом местности и т.д.), описывающих состояние среды и условия распространения пожара. В то же время в реальных условиях получение такой информации очень затруднено, а порою и невозможно. Кроме того, подобные модели требуют значительных вычислительных ресурсов

и временных затрат. Поэтому их использование для оперативного прогнозирования реальных пожаров является практически невозможным. На практике для моделирования развития природных пожаров преимущественно используются упрощенные модели, основанные на задании зависимостей распространения огня от условий природной среды эмпирическими аппроксимациями, которые во многих случаях могут показывать достаточно хорошие результаты (Sullivan, 2009b; Finney et al., 2011; Хвостиков и др., 2012).

В то же время при моделировании динамики пожара точность прогноза зависит от погрешностей задания начальных данных, характеризующих свойства природных горючих материалов, рельефа, значения локальных метеорологических параметров непосредственно в области активного горения и т.д. Поэтому на практике при использовании моделей возникает вопрос об оценке достоверности прогнозов и обеспечении возможностей для расчета вероятностей различных сценариев развития пожара. Решение данной задачи требует перехода от детерминированного моделирования пожаров (с жестко определенными начальными условиями и уравнениями, описывающими процессы распространения огня) к стохастическим описаниям, позволяющим учесть различные неопределенности в задании начальных условий и в описании процессов развития пожаров. Идея такого подхода к моделированию динамики пожаров рассматривались ранее (например, Boychuk et al., 2009; Finney et al., 2011; Perryman et al., 2013). При этом в ряде работ отечественных ученых (Доррер, 1978; Барановский, 2010; Лепп, Ушанов, 2010) дается теоретическое построение вероятностной модели развития пожаров и исследуется влияние стохастических параметров на их поведение.

Один из подходов к стохастическому прогнозированию развития пожаров основан на многократном детерминированном моделировании для различных генерируемых случайно реализаций исходных данных. Такой подход использовался, например, для учета неопределенности в метеорологических данных (Anderson et al., 2005) или для моделирования пожара на длительных интервалах времени при отсутствии метеорологических прогнозов (Finney et al., 2011). В настоящей работе данный подход использовался при построении вероятностной модели распространения пожаров. При этом особенностью предлагаемой модели является ее ориентация на использование информации, которая сегодня может быть получена для всей территории России на основе данных спутниковых и метеорологических наблюдений. Этот факт является ключевым с точки зрения возможности использования предлагаемой модели для решения практических задач прогнозирования пожаров в режимах близких к реальному времени.

Целью работы является построение стохастической модели развития пожара, способной адекватно оценивать вероятность достижения близлежащих объектов огнем на период 1–3 суток с учетом погрешностей входных данных. Ниже описан метод прогностического моделирования и результаты его апробации применительно к пожарам в лиственных лесах.

Модель и входные данные

Созданная в рамках данной работы стохастическая модель распространения огня использует систему детерминированного прогнозирования динамики лесных пожаров CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System). Она основана на системе уравнений, определяющих зависимость скорости развития фронта горения от типов природных горючих материалов, метеорологических условий и характеристик рельефа (Development..., 1992). Для построения вероятностной модели использовалась регионально параметризованная для условий России версия CFFBPS (Хвостиков и др., 2012).

Для моделирования CFFBPS рассчитывает влажность природных горючих материалов, определяемую через значения данного параметра в предыдущий момент времени и метеорологических характеристик, включая температуру и влажность воздуха и количество осадков. По данным о влажности и типе природных горючих материалов, силе и направлении ветра модель определяет скорость распространения фронта горения. При этом форма пожара описывается эллипсом, в одном из фокусов которого расположен источник огня, а расстояние от фокуса до наиболее удаленной точки эллипса определяется по скорости фронтового распространения пожара и времени моделирования. Расчет соотношения длин осей эллипса осуществляется по скорости ветра. Полученное описание распространения пожара от точечного источника эллипсом используется для расчета боковой и тыловой скорости распространения огня. Для учета влияния рельефа на темп развития пожара угол наклона местности переводится в эквивалентный ему по воздействию ветер, скорость которого затем суммируется со скоростью ветра по данным метеорологических измерений.

