

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального исследовательского центра
«Красноярский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН),
член-корреспондент РАН

Шпедт А.А.

« 23 » декабря 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

(Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»)

на диссертационную работу Лозина Дмитрия Владиславовича на тему **«Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»

Основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Лозина Дмитрия Владиславовича на тему «Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов» состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и Приложения. Полный объем диссертации составляет 160 страниц, включая 53 рисунка. Список литературы содержит 114 наименований.

Диссертация Д.В. Лозина посвящена разработке и созданию новых методов и алгоритмов обработки спутниковых данных для оперативного мониторинга лесных пожаров и оценки их последствий. Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения оперативных и точных оценок повреждения лесного покрова дистанционными средствами и развитие системы управления природными ресурсами, что особенно важно для обширных и труднодоступных территорий России. Научная новизна заключается в том, что впервые на основе массового автоматизированного сравнения многолетних (2006–2021 гг.) рядов спутниковых данных об интенсивности горения и постпожарных повреждений для более 380 тысяч пожаров получены статистически обоснованные зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности горения с учётом типа леса и условий наблюдения. На основе этих зависимостей разработан новый вероятностный метод и алгоритм для автоматической оперативной оценки гибели лесной растительности. Кроме того, предложен универсальный подход к адаптации алгоритма детектирования активного горения (на базе MOD14) для работы с дан-

ными различных спутниковых систем, включая российские аппараты серии «Метеор-М». Работа вносит значительный вклад в развитие системы комплексного мониторинга природных пожаров в стране, а также совершенствует методы обработки спутниковой информации, в том числе данных российских спутниковых систем. Практическая значимость подтверждена внедрением результатов в действующие системы мониторинга, такие как информационные системы «Углерод-Э» и «ИСДМ-Рослесхоз», что способствует расширению возможностей национальных систем дистанционного наблюдения.

Введение содержит обоснование актуальности исследуемой проблемы и анализ степени ее изученности, формулировки цели и задач, научной новизны и значимости работы. В нем также изложены основные полученные результаты и положения, выносимые на защиту, охарактеризованы использованные методы исследования и апробация полученных результатов. Приведены сведения о структуре, объеме и кратком содержании диссертации, ее соответствии паспорту специальности, а также информация о практическом внедрении разработок.

В **Первой главе «СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ»** проведён всесторонний анализ современного состояния спутникового мониторинга лесных пожаров, на основе которого сформулированы ключевые научно-технические проблемы. Во-первых, несмотря на признанную перспективность использования данных об интенсивности горения (FRP) для оценки послепожарной нарушенности растительных покровов, существующие работы, как правило, опираются на ограниченные локальные выборки и не предполагают статистически обоснованных, универсальных зависимостей между FRP и степенью повреждения древостоев, учитывающих разнообразие типов лесного покрова и сезонных условий. Во-вторых, отсутствует целостная автоматизированная методология для оперативного получения таких оценок на больших территориях. В-третьих, с приближением завершения миссий спутников TERRA/AQUA и прекращением выполнения съёмки аппаратурой MODIS остро встаёт задача адаптации алгоритмов детектирования и анализа к исходным материалам альтернативных спутниковых систем. Особое практическое значение имеет разработка работоспособного комплекса решения задачи мониторинга пожаров на основе данных российского прибора МСУ-МР, что необходимо для обеспечения технологической независимости национальной системы мониторинга.

