

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК: 528.88

ОЦЕНКА ПИРОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕСНЫЕ ТЕРРИТОРИИ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ

С.Н. Жаринов¹, Е.И. Голубева², М.В. Зимин³

¹ ГК СКАНЭКС, департамент лесных проектов

^{2,3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

³ Институт географии РАН, отдел картографии и дистанционного зондирования Земли

¹ Руководитель; e-mail: snzharinov@mail.ru

² Кафедра рационального природопользования, проф., д-р биол. наук; e-mail: egolubeva@gmail.com

³ Лаборатория аэрокосмических методов, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ziminmv@mail.ru

Рассматриваются возможность и ограничения применения общепринятых алгоритмов детектирования поврежденных огнем лесных территорий средствами дистанционного зондирования, которые позволяют системам мониторинга в автоматическом режиме формировать данные о площадях пожаров и площадях, на которых в последующем фиксируется гибель лесных насаждений. Результирующие размеры детектируемых площадей пожаров обладают погрешностью измерений, величины которых определены на основе единовременных данных, установленных в ходе исследований в отношении обширной территории за один лесопожарный сезон. Лесные пожары, в зависимости от географических особенностей территории, имеют различные пространственно-временные и качественные характеристики, поэтому сопровождаются неоднородными повреждениями лесов, что влияет на точность дистанционного определения гари или горельника. В связи с этим применение установленной величины погрешности при исследованиях на локальном уровне может привести к неточности результатов. Анализ космических снимков земель лесного фонда Тверской области за 2007–2022 гг. показал необходимость установления региональных величин погрешности измерений площадей, пройденных пожарами. Сопоставление производных данных среднего пространственного разрешения с данными высокого пространственного разрешения доказывает наличие региональной величины отклонения от установленной величины погрешности измерений, достигающей значительных размеров при относительно малых площадях детектируемых участков. Исследование показало целесообразность установления региональных величин погрешности измерений пирогенного воздействия на лесные территории. Применение полученных результатов позволит повысить точность определения площадей лесных пожаров и размера связанного с ними ущерба по данным дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, космические снимки, лесные пожары, погрешность измерений

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.10

ВВЕДЕНИЕ

Существующие способы дистанционного определения мест возникновения лесных пожаров и пройденной огнем площади базируются на основе данных об изменениях радиационной температуры земной поверхности [Li et al., 2001; Giglio et al., 2003; Arino et al., 2005], а также на пространственно-временных изменениях ее спектрально-отражательных характеристик [Gregoire et al., 2003; Sukhinin et al., 2005; Roy et al., 2008]. В связи с общедоступностью и широким охватом территории космической съемкой высокого пространственного разрешения (данные со спутников Landsat и Sentinel-2) разра-

батываются методы, способные с более высокой точностью, в сравнении с результатами по данным среднего пространственного разрешения (данные со спутников Terra и Aqua), определять лесные площади, которые повреждаются огнем [Богданов и др., 2017; Шихов, Зарипов, 2018], в том числе с применением нейронных сетей глубокого обучения [Вик и др., 2021]. Чрезвычайно информативные оценки пирологического воздействия на леса, расположенные на территории Российской Федерации, проводятся регулярно [Барталев и др., 2017] на основе обработки данных среднего пространственного разрешения.

Продукты разработанных алгоритмов обработки данных ДЗ, помимо иных систем, применяются в Информационной системе дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) [Информационная..., 2023]. Одним из источников информации, по данным которых они формируются, выступает прибор MODIS спутников Terra и Aqua. Пространственное разрешение исходных данных, которые обрабатываются алгоритмом, основанным на изменениях радиационной температуры, составляет 1 км, алгоритмом, основанном на фиксации изменений спектрально-отражательных характеристик, – 250 м.

Технология формирования полигональных объектов, потенциально представляющих собой пройденные огнем участки, по алгоритму, основанному на температурных аномалиях, заключается в объединении пикселей и групп пикселей, определяемых при помощи алгоритма MOD14, а также агрегацию определяемых полигонов при их сопоставимости по пространственно-временным критериям [Барталев и др., 2012].

