

## Метод уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня

С. А. Хвостиков, С. А. Барталев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

*Москва, 117997, Россия*

*E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru*

Информация о положении фронта пожара критически важна для принятия решения о мерах по борьбе с огнём. Оперативные спутниковые данные обладают низким пространственным разрешением и не всегда позволяют оценить динамику фронта с достаточной точностью. В настоящей работе представлен метод ассимиляции данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в модель природных пожаров, позволяющий уточнить положение фронта пожара с учётом погрешностей модельных и спутниковых оценок. В отличие от предшествующих работ по ассимиляции данных предложенный метод был опробован на значительном количестве продолжительных крупных природных пожаров. Метод основан на использовании вероятностной модели природных пожаров, спутниковых данных инструмента MODIS и ассимиляции на основе оптимизационного подхода. Метод задаёт уточнённый фронт пожара таким образом, чтобы он максимально соответствовал и модельным, и спутниковым оценкам положения фронта горения с учётом их погрешностей. Для этого метод предоставляет набор нормалей к фронту пожара и оценивает фактическое и модельное распространение вдоль них, вычисляя позицию уточнённого фронта вдоль нормалей через минимизацию суммы квадратичных форм отклонения уточнённого фронта от двух его оценок. Метод был опробован на 230 пожарах на территории России и продемонстрировал увеличение точности определения положения фронта пожара в сравнении с данными ДЗЗ.

**Ключевые слова:** природные пожары, моделирование, MODIS, Landsat, ассимиляция данных

Одобрена к печати: 30.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18

### Введение

Спутниковые данные — практически единственный источник оперативной информации о природных пожарах в масштабах всей территории России. Требование оперативности приводит к необходимости использования данных низкого пространственного разрешения (приборы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)). Но даже для них наблюдение пожара может затрудняться наличием облачности или дыма. Подход, основанный на ассимиляции данных в модели распространения природных пожаров, потенциально позволяет учесть основные мешающие факторы и получить более достоверную оценку динамики фронта горения.

Ассимиляция данных зарекомендовала себя как эффективный метод комплексирования фактических наблюдений и моделей, позволяющий учитывать их погрешности и широко применяемый, например, в области метеорологического прогнозирования (Kalnay, 2003). В задачах моделирования динамики пожаров методы ассимиляции данных стали активно исследоваться в последние 1–2 десятилетия, краткий обзор по этой теме содержится в работе (Хвостиков, Барталев, 2021). Можно отметить несколько основных подходов к ассимиляции данных в модели природных пожаров. Отдельные исследователи осуществляют ассимиляцию, используя спутниковые данные как эталон и настраивая параметры модели с целью максимизации соответствия между эталоном и результатами моделирования (Valero et al., 2017). Другой популярный подход предполагает использование аналитических методов, таких как фильтр Калмана, который исходит из наличия погрешностей как в модельных, так и в

фактических оценках и учитывает оба источника погрешности в итоговой оценке состояния системы (Mandel et al., 2008, 2014; Rochoux et al., 2014).

Можно привести две работы, представляющие контрастные подходы к ассимиляции данных на основе фильтра Калмана. В одной из них ассимиляция данных о температуре проводилась в детальную физическую модель развития пожара на уровне всех клеток области горения, что привело к необходимости разработки специального подхода Morphing EnKF (Mandel et al., 2008). В другом исследовании использовался обычный ансамблевый фильтр Калмана (EnKF), с помощью которого данные о координатах положения фронта горения ассимилировались в эмпирическую модель природных пожаров (Rochoux et al., 2014). Большинство работ по ассимиляции используют или синтетические данные (например, полученные на основе моделей развития пожара с неизвестными параметрами), или материалы аэросъёмки. Существует ограниченное количество работ, исследующих применимость данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в задачах их ассимиляции в модели пожаров (например, (Mandel et al., 2014)).

