

## Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений

С.А. Хвостиков<sup>1,2</sup>, И.В. Балашов<sup>1</sup>, С.А. Баргалева<sup>1</sup>, В.Ю. Ефремов<sup>1</sup>, Е.А. Лупян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32  
E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru;

<sup>2</sup>Московский Государственный Институт электроники и математики НИУ ВШЭ,  
109028 Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3.

В статье описан метод и результаты региональной оптимизации параметров канадской прогнозной модели динамики природных пожаров CFFBPS применительно к условиям России. Оптимизация модели выполнена с использованием репрезентативной опорной выборки реальных пожаров, действовавших на территории России, фактическая информация о ежедневной динамике которых была получена по результатам обработки данных спутникового радиометра MODIS. Оценка точности результатов моделирования выполнялась для выборки, включавшей более 40000 пожаров, действовавших на территории России в период 2007-2011 годов, на основе сравнительного критерия близости модельной и фактической динамики развития пожаров. В результате оптимизации были получены значения параметров модели, позволившие существенно повысить точность моделирования динамики пожаров. Оптимизированная модель была положена в основу разработки в составе Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) блока прогноза динамики очагов горения, обеспечивающего возможность интерактивной модификации ряда ключевых параметров пожаров и моделирование их развития с использованием web-интерфейса.

**Ключевые слова:** лесные пожары, моделирование динамики, оптимизация, дистанционное зондирование.

### Введение

Ежегодно природные пожары наносят значительный экологический и экономический ущерб лесам и другим наземным экосистемам России, загрязняют атмосферу продуктами горения, угрожают здоровью и жизни людей. Для организации эффективного противодействия природным пожарам важнейшее значение имеет возможность оперативного прогнозирования динамики их развития. К настоящему времени разработано множество методов, позволяющих прогнозировать динамику пожаров. Указанные методы основаны на широком диапазоне подходов, начиная от приближительных, основанных на эмпирически установленных зависимостях скорости движения фронта пожара от метеоусловий и типа местности, оценок до использования комплексных моделей, учитывающих химические и физические процессы горения в их взаимодействии с атмосферой. Использование существующих методов при наличии необходимых входных данных о метеоусловиях, рельефе местности, составе и запасах горючих материалах в зоне действия пожара, позволяет осуществлять краткосрочный прогноз его развития.

На данный момент создано множество моделей прогноза развития пожаров, предназначенных для разных условий и моделирующих различные аспекты горения с различной точностью. В числе разработанных российскими учеными моделей можно отметить физико-математическую модель, разработанную в Томском государственном университете (Гришин, 1992), и модель на основе нейронных сетей, созданную в Сибирском государственном технологическом университете (Дорпер, 2011). Из зарубежных моделей можно отметить разработанную в США модель FARSITE, (Finney 1998) и модель Prometheus, созданную в Канаде (Tumstra 2010).

Вместе с тем, в настоящее время существующие модели динамики пожаров крайне редко используются в реальной практике лесопожарной службы России для решения задач опера-

тивного прогнозирования распространения огня. Это, прежде всего, связано с отсутствием для всей территории России необходимых для моделирования динамики пожаров входных данных. При этом следует отметить, что в современных условиях практически единственным инструментом, обеспечивающим оперативный сбор информации о пожарах на больших территориях, являются методы дистанционного зондирования со спутников. Вместе с тем, большинство существующих моделей распространения пожаров плохо адаптированы к работе с данными о состоянии пожара и горючих материалов, полученными по данным дистанционного зондирования Земли. Это приводит к необходимости развития методов прогноза динамики пожаров, основанных на ассимиляции в существующие модели данных дистанционного зондирования и результатов их обработки. Такие методы прогнозирования в дальнейшем могут использоваться в рамках систем оперативного мониторинга пожаров.