Во **Второй главе «МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК ПЛОЩАДЕЙ ВОЗМОЖНОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА MODIS»** представлены результаты разработки и валидации метода оперативной оценки повреждений лесов, основанного на анализе связи между интенсивностью горения и вероятностью гибели древостоя. В основе метода лежит сопоставление значительных массивов данных за 2006–2021 годы, а именно, максимальных значе-

ний удельной мощности излучения (FRPS) с пиксельных карт MODIS и ретроспективных данных о категориях состояния леса (СКС). Полученные вероятностные зависимости «интенсивность–повреждение» были дифференцированы по двум ключевым факторам: сезону, в течение которого развивается пожар (весенний/летний) и преобладающему типу растительного покрова. На этой основе предложен метод расчёта ожидаемой площади погибших лесов, учитывающий вероятностный характер этой связи и степень лесистости территории. Разработанный метод был реализован в виде полностью автоматизированного алгоритма, который ежедневно формирует актуальные карты максимального FRPS и прогнозируемых повреждений, а также выполняет оценку площади погибших древостоев. Сравнение результатов с независимыми ретроспективными оценками, полученными по снимкам до и после пожаров, подтвердило высокую точность и практическую применимость подхода для оперативного мониторинга последствий лесных пожаров.

Третья глава «АДАПТАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИБОРА MODIS К РАБОТЕ С ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ» посвящена адаптации разработанных методов и алгоритмов для работы с использованием исходных данных различных (альтернативных) спутниковых систем, что является ключевой задачей для обеспечения технологической универсальности и независимости системы противопожарного спутникового мониторинга в нашей стране. В главе продемонстрирована успешная адаптация комплекса методов для работы с разнородными спутниковыми данными. Разработан универсальный метод калибровки алгоритма MOD14, позволивший впервые создать высококачественный пожарный продукт на основе данных отечественных спутников «Метеор-М» и улучшить настройки стандартного алгоритма, применительно к данным зарубежных систем SLSTR и MERSI-II. Адаптация метода оценки послепожарной нарушенности лесов для материалов VIIRS с учётом суточного цикла съёмки обеспечила его корректное применение в заявленных целях. Полученные результаты формируют основу для перевода систем оперативного мониторинга на использование данных многоспутниковой группировки.

Разработанный формальный подход к адаптации решает не только узкую задачу переноса алгоритмов, но и обеспечивает сопоставимость и высокое качество пожарных продуктов, получаемых от разнородной спутниковой группировки. Это создает основу для построения устойчивых, технологически независимых и научно обоснованных систем оперативного мониторинга, способных работать как на международных, так и на отечественных спутниковых данных.

В Четвертой главе «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ» представлены результаты, основанные на практическом применении разработанных методов автоматизированной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Во-первых, на основе глобальных данных MODIS за 2002–2021 годы впервые получены сопоставимые оценки межгодовой динамики гибели лесов в циркумполярной зоне (севернее 60° с.ш. и за Полярным кругом), что выявило рост числа пожаров и площадей погибших лесов в России во втором десятилетии при отсутствии значимых трендов для США, Канады и Северной Европы. Во-вторых, углубленный анализ для территории России (2001–2024 гг.) на основе созданной базы данных (БД FRPSD) показал более чем двукратный рост летальности пожаров (доли погибшей растительности) при стабильной общей пройденной огнем площади, причем этот рост в основном обусловлен отпадом после пожаров в хвойно-лиственных лесах и увеличением доли площадей с наибольшей степенью повреждений, а также выявлена резкая сезонная динамика – летальность летних пожаров (пик в июле) может в шесть раз превышать весеннюю, а на три летних месяца приходится свыше 80% площадей сильных повреждений. В-третьих, реализована и введена в эксплуатацию полная технологическая цепочка оперативной обработки данных российской спутниковой системы (МСУ-МР), что позволило адаптированной системе мониторинга пожаров на территории РФ представить достоверную информацию о пожарах, что подтверждается сопоставимостью интегральных оценок пройденных огнем площадей с данными MODIS за 2024 г.

В **Заключении** приводятся выводы и перечисляются основные результаты, полученные в диссертации.

