Возможность определения динамики фронта пожара на основе данных Sentinel и Landsat в применении к задачам прогнозирования распространения огня

С. А. Хвостиков, А. В. Кашницкий, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru

На данный момент сложилась уникальная ситуация беспрецедентного уровня обеспеченности открытыми данными высокого пространственного разрешения (10–30 м на пиксель), связанная с наличием трёх спутников Sentinel-2 и двух спутников Landsat на орбите Земли. Такой большой объём спутниковой информация сделал возможным регулярное наблюдение динамики пожаров с высоким уровнем пространственной детализации и временным интервалом от одних суток, а в отдельных случаях и до десятков минут. Обработка этой информации с целью детектирования актуальной площади повреждений растительности и области активного горения возможна с помощью уже существующих инструментов, например, реализованных в системе «ВЕГА-Science». В статье показаны примеры мониторинга динамики пожаров на интервале 18 мин., 1 день и 4 дня. Такие наблюдения могут применяться для инициализации стартовых условий при прогнозировании развития пожаров, а также для настройки используемых при прогнозе моделей. Также такие данные потенциально позволяют восстановить историю развития пожара и оценить скорость его распространения на разных участках фронта горения. Выполненное в работе моделирование продемонстрировало, что полученные с использованием детальных спутниковых данных прогнозы показывают высокий уровень соответствия с фактически наблюдаемой динамикой распространения огня. Кроме этого, в работе была выполнена ручная настройка модельных параметров на основе спутниковых наблюдений динамики пожаров, обеспечившая значительное увеличение качества прогноза. В дальнейшем с учётом полученных результатов и с использованием разработанных в ИКИ РАН инструментов можно создать систему мониторинга динамики пожаров на основе данных спутников Sentinel-2 и Landsat с прогнозированием распространения огня и настройкой модельных параметров.

Ключевые слова: Sentinel-2, Landsat, природные пожары, ДЗЗ, картографирование гарей, мониторинг лесных пожаров, моделирование, настройка параметров модели

Одобрена к печати: 04.09.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-429-434

Введение

В Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) ведётся разработка различных технологий спутникового мониторинга природных пожаров (Лупян и др., 2017, 2021). Особенность разрабатываемых технологий заключается в использовании данных приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), не всегда позволяющих точно определить положение фронта горения ввиду их низкого пространственного разрешения. При этом детальная информация о положении фронта горения может быть применена в различных задачах, включая прогнозирование развития пожара. Использование данных MODIS или VIIRS для определения исходного контура пожара даёт переоценку периметра фронта горения, что при прогнозе распространения огня может приводить к завышению боковой и тыловой составляющих пройденной пожаром площади. В связи с этим детальные контуры пожаров, полученные на основе данных высокого пространственного разрешения в момент горения, могут значительно увеличить точность модельных прогнозов.

На данный момент сложилась уникальная ситуация беспрецедентного уровня обеспеченности открытыми спутниковыми данными высокого пространственного разрешения. Наличие на орбите Земли трёх спутников программы Sentinel-2 (прибор MSI (*англ.*

Multispectral Instrument)) и двух спутников программы Landsat (приборы OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor)) делает возможным регулярное получение ежедневной, а в отдельных случаях и более частой информации о динамике природных пожаров. Например, на *рис. 1* приведены два снимка пожара, полученные с разницей в 18 мин. и демонстрирующие, как регулярное наблюдение в высоком пространственном разрешении позволяет оценить изменение фронта горения. На снимках видно, что восточная часть фронта прошла 200 м в северном направлении, в то время как его западная часть сместилась только на несколько десятков метров. Таким образом, на основе детальных наблюдений можно установить не только положение фронта, но и фактическую скорость пожара при разных условиях горения. Анализ показывает, что для многих пожаров возможно получить почти ежедневные наблюдения их динамики с высоким пространственным разрешением. Пример такого наблюдения истории пожара приведён по ссылке http://sci-vega.ru/mapviewer/?id=1782921426477. Для доступа к спутниковым снимкам здесь и далее использовалась система «ВЕГА-Science» (Loupian et al., 2022) и ресурсы Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