Все приведённые выше работы оценивали точность подхода, предполагающего ассимиляцию данных на основе ограниченной выборки. Также они исследовали только адекватность модельных прогнозов, не анализируя способность модели воспроизводить фактическое состояние пожара. В настоящей статье предлагается метод ассимиляции данных ДЗЗ в модель природных пожаров, основанный на оптимизационном подходе и учитывающий погрешности модельных и спутниковых оценок. Способность метода оценивать фактическое положение фронта пожара была проверена на 230 природных пожарах на территории России.

## Методы и исходные данные

### *Модель динамики пожара и исходные данные*

Моделирование развития природных пожаров осуществлялось на основе подходов и программного обеспечения, разработанных ранее в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Хвостиков и др., 2012, 2016). В основе использованного подхода к моделированию лежит канадская система CFFBPS (*англ.* Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) (Development..., 1992), позволяющая оценивать скорость распространения пожара на основе данных о метеоусловиях, рельефе и параметрах горючих материалов. Эволюция пожара воспроизводится на растровой сетке, где распространение огня из каждой «горящей» клетки задаётся эллипсом, форма которого определяется модельными оценками скорости пожара. Оценка точности работы модели на большом количестве пожаров продемонстрировала её способность адекватно моделировать процесс развития пожара в условиях различных типов лесов России (Хвостиков и др., 2012).

Вероятностное моделирование развития пожара осуществлялось на основе метода Монте-Карло (Хвостиков и др., 2016). Метод, используя указанную выше модель пожара, воспроизводит множество реализаций распространения огня, варьируя метеоусловия и значения параметров модели с учётом их погрешностей. Каждая реализация даёт оценку пройденной огнём области, их агрегация позволяет получить вероятностный прогноз развития пожара. Проведённый ранее анализ показал достаточно хороший уровень соответствия между результатами работы вероятностной модели и данными спутникового мониторинга.

В представленную вероятностную модель ассимилировались данные детектирования очагов горения, полученные спутниковым инструментом MODIS. Он позволяет детектировать очаги горения (хотспоты) в каждой точке Земли несколько раз в сутки с пространственным разрешением 1 км (Giglio et al., 2016). Для выполнения ассимиляции весь период горения пожара разбивался на отдельные интервалы. Границы временных интервалов совпадали со временем детектирования очагов горения и выбирались таким образом, чтобы продолжительность каждого интервала составляла не менее 16 ч. Более короткие интервалы потребовали бы более высоких вычислительных мощностей, а также были бы более подвержены случай-

ным единичным погрешностям спутниковых измерений. Воспроизведение эволюции пожара выполнялось последовательно для каждого интервала, при этом полученный на предыдущем этапе уточнённый фронт горения использовался в качестве исходного на следующем этапе ассимиляции.

### Метод ассимиляции данных ДЗЗ в модель динамики пожара

Предложенный в работе метод позволяет уточнять положение фронта пожара посредством ассимиляции данных спутникового детектирования очагов активного горения в имитационную модель распространения огня. Метод задаёт уточнённый фронт пожара таким образом, чтобы он максимально соответствовал и модельным, и спутниковым оценкам положения фронта горения с учётом их погрешностей. Для работы метода необходимы данные детектирования очагов горения, модель распространения огня и её входные данные, а также оценка исходного положения фронта пожара, которая может быть получена в результате применения метода уточнения на предыдущем временном интервале.

Стоит отметить, что в настоящей работе под фронтом пожара подразумевается горящая часть кромки пожара, эти два термина будут считаться взаимозаменяемыми.

Предполагается, что модельная и спутниковая оценки и их погрешности могут быть аппроксимированы многомерным нормальным распределением. Для задания этого распределения строится набор нормалей к исходному фронту пожара. Пройденные огнём расстояния вдоль каждой из нормалей образуют многомерный вектор  $X = (X_1, X_2, \dots, X_i)$ , где  $X_i$  — расстояние, пройденное огнём вдоль  $i$ -й нормали. Спутниковые и модельные оценки значений этого вектора позволяют определить параметры многомерного нормального распределения: вектор средних значений и матрицу ковариаций.