Система осуществляет моделирование пожара на регулярной сетке с размером клеток 230 метров. Выбор размеров клеток продиктован уровнем пространственного разрешения карты растительного покрова России (Барталев и др., 2011), которая использована в работе при моделировании как источник входных данных о типах природных горючих материалов. При этом каждая клетка сетки может принимать в некоторый фиксированный момент времени одно из состояний следующего ограниченного набора: территория активного горения, территория завершеного горения, территория возможного горения, территория невозможного горения (отсутствуют горючие материалы). На сетке отмечены территории активного горения и уже пройденные огнем участки, а для каждой клетки в состоянии активного горения рассчитываются скорости фронтового и бокового распространения пожара, определяющие пройденную ими область за заданный временной интервал. Клетки территории возможного горения, центры которых пройдены пожаром, переходят в состояние активного горения и учитываются при дальнейшем моделировании.

В качестве исходной (стартовой) области активного горения для проведения прогнозного моделирования используются результаты детектирования действующих пожаров (hot-spot) по данным MODIS с пространственным разрешением 1 км (Justice et al., 2006), обновляемые, при отсутствии мешающего влияния облачности, до 6–8 раз в сутки.

Алгоритм реконструкции периметра пожара включает в себя анализ пространственно-временной связности выявленных по данным MODIS очагов горения (Барталев и др., 2012). Выбор спутникового инструмента MODIS обоснован наличием многолетнего открытого архива данных наблюдений. Однако модель может использовать данные и других спутниковых аппаратов, способных детектировать тепловые аномалии (например, NPP-VIIRS, Landsat, Sentinel-2).

При моделировании использовалась фактическая и прогностическая метеоинформация (данные о скорости и направлении ветра, количестве осадков, температурах воздуха и точки росы), поставляемая Гидрометцентром России на регулярной сетке с пространственным разрешением 0,25 градуса и временным шагом 3 часа.

Необходимая для моделирования информация о типах природных горючих материалов получается на основе карты растительного покрова России (Барталев и др., 2011) с пространственным разрешением 230 м и легендой, включающей 23 различных класса. Источником данных о характеристиках рельефа местности служит широко используемая цифровая модель SRTM Digital Elevation Map с деградированным до 230 м пространственным разрешением (Reuter et al., 2007).

Необходимость адаптации модели к использованию на территории России потребовала ее региональной параметризации. Последняя осуществлялась путем оптимизации значений параметров, определяющих скорость распространения пожара в различных типах растительности. Оптимизация проводилась с использованием репрезентативной выборки пожаров путем минимизации меры отклонения результатов моделирования от фактической динамики развития очагов горения по данным спутниковых наблюдений (Хвостиков и др., 2012).

Регионально адаптированная модель показала возможность адекватного воспроизведения динамики развития пожара, однако оценка точности прогнозирования пройденной огнем площади показала наличие ошибок, предположительно объясняемых погрешностями метеорологических данных и параметров модели (Хвостиков и др., 2012). Стохастическое моделирование при прогнозе динамики пожара потенциально позволяет учесть влияние этих погрешностей.

Оценка погрешностей входных данных

В работе принято предположение о том, что ошибки прогнозирования динамики пожара вызваны преимущественно погрешностями в задании следующих, оказывающих наибольшее влияние на развитие пожара, метеорологических данных: скорости и направления ветра, количества осадков. Влияние на результаты моделирования погрешностей в значениях других метеорологических параметров в данной работе не рассмотрены.

Существует несколько возможных источников погрешности прогнозных метеоданных. Первый источник – погрешности собственно метода прогнозирования, связанные

с несовершенством используемых метеорологических моделей и ошибками входных данных. Эти погрешности можно оценить посредством сравнения прогнозных значений характеристик с фактически наблюдаемыми величинами на метеостанциях.

Второй источник погрешности связан с пространственным разрешением прогнозных метеоданных. Так как прогнозные метеоданные дают информацию только о средних значениях в клетке регулярной сетки (0,25 градусов), то фактические значения параметров в области горения могут существенно от них отличаться. Величина данной погрешности зависит от локальных факторов, таких как рельеф, и может варьироваться для разных клеток регулярной сетки. Повышение пространственного разрешения данных может уменьшить значение этой погрешности. Данные более высокого пространственного разрешения также могут быть использованы и для оценки величины этой погрешности.