Актуальность выполненной работы обусловлена возрастающей глобальной значимостью оценки последствий лесных пожаров как для мониторинга климатических изменений, так и для контроля за состоянием существующих экосистем, а также практическими потребностями в создании независимых технологий мониторинга и развитии методов тематической обработки данных спутниковой съёмки Земли. Спутниковые наблюдения являются основным источником информации о пожарах на обширных территориях, однако существующие методы оценки послепожарной нарушенности лесов и отпада древостоев обладают критическими недостатками. Подходы на основе анализа снимков «до» и «после» пожаров дают точные, но сильно запаздывающие результаты, в то время как методы, использующие оперативные данные об интенсивности горения, до сих пор не имели надёжной статистической базы для перехода к количественным оценкам гибели древостоя. Особенно остро стоит задача учёта разнообразия природных условий, типов лесов и сезонной приуроченности тяжести последствий от пожаров, что необходимо для точного прогнозирования выбросов углерода или оценок экологического ущерба.

Следует также отметить острую необходимость в технологической адаптации методов мониторинга под современные спутниковые данные, включая российские аппараты и их приборное обеспечение. Это критически важно для независимости национальных систем наблюдения, поскольку большинство действующих сервисов исторически оперируют данными иностранных спутниковых платформ. В текущих условиях создание универсальных методов для перевода

систем (например, «ИСДМ-Рослесхоз») на отечественную информацию становится стратегическим приоритетом. Таким образом, исследование решает две ключевые задачи: разработку новых алгоритмов оценки гибели лесов от пожаров и обеспечение их работы на многоспутниковых данных, отвечая на острые научные и государственные вызовы.

Наиболее важные и новые результаты. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей в журналах, рекомендованных ВАК, 7 из которых – в журнале «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (1-й уровень «Белого списка»). Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы.

Основные **новые результаты** работы, представленные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Был разработан новый вероятностный метод оценки гибели лесов от пожаров, ключевой основой которого стало массовое сопоставление данных дистанционного зондирования: оперативных показателей интенсивности горения (FRP) и последующих результатов ранжирования постпожарных повреждений. На уникальном для России материале – анализе свыше 380 тысяч пожаров за период с 2006 по 2021 год – впервые получены статистически достоверные вероятностные зависимости между измеряемой спутниковыми средствами мощностью теплоизлучения пожара и гибелью древостоев. Основная новизна метода заключается в том, что эти зависимости дифференцированы по двум критически важным факторам: типу лесной растительности (группам доминирующих древостоев) и периодам возникновения пожара. Такой подход позволяет отказаться от усреднённых оценок и перейти к значительно более точному, обусловленному конкретными условиями, прогнозированию нарушения лесов пожарами.
2. Был разработан и внедрен в практику мониторинга адаптированный алгоритм, который в полностью автоматическом режиме и с периодичностью в одни сутки осуществляет оперативную оценку пожарного воздействия на лесные экосистемы с выявлением потенциальных площадей отпада древостоев. Его ядро, основанное на выявленных вероятностных закономерностях, позволяет генерировать как карты максимальной интенсивности горения (maxFRPS) в ходе пожара, так и прогнозные карты будущих повреждений растительности. Ключевая новизна решения заключается в переходе от ретроспективного анализа снимков «до и после» пожара, требующего месяцев для получения итогов, к динамическому мониторингу и оценке ущерба в процессе развития пожарной ситуации, то есть в режиме, близком к реальному времени. Данный алгоритм уже интегрирован в функционирующую государственную информационную систему (ИАС «Углерод-Э»), что подтверждает его практическую значимость и готовность к использованию.

3. Разработан универсальный итеративный метод для адаптации классического алгоритма обнаружения пожаров MOD14 к данным различных спутниковых систем (VIIRS, MERSI-II, SLSTR, российский МСУ-МР). Его ключевая новизна заключается в автоматическом сопоставлении выходных продуктов и итеративной подстройке пороговых параметров для минимизации ошибок детектирования. Важнейшим практическим результатом стала первая в стране генерация глобального продукта по пожарам на основе данных российского прибора МСУ-МР со спутников «Метеор-М», что создает фундамент для перевода национальных систем мониторинга на отечественную спутниковую информацию.