Параметры модельного распределения вычисляются посредством вероятностного моделирования динамики пожара методом Монте-Карло, описанным в предыдущем разделе настоящей работы. На каждой реализации метода Монте-Карло оценивается расстояние, пройденное огнём вдоль каждой нормали. Агрегация полученных оценок позволяет вычислить вектор средних и матрицу ковариаций многомерного нормального распределения по известным формулам:

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{ij}, \\ M_{ik} &= \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (X_{ij} - E_i) \cdot (X_{kj} - E_k), \\ P_{model} &= N \left[ \mu_{model} = (E_1, \dots, E_m), \quad \Sigma_{model} = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1m} \\ \dots & & \dots \\ M_{m1} & \dots & M_{mm} \end{bmatrix} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  — расстояние, пройденное огнём вдоль  $i$ -й нормали на  $j$ -й реализации вероятностного моделирования;  $E_i$  — среднее расстояние вдоль  $i$ -й нормали, элемент вектора средних многомерного нормального распределения  $\mu_{model}$ ;  $M_{ik}$  — элемент матрицы ковариаций  $\Sigma_{model}$ , ковариация между  $i$ -й и  $k$ -й нормалью;  $P_{model}$  — модельное многомерное нормальное распределение. Ввиду вынужденно малого числа реализаций матрица ковариаций может оказаться несимметричной, для коррекции матрицы использовалась библиотека ShrinkCovMat (Touloumis, 2015), реализованная на языке R.

При оценке параметров спутникового вероятностного распределения предполагается, что наблюдения отдельных очагов независимы друг от друга и, соответственно, их матрица ковариации имеет диагональную форму. Пересечение нормали и очага активного горения образует отрезок, для которого считается, что его середина задаёт среднее значение нормального распределения для этой нормали, а длина отрезка — стандартное отклонение вдоль неё.

Так как одна нормаль может быть пересечена множеством детектированных очагов горения, то для оценки положения фронта используется только самый удалённый из них.

Полученные спутниковые и модельные многомерные нормальные распределения используются для нахождения наиболее достоверного уточнённого положения фронта пожара. Такое уточнённое положение определяется посредством минимизации критерия, основанного на сумме квадратичных форм отклонений фронта от средних модельных и спутниковых оценок:

$$E(x) = (x - \mu_{model}) \cdot \Sigma_{model} (x - \mu_{model})^T + \sum_i \begin{cases} 1, & |x(i) - \mu_{hs}(i)| \leq \sqrt{\Sigma_{hs}[i,i]}, \\ \frac{(x(i) - \mu_{hs}(i))^2}{\Sigma_{hs}[i,i]}, & |x(i) - \mu_{hs}(i)| > \sqrt{\Sigma_{hs}[i,i]}, \end{cases}$$

где  $\mu_{hs}$ ,  $\Sigma_{hs}$  — вектор и матрица по спутниковым оценкам;  $x$  — оптимизируемый вектор уточнённых расстояний и, соответственно,  $x - \mu_{model}$  — отклонение его от модельных оценок (которое транспонируется ( $T$ ) для умножения на матрицу ковариации). Константа в спутниковой части критерия связана с тем, что фактический фронт пожара может находиться в любой точке детектированного по ДЗЗ очага активного горения, поэтому значение критерия фиксируется на 1, если оценка попадает внутрь детектированного пиксела очага горения, и увеличивается, если фронт вышел за его пределы.

Минимизация данного критерия методом градиентного спуска позволяет найти наилучшую оценку расстояния, пройденного пожаром вдоль каждой нормали. Оптимизированный вектор пройденных огнём расстояний задаёт новый фронт пожара. Общая схема ассимиляции представлена на *рис. 1* и включает в себя: построение нормалей, определение параметров вероятностного распределения по модельным и спутниковым оценкам и вычисление итогового уточнённого фронта. Применение данного подхода к ассимиляции данных ДЗЗ в модель с достаточной точностью и вычислительной эффективностью потребовало внесения ряда модификаций, которые перечислены далее.