Учет участков растительного покрова, потенциально поврежденных в результате пожара, детектируемых на основе анализа спектрально-отражательных характеристик земной поверхности проводится только на территориях, на которых ранее в текущем году регистрировались температурные аномалии. Таким образом, из общего массива данных об изменениях растительного покрова исключаются лесные территории, изменения на которых произошли по иным причинам. В качестве критерия пространственной согласованности используется наличие четырех процентов площади связанной области, совпадающей с тепловыми аномалиями. В результате выявленный участок изменения растительности считается поврежденным пожаром, если он согласуется с тепловыми аномалиями в пространственном и временном отношении. Состоятельность данного принципа приводится в ряде профильных исследований [Fraser et al., 2000; Bartalev et al., 2007].

В связи с тем что лесные пожары обладают высокой пространственно-временной вариабельностью, обусловленной характеристиками пирологических материалов, метеорологическими условиями, рельефом местности, суточной и сезонной динамикой температур очагов горения [Giglio et al., 2006], получение однородных данных о лесных пожарах на значительных территориях дистанционными методами невозможно. Известно, что при формировании данных по алгоритму, основанному на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности, точность детектирования пройденной огнем площади находится в прямой зависимости от ее размера. Исследованием [Руководство..., 2014]

определено, что существенная погрешность измерения характерна для участков, площадь которых составляет менее 100 га, и различна для лесных и не лесных территорий. Результаты приведенной работы исходят из пространственно-временного сопоставления данных о площадях пройденной огнем территории в Российской Федерации в 2011 г., определенной алгоритмом, основанным на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности, с площадями, полученными при дешифрировании снимков высокого пространственного разрешения (Landsat TM/ETM+), в том числе в экспертном режиме.

Очевидно, что точность данных о площадях пожаров на лесных территориях, получаемых дистанционными методами, варьирует в зависимости от региона исследования.

Установление региональных величин погрешности измерений позволит дать более точное представление о пирогенном воздействии на лесные территории и оценивать связанный с ним ущерб дистанционными методами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки точности выявления пройденных огнем площадей на основе метода фиксации изменения спектрально-отражательных свойств поверхности на региональном уровне проведено сопоставление соответствующих результатов обработки данных прибора MODIS (пространственного разрешения 250 м/пиксель) с результатами дешифрирования спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (от 30 до 2,5 м/пиксель), полученных приборами OLI (Landsat-8), ETM+ (Landsat-7), MSI (Sentinel-2), MCC (Канопус-В, БКА). Оценка проводилась в отношении территории земель лесного фонда в Тверской области, на которых в период с 2007 по 2022 г. алгоритмом автоматического детектирования по данным прибора MODIS зафиксированы изменения спектрально-отражательных свойств земной поверхности.

На территории, где в автоматическом режиме определены повреждения растительного покрова, с использованием ИСДМ-Рослесхоз в экспертном режиме подбирались снимки высокого пространственного разрешения. Применимость подобранного снимка должна отвечать условиям: 1) его дата отстояла по времени от момента окончания фиксации «горячей точки» в системе не более чем на три месяца; 2) цветное синтезированное изображение позволяло надежно идентифицировать поврежденные огнем территории. Оценка площадей, пройденных пожарами, проводилась средствами ГИС на основе экспертного дешифрирования материалов космической съемки высокого пространственного разрешения. Пример сопоставля-

емых пространственных данных (рис. 1) представлен пожаром, действовавшим на территории Торжокского лесничества в период с 19.08.2022 по 23.08.2022 (снимок Sentinel-2A за 25.08.2022).