На основании анализа временной динамики прогнозных метеопараметров и фактических показаний были построены предварительные оценки данных погрешностей. Для упрощения процесса моделирования в работе не учитывалось возможное наличие зависимости ошибки метеоданных от их прогнозных значений и погрешностей в предыдущих по времени данных.

Также было сделано предположение о наличии погрешностей в параметрах модели, отвечающих за скорость распространения пожара в различных типах растительности. При этом ошибка принималась нормально распределенной с нулевым средним и вариацией, дающей наиболее точный стохастический прогноз развития пожара.

Стохастическое моделирование динамики пожаров

Используемая модель развития пожара описывает зависимость скорости распространения огня от характеристик природных горючих материалов, рельефа местности и погодных условий в виде системы эмпирических уравнений. Однако даже для относительно простой модели аналитический учет влияния стохастической природы используемых параметров и входных данных на точность результатов является затруднительным. Возможной альтернативой аналитическому учету влияния случайных факторов на результаты моделирования может быть использование метода Монте-Карло, основанного на получении множества реализаций стохастического процесса, в каждой из которых его вероятностные составляющие заменяются их случайными реализациями. Последующий анализ полученных реализаций позволяет получить статистическую информацию о вероятностном поведении стохастического процесса.

При моделировании развития пожара методом Монте-Карло на каждой реализации случайно выбираются значения стохастических элементов модели – погрешностей в скорости и направлении ветра, количестве осадков и линейной компоненте скорости распространения пожара. На основании этих погрешностей строится детерминистический прогноз, представляющий собой регулярную сетку, на которой указаны клетки, перешедшие

в состоянии активного горения за период моделирования. Вероятностный прогноз развития пожара основан на совмещении регулярных сеток, полученных по множеству реализаций.

Вероятностное моделирование позволяет построить карту вероятностей достижения пожаром окрестных территорий. Для этого в каждой клетке сетки подсчитывается число реализаций, для которых детерминистический прогноз показал переход клетки в состояние горения, и делится на общее число всех реализаций (рис. 1). Так как каждая реализация получается в результате случайного выбора значений из распределений погрешностей и предполагается, что полученные распределения адекватно отражают вероятность различных сценариев развития пожара, то полученная оценка предположительно характеризует вероятность достижения клетки пожаром.

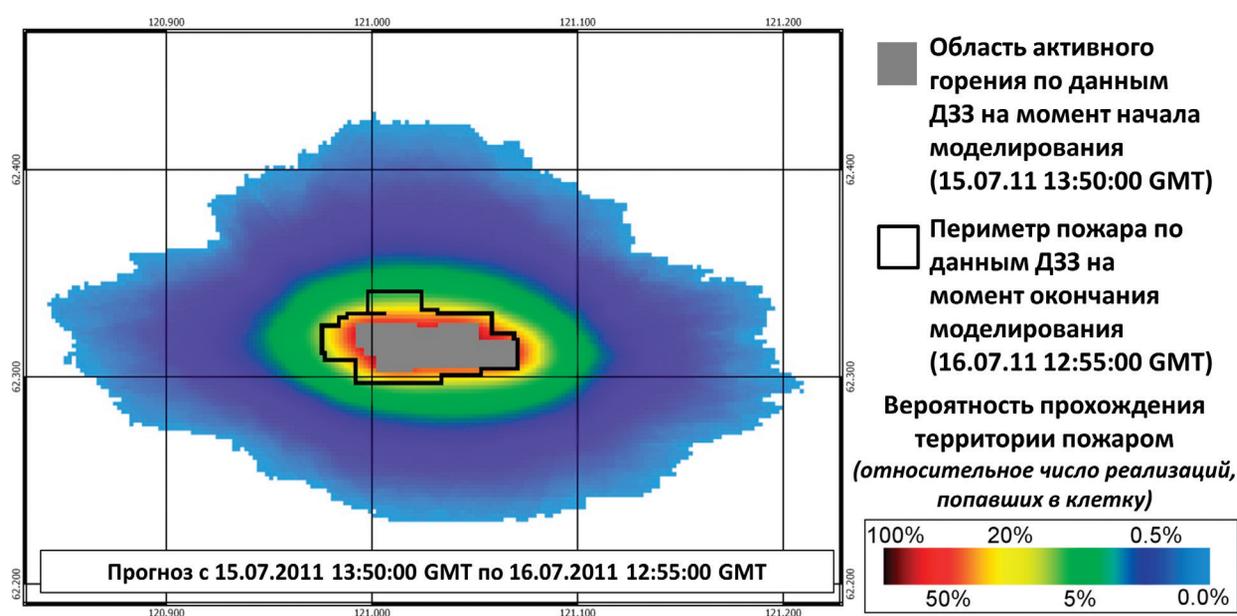


Рис. 1. Пример вероятностного прогноза развития пожара в сравнении с его фактическим периметром по данным спутниковых наблюдений

