

Система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия

Д. В. Лозин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru*

Приведено описание разработанной в составе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) системы оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия. Система основана на использовании меры интенсивности горения пожаров (*англ.* Fire Radiative Power — FRP) и имеющихся связей этой характеристики с постпожарными повреждениями лесов. В качестве исходных данных система использует оперативную базу данных пожаров и ежегодно обновляемую карту типов лесного покрова на территории Российской Федерации. В работе представлены общие характеристики системы, архитектура её построения и некоторые особенности реализации. Проведено условное разделение основного программного модуля системы на три блока: построение карт максимальной интенсивности горения пожаров, построение карт прогнозируемых постпожарных повреждений и площадные оценки площади погибшей лесной растительности для объектов разного уровня масштаба (пожары, лесничества, субъекты, федеральные округа, Российская Федерация). Для каждого блока описан реализующий его алгоритм действий. Также описаны основные особенности получаемых в результате работы системы информационных продуктов. Кратко обсуждены вопросы возможности их использования для решения различных задач и их интеграции в информационные системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пожар, дистанционная оценка интенсивности горения, FRP, степень повреждения лесов, методы обработки спутниковых данных, лесная пирология

Одобрена к печати: 17.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106

Введение

Среди различных характеристик лесных пожаров информация об интенсивности горения может быть использована для решения многих актуальных задач в области лесной пирологии. Разработано значительное число методов и подходов, использующих данные об интенсивности горения для оценки повреждений растительного покрова пожарами (Пономарев и др., 2017; Heward et al., 2013; Mottram et al., 2005). Также эта информация используется при оценке объёмов выброса углерода в атмосферу в результате действия пожаров (Barnaba et al., 2011; Ichoku, Kaufman, 2005; Kaufman et al., 1998; Li et al., 2022; Mota, Wooster, 2018; Riggan et al., 2004; Sofiev et al., 2009). В данных направлениях продолжается значительное число работ, ориентированных на уточнение зависимостей степени повреждения лесного покрова от интенсивности наблюдаемых пожаров и разработку подходов получения оперативных оценок потенциальной гибели лесов. Так, например, в исследовании (Лупян и др., 2022) на основе анализа многолетних дистанционных наблюдений интенсивности пожаров, выполненных по всей территории России, и возникающих в результате их действия повреждений лесного покрова были получены зависимости вероятности гибели различных лесов от наблюдавшейся интенсивности горения. На основе выявленных зависимостей также был предложен метод оперативной оценки ожидаемых площадей гибели лесов. Следует отметить, что подобная информация может быть интересна для решения различных научных и прикладных задач. Поэтому на основе предложенного метода в составе Центра коллективного пользования

(ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) была разработана система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия (далее — Система). В настоящей статье представлены общие характеристики, архитектура построения и некоторые особенности Системы и её реализации. Также описаны получаемые в результате работы Системы информационные продукты, которые обеспечивают возможность оперативной оценки потенциальных повреждений лесного покрова пожарами. Кратко обсуждены вопросы использования получаемых информационных продуктов и их интеграции в информационную систему (ИС) «Вега-Лес» (<http://forest.geosmis.ru/>) (Балашов и др., 2020) и информационно-аналитическую систему (ИАС) «Углерод-Э» (<http://carbon.geosmis.ru/>), которые обеспечивают инструменты для отображения и анализа продуктов для широкого круга пользователей.

Используемые в Системе данные

Основной источник входных данных для разработанной Системы — оперативная база данных (БД) пожаров, формируемая на основе шестой коллекции данных приборов MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire/Hotspot Data (MCD14DL); MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://earthdata.nasa.gov>). Особенности построения данной БД достаточно подробно описаны, в частности, в работе (Галеев и др., 2005). Для каждой горячей точки (пожарный пиксель сцены MODIS, ГТ) в БД имеется информация о наблюдавшейся в ней интенсивности горения, количественно выраженной в величине FRP (*англ.* Fire Radiative Power) (Mottram et al., 2005; Wooster et al., 2003), а также дата регистрации ГТ и её фактический размер в зависимости от угла сканирования прибора. Для того чтобы можно было сопоставлять информацию, приходящую от пикселей разного размера, далее в методе используется значение FRP, поделённое на площадь пикселя (FRPS), т. е. удельный поток с единицы площади для наблюдаемой ГТ. Данная БД также содержит информацию о группах ГТ, объединённых по пространству и времени (ГТ, центры которых лежат на расстоянии меньше 0,5 км и время регистрации которых различается не более чем на пять дней). Такие группы в дальнейшем будут именоваться пожарами.

