

На правах рукописи



ЛОЗИН Дмитрий Владиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ
АНОМАЛИЙ И ИХ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСОВ**

Специальность:
1.3.1 – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН)

*Научный
руководитель:* **Лупян Евгений Аркадьевич,**
доктор технических наук, заведующий отделом «Технологий
спутникового мониторинга», Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт космических
исследований Российской академии наук, Москва

*Официальные
оппоненты:* **Алексанин Анатолий Иванович,**
доктор технических наук, заведующий лабораторией
спутникового мониторинга, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов
управления Дальневосточного отделения Российской академии
наук, Владивосток

Мурынин Александр Борисович,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр «Информатика и
управление» Российской академии наук, Москва

*Ведущая
организация:* Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский
научный центр Сибирского отделения Российской академии
наук», Красноярск

Защита диссертации состоится **«11» февраля 2026 года в 14 ч 00 мин** на
заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.1.481.02
на базе ИКИ РАН по адресу:
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, подъезд А3 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте
<http://iki.rssi.ru/diss/index.htm>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН,
ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.02.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.481.02
кандидат технических наук

С.В. Воронков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Космические наблюдения в настоящее время являются одним из важных средств исследования различных процессов, происходящих на Земле. Значимым направлением таких исследований является изучение природных пожаров, в том числе осуществление их долговременного мониторинга. Данное направление активно развивалось на протяжении последних десятилетий. Существует множество работ (L. Giglio, C.O. Justice, M.J. Wooster, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, Е.И. Пономарев и др.), в которых были созданы различные методы и алгоритмы обработки спутниковых данных, позволяющие осуществлять мониторинг природных пожаров и проводить оценку их различных характеристик. Одной из значимых задач исследований природных пожаров стала оценка повреждений пожарами растительного покрова. Важность решения данной задачи связана, в том числе, с необходимостью проведения оценок выбросов климатически активных газов, объем которых напрямую связан со степенью повреждения растительного (в первую очередь лесного) покрова. Следует отметить, что для получения таких оценок по большим территориям (включая труднодоступные) сегодня фактически единственным источником однородной информации представляются данные космических наблюдений. При этом для получения информации на их основе требуются специальные методы и алгоритмы обработки данных. Построению таких методов посвящено достаточно много работ (P. Morgan, K.C. Ryan, H. Heward, Ф.В. Стыценко, С.А. Барталев, Е.И. Пономарев). Работы в данном направлении можно условно разделить на два вида: 1) оценка повреждений на основе анализа наблюдений до и после действия пожаров; 2) оценка на основе анализа интенсивности горения. Первое направление позволяет получить достаточно точные оценки повреждений, однако эта информация может быть получена только через некоторый период после завершения пожаров (иногда через несколько месяцев). Также при проведении таких оценок могут возникать