Научное значение полученных в диссертации результатов. Научная значимость работы подтверждается её двусторонним вкладом: в развитие теоретических основ (через выявление количественных зависимостей при моделировании последствий пожаров) и в решение практических задач. Разработанные автором методы, алгоритмы и программный продукт уже внедрены в системы мониторинга, используемые в России.

Практическое значение полученных результатов работы заключается в создании и внедрении комплекса методов и алгоритмов для оперативной и точной оценки воздействия на растительность лесных пожаров на основе спутниковых данных, которые повышают оперативность, точность и автономность национальной системы мониторинга лесных пожаров и их последствий. Эти решения уже используются в государственных системах мониторинга («Углерод-Э» и «ИСДМ-Рослесхоз»), обеспечивают технологическую независимость за счет адаптации алгоритмов к российским спутникам «Метеор-М» и формируют уникальную базу знаний для управления лесами. Результаты напрямую способствуют решению задач в области охраны лесов, экологической безопасности, климатического мониторинга и обеспечения технологического суверенитета России.

Основные замечания по содержанию диссертации.

1. В разделе 2.2 при оценке повреждений лесного покрова пожарами, использован коэффициент коррекции $K_{forest} = 0,81$ (стр. 57). При этом далее (стр. 72) значение коэффициента – иное: «...применяется линейная коррекция с экспериментально выведенным коэффициентом $K_{forest}=0,859$ ». Метод определения данного коэффициента не вполне ясен. Вызывает вопрос его универсальность для всей территории России и для всех вариантов растительного покрова. Можно ли в качестве альтернативы вместо среднего коэффициента $K_{forest}=0,81$ использовать значение площади, покрытой лесом, в каждом пикселе растра FRPN?
2. Метод оценки пройденной огнём площади (формула 2.2, стр. 64), основанный на эвристическом подходе (выбор максимума из двух функций), требует физического или статистического обоснования. Почему именно такая схема была выбрана?

3. Представленная в разделе 4.1 главы 4 экстраполяция зависимостей между FRPS и вероятностью гибели лесов севера России на всю циркумполярную зону требует аргументации. Чем обоснована возможность переноса моделей в контексте сходства/различий пожарных режимов в бореальных экосистемах Канады, Аляски, Скандинавии и РФ?
4. Некоторые формулировки и положения в тексте диссертации нуждаются в дополнительных пояснениях:
 - Встречаются ссылки на формулы из литературных источников, однако сами формулы не приведены (стр. 20); в разделе 1.3 (стр. 23-26) нет упоминания о продукте Global Forest Change, который отражает потери лесной растительности, в том числе, в результате пожарного воздействия.
 - Учитывалось ли при обработке данных (раздел 2.1, стр. 46) вероятное дублирование пожарных пикселей в соседних сканах на больших ($> \sim 25^\circ$) углах сканирования, что свойственно для данных MODIS?
 - Требуется уточнение, каким образом были установлены оптимальные значения параметров модифицированного алгоритма MOD14 для работы с данными МСУ-МР, представленные в разделе 3.3 (таблица 3.3, стр. 101). Использовался ли ручной итерационный подбор значений или какие-либо статистические методы анализа данных?

Опечатки, ошибки и стилистические неточности в тексте

1. В формуле 1.1 (стр. 15) параметр A_i , вероятно, должен соответствовать не площади i -го компонента (в m^2), а доле площади пикселя (безразмерная величина), иначе единицы измерения не согласуются ($[m^2 * Вт / (m^2 * K^4) * m^2 * K^4]$ не равно [Вт]).
2. При оформлении графического и табличного материала допущены нарушения в форматировании подписей к рисункам (их перенос на следующую страницу), несоблюдение единообразия отступов, непоследовательное использование курсивного начертания в самих подписях. Присутствует некорректная ссылка на «табл. 2» (стр. 95). В подписях к рисункам 3.7 (стр. 86) и 3.8 (стр. 87), скорее всего, содержится ошибка, поскольку данные прибора VIIRS не могли быть получены в 2006 году – его эксплуатация началась позднее. В некоторых результатах, представленных графиками и таблицами, не приводится уровень дисперсии или коэффициенты достоверности (рис. 2.3, табл. 2.1, 2.12, рис. 4.11). На рисунках 2.17, 2.18 уровень корреляции результатов представлен только качественно, количественное описание опущено. В подписи к рисунку 4.15 (стр. 129) присутствует описание трех линий, однако на самом рисунке показаны только две линии.
3. В работе присутствуют стилистические неточности, неупотребляемые в литературе по рассматриваемой теме термины и обороты, неудачные прямые переводы специальных терминов, например: «...процента гибели лесов от площадей, пройденных пожарами» (стр. 4); «деятельность пожара» (стр. 11);

«...пылающего горения», «излучаемого огнём», «тепловые компоненты пожара» (стр. 15); «сухой топливной биомассы» (стр. 17); «огненные шрамы», «вымирание лесной растительности» (стр. 19); «доля пиксела, заполненная биомассой» (стр. 38); «в связи с опустением запасов топлива» (стр. 41) и др.; стр. 111: «Следует отметить, что на данных территориях находится значительное число лесов» – корректнее говорить не о числе, а о площадях лесов и редколесий; стр. 112: «За полярным кругом в этих странах соответственно находится 15, 10, 17 и 58 процентов лесов» – корректно говорить о соотношении площадей лесов по странам.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ и полученных результатов.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация Д.В. Лозина посвящена решению актуальной задачи разработки методов и алгоритмов анализа спутниковых данных о тепловых аномалиях для мониторинга лесных пожаров и оценки ущерба. Основной научный вклад диссертации заключается в разработке принципиально нового вероятностного метода для оперативной оценки гибели лесов от пожаров, основанного на впервые установленных статистических зависимостях между интенсивностью горения (по данным MODIS) и степенью повреждения растительности для различных типов лесов и сезонов, полученных в результате массового сопоставления многолетних рядов спутниковых данных по всей территории России, а также в создании универсального итерационного подхода для успешной адаптации алгоритмов детектирования пожаров к данным различных спутниковых систем, включая российские аппараты «Метеор-М».

Результаты диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемом журнале и имеют на данный момент 79 цитирований, что указывает на научный и практический интерес в профессиональном сообществе.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Лозина Дмитрия Владиславовича на тему «Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия».

Отзыв принят на расширенном заседании объединенного семинара «Космические системы и дистанционное зондирование» Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (Лаборатория космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО

РАН, Институт вычислительного моделирования СО РАН, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Кафедра геоинформационных систем Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета). На заседании семинара присутствовало 35 человек. По результатам представленного доклада и последующего обсуждения участниками семинара была выражена единогласная поддержка представленной диссертационной работы.

Отзыв составлен зав. лабораторией космических систем и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН, зам. директора по научной работе Института вычислительного моделирования СО РАН, к.ф.-м.н., доцентом Якубайликом О.Э., с.н.с. Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, к.т.н., доцентом Пономарёвым Е.И., в.н.с. Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, д.с.-х.н., профессором Ивановым В.А., с.н.с. Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, к.т.н. Швецовым Е.Г.

Зав. Лабораторией космических систем
и технологий ФИЦ КНЦ СО РАН,
Зам. директора по научной работе Института
вычислительного моделирования СО РАН,
кандидат физико-математических наук

Якубайлик О.Э.

Старший научный сотрудник
Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
кандидат технических наук

Пonomарёв Е.И.

Ведущий научный сотрудник
Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
доктор сельскохозяйственных наук

Иванов В.А.

Старший научный сотрудник
Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
кандидат технических наук

Швецов Е.Г.

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Сокращенное наименование: ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50.

Телефон: 8 (391) 290-73-12

Факс: 8 (391) 290-53-78

Адрес электронной почты: fic@ksc.krasn.ru

Сайт: <https://ksc.krasn.ru/>