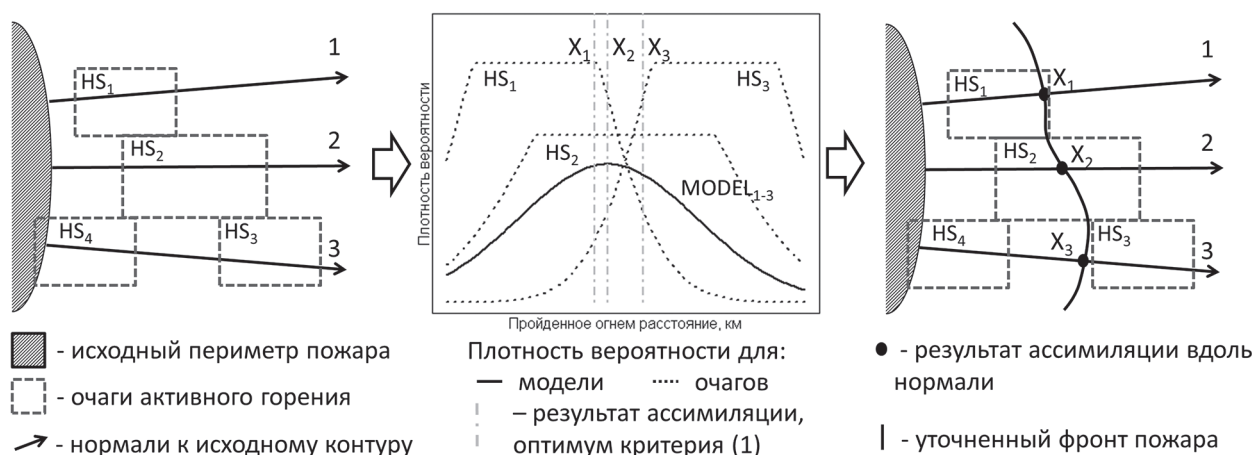


Рис. 1. Пример уточнения эволюции фронта горения на основе ассимиляции спутниковых данных ДЗЗ в модель развития пожара

Увеличение числа нормалей, для которых анализируется развитие пожара, приводит к линейному росту времени моделирования и квадратичному росту времени оптимизации. Из соображений вычислительной эффективности нормали к исходному фронту строились с большими промежутками, а не в каждом пикселе растровой сетки модели. Построение нормалей начинается с участка фронта, смежного с частью фронта, где горение прекратилось, или, в случае её отсутствия, с произвольной позиции. Метод идёт вдоль кромки пожара, перебирая все возможные нормали и оставляя только те, которые или удалены бо-



лее чем на 300 м от уже выбранных нормалей, или отклоняются от них не менее чем на  $30^\circ$ . Использование более частых нормалей в теории могло бы увеличить точность и детальность предложенного метода. Но на практике разрешения хотспотов MODIS (1 км) и используемых карт горючих материалов (250 м) привели бы к тому, что на участках фронта без изгибов более частые нормали показывали бы похожую фактическую и модельную динамику, увеличивая время работы алгоритма и не давая повышения детальности.

Использование разновременных дистанционных наблюдений может увеличить точность основанных на ассимиляции оценок. Для этого в вектор пройденных огнём расстояний заносится несколько значений, относящихся к одной и той же нормали, но измеренных в разные моменты времени. Выбор моментов времени происходит отдельно для каждой нормали и зависит от времени детектирования очагов горения, пересекающих данную нормаль. Для каждого момента детектирования пожара модельные и спутниковые оценки положения фронта горения вдоль нормали сохраняются и заносятся в соответствующие компоненты многомерного вектора пройденных огнём расстояний. Для уменьшения вычислительной сложности (размера вектора нормалей) спутниковые наблюдения, полученные с разницей менее чем в 1 ч, считаются одномоментными.

Стоит отметить, что аналогичный подход добавления разновременных элементов может позволить оценить положение фронта пожара в произвольный момент времени внутри интервала моделирования, даже если для него нет дистанционных наблюдений. Таким образом, метод может воспроизводить динамику фронта пожара.