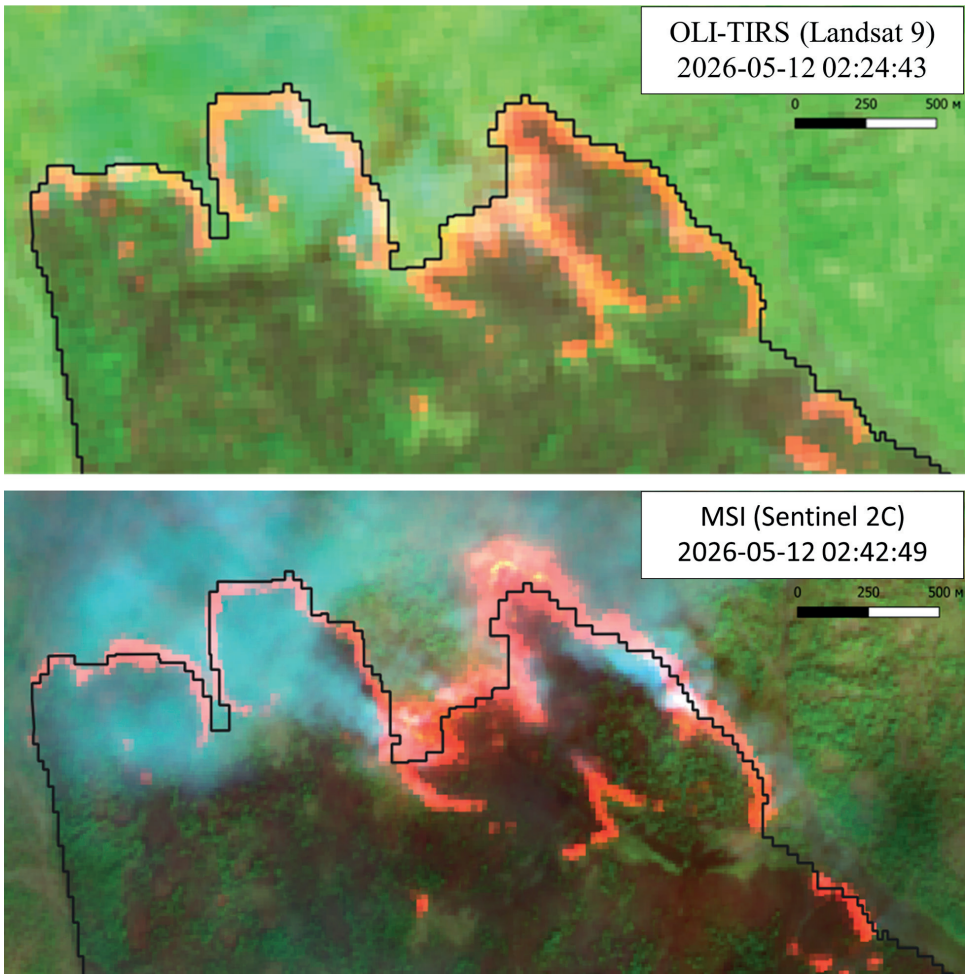


Рис. 1. Распространение лесного пожара в Шимановском районе Амурской области за период 18 мин. Чёрным цветом отмечен контур пройденной огнём территории в начальный период времени (12.05.2026, 02:24:43 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)). Для визуализации использовался RGB-синтез (*англ.* Red, Green, Blue) изображений в следующих спектральных каналах: R — SWIR (*англ.* short wave infrared), 2100–2280 нм; G — NIR (*англ.* near infrared), 785–900 нм; B — Red, 650–680 нм

Обработка этих снимков возможна с помощью разработанных ранее методов и инструментов, позволяющих выполнять оценку постпожарных повреждений растительности

с высоким пространственным разрешением (до 10 м на пиксель) по данным спутников Landsat (приборы TM (*англ.* Thematic Mapper), ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus), OLI), Sentinel-2 (прибор MSI (*англ.* Moisture Stress Index)), «Метеор-М» (прибор КМСС (комплекс многозональной спутниковой съёмки)) и др. Например, в публикации (Кашницкий и др., 2015) описана технология оценки повреждений на основе кластеризации, которая активно применяется сегодня операторами Авиалесоохраны в оперативной работе по тушению лесных пожаров.