Полученная оценка вероятности зависит от числа реализаций, используемых для построения прогноза, и приближается к истинному значению по мере увеличения числа реализаций. Был проведен вычислительный эксперимент по моделированию группы пожаров с использованием различного числа реализаций. В качестве «истинного» значения условно принимались результаты, полученные при моделировании с числом реализаций равным 100 000. Для оценки ошибок моделирования, связанных с использованием ограниченного числа реализаций, было проведено моделирование с различным числом реализаций и оценены максимальные ошибки отклонения получаемых при этом результатов от «истинных». График зависимости полученных ошибок от числа используемых при моделировании реализаций приведен на рис. 2. Из представленного графика видно, что максимальная ошибка в оценке вероятности убывает по мере роста числа реализаций и составляет менее 1% при использовании 15000 и более реализаций. Таким образом, использование

указанного числа реализаций обеспечивает малую погрешность оценки вероятности и позволяет провести массовый вычислительный эксперимент в приемлемое время.

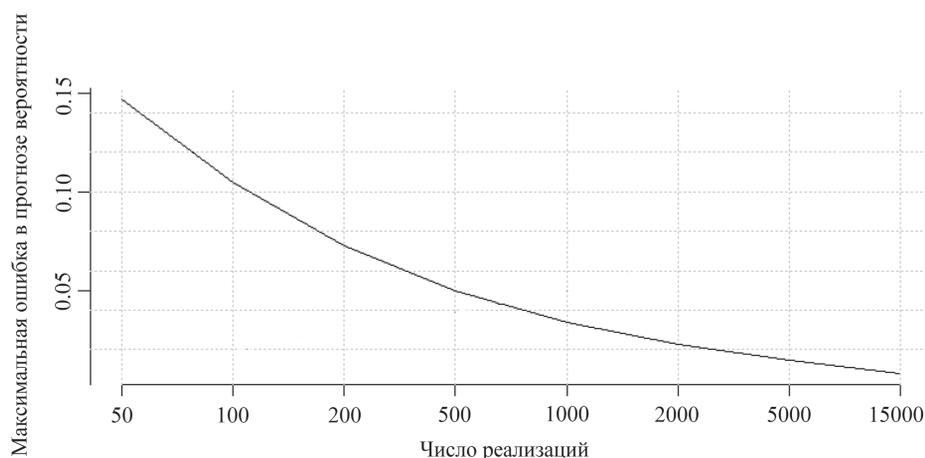


Рис. 2. Изменение максимальной ошибки модельной оценки значения вероятности достижения клетки пожаром в зависимости от числа реализаций

Для анализа точности модели был проведен массовый вычислительный эксперимент, в ходе которого было осуществлено моделирование динамики 660 пожаров в лиственных лесах Сибири и Дальнего Востока, имевших место в 2011–2013 годах. При использовании настольного компьютера класса Core 2 Duo (E4700 2,6 Гц, 2 Gb RAM) в однопоточном режиме среднее время моделирования пожара составило около получаса или около двух недель на проведение вычислительного эксперимента в целом.

Точность прогноза оценивалась посредством сравнения модельных оценок вероятности с частотой фактического попадания пожара в клетки регулярной сетки. Для сравнения клетки с одинаковой модельной оценкой вероятности были сгруппированы и пересекались с контуром фактически пройденной пожаром территории по данным ДЗЗ. В предположении идеально точной модели фактически пройденная пожарами территория должна быть строго пропорциональна значениям их вероятности. То есть половина клеток со значениями вероятности 50% должна быть пройдена реальными пожарами так же, как и 1/10 часть числа клеток со значениями вероятности 10% и т.д.