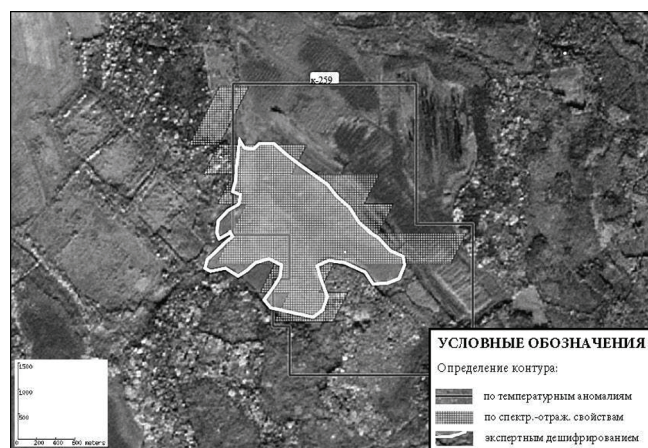


Рис. 1. Пример создания контуров лесных пожаров

Fig. 1. Example of creating forest fire contours

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На территории земель лесного фонда Тверской области в 2007–2022 гг. с применением данных ИСДМ-Рослесхоз по алгоритму, основанному на данных об изменениях радиационной температуры земной поверхности, зарегистрировано 505 участков тепловых аномалий (пространственное разрешение 1 км), в границах которых или смежных с ними территориях по алгоритму, основанному на выявлении изменений спектрально-отражательных свойств поверхности земли, в заданных условиях детектировано 236 участков (пространственное разрешение 250 м). Данные территории составили базу участков, на которые подбирались снимки высокого пространственного разрешения (2,5–30 м) для экспертного определения контуров гарей или горельника при их наличии. Для 206 участков подобраны снимки высокого пространственного разрешения, позволяющие в заданных условиях экспертным подходом идентифицировать наличие повреждений растительного покрова, вызванных пожарами. На остальные участки снимки, удовлетворяющие заданным условиям, подобрать не удалось. Визуальная оценка снимков высокого пространственного разрешения показала, что для 155 участков контуры последствий лесных пожаров визуально определяются. В данное число не вошли участки с зафиксированными изменениями спектрально-отражательных свойств поверхности, распознаваемые по снимками высокого пространственного разрешения как разработанные лесосеки, на которых очистка от

порубочных остатков проводилась огневым способом (рис. 2, слева Западновинское лесничество, дата детектирования пожара 12.09.2017, справа Фировское лесничество, дата детектирования пожара 23–24.09.2015).

Таким образом, опорные данные, сформированные в результате дешифрирования снимков высокого пространственного разрешения, включили в себя информацию о 155 поврежденных пожарами участках, которые сопоставлялись с соответствующими им пространственными данными, определенными по алгоритму, основанному на изменениях спектрально-отражательных свойств земной поверхности. Общая площадь пожаров, определенная по алгоритму изменения спектрально-отражательных свойств поверхности, составила 45731 га, из которых 5904 га являются покрытой лесом территорией. Экспертный анализ снимков высокого пространственного разрешения показал, что общая площадь поврежденных территорий составила 38891 га, из которых 3604 га являются покрытой лесом территорией.

Для проведения оценки зависимости точности определения площади поврежденных огнем участков от их размеров все участки не более 1000 га разделялись на группы с шагом в 100 га, что обеспечило сопоставимость полученных результатов с общероссийскими данными [Руководство..., 2014]. Для каждой группы получена оценка относительной средней ошибки для покрытых и не покрытых лесом территорий.

Суммарные значения показывают относительную ошибку по общей площади в 18%, а по покрытой лесом – 64%.

Проведенный анализ данных относительно составных частей региона исследования – лесничеств показал, что величина погрешности измерений для них различна. Все площади контуров, определенные как поврежденные огнем территории, распределены по четырем агрегированным группам: до 300, 300–600, 600–900, более 900 га. В группе до 300 га с погрешностью измерения не более 50% определено 23% пожаров, с погрешностью 50–100% – 16% пожаров, с погрешностью более 100% – 61% пожаров. В группе 300–600 га с погрешностью измерений не более 50% определено 9% пожаров, с погрешностью 50–100% – 64% пожаров, с погрешностью более 100% – 27% пожаров. В группе 600–900 га с погрешностью измерений не более 50% определено 33% пожаров, с погрешностью 50–100% – 50% пожаров, с погрешностью более 100% – 17% пожаров. В группе более 900 га с погрешностью измерений не более 50% определено 75% пожаров, с погрешностью 50–100% – 25% пожаров, с погрешностью определения более 100% пожаров не зарегистрировано.