Другим типом входных данных является ежегодно обновляемая карта территории Российской Федерации, содержащая информацию об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016).

Реализованная схема анализа данных

Реализованная в Системе общая схема анализа данных представлена на *рис. 1* (см. с. 98). В первом блоке происходит преобразование исходной информации о пожарах в растровый вид. На выходе получается ежедневный ряд карт с информацией о максимальной интенсивности горения пожаров за сезон. Другим видом выходных данных является аналогичный ряд карт, дополненный информацией о дате зарегистрированного максимального FRPS в каждом пикселе карты. На втором этапе данные объединяются с информацией о типе растительности, после чего в каждом пикселе карты осуществляется преобразование трёх значений (FRPS, месяц, тип растительности) в оценку доли пикселя, в которой прогнозируется гибель растительного покрова. В результате получается ежедневный ряд карт прогнозируемых постпожарных повреждений и интегральные оценки площади погибшей растительности, рассчитываемые по полученному ряду карт. На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. Для построения на основе полученных данных статистической информации о гибели лесов на различных территориях (лесничествах, субъектах, районах и т. д.) используются схемы и программные модули, реализованные в системах, созданных и функционирующих на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

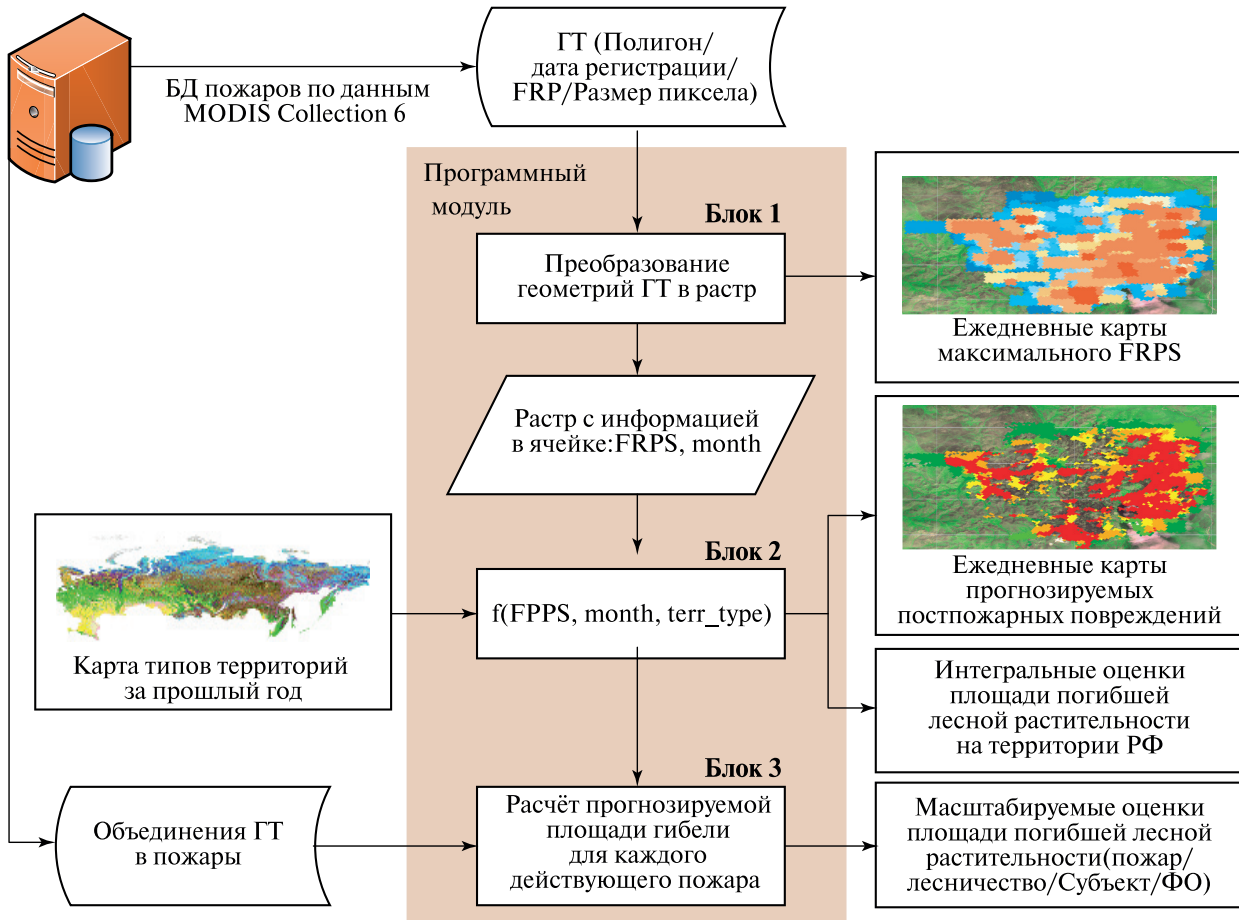


Рис. 1. Общая схема анализа данных, реализованная в Системе

Для реализации описанной схемы обработки данных внедрён программный модуль (скрипт), написанный на языке Python и использующий библиотеки numpy, pymysql, gdal, datetime и os. Созданный модуль запускается автоматически ежедневно и обеспечивает обработку информации о возникших с начала года на территории России лесных пожарах. В следующих разделах настоящей работы будут более детально описаны отдельные элементы процедуры анализа данных.

Построение карт максимального FRPS

Алгоритм действий первого блока программного модуля представлен на рис. 2 (см. с. 99). Первым шагом является подключение к БД пожаров для получения информации о геометриях ГТ, детектированных с начала календарного года по день запуска скрипта, вместе с датой их регистрации (dt), FRP и размерах ГТ ($size_x$, $size_y$). Как было отмечено ранее, для однородности представления FRP каждой ГТ нормируется на площадь этой точки ($FRPS = FRP / (size_x \times size_y)$).