Дополнительно метод исключает «выбросы» данных спутникового мониторинга пожаров. Пиксели с наличием действующих пожаров не используются при оценке фактического положения фронта пожара, если они слишком удалены от его исходной кромки. Для определения степени удалённости используется модельная оценка пройденного огнём расстояния (многомерное нормальное распределение). Оценка удалённости и исключение «выбросов» в данных спутникового детектирования пожаров происходит вдоль каждой из нормалей. Очаг активного горения однозначно исключается в случае, если он расположен далее чем 2,5 стандартного отклонения от средней модельной оценки вдоль данной нормали, и однозначно учитывается, если он оказывается ближе, чем 1,3 стандартного отклонения. Если очаг удалён на расстояние в интервале от 1,3 до 2,5 стандартного отклонения, проводится анализ всех нормалей, пересекающих данный очаг горения, и выбирается одна из них с минимальным отклонением. Если в результате такой коррекции некоторые очаги активного горения оказываются неучтёнными при ассимиляции, то они интерпретируются как отдельный новый пожар, определяемый ими фронт добавляется к исходной кромке пожара и для неё заново выполняется процесс построения нормалей и вычисления модельных и спутниковых оценок.

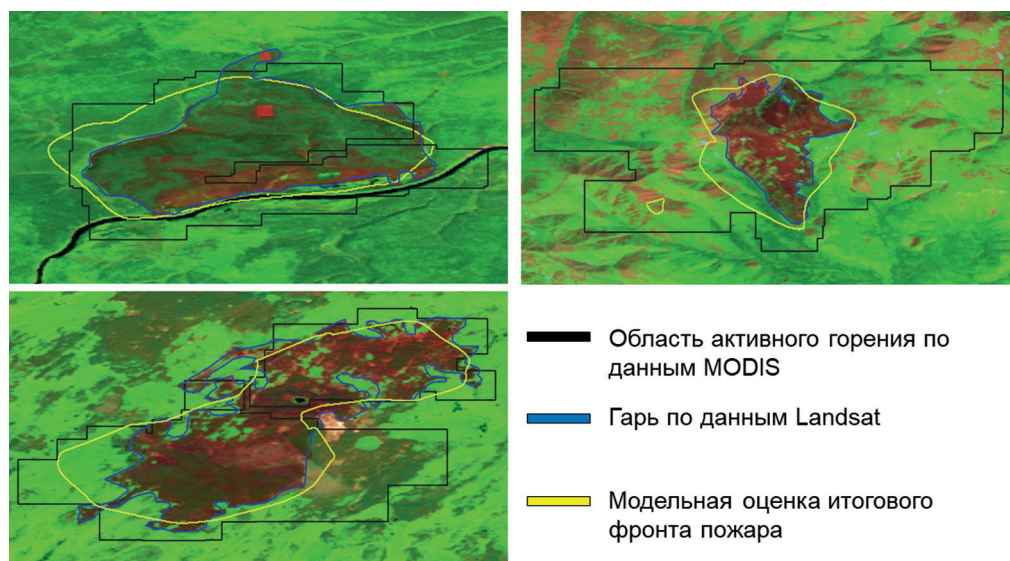
Для нового пожара необходимо определить его исходную область горения. Известно, что область горения может занимать малую часть пикселя спутникового изображения, а точное её местоположение неизвестно. В связи с этим используется минимально возможная исходная область горения — одна клетка модельной сетки, находящаяся в центре очага горения по данным MODIS. При наличии нескольких пересекающихся очагов горения применяется итеративный алгоритм, который находит область, пересекаемую наибольшим числом хотспотов, редуцирует её до одного пикселя и затем повторяет процедуру для оставшихся неучтённых очагов.

При оценке расстояния, пройденного огнём вдоль каждой нормали, необходимо исключать источники горения, не связанные с данной нормалью. Для этого в исходном фронте горения оставляется только один соответствующий очагу горения пиксель, к которому построена нормаль. Моделирование на основе модифицированного фронта позволяет однозначно установить пройденное огнём расстояние без учёта влияния остальных источников горения. Результаты локального моделирования всех нормалей используются для оценки параметров нормального распределения по формулам (1).

В используемой модели нет явных условий прекращения горения. Поэтому предложено простое условие прекращения горения в случае отсутствия спутниковых наблюдений очагов в течение двух последовательных итераций ассимиляции. При появлении новых очагов на уже прогоревших участках они возвращаются в состояние горения.