В настоящей работе представлена демонстрация возможностей использования данных спутников Landsat и Sentinel-2 в пожарном моделировании. Моделирование выполнялось с помощью существующей в ИКИ РАН системы прогнозирования развития пожаров (Хвостиков и др., 2012). Система использует уравнения канадской системы распространения огня CFFBPS (*англ.* Canadian Forest Fire Behavior Prediction System), задающие связь между скоростью пожара и характеристиками горючих материалов, метеорологическими условиями и рельефом (Development..., 1992).

Моделирование распространения пожаров

Для демонстрации возможностей использования данных высокого пространственного разрешения в задаче прогнозирования распространения природных пожаров были рассмотрены три примера наблюдения пожаров с периодичностью: несколько десятков минут (пожар номер 155503 в базе данных системы «ВЕГА-Science»), один день и четыре дня (пожар номер 163591). Для каждого снимка с помощью специальных инструментов (Кашницкий и др., 2016), имеющихся в системе «ВЕГА-Science», были в ручном режиме получены контуры повреждений на момент съёмки и выделены пиксели активного горения. На *рис. 2* показаны модельные прогнозы и фактическое положение фронта горения на момент окончания моделирования для всех трёх случаев. Для части примеров также была проведена ручная настройка параметров модели, направленная на увеличение соответствия между прогнозом и фактом.

Для пожара 155503 (см. *рис. 2а*) характерно быстрое распространение на север (200 м за 18 мин.). Модель воспроизводит значительно более медленное распространение в восточном направлении, что может свидетельствовать о некорректных метеоданных. Задание модельного параметра ветра на 5 м/с в северном направлении улучшает модельный прогноз и позволяет точнее воспроизвести наблюдаемое по спутниковым данным развитие пожара.

Для пожара 163591 в период с 27 по 28 мая (см. *рис. 2б*) характерно быстрое распространение на 4,5 км в восточном направлении. Модель также показывает преимущественно развитие на восток, но с меньшей скоростью и значимым боковым распространением. Такой результат моделирования также может наблюдаться при неверных данных о метеоусловиях. Задание ветра 4 м/с в восточном направлении даёт адекватный модельный прогноз, соответствующий наблюдаемой динамике фронта горения. Небольшая переоценка на юго-восточном направлении связана с заданием одинаковых значений силы и направления ветра для всего интервала моделирования и могла бы быть исправлена при более сложном сценарии прогноза. Переоценка на севере пожара, скорее всего, говорит о наличии преград, информация о которых отсутствует во входных данных модели развития пожаров.

Для пожара 163591 при его развитии с 28 мая по 2 июня (см. *рис. 2в*) характерно преимущественно распространение в северном и восточном направлении. Модель успешно воспроизвела развитие пожара, несмотря на длительный период моделирования и фактор накопления ошибок со временем. Недооценка на севере пожара может быть объяснена возникновением нового пожара, о чём свидетельствует спутниковое детектирование изолированных точек активного горения в 1,5 км от фронта пожара 163591 по состоянию на 30 мая. Переоценка на северо-востоке предположительно связана с противопожарными мерами, предпринятыми для защиты населённого пункта от огня.