На втором шаге происходит растеризация геометрий с занесением соответствующих им FRPS с округлением до целого в каждый пиксель выходного изображения. В случае пересечения нескольких геометрий ГТ в каждом пикселе, покрывающем это пересечение, выбирается максимальное из значений FRPS. Как было ранее отображено при описании общей структуры технологии, помимо растров, содержащих только максимальное FRPS, аналогичным образом создаются растры с дополненной информацией о дате зарегистрированного FRPS. Технически алгоритм формирования таких растров отличается только в выражении (1), значение которого записывается в каждый пиксель выходного изображения. Таким образом,

обеспечивается одновременное хранение необходимой информации: день регистрации FRPS находится в разрядах с 3-го по 5-й, а разряды с 6-го по 9-й служат для хранения FRPS. При этом первые два разряда остаются пустыми для дальнейшего добавления в них информации о типе растительности в следующем блоке программного модуля.

$$\text{round} \frac{\text{FRP}}{\text{size}_x \times \text{size}_y} \times 1000\ 000 + \text{DAYOFYEAR}(dt) \times 100. \quad (1)$$

На третьем шаге происходит перепроецирование изображения в равновеликую коническую проекцию Альберса с размером одного пикселя в 230 м. Такой выбор был продиктован форматом данных о постпожарных повреждениях лесов, с которыми ранее сопоставлялись карты максимального FRPS (Лупян и др., 2022). Так как сформированные зависимости, преобразующие FRPS в предсказываемую долю пикселя с погибшей растительностью, были получены именно для данных параметров пространственного изображения, было принято решение сохранить их во избежание возможной ошибки в оценке площади погибшей растительности, связанной с другой проекцией и разрешением данных.

Последние два шага связаны с удобством хранения и визуализации полученных карт в ИС «Вега-Лес» и ИАС «Углерод-Э». Задаётся тайловый способ хранения изображения и метод его сжатия (TILED = YES, COMPRESS = LZW, BIGTIFF = YES). В конце для растра создаются его обзорные уровни. На *рис. 4* в левом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт максимального FRPS, охватывающих развивающийся пожар.

Преобразование геометрий ГТ в растр



Рис. 2. Алгоритм действий первого блока программного модуля

Построение карт прогнозируемых постпожарных повреждений

На *рис. 3* (см. с. 100) представлена схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS («1а»), и карт типов растительности («1б») в карты прогнозируемых постпожарных повреждений («9»). Общая идея данного преобразования заключена в использовании полученных в работе (Лупян и др., 2022) зависимостей вероятности гибели лесной растительности от величины FRPS пожара с учётом типа растительности и месяца действия пожара. На настоящий момент такие зависимости получены для всех лесных типов растительности используемой карты (Барталев и др., 2016) и всех месяцев года. Они представлены в табличном виде («6»), где каждому ключу («5»), состоящему из верхней границы диапазона FRPS, месяца пожара и индекса типа растительности, ставится в соответствие доля пикселя с прогнозируемой гибелью лесной растительности («7»).