Результаты оценки приведены на рис. 3, отражающем средние величины частот попадания фактических пожаров в клетки с соответствующими им значениями вероятности, заданными с фиксированным шагом. На рисунке указаны диапазоны разброса частот на различных интервалах осреднения. Из графика видно, что точки, соответствующие модельной оценке вероятности и фактической частоте достаточно близки к линии $y=x$, что свидетельствует об адекватности результатов моделирования.

Наблюдаемое на рис. 3 отклонение графика от ожидаемых значений в области больших вероятностей потенциально может быть связано с достаточно низким пространственным разрешением (1 км) спутниковых данных, используемых для детектирования действу-

ющих пожаров. Так как пространственное разрешение указанных спутниковых данных ниже разрешения клетки модели (250 м), то в один пиксель спутниковых данных попадает множество клеток модели. Клетки с большими значениями вероятности сгруппированы близко друг к другу в модельном прогнозе. Поэтому один пиксел спутниковых данных может покрыть значительную часть клеток с большими значениями вероятности, даже если некоторые из них на самом деле не горят, что может приводить к завышению фактической частоты попадания пожара в клетку. Данный эффект менее значим для более распределенных пространственно клеток с малыми значениями вероятности, что может объяснять отклонение от линии $y=x$ для больших значений вероятности на *рис. 3*.

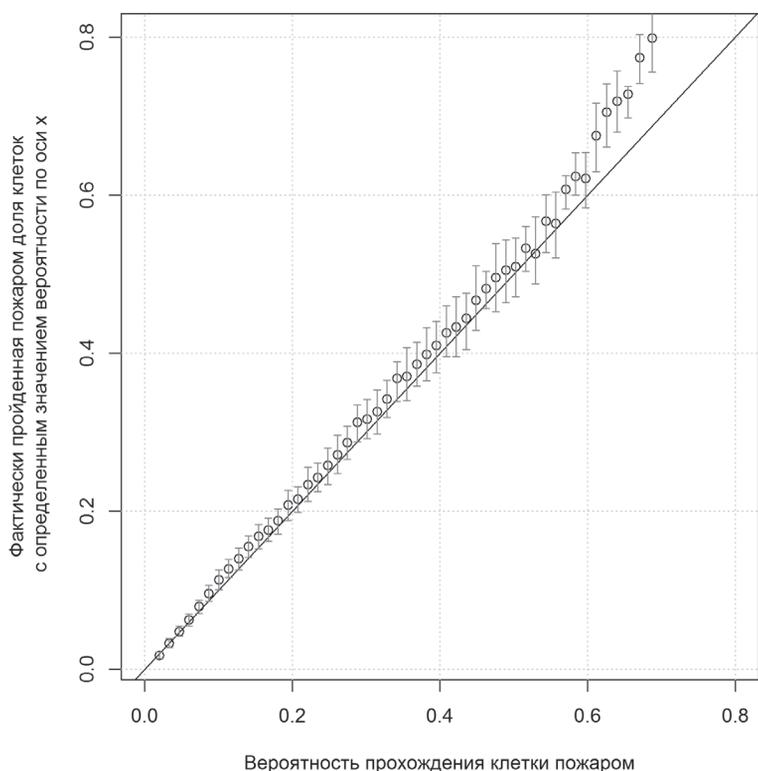


Рис. 3. Диаграмма соответствия модельной оценки вероятности и фактически пройденной пожаром доли клеток с данным значением вероятности. Точками отмечены средние значения доли площади, пройденной пожаром, вертикальными линиями – величина ее стандартного отклонения. Сплошной прямой обозначен график линии $y=x$

Вероятностная модель может позволить оценить устойчивость и адекватность детерминистической модели развития пожаров. Можно предположить, что детерминистический прогноз распространения огня должен приходиться на области с большими значениями вероятности. Если это не так, то можно сделать вывод, что условия в области активного горения неустойчивы и детерминированный прогноз недостоверен для данного пожара.

Предложенная модель развития пожаров может быть использована для принятия оперативных решений о противопожарных мероприятиях. Модель может использоваться для оценки степени угрозы для близлежащих объектов. Каждому объекту в зависимости от установленной степени защиты может быть присвоено пороговое значение вероятности,

требующее принятия пожароохранных мер. Особо отметим, что вероятностная модель также может быть использована для расчета потенциальных потерь лесных ресурсов от пожаров. Возможность оценки таких потерь необходима для принятия решений о целесообразности расходования ресурсов на тушение конкретного пожара.