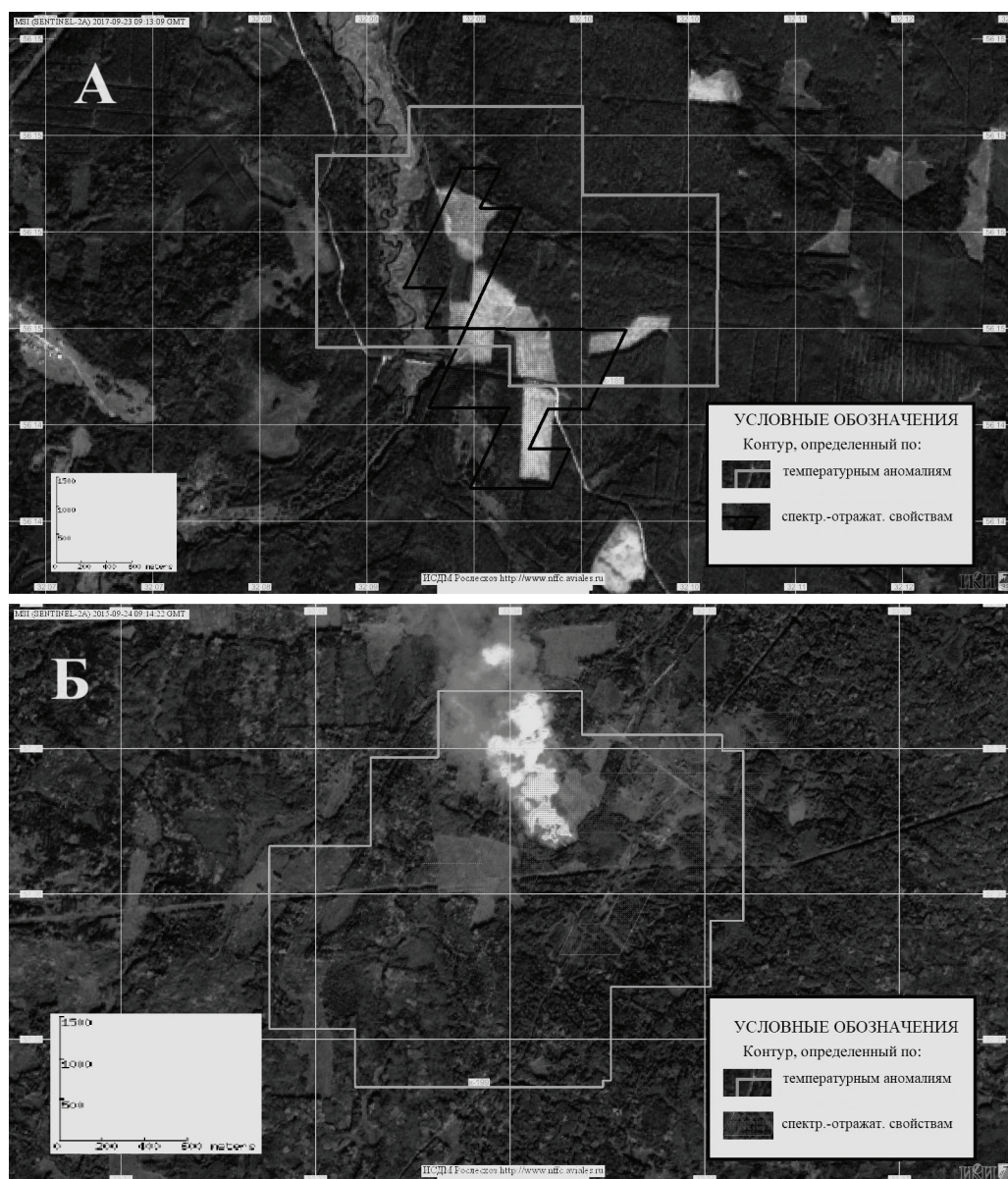


Рис. 2. Детектирование лесных пожаров на местах вырубок: А – Западновинское лесничество, дата детектирования пожара 12.09.2017; Б – Фировское лесничество, дата детектирования пожара 23–24.09.2015

Fig. 2. Detection of forest fires at clearing sites:

A – Zapadnodvinskoye forest district, date of fire detection 12.09.2017; Б – Firovskoye forest district, date of fire detection 23–24.09.2015

Минимальный размер относительной ошибки измерений площади отмечается для участков, выделенных в границах Бежецкого, Западновинского, Тверского и Удомельского лесничеств. Значительная величина погрешности измерений (более 100%) отмечается для участков, выделенных в границах Кашинского, Краснохолмского, Осташковского лесничеств (рис. 3). Однако на территории Удомельского лесничества 100% контуров имеют площадь до 300 га (в данной группе 61% контуров имеет погрешность 100% и более), а на территории Кашинского лесничества есть пожары со значительной площадью.