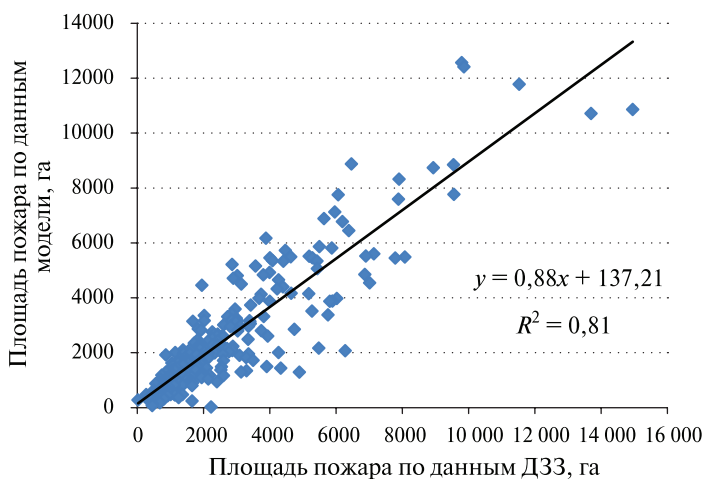
## Результаты

Метод уточнения положения фронта пожара был проверен на 230 природных пожарах 2013 г., для которых не осуществлялось тушение. Для них с помощью методов, описанных в работах (Барталев и др., 2012; Лупян и др., 2017), на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (спутников серии Landsat, 30 м), по кромке гари, оставленной пожаром, оценивалось итоговое положение фронта в момент прекращения горения. Это положение сравнивалось с итоговым уточнённым фронтом пожара, полученным на основе ассимиляции данных. Примеры сравнения уточнённой кромки и фактической гари приведены на *рис. 2*.



*Рис. 2.* Пример уточнённого фронта пожара в сравнении со спутниковыми данными низкого и высокого пространственного разрешения

Сравнение площадей, полученных по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения и уточнённым модельным оценкам, приведено на *рис. 3*. Представленная диаграмма рассеивания и значение корреляции  $R^2 = 0,81$  позволяет сделать вывод, что предложенный метод адекватно оценивает площадь, пройденную огнём, что косвенно свидетельствует о способности метода оценивать положение фронта пожара.



*Рис. 3.* Сравнение уточнённых модельных оценок и фактических площадей, пройденных огнём

Для сравнения уточнённого фронта пожара и его фактического положения по спутниковым данным использовался метод, основанный на расстоянии Хаусдорфа:

$$R_{\max}(A, B) = \max_{a \in A} \left( \min_{b \in B} (d(a, b)) \right),$$

где  $A, B$  — полигоны,  $a$  и  $b$  — их точки,  $d(a, b)$  — расстояние между ними. В соответствии с этой формулой для каждой точки полигона (фронта) находится расстояние до ближайшей точки другого полигона и из всех этих расстояний выбирается наибольшее. Так как такая оценка даёт только информацию о наибольшем расстоянии между полигонами, то была предложена вариация критерия, оценивающая среднее расстояние по формуле:

$$R_{\text{max}}(A, B) = \int_A \left( \min_{b \in B} (d(a, b)) \right).$$

Среднее расстояние от оценочного положения итогового фронта пожара до его фактического положения для 230 пожаров на территории России

	По данным MODIS	По результатам ассимиляции данных в модель
Максимальное расстояние до гари, км	1,90	1,45
Среднее расстояние до гари, км	0,65	0,45

В *таблице* приведены результаты оценки расстояний между полигонами для уточнённого фронта пожара и для фронта по данным оперативного спутникового мониторинга. Можно сказать, что метод позволяет улучшить оценку положения фронта пожара в среднем на 200 м (с 650 до 450 м), или на 30 %.

## Заключение

Предложен метод уточнения положения фронта пожара, основанный на ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня. Апробация метода на реальных природных пожарах продемонстрировала его способность получать уточнённые значения пройденной огнём площади и оценивать положение фронта горения. Анализ показал преимущество представленного подхода над используемыми на данный момент методами оперативного дистанционного мониторинга пожаров.