Заключение

В работе предложен подход к вероятностному прогнозированию развития природных пожаров методом Монте-Карло. Данный подход позволяет оперативно получать вероятностный прогноз развития любого действующего на территории России пожара с использованием доступных данных о метеорологических условиях, типах природных горючих материалов и рельефе местности. Предложенный подход позволяет учесть погрешности во входных данных и получить возможные сценарии развития пожара с учетом этих погрешностей.

Проверка точности модели показала, что получаемые с ее помощью прогнозы позволяют достаточно точно оценить вероятность прохождения территории пожаром. Это позволяет использовать модель для оценки степени угрозы пожара для близлежащих объектов.

Потенциальные пути дальнейшего повышения качества прогноза развития пожаров сопряжены с дополнительным учетом погрешностей во входных данных, например, в данных о форме пожара, типах природных горючих материалов и рельефе местности. Указанные погрешности могут быть, в частности, снижены за счет использования спутниковых данных более высокого пространственного разрешения.

Качество модели также может быть улучшено за счет снижения уровня погрешности и повышения пространственной детальности метеоданных. Целесообразно в дальнейшем исследовать возможность учета зависимости оценки погрешности в прогнозных метеоданных от значений параметров и истории их изменения.

Представленная вероятностная модель интегрирована в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) (Барталев и др., 2010; Лупян и др., 2015а).

Использованные в исследовании для получения данных о типах природных горючих материалов карты растительного покрова России созданы за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Институте космических исследований Российской академии наук.

Для анализа спутниковых данных при подготовке статьи использовались вычислительные ресурсы Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Барановский Н.В. Модель для оценки пожарной безопасности населенного пункта при лесных пожарах // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. 2010. № 5. С. 8.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценок Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
4. Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е. Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
5. Доррер Г.А. Оценка статистических характеристик контуров лесных пожаров. // Физика горения и взрыва. 1978. № 2. С. 71–76.
6. Лепп Н.Э., Ушанов С.В. Имитационное моделирование процесса распространения лесного пожара по неоднородному слою горючего материала // Кубатурные формулы, методы Монте-Карло и их приложения. 2010. С. 73.
7. 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., Краиенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценок 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. 2015а. Т. 12. № 5. С. 222–250.
8. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015б. Т. 12. № 5. С. 263–284.
9. 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.
10. Anderson K., Flannigan M., Reuter G. Using ensemble techniques in fire-growth modelling // Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology. Boston, Massachusetts, USA, October 24–27, 2005. pp. 2.4–2.10.
11. Boychuk D., Braun W.J., Kulperger R.J., Krougly Z.L., Stanford D.A. A stochastic forest fire growth model // Environmental and Ecological Statistics. 2009. Vol. 16. No. 2. P. 133–151.
12. Justice C., Giglio L., Boschetti L., Roy D., Csiszar I., Morissette J., Kaufman Y. MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document. Version 2.3. 2006. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf.
13. Finney M., Grenfell I., McHugh C., Seli R., Trethewey D., Stratton R., Brittain S. A method for ensemble wildland fire simulation // Environmental Modeling & Assessment. 2011. V. 16. No. 2. P. 153–167.
14. Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system. F.C. F.D. Group. Information Report ST-X-3. Ottawa, Ontario, Canada, 1992. 63 p.
15. Perryman H.A., Dugaw C.J., Varner J.M., Johnson D.L. A cellular automata model to link surface fires to firebrand lift-off and dispersal // International journal of wildland fire. 2013. V. 22. No. 4. P. 428–439.
16. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models // International Journal of Wildland Fire. 2009a. V. 18. No. 4. P. 349–368.
17. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models // International Journal of Wildland Fire. 2009b. V. 18. No. 4. P. 369–386.

Stochastic wildfire model based on Monte-Carlo method and remote sensing data integration

S.A. Khvostikov, S.A. Bartalev, E.A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: khvostikov@smis.iki.rssi.ru

The article presents stochastic wildfire model based on Monte-Carlo method and remote sensing data integration into wildfire propagation model. Currently, the accuracy of wildfire models is limited by both error in input data and models themselves. Stochastic approach allows accounting for sources of errors. Monte-Carlo method is used to calculate multiple realisations of wildfire spread accounting for different possible propagation scenarios and evaluate probability of fire spreading to nearby territories. Evaluation of model performance was done for a few hundred wildfires in Siberian larch forests. Performance was analyzed by way of comparing model's probability estimates and actual frequency of wildfire reaching nearby areas. Analysis showed good agreement between model's estimates and actual remote sensing data. This model can be used to estimate danger for settlements and infrastructure objects from nearby fires.