Взаимосвязь точности определения границ поврежденных огнем территорий от породного состава произрастающих на них деревьев не выявлена (табл.).

В лесничествах, на территории которых абсолютно преобладают мягколиственные породы деревьев, относительная ошибка измерений составляет от 37 до 74%. Территории, на которых произрастают деревья с высокой долей (от 4,3 до 4,8 единиц) в породном составе хвойных насаждений, – от 20 до 358%.

Поскольку характер повреждений лесных территорий зависит от вида пожара и его интенсивности, достоверность дистанционной определяемости границ площадей и автоматическими, и экспертными

методами имеет вариабельность. В связи с чем гипотетически пожары высокой интенсивности, действовавшие на небольших площадях вне зависимости от их видов, в значительной мере повреждают лесные территории и, как следствие, достаточно точно детектируются. Пожары низкой интенсивности, действовавшие на значительных площадях, несущественно повреждают лесные территории и, как следствие,

провоцируют возникновение затруднений в определении их контуров. Вполне вероятно, что выявленные пространственные вариации ошибок измерений пройденных огнем площадей размером менее 900 га в значительной степени зависят от вида и интенсивности действовавших на данных территориях пожаров, что требует натурных исследований, которые не предусматриваются данной работой.

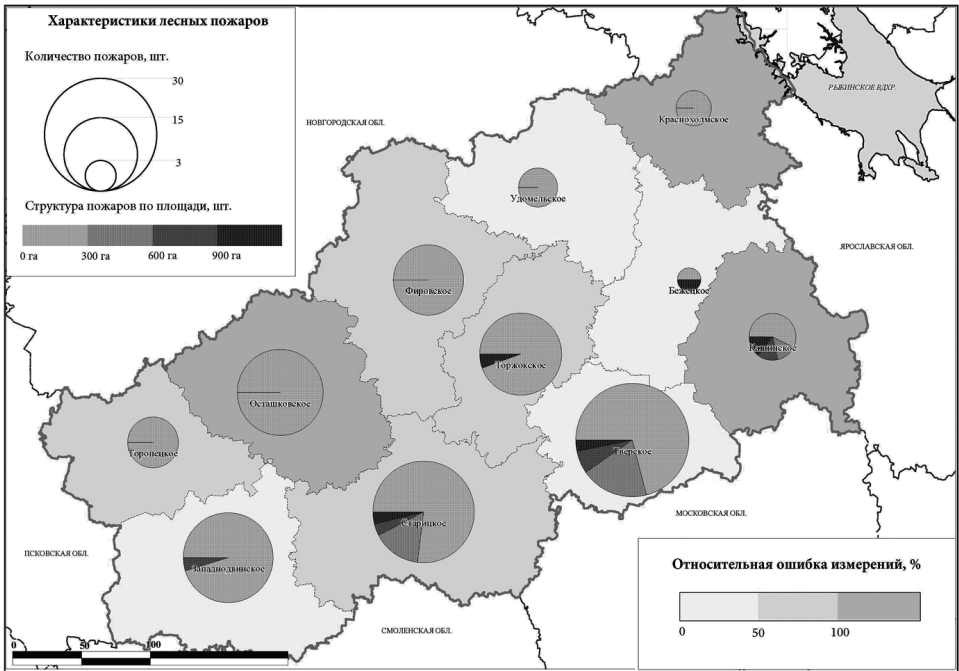


Рис. 3. Территориальная дифференциация погрешности измерений

Fig. 3. Territorial differentiation of measurement error

Таблица

Зависимость ошибки измерений от породного состава древостоев

Лесничество	Относительная ошибка измерений, %	Средний породный состав древостоев [Лесохозяйственные..., 2023]
Бежецкое	47	3.4Б2.2С1.7Ос1.5Е0.9Олс0.3Олч
Западнодвинское	37	3.3Б1.9Ос1.8Е1.8С0.6Олс0.6Олч
Кашинское	161	3Б3С1.8Е1.5Ос0.5Олс0.2Олч
Краснохолмское	274	3.2Е2.9Б1.6С1.4Ос0.8Олс0.1Олч
Осташковское	358	3.2Б2.8Е1.9С1.4Ос0.6Олс0.1Олч
Старицкое	51	3.8Б2.4Ос2Е1.3Олс0.5С
Тверское	21	3.4Б3.1С1.5Е1.3Ос0.4Олс0.3Олч
Торжокское	58	3.4Б2.2Е1.9Ос1.3С1.2Олс
Торопецкое	74	3.3Б2.7Е1.6Ос1.4С0.7Олс0.3Олч