Представленный метод может быть использован для оценки положения фронта горения в любой момент, начиная с возгорания и до времени последнего спутникового наблюдения пожара. Также подход к ассимиляции данных в модель предоставляет возможность прогнозирования дальнейшего развития природного пожара с учётом текущих модельных и спутниковых оценок; исследованию прогностической способности предложенного метода будут посвящены последующие работы. Кроме этого, метод может быть доработан за счёт включения дополнительной спутниковой информации о температуре хотспота или интенсивности горения (Пономарев и др., 2017).

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 19-77-30015. Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. 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.
5. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Возможности применения данных спутникового мониторинга для моделирования динамики развития природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
6. 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.
7. Хвостиков С. А., Барталев С. А., Лупян Е. А. Вероятностное прогнозирование развития природных пожаров методом Монте-Карло на основе интеграции в имитационную модель данных спутникового 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.
8. Development and Structure of the Canadian Forest fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3 / Forestry Canada Fire Danger Group. Ottawa: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, 1992. 66 p.
9. 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.
10. Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 369 p.
11. Mandel J., Bennethum L. S., Beezley J. D., Coen J. L., Douglas C. C., Kim M., Vodacek A. A wildland fire model with data assimilation // Mathematics and Computers in Simulation. 2008. V. 79. No. 3. P. 584–606. DOI: 10.1016/j.matcom.2008.03.015.
12. 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. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.6948>.
13. Rochoux M. C., Emery C., Ricci S., Cuenot B., Trouvé A. Towards predictive data-driven simulations of wild-fire 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/nhess-15-1721-2015.
14. Touloumis A. Nonparametric Stein-type shrinkage covariance matrix estimators in high-dimensional settings // Computational Statistics and Data Analysis. 2015. V. 83. P. 251–261. DOI: 10.1016/j.csda.2014.10.018.
15. 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.



## Using remote sensing data assimilation into wildfire model to evaluate fire front position

S. A. Khvostikov, S. A. Bartalev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

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

*E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru*

Fire front position and dynamics is of critical importance for evaluation of potential fire response measures. Low resolution remote sensing data used to detect burning fires cannot enable determining fire front position with sufficient accuracy. This article presents a method to evaluate fire front position using remote sensing data assimilation into a wildfire model. Unlike previous works on data assimilation, the proposed method was tested on multiple big multi-day wildfires. The proposed method uses probabilistic wildfire spread model, MODIS hotspots and data assimilation approach based on optimization of fire front position that accounts for uncertainties of both model and remote sensing data. The method uses a set of normals to fire front and estimates predicted and remote-sensing-derived fire spread along them, evaluating the real fire front position by minimizing its deviation from the two estimates. This method was applied to 230 fires on the territory of Russia. The evaluated fire front position showed considerable improvement over the original MODIS data.

**Keywords:** wildfires, modelling, MODIS, Landsat, data assimilation

Accepted: 30.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-9-18

### References

1. 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).
2. 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 21<sup>st</sup> century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
3. Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4. 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.
5. Khvostikov S. A., Bartalev S. A., Use of remote sensing data in wildfire modelling, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-9-27.
6. 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).
7. 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.
8. *Development and Structure of the Canadian Forest fire Behavior Prediction System, Information Report ST-X-3*, Forestry Canada Fire Danger Group, Ottawa: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate, 1992, 66 p.

9. 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.
10. Kalnay E., *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 369 p.
11. Mandel J., Bennethum L. S., Beezley J. D., Coen J. L., Douglas C. C., Kim M., Vodacek A., A wildland fire model with data assimilation, *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, Vol. 79, No. 3, pp. 584–606, DOI: 10.1016/j.matcom.2008.03.015.
12. 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., <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.6948>.
13. 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/nhess-15-1721-2015.
14. Touloumis A., Nonparametric Stein-type shrinkage covariance matrix estimators in high-dimensional settings, *Computational Statistics and Data Analysis*, 2015, Vol. 83, pp. 251–261, DOI: 10.1016/j.csda.2014.10.018.
15. 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.