Keywords: wildfires, remote sensing, modelling, Monte-Carlo

Accepted: 11.10.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-145-156

References

1. Baranovskii N.V., Model' dlya otsenki pozharnoi bezopasnosti naselennogo punkta pri lesnykh pozharakh (Model for evaluation of fire safety of settlement in forest fires), *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti: Internet-zhurnal*, 2010, No. 5, p. 8.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrodiametra MODIS (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V., Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovykh dannykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ (Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 9–26.
4. Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotel'nikov R.V., Loupian E.A., Shchetinskii V.E., Osnovnyye vozmozhnosti i struktura informatsionnoi sistemy distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM Rosleskhoz) (The main functionalities and structure of Forest Fire Satellite Monitoring Information System of Russian Federal Forestry Agency (SMIS-Rosleskhoz)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 97–105.
5. Dorrer G.A., Otsenka statisticheskikh kharakteristik konturov lesnykh pozharov (Evaluation of wildfires contours' stochastic characteristics), *Fizika goreniya i vzryva*, 1978, No. 2, pp. 71–76.
6. Lepp N.E., Ushanov S.V., Imitatsionnoye modelirovaniye protsessa rasprostraneniya lesnogo pozhara po neodnorodnomu sloyu goryuchego materiala (Imitational modelling of wildfires spread in heterogenous fuels), *Kubaturnye formuly, metody Monte-Karlo i ikh prilozheniya*, 2010, p. 73.
7. Loupian E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V., Kotel'nikov R.V., Balashov I.V., Burtsev M.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Zharko V.O., Kovganko K.A., Kolbudaev P.A., Krashennnikova Yu.S., Proshin A.A., Mazurov A.A., Uvarov I.A., Stytsenko F.B., Sychugov I.G., Flitman E.V., Khvostikov S.A., Shulyak P.P., Organizatsiya raboty so sputnikovymi dannymi v informatsionnoi sisteme distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaistva (ISDM-Rosleskhoz) (Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 222–250.
8. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015b, T. 12, No. 5, pp. 263–284.
9. Khvostikov S.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Regional'naya optimizatsiya parametrov prognoznoi modeli prirodnykh pozharov i operativnoye modelirovaniye dinamiki ikh razvitiya s ispol'zovaniem dannykh sputnikovykh nablyudenii (Regional scale optimization of wildfire model parameters and modeling of wildfire dynamic using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 91–100.

10. Anderson K., Flannigan M., Reuter G., Using ensemble techniques in fire-growth modeling, Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, Boston, Massachusetts, USA, October 24–27, 2005, pp. 2.4–2.10.
11. D., Braun W.J., Kulperger R.J., Krougly Z.L., Stanford D.A., A stochastic forest fire growth model, *Environmental and Ecological Statistics*, 2009, Vol. 16, No. 2, pp. 133–151.
12. Justice C., Giglio L., Boschetti L., Roy D., Csiszar I., Morisette J., Kaufman Y., MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document. Version 2.3, 2006. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf.
13. Finney M., Grenfell I., McHugh C., Seli R., Trethewey D., Stratton R., Brittain S., A method for ensemble wildland fire simulation, *Environmental Modeling & Assessment*, 2011, Vol. 16, No. 2, pp. 153–167.
14. Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system, F.C. F.D. Group, Information Report ST-X-3, Ottawa, Ontario, Canada, 1992, 63 p.
15. Perryman H.A., Dugaw C.J., Varner J.M., Johnson D.L., A cellular automata model to link surface fires to fire-brand lift-off and dispersal, *International journal of wildland fire*, 2013, Vol. 22, No. 4, pp. 428–439.
16. Sullivan A.L., Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models, *International Journal of Wildland Fire*, 2009a, Vol. 18, No. 4, pp. 349–368.
17. Sullivan A.L., Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models, *International Journal of Wildland Fire*, 2009b, Vol. 18, No. 4, pp. 369–386.