В данной работе нами исследована возможность применения в условиях России существующей канадской модели распространения пожара CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) (Forestry Canada Fire Danger Group., 1992) и ее региональной оптимизации на основе ассимиляции в модель результатов обработки данных спутниковых наблюдений. В первую очередь исследовалась возможность моделирования пространственного распространения пожара. Выбор данной модели продиктован относительным сходством природных условий России и Канады, доступностью технической документации по модели, высоким уровнем детальности описания в модели процесса распространения огня, при относительной простоте ее реализации. Кроме того, модель построена на основе статистических зависимостей параметров пожаров от условий окружающей среды, что упрощает модификацию и настройку модели.

### Модель распространения пожара CFFBPS и ее программная реализация

Использованная в данной работе модель CFFBPS создана на основе экспериментальных данных, полученных для нескольких сотен пожаров (Forestry Canada Fire Danger Group., 1992).. По данным выполненных экспериментов был составлен ряд соотношений между характеристиками пожара и основными влияющими на него факторами (метеусловиями, рельефом, горючими материалами), которые и были положены в основу модели CFFBPS. Общая схема моделирования представлена на рис. 1. Условно модель можно разделить на несколько частей.

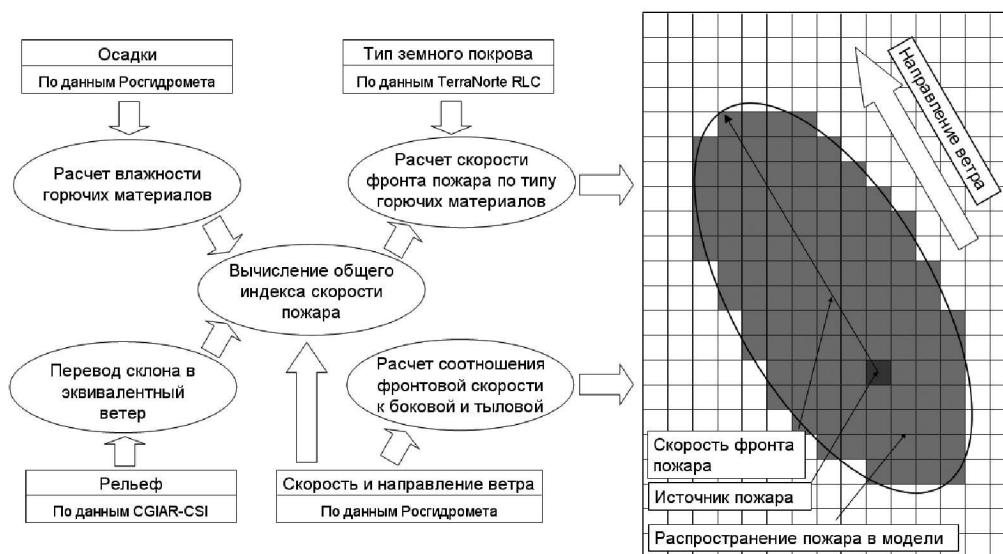


Рис. 1. Общая схема моделирования распространения пожара

Первая часть модели оценивает параметры индекса пожарной опасности. В первую очередь это индекс влажности топлива, который рассчитывается на основе информации о влажности воздуха, температуре воздуха и осадках. Этот индекс позволяет учесть увеличение влажности топлива от осадков, высушивание топлива при высоких температурах и низкой влажности, а также суточные колебания влажности топлива (при изменении температуры и влажности воздуха). Индекс влажности топлива изменяется достаточно быстро, поэтому канадский индекс пожарной опасности также включает индекс засухи, изменяющийся значительно медленнее, только при сильных осадках или длительных периодах высоких температур. Индекс засухи используется при моделировании верховых пожаров.

На втором этапе определяется скорость пожара и его форма. Сначала модель рассчитывает общий индекс скорости пожара (как функции от влажности топлива и скорости ветра), а затем осуществляет подсчет скорости фронтового распространения пожара для конкретного типа топлива, корректируя индекс скорости с помощью ряда линейных и степенных коэффициентов, характерных для данного типа топлива. Модель предполагает, что формой пожара является эллипс, источник пожара - это один из фокусов эллипса, скорость фронтового распространения пожара - это расстояние от источника пожара (фокуса) до наиболее удаленной точки эллипса. Модель осуществляет расчет соотношения длин большей и меньшей осей эллипса по скорости ветра. Задав таким образом эллипс, описывающий распространение пожара от точечного источника, можно рассчитать боковую и тыловую скорость распространения пожара.