Опишем алгоритм более подробно (см. *рис. 3*). После получения карт («1а», «1б») в матричном виде («2а», «2б») и их объединения («3») в каждой ячейке («4») получившейся матрицы, как было отмечено ранее, одновременно содержится информация о типе растительности (разряды 1, 2), день регистрации FRPS (разряды 3–5) и значение FRPS (разряды 7–10). Далее для каждой значимой ячейки по номеру дня в году определяется месяц, а для FRPS подбирается верхнее значение соответствующего ему диапазона значений FRPS, для которого в работе (Лупян и др., 2022) была получена статистическая оценка прогнозируемой гибели лесной растительности. В результате получается ключ («5») и по нему происходит обращение к таблице («6»). Соответствующее ключу («5») значение («7») подставляется вместо ключа в обрабатываемую матрицу. После выполнения такого преобразования для всех ячеек получившаяся матрица («8») растрируется в ту же проекцию, что и исходная карта («1б»), в результате чего получается целевой растр («9») — карта прогнозируемых постпожарных повреждений.

На рис. 4 (см. с. 101) в правом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт, соответствующих картам максимального FRPS из левого столбца того же рисунка. Можно заметить, что покрытие карты FRPS больше, чем карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Это связано с тем, что ГТ, геометрия которой покрывает одновременно лесную и нелесную растительность, целиком отображается на карте максимального FRPS. Для карты прогнозируемых постпожарных повреждений ГТ отображается не целиком, а только её часть, соответствующая лесной растительности.