Удомельское	20	3.3Б2.3С2Е1.6Ос0.6Олс0.2Олч
Фировское	64	3.1Б2.6Е2.3С1.4Ос0.5Олс0.1Олч
Итого		3.2Б2.1Е1.9С1.9Ос0.7Олс0.2Олч

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показали, что погрешность определения площадей, пройденных огнем, на основе данных ИСДМ-Рослесхоз для территории Тверской области в целом выше значений, определенных в отношении всей территории России (рис. 4). Аналогично установленным для всей России показателям, для Тверской области погрешность измерений относительно небольших по площади территорий значительна. Погрешность измерения покрытой лесом площади имеет незначительное уменьшение по мере возрастания площади участков, в то время как общая площадь имеет заметные вариации (до 100%) и достигает значения 20% при площади детектирования более 1000 га.

Исследование показало, что в регионе относительная средняя ошибка измерений общей площади лесных пожаров размером >100 га выше, чем значение погрешности по всей территории России, на 65%, а лесной – на 20%. Для площади пожара раз-

мером 1000 га и более – на 10%, а для покрытой лесом территорий – на 40%.

Ввиду того что фактически значительная часть детектируемых случаев не является лесными пожарами, а подавляющее большинство случаев имеет большую неточность измерений в силу их площадей (средняя расчетная площадь одного пожара на участках, подтвержденных снимками высокого пространственного разрешения, по данным MODIS составляет 295 га), использование показателей пройденных огнем площадей, детектируемых по алгоритму изменений спектрально-отражательных свойств поверхности на основе данных прибора MODIS не позволяют достоверно оценивать в регионе масштабы повреждений растительности пожарами за пожароопасный сезон. Для пожаров, площадь которых значительна (более 900 га), применение результатов космического мониторинга допустимо с учетом использования показателя вероятной относительной средней ошибки.

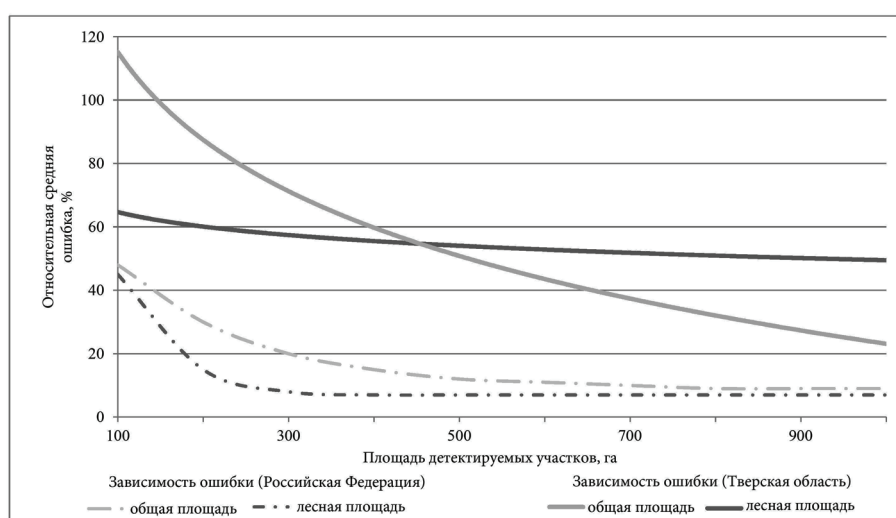


Рис. 4. Зависимость относительной средней ошибки оценки площади поврежденных пожарами участков от их размеров, по данным MODIS [Руководство..., 2014]