Третья часть отвечает за учет ряда вспомогательных факторов, например рельефа и возможности возникновения верхового пожара. Рельеф в модели переводится в эквивалентный ему по воздействию ветер. Зависимость скорости распространения пожара от рельефа при отсутствии ветра известна, и по ней, посредством обращения зависимости скорости пожара от ветра, вычисляется ветер, эквивалентный рельефу по воздействию. Этот ветер суммируется с ветром, полученным по метеоданным, и используется при подсчете скорости пожара. Модель может достаточно точно учитывать рельеф с уклоном до 30 градусов, но при более крутых склонах может вести себя некорректно.

Для учета верхового пожара модель на первом этапе рассчитывает степень вовлеченности кроны (на нее влияет высота кроны, индекс засухи, скорость низового пожара). Затем модель оценивает скорость распространения верхового пожара (с учетом ряда специальных коэффициентов) и итоговая скорость пожара берется как линейная интерполяция между исходной скоростью пожара и новой, с учетом степени вовлеченности кроны.

На выходе модели получаются линейные размеры эллипса, описывающего распространение пожара от точечного источника. В данной работе модель применялась к регулярной сетке с пространственным разрешением 250 метров, как показано на рисунке 1. Источниками пожара считаются центры растровых клеток, эллипсы строятся для всех, соответствующих участкам активного горения, клеток пожара, а главная ось эллипсов сонаправлена ветру. Сумма площадей эллипсов дает изменение формы пожара за заданный срок.

На языке C++ была создана программа, реализующая описанную выше модель и являющаяся приложением для командной строки. Программа загружает необходимую для работы модели информацию из баз данных MySQL и выводит результат моделирования в файлы графического и текстового форматов. Для построения прогноза распространения пожара, программа, используя модель, определяет минимальное время, за которое пожар может дойти до каждой из ближайших еще не вовлеченных в пожар клеток регулярной сетки. Затем блок выбирает из всех этих клеток ту, которая пожар достигнет раньше всех, переводит время модели на момент достижения этой клетки огнем и заново оценивает время распространения пожара до соседних клеток с учетом изменения формы пожара. Затем выбирается следующая клетка, которую пожар достигнет раньше остальных и процесс повторяется. Модель останавливается при достижении конца заданного временного промежутка моделирования.

## Входные данные модели

Необходимые для использования модели входные данные о состоянии и форме пожара в настоящей работе получены на основе результатов детектирования действующих очагов горения по данным спутникового радиометра MODIS с пространственным разрешением около 1 км (Justice et al., 2006).

Оперативная оценка площадей пожаров включает анализ динамики очагов горения на основе временных серий, соответствующих действующим пожарам, *hot-spot* пикселей. При этом автоматический алгоритм обработки результатов детектирования *hot-spot* пикселей позволяет формировать полигоны пожаров с учетом предыстории развития очагов горения (Барталев и др., 2012). Использование результатов обработки спутниковых данных позволяет ежедневно оценивать площадь и определять форму пожаров.

Необходимые для моделирования динамики пожаров данные о метеоусловиях в рамках данной работы получены от Росгидромета. Эти данные включают основные характеристики, влияющие на пожар, такие как скорость и направление ветра, температура воздуха и точки росы, количество осадков. Эти данные представлены на регулярной сетке с разрешением четверть градуса, с временным промежутком 3 часа.

Данные о горючих материалах получены на основе карты растительного покрова России TerraNorte RLC, созданной по данным MODIS с пространственным разрешением 250 м и легендой, включающей 23 различных класса (Барталев и др., 2011). При моделировании считалось, что вся клетка однородно заполнена одним типом земного покрова, а его характеристики не зависят от времени года и месторасположения на территории России. Данные о рельефе получены по карте CGIAR-CSI SRTM Digital Elevation Map, также обладающей пространственным разрешением 250 метров (Reuter et al., 2007).