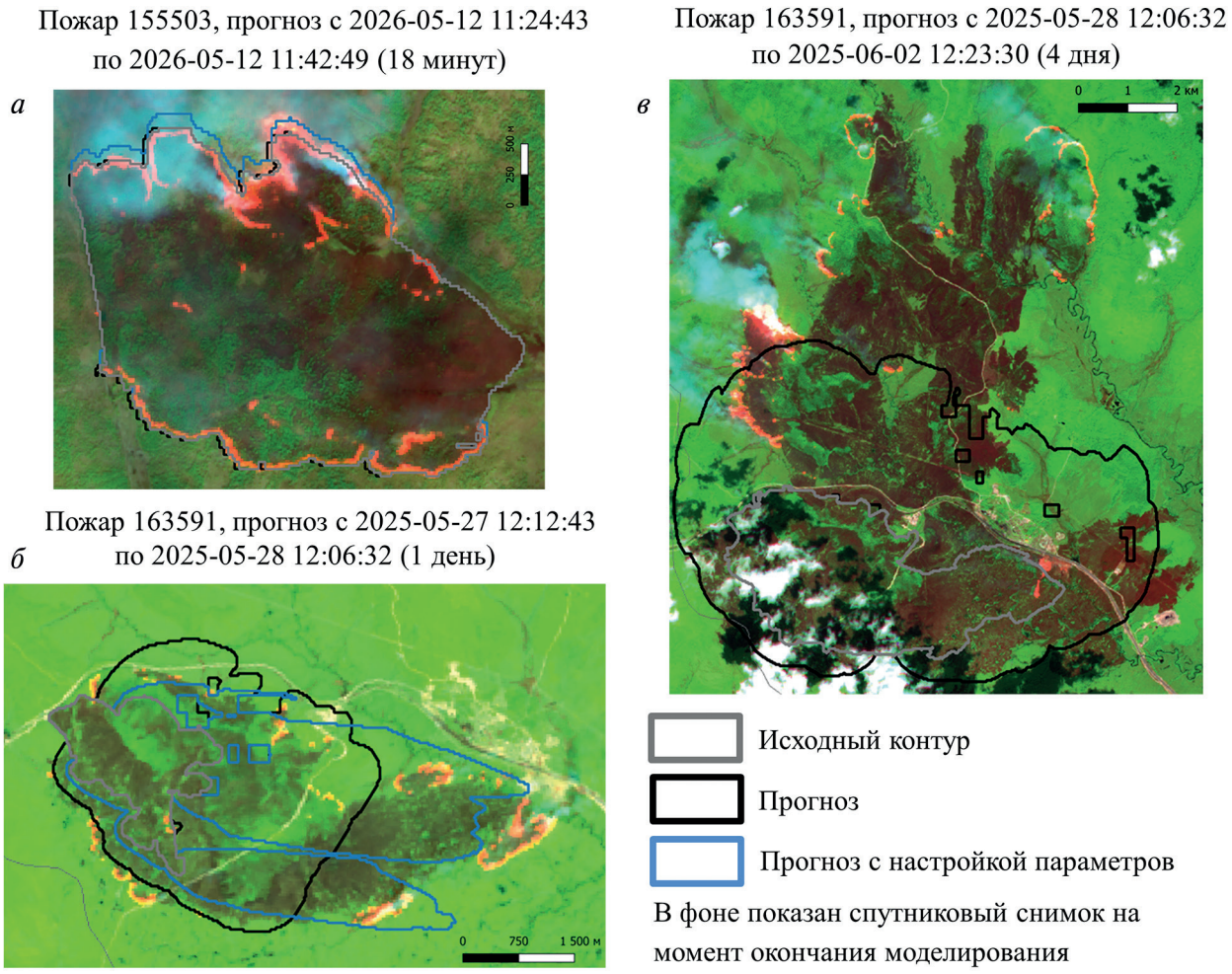


Рис. 2. Модельный прогноз развития пожаров с заданием исходного контура горения на основе спутниковых данных в сравнении с фактическим положением пожара в момент окончания моделирования

Заключение

Полученные результаты показали возможность мониторинга развития пожаров с высоким уровнем пространственной и временной детальности на основе совместного использования данных спутниковых систем Sentinel-2 и Landsat. Рассмотренные в статье примеры мониторинга динамики пожаров продемонстрировали, как спутниковые данные могут использоваться для оценки положения фронта горения и контура пройденной огнём территории с последующим их применением для инициализации модели прогнозирования пожаров. Полученные прогнозы распространения огня показали высокий уровень соответствия с фактическими спутниковыми наблюдениями его динамики. Также было продемонстрировано, как настройка параметров модели, в частности данных о метеоусловиях, позволяет значительно улучшить качество получаемых модельных прогнозов.