Fig. 4. Dependence of the relative average error in estimating the area of fire-damaged localities according to MODIS data on their size [Rukovodstvo..., 2014]

Благодарность. Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды», темы государственного задания кафедры рационального природопользования «Устойчивое развитие территориальных систем природопользования», государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0009 № 1023032700199-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 Landsat-

TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–26.
Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозиро-

- вания пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193.
- Богданов А.П., Алешико Р.А. Разработка методики мониторинга состояния лесов на основе использования данных мультиспектральной космосъемки, ПЭММЭ. 2017. Т. XXVIII. № 1. С. 98–110. DOI: 10.21513/0207-2564-2017-1-98-110.
- Вик К.В., Друки А.А., Григорьев Д.С., Спицын В.Г. Применение нейронных сетей глубокого обучения для решения задачи сегментации лесных пожаров на спутниковых снимках // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 55. С. 18–25. DOI: 10.17223/19988605/55/3.
- Руководство пользователя информационной системы дистанционного мониторинга ИСДМ-Рослесхоз для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации. Пушкино, 2014. 399 с.
- Шихов А.Н., Зарунов А.С. Многолетняя динамика потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 114–128. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128. URL: <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=1926>.
- Arino O., Plummer S., Defrenne D. Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas, *Proceedings of the MERAS-AATSR Symposium*, ESA publication, 2005, p. 597.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, no. 6, p. 1397–1404, DOI: 10.1080/01431160600840978.
- Fraser R.H., Li Z., Cihlar J. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest, *Remote Sens. Environ.*, 2000, vol. 74, p. 362–376.
- Giglio L., Descloitres J., Justice Ch.O. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 87, p. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
- Gregoire J.M., Tansey K., Silva J.M.N. The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 2003, vol. 24, p. 1369.
- Li Z., Kaufman Y.J., Ichoku C. et al. A review of AVHRR-based fire active fire detection algorithm: Principles, limitations, and recommendations, *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space, Planning and Coordinated International Effort*, 2001, p. 199–225.
- Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The Collection 5 MODIS Burned Area Product – Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112, p. 3690, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S. et al. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sens. Environ.*, 2005, vol. 94, p. 428, DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.
- Электронный ресурс
Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения 13.02.2023).
Лесохозяйственные регламенты лесничеств Тверской области. URL: <https://les.tver.ru/np-baza/np-dokumenty/lesnoy-plan-i-reglamenty/> (дата обращения 05.06.2023).

Поступила в редакцию 10.05.2023

После доработки 15.09.2023

Принята к публикации 06.10.2023

ASSESSMENT OF PYROGENIC IMPACT ON FOREST AREAS IN THE TVER REGION

S.N. Zharinov¹, E.I. Golubeva², M.V. Zimin³

¹ SCANEX, Forest Project Department

^{2,3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Department of cartography and remote sensing of the Earth

¹ Head; e-mail: snzharinov@mail.ru

² Department of Environmental Management, Prof., Dr.Sc. in Biology; e-mail: egolubeva@gmail.com

³ Laboratory of Aerospace Methods, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ziminmv@mail.ru

We consider the potential and limitations of widely accepted remote sensing algorithms for detecting forest areas damaged by fires, which allow the monitoring systems to automatically form data about the fire areas and the areas where death of tree stands is subsequently recorded. The resulting size of the detected areas has a measurement error, which is typically determined on the basis of a one-time survey for a large territory and one forest fire season. Depending on the geographical features of the territory, forest fires have specific spatiotemporal and qualitative characteristics, and are accompanied by specific heterogeneous damage to forests, which affect the accuracy of remote detection of a burnt area or fire-damaged forest. Hence the use of the unified

large-area error estimate for local-level surveys could lead to inaccurate results. The analysis of space images of forest fund lands in the Tver region for the period 2007–2022 demonstrated the need to establish regional values of the measurement error for fire-impacted areas. By comparing the medium spatial resolution data with the data of high spatial resolution we identify a regional bias, which is significant given the relatively small size of the detected areas. The study demonstrates the expediency of establishing regional error values for measurements of pyrogenic impact on forest areas. By implementing the suggested changes we could improve the accuracy of remotely-sensed estimates of fire-impacted areas and the amount of associated damage to forests.