## Оценка точности и региональная оптимизация модели

При оценке качества работы модели необходимо учитывать, что используемые моделью спутниковые данные MODIS с пространственным разрешением около 1 км не позволяют точно оценить форму пожара. Так на соответствующей детектированному *hot-spot* пикселу территории очаг горения может действовать лишь на небольшой ее части, что снижает корректность непосредственного сравнения результатов моделирования динамики пожара и полученных по данным спутниковых наблюдений оценок.

Поэтому для оценки точности прогноза динамики пожара был предложен критерий, основанный на сравнении формы пожара, полученной как по результатам моделирования, так и на основе спутниковых данных на уровне пространственного разрешения последних. В соответствии с предложенным критерием область пожара делится на клетки, соответствующие элементам пространственного разрешения спутниковых данных, а дальнейший анализ проводится на уровне этих клеток. В каждой из клеток определяется, находится ли в ней пожар, активно горящие точки и появились ли новые точки горения за период моделирования. Используя эти данные, можно построить ряд оценок точности модели. В данной работе в качестве критерия ошибки модели использовалось соотношение между числом клеток, в которых наблюдался прирост пожара по спутниковым данным и по результатам моделирования (большее значение делилось на меньшее).

Значения указанного выше критерия ошибки моделирования были оценены для 42897 пожаров, действовавших в период 2007-2011 годов. При этом использование исходных (до оптимизации) значений параметров модели приводило, к неприемлемым для практического использования результатам моделирования, отличавшихся от данных реальных наблюдений в разные годы примерно в 4-10 раз (табл.1).



**Таблица 1.** Среднее соотношение значений площади модельных и реальных пожаров

Среднее соотношение площадей пожаров	Годы				
	2011	2010	2009	2008	2007
До оптимизации	4,21	10,2	7,0	5,83	5,92
После оптимизации	1,72	1,75	1,66	1,66	1,7
После оптимизации, пожары больше 200 га	1,58	1,64	1,55	1,54	1,59
После оптимизации, пожары больше 500 га	1,52	1,64	1,52	1,51	1,54

Для улучшения качества прогнозов динамики пожаров была проведена оптимизация параметров модели. В число оптимизируемых параметров включались скорость распространения пожара для различных типов горючих материалов, коэффициент для вычисления соотношения бокового и тылового распространения пожара, коэффициенты в формулах для учета влияния влажности горючих материалов и рельефа.

Для проведения оптимизации случайным образом были выбраны 200 пожаров 2011 года. При этом в процессе оптимизации осуществлялось моделирование динамики пожаров при различных значениях параметров с целью минимизации среднего значения ошибки. Оптимизация осуществлялась с помощью генетического алгоритма RGENOUD (Mebane et al, 2011).

В результате проведенной оптимизации полученные новые значения параметров модели позволили сократить среднюю ошибку моделирования пожара примерно до значения 1,7. При этом для крупных пожаров (более 200 га) модель обеспечивает значение несколько меньшее значение критерия ошибки около 1,5-1,6 раз. Следует также отметить, что оптимизированная модель обеспечивает достаточно устойчивое соотношение между площадями пожара по результатам моделирования и по данным спутниковых наблюдений для различных лет (табл. 1).

### Оперативное моделирование пожаров

Полученная в результате региональной оптимизации параметров модель развития очагов горения была интегрирована в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз (Барталев и др., 2010) для решения задач оперативного прогнозирования.

Разработанные в составе ИСДМ-Рослесхоз инструменты обеспечивают возможности получения по спутниковым данным оперативной информации о форме пожара, участках активного горения в текущий момент времени и динамике пожара за все время его действия. Система предоставляет пользователям доступ к большому набору дополнительной информации, необходимой для анализа пожарной ситуации, включая данные о текущих и прогнозных метеоусловиях с использованием соответствующего web-интерфейса (Ефремов и др., 2011).