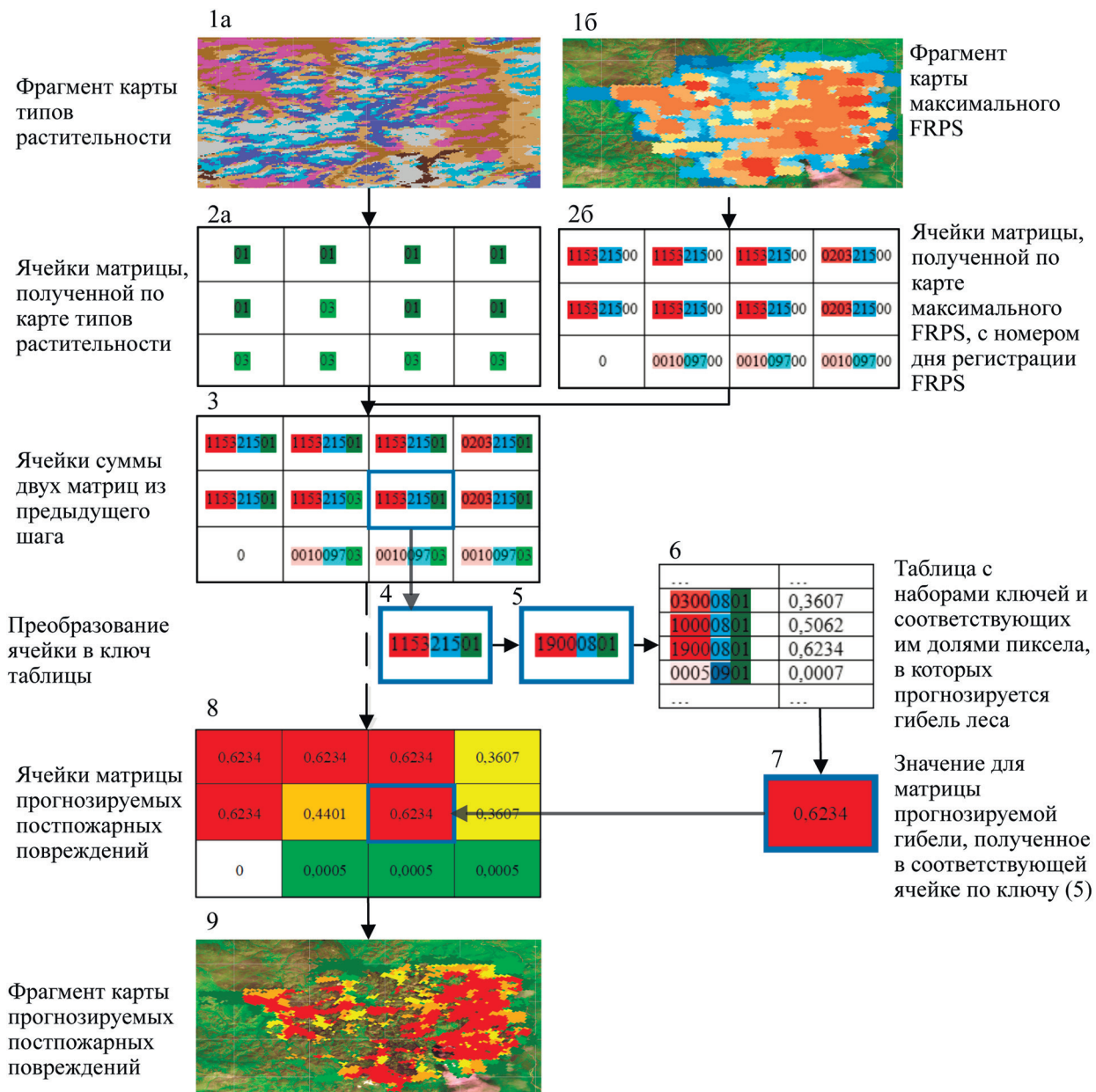


Рис. 3. Схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS, и карт типов растительности в карты прогнозируемых постпожарных повреждений

Ежедневно составляемые карты максимального FRPS и карты оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности описанным выше способом строятся с покрытием всей территории Российской Федерации. Постоянный размер ячейки таких карт позволяет перейти к интегральной площадной оценке погибшей растительности для территории страны.