Keywords: remote sensing, space images, forest fires, measurement error

Acknowledgements. The study was performed according to the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the Lomonosov Moscow State University “Future of the Planet and Global Environmental Change” and topics of the state assignment of the Department of Environmental Management “Sustainable development of territorial nature management systems”, the state assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0009 no. 1023032700199-9.

REFERENCES

- Arino O., Plummer S., Defrenne D. Fire Disturbance: The ten years time series of the ATSR World Fire Atlas, *Proceedings of the MERAS-AATSR Symposium*, ESA publication, 2005, p. 597.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Styitsenko F.V., Flitman E.V. Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyh dannyh p[azlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS Landsat-TM/ETM+ [Integrated burnt area assessment based on combined use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 2, p. 9–26. (In Russian)
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, no. 6, p. 1397–1404, DOI: 10.1080/01431160600840978.
- Bartalev S.A., Styitsenko F.V., Hvostikov S.A., Lupyan E.A. Metodologiya monitoring i prognozirovaniya pyrogennoj gibeli lesov na osnove dannyh sputnikovyh nablyudenij [Methodology for monitoring and forecasting pyrogenic forest loss based on satellite observations], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 6, p. 176–193, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193. (In Russian)
- Bogdanov A.P., Aleshko P.A. Development of methodology for forest monitoring based on use of data of multispectral space imagery, *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2017, vol. XXVIII, no. 1, p. 98–110, DOI: 10.21513/0207-2564-2017-1-98-110.
- Fraser R.H., Li Z., Cihlar J. Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest, *Remote Sens. Environ.*, 2000, vol. 74, p. 362–376.
- Giglio L., Descloitres J., Justice Ch.O. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 87, p. 273–282, DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
- Gregoire J.M., Tansey K., Silva J.M.N. The GBA2000 initiative: developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 2003, vol. 24, p. 1369.
- Li Z., Kaufman Y.J., Ichoku C. et al. A review of AVHRR-based fire active fire detection algorithm: Principles, limitations, and recommendations, *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space, Planning and Coordinated International Effort*, 2001, p. 199–225.
- Roy D.P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The Collection 5 MODIS Burned Area Product – Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product, *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112, p. 3690, DOI: 10.1016/j.rse.2008.05.013.
- Rukovodstvo polzovatelya informatsionnoj sistemy distantsionnogo monitoring ISDM-Rosleshoz dlya opredeleniya pozharnoj opasnosti v lesah Rossijskoj Federatsii* [User’s Guide for the remote monitoring information system ISDM-Rosleskhov for determining fire danger in the forests of the Russian Federation], Pushkino, 2014, 399 p. (In Russian)
- Shihov A.N., Zaripov A.S. Mnogoletnyaya dinamika poter’ lesov ot pozharov i vetrovalov na severo-vostoke Evropejskoj Rossii po sputnikovym dannym [Long-term dynamics of forest losses from fires and windfalls in the north-east of European Russia according to satellite data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2018, vol. 15, no. 7, p. 114–128, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-114-128. (In Russian)
- Sukhinin A.I., French N.H.F., Kasischke E.S. et al. Satellite-based Mapping of Fires in Russia: New Products for Fire Management and Carbon Cycle Studies, *Remote Sens. Environ.*, 2005, vol. 94, p. 428, DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.011.
- Vik K.V., Druki A.A., Grigoriev D.S., Spicyn V.G. Application of deep learning neural networks to solve the problem of segmentation of forest fires on satellite images, *Vestnik Tomskogo gos. Un-ta, Upravlenie, vychislitel’naya tekhnika i informatika*, 2021, no. 55, p. 18–25, DOI: 10.17223/19988605/55/3. (In Russian)

Web sources

- Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoring Federalnogo agentstva lesnogo hozyajstva [Information system for remote monitoring of the Federal Forestry Agency] (ISDM-Rosleskhov), URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (access date 13.02.2023). (In Russian)
- Lesohozyajstvennye reglamenty lesnichestv Tverskoj oblasti [Forestry regulations of forest districts of the Tver region], URL: <https://les.tver.ru/np-baza/np-dokumenty/lesnoy-plan-i-reglamenty/> (access date 05.06.2023). (In Russian)

Received 10.05.2023

Revised 15.09.2023

Accepted 06.10.2023