Пользователи системы могут получить доступ к блоку моделирования распространения пожара посредством web-интерфейса системы ИСДМ-Рослесхоз (рис. 2). Интерфейс системы позволяет по номеру пожара и дате начала и конца моделирования осуществить прогноз распространения пожара на заданный промежуток времени. При этом модель начинает моделирование с момента последнего наблюдения пожара, чтобы корректно учесть изменения формы пожара за период с начала наблюдения до времени начала моделирования, указанного пользователем.

Результаты моделирования пожара отображаются вместе с данными спутниковых наблюдений, что позволяет оценить возможное пространственное распространение пожара,

площадь пожара на момент окончания моделирования и скорость фронта пожара в период моделирования. Также блок моделирования выводит дополнительную информацию о пожаре, включая время начала моделирования, площадь пожара на начало и конец периода моделирования, как для реального, так и для модельного пожара, скорость и направление ветра, индекс влажности горючих материалов, класс пожарной опасности и некоторые дополнительные характеристики.

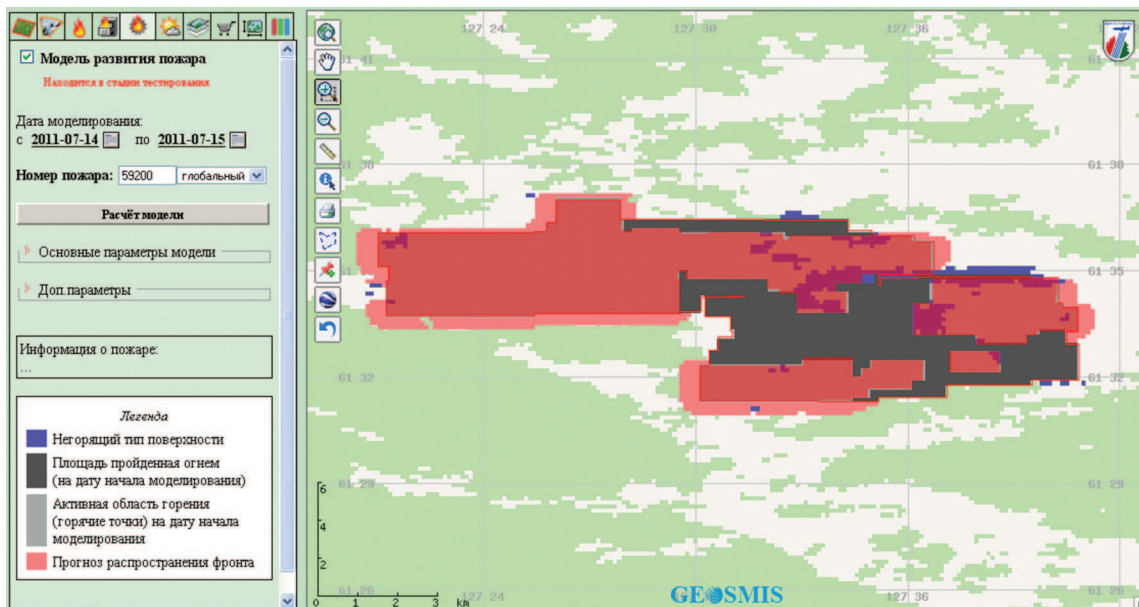


Рис. 2. Web-интерфейс блока прогноза развития пожара ИСДМ-Рослесхоз

Кроме этого, интерфейс блока моделирования предоставляет возможности по более точной настройке модели. Например, пользователь может самостоятельно задать скорость и направление ветра, или уменьшить активно горящую площадь пожара на начало моделирования. Также пользователь может изменить ряд параметров модели, в частности параметры, влияющие на скорости распространения пожара для разных типов растительности и коэффициент соотношения бокового и фронтального распространения пожара.

## Заключение

Выполненные исследования позволили на основе результатов обработки данных спутниковых наблюдений провести региональную оптимизацию параметров модели развития пожаров CFFBPS применительно к условиям России, что обеспечило существенное повышение точности прогнозного моделирования.

Выполненная интеграция оптимизированной модели в Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров ИСДМ-Рослесхоз обеспечивает функции оперативного прогнозирования развития пожаров с возможностью интерактивной настройки ряда параметров модели пользователями и получения доступа к результатам моделирования с использованием web-интерфейса.