Приведённые в работе примеры также показывают, что регулярные наблюдения на основе спутниковых данных Landsat и Sentinel дают возможность восстановить историю развития пожара и оценить скорость его распространения на разных участках фронта горения.

В дальнейшем на основе разработанных в ИКИ РАН инструментов можно реализовать автоматическое получение оценок контуров области активного горения и пройденной огнём территории для мониторинга динамики пожаров с высоким уровнем пространственной и временной детализации, что также позволит повысить точность и качество модели распространения пожаров.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Барталев С. С.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Стыценко Ф. В.* Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 7–16.
2. *Кашницкий А. В.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Константинова А. М.* Технология создания инструментов обработки и анализа данных сверхбольших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777.
3. *Лупян Е. А.*, *Барталев С. А.*, *Балашов И. В. и др.* 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.
4. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А. и др.* 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.
5. *Лупян Е. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Сенько К. С. и др.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
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. 91–98.
7. Development and structure of Canadian Forest fire behavior prediction system. Information Report ST-X-3. Ottawa: Forestry Canada, 1992. 64 p.
8. *Loupian E.*, *Bourtsev M.*, *Proshin A. et al.* Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.

Possibility of wildfire front detection using Sentinel and Landsat data in application to fire spread prediction

S. A. Khvostikov, A. V. Kashnitskii, S. A. Bartalev

Space Research Institute of RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: khvostikov@d902.iki.rssi.ru

Currently, there is an unprecedented amount of open-access high resolution data (10–30 m per pixel) due to presence of three Sentinel-2 satellites and two Landsat satellites on the orbit of Earth. This abundance of data created a possibility of regular wildfire monitoring with high level of spatial and temporal resolution, with time interval between observations ranging from one day and to tens of minutes. This information can be processed using existing instruments (for example those of VEGA-Science system) to evaluate burn area and fire front position. In the article, we show examples of such wildfire monitoring at 18-minute, 1-day and 4-day time intervals. Such observations can be used to set initial conditions for wildfire prediction and for tuning of fire spread models. Also, these data potentially can be used to evaluate spread speed for different fire front areas and recreate fire history. Wildfire modeling, performed in the article, showed that the use of detailed remote sensing data can produce predictions with high level of agreement with actual fire behavior. Also, remote sensing data was used to manually tune model parameters, leading to notable improvement of predictions. In future, on the

basis of the results of this work and instruments developed at Space Research Institute RAS, it will be possible to create a wildfire monitoring system using Sentinel-2 and Landsat data that can predict fire spread and allow adjusting model parameters.

Keywords: Sentinel-2, Landsat, wildfires, remote sensing, burn mapping, forest fire monitoring, modeling, model parameter tuning

Accepted: 04.09.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-429-434

References

1. Kashnitskii A.V., Loupian E.A., Bartalev S.A., Bartalev S.S., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Stytsenko F.V., Optimization of burn mapping interactive procedures in remote fire monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 4, pp. 7–16 (in Russian).
2. Kashnitskii A.V., Lupyan E.A., Balashov I.V., Konstantinova A.M., Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2017, V. 30, pp. 84–87, DOI: 10.1134/S1024856017010080.
3. Loupian E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V. et al., 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
4. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A. et al., 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, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Loupian E.A., Stytsenko F.V., Senko K.S. et al., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
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, V. 9, No. 3, pp. 91–98 (in Russian).
7. *Development and structure of Canadian Forest fire behavior prediction system*, Information Report ST-X-3, Ottawa: Forestry Canada, 1992, 64 p.
8. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.