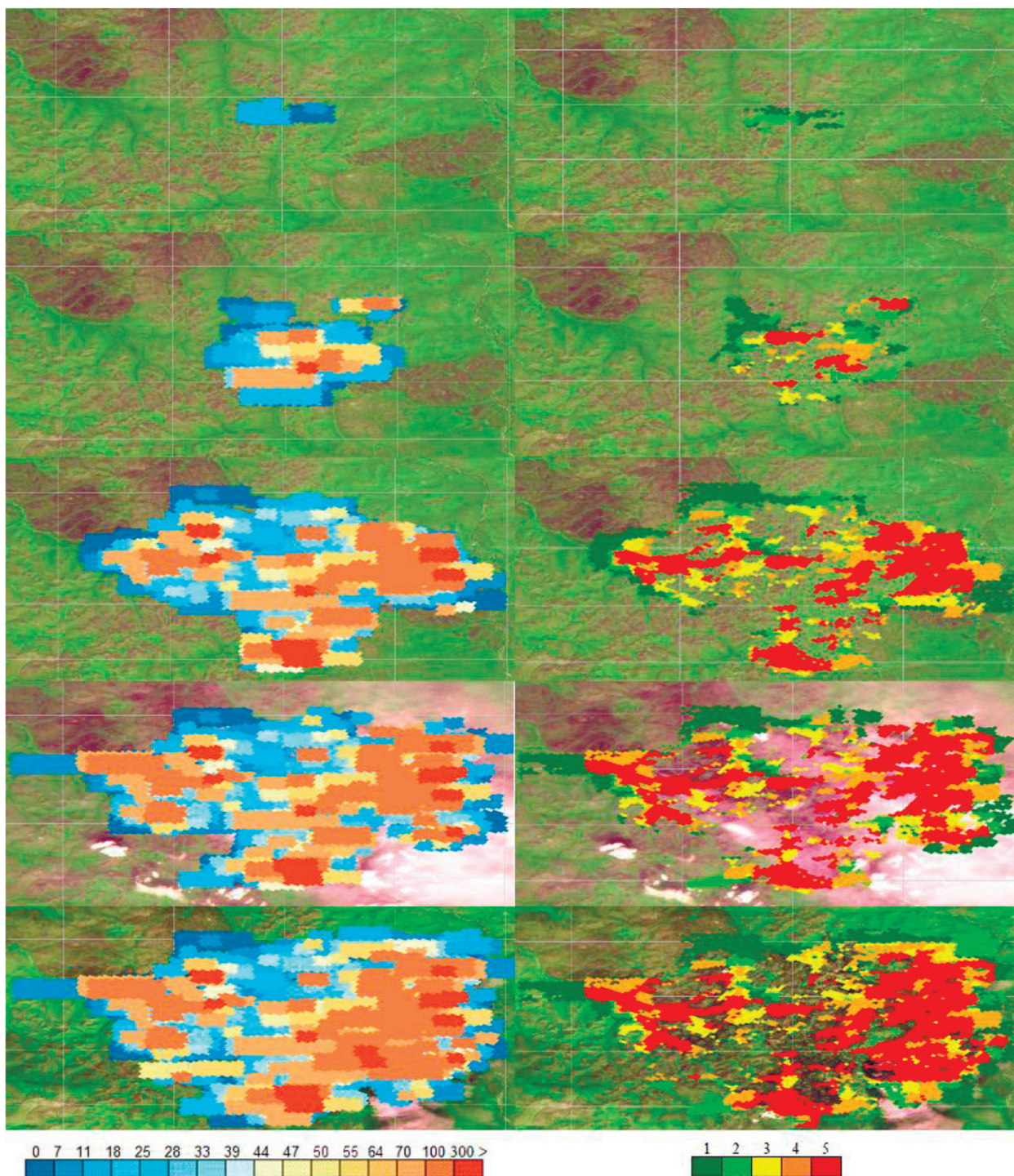


Рис. 4. Серия фрагментов карт максимального FRPS (слева) и оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности по FRPS (справа) для пожара, происшедшего с 4 по 31 июля 2023 г. на территории Аяно-Майского р-на Хабаровского края. FRPS измеряется в МВт/км²; повреждения оценены дискретными категориями от 1 до 5: 1 — отсутствие повреждений, 5 — полная гибель растительности. Даты фрагментов карт сверху вниз: 4, 11, 18, 25, 31 июля

Для этого все значения в пикселях карты (dam_val) суммируются и полученная величина умножается на площадь ячейки $S_{pix} = 5,9$ га. Затем к результату применяется линейная коррекция с экспериментально выведенным коэффициентом $K_{forest} = 0,859$. Данная коррекция проводится с целью устранения погрешности, связанной с субпиксельной неопределённостью ячейки карты типов растительности. Таким образом, суммарная площадь погибшей

в результате действия пожаров лесной растительности на территории Российской Федерации рассчитывается по формуле:

$$S_{dat} = S_{pix} \cdot K_{forest} \cdot \sum dam_val_{i,j} \text{ га.} \quad (2)$$

Получение оценок площадей возможной гибели лесов на различных территориях

На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. В связи с этим в последнем блоке Системы действующие пожары соотносятся с составленной картой погибшей растительности. Общая схема блока представлена на рис. 5.

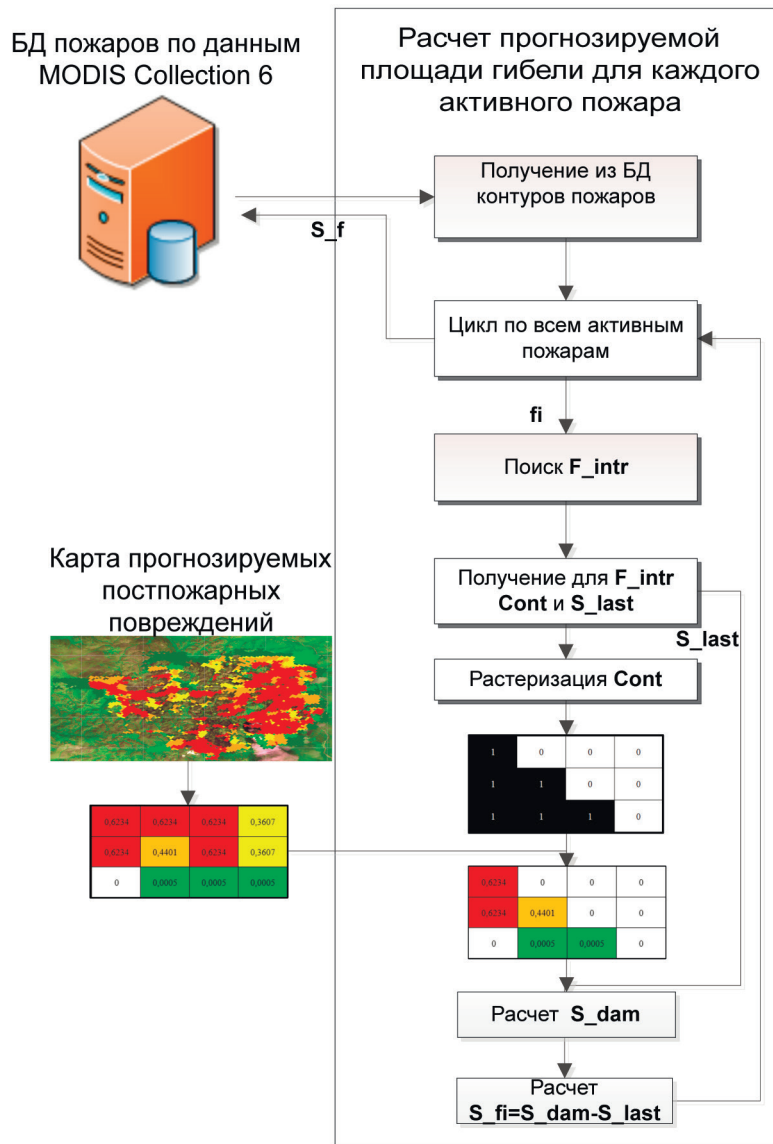


Рис. 5. Алгоритм действий третьего блока программного модуля. Здесь f_i — активный пожар i -го шага цикла; F_intr — множество завершённых пожаров за год, пересекающихся с f_i , вместе с самим f_i ; $Cont$ — объединённый контур пожаров из F_intr ; S_last — сумма оценок площади погибшей растительности для пожаров из F_instr (исключая оценку для f_i); S_dam — оценка площади погибшей растительности, полученная для F_instr ; S_fi — оценка площади погибшей растительности для f_i ; S_f — набор S_f с соответствующими с ними соответствующими идентификаторами f_i

После выгрузки информации о пожарах из БД запускается цикл по всем активным пожарам. На каждом шаге этого цикла выбирается один пожар (fi) и для этого пожара происходит расчёт S_{fi} — оценки площади погибшей растительности в результате действия пожара fi . После расчёта для всех пожаров из цикла набор (S_f), состоящий из оценок S_{fi} вместе с соотнесёнными с ними идентификаторами пожаров fi , заносится в БД. Важным требованием к расчёту является аддитивность оценок для «связанных» по территории пожаров — пожаров, контуры которых пересеклись в пространстве в течение сезона. Для этого при расчёте S_{fi} для каждого fi сначала находится F_{intr} — множество завершённых пожаров за год, пересёкшихся с fi (в случае пересечения активных пожаров их объединение уже произведено в исходной БД). Данное множество также включает сам пожар из цикла fi . Затем для этого множества строится его объединённый контур ($Cont$), а также рассчитывается S_{last} — сумма оценок площадей погибшей растительности для пожаров из F_{intr} (исключая пожар fi), которые уже были рассчитаны ранее. Таким образом, в случае, если в F_{intr} входит только пожар fi (пожар из цикла не пересёкся ни с одним из пройденных за сезон пожаров), $Cont$ совпадёт с контуром пожара fi , а $S_{last} = 0$. На следующем шаге происходит растеризация контура $Cont$ для получения маски в проекции карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Маска в матричном виде пересекается с картой, в результате чего получается фрагмент глобальной карты, соответствующей объединениям пожаров F_{intr} . Для данного фрагмента по формуле (2) происходит расчёт S_{dam} — прогнозируемой площади повреждений для F_{intr} . Так как все пожары из F_{intr} , кроме fi , не являются активными, S_{dam} отличается от S_{last} только за счёт действия fi . В связи с этим значение $S_{fi} = S_{dam} - S_{last}$ вместе с идентификатором пожара fi добавляются в набор S_f , и цикл переходит на следующий шаг.

Заключение

Разработанная система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия в настоящее время позволяет в полностью автоматическом режиме формировать следующие информационные продукты:

- Ежедневно обновляемые карты максимального FRPS на территории Российской Федерации.
- Ежедневно обновляемые карты прогнозируемых постпожарных повреждений лесной растительности на территории Российской Федерации.
- Ежедневно обновляемые оценки площади погибшей лесной растительности в результате действия пожаров на территории Российской Федерации с возможностью получения соответствующих оценок для различных федеральных округов, регионов, районов, лесничеств и конкретных пожаров.
- Соответствующие ряды карт и оценок, полученные по архивным данным с 1 января 2001 г.

Указанный набор продуктов предоставляет большой набор данных, которые могут быть использованы для широкого круга исследовательских и прикладных задач. Одним из главных достоинств реализованной системы представляется оперативность получаемых продуктов, что делает возможным их применение при решении задач, требующих быстрого реагирования на развитие пожара.

Для работы с получаемыми продуктами в различных системах могут быть реализованы интерфейсы, обеспечивающие проведение их анализа в зависимости от задач конкретных систем. В настоящее время эти возможности реализованы, в частности, в ИС «Вега-Лес» и ИАС «Углерод-Э».

Система создавалась с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (<http://скр.geosmis.ru/>, Лупян и др., 2019), который поддерживается Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Методики и программное обеспечение

оперативной обработки данных для построения ежедневных карт максимальной интенсивности горения и оперативной оценки постпожарных повреждений лесов разработаны при поддержке темы «Эмиссия» (госрегистрация № 122101700045-7).

Литература

1. *Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А. и др.* Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. *Галеев А. А., Прошин А. А., Ершов Д. В., Тащилин С. А., Мазуров А. А., Луян Е. А.* Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 367–371.
4. *Луян 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. *Луян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
6. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О.* Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.
7. *Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G. P.* An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. Iss. 20. P. 10487–10501. DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
8. *Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P. et al.* Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing // Intern. J. Wildland Fire. 2013. V. 22(7). P. 910–918. DOI: 10.1071/WF12087.
9. *Ichoku C., Kaufman Y. J.* A Method to Derive Smoke Emission Rates from MODIS Fire Radiative Energy Measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 11. DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
10. *Kaufman Y. J., Justice C., Flynn L. et al.* Monitoring global fires from EOS-MODIS // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 32215–32239. DOI: 10.1029/98JD01644.
11. *Li F., Zhang X., Kondragunta S. et al.* Hourly biomass burning emissions product from blended geostationary and polar-orbiting satellites for air quality forecasting applications // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 281. Article 113237. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113237.
12. *Mota B., Wooster M. J.* A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP) // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 206. P. 45–62. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
13. *Mottram G. N., Wooster M. J., Balzter H., George C., Gerrard F., Beisley J.* The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires. 2005. 4 p.
14. *Riggan P., Tissell R., Lockwood R. et al.* Remote measurement of energy and carbon flux from wildfires in Brazil // Ecological Applications. 2004. V. 14(3). P. 855–872. DOI: 10.1890/02-5162.
15. *Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M. et al.* An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. V. 9. Iss. 18. P. 6833–6847. DOI: 10.5194/acp-9-6833-2009.
16. *Wooster M. J., Zhukov B., Oertel D.* Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 86. P. 83–107. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.

System of operational construction of fire burning intensity maps and estimates of possible loss of forest vegetation as a result of fire action

D. V. Lozin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: lozin@d902.iki.rssi.ru

The paper presents a description of the system of operational construction of fire burning intensity maps and estimates of possible loss of forest vegetation as a result of fire action. The system has been developed as part of the IKI-Monitoring Shared Use Center (<http://ckp.geosmis.ru/>). The system is based on using fire burning intensity (FRP — Fire Radiative Power) and existing links of this characteristic with post-fire damage to vegetation. As input data, the system uses an operational fire database and an annually updated map of forest cover types in the Russian Federation. The paper presents general characteristics of the system, its construction architecture and some features of implementation. The main program module of the system is conditionally divided into three blocks: construction of maps with maximum fire burning intensity, construction of maps with projected post-fire damage and assessment of the dead forest vegetation area for different scale objects (fires, forestries, federal subjects and districts, Russian Federation). The algorithm of actions realizing each block is described. Also, the main features of the information products obtained as a result of the system operation are described. The issues of using those information products for solving various tasks and their integration into various information systems are briefly discussed.

Keywords: remote sensing, wildfire, remote assessment of burning intensity, FRP, the forest damage by fires, satellite data processing methods, forest pyrology

Accepted: 17.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106

References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A. et al., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 73–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Galeev A. A., Proshin A. A., Ershov D. V., Tashchilin S. A., Mazurov A. A., Forest fires satellite monitoring data storage management, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 367–371 (in Russian).
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring Shared Use Center for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennyye 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.
5. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
6. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Usataya Yu. O., Registration of Wildfire Energy Characteristics in Siberian Forests Using Remote Sensing, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 4, pp. 3–11 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961417040017.
7. Barnaba F., Angelini F., Curci G., Gobbi G. P., An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, Issue 20, pp. 10487–10501, DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
8. Heward H., Smith A. M. S., Roy D. P. et al., Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing, *Intern. J. Wildland Fire*, 2013, Vol. 22(7), pp. 910–918, DOI: 10.1071/WF12087.

9. Ichoku C., Kaufman Y.J., A Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 11, DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
10. Kaufman Y.J., Justice C., Flynn L. et al., Monitoring global fires from EOS-MODIS, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 32215–32239, DOI: 10.1029/98JD01644.
11. Li F., Zhang X., Kondragunta S. et al., Hourly biomass burning emissions product from blended geostationary and polar-orbiting satellites for air quality forecasting applications, *Remote Sensing of Environment*, 2022, Vol. 281, Article 113237, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113237.
12. Mota B., Wooster M.J., A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP), *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 206, pp. 45–62, DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
13. Mottram G.N., Wooster M.J., Balzter H., George C., Gerrard F., Beisley J., *The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires*, 2005, 4 p.
14. Riggan P., Tissell R., Lockwood R. et al., Remote measurement of energy and carbon flux from wildfires in Brazil, *Ecological Applications*, 2004, Vol. 14(3), pp. 855–872, DOI: 10.1890/02-5162.
15. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M. et al., An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, Vol. 9, Issue 18, pp. 6833–6847, DOI: 10.5194/acp-9-6833-2009.
16. Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D., Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, pp. 83–107, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.