Дальнейшие исследования и разработки в данном направлении могут быть сопряжены с использованием спутниковых изображений более высокого пространственного разрешения (10-30 м), например данных Landsat-TM/ETM, а также данных перспективных систем LCM и Sentinel-2. Использование спутниковых данных высокого пространственного разрешения позволит сократить уровень неопределенности в оценках реальной формы пожара при их сравнении с результатами моделирования. Это, в свою очередь, даст

возможность, повысить эффективность оптимизации модели. При этом, однако, следует учитывать ограниченные возможности спутниковых систем высокого пространственного разрешения по частоте наблюдения, что может являться существенным препятствием для эффективного использования получаемых данных для решения задач моделирования развития пожаров.

Имеется также потенциальная возможность повышения точности прогнозирования динамики пожара при оперативном моделировании за счет улучшения точности используемых метеоданных. В этой связи, в перспективе представляется целесообразным использование метеоданных более высокого пространственного разрешения.

Данная работа выполнена в рамках темы научно-исследовательских работ ИКИ РАН «МОНИТОРИНГ - Разработка методов и технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности» (Гос. Регистрация № 01.20.0.2.00164).

### Литература

1. *Барталев С.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Щетинский В.Е.* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т.7. № 2. С.97-105.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 4. С.285-302.
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. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними // Новосибирск: Наука, 1992, 406 с.
5. *Доррер Г.А., Коморовский В.С., Якимов С.П.* Оценка и прогнозирование динамики крупных лесных пожаров // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал, 2011. Вып. 2 (36). 16 с.
6. *Ефремов В.Ю., Балашов И.В., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Толпин В.А., Уваров И.А., Флитман Е.В.* Объединенный картографический интерфейс для работы с данными ИСДМ-Рослесхоз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. № 3. С.129-139.
7. *Justice, C. et al.* MODIS Fire Products Algorithm Technical Background Document. Version 2.3 //2006. [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod14.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf)
8. *Finney M. A.* FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation. // Res. Pap. RMRSRP-4 1998. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
9. *Forestry Canada Fire Danger Group.* Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. // Inf. Rep. ST-X-3, 1992. For. Can., Ottawa, Ont.
10. *Mebane W.R.Jr., Sekhon J.S.* Genetic optimization using derivatives: the rgenoud package for R. // Journal of Statistical Software, 2011. Volume 42, Issue 11, pages 1-26.
11. *Reuter H.I., Nelson A., Jarvis A.* An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. // International Journal of Geographic Information Science, 2007. Volume 21, Issue 9, pages 983-1008.
12. *Tymstra C., Bryce R., Wotton B., Armitage O.* Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model. // Natural Resources of Canada, Canadian Forest Service, 2010. Northern Forest Center, Edmonton, AB.

# Regional scale optimization of wildfire model parameters and modeling of wildfire dynamic using remote sensing data

S.A. Khvostikov <sup>1,2</sup>, I.V. Balashov <sup>1</sup>, S.A. Bartalev <sup>1</sup>, V.Yu. Efremov <sup>1</sup>, E.A. Loupian <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Russian Academy of Sciences' Space Research Institute,  
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.  
E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru;*

<sup>2</sup> *Moscow State Institute of Electronics and Mathematics,  
109028 Moscow, 3, Bolshoy Trehsvjatitel'skij per.*

The article describes method and results of forest fire model CFFBPS regional optimization for the territory of Russia. The optimization was performed on a representative samples of wildfires, which daily dynamic was obtained using MODIS satellite data. Epy model performance was tested for more than 40000 fires on territory of Russia for years 2007-2011, using special correspondence criteria between modeled and satellite data derived burned area. The optimised model parameters significantly improved model quality for wildfires in Russia. The optimized model was used as a basis for a fire dynamic forecasting subsystem of Informational System of Remote Monitoring of Forest Fires (ISDM-Rosleskhoz). The system's web-interface allows users to model wildfire dynamic and to adjust some of model input data and parameters.

**Keywords:** forest fires, dynamic modeling, optimisation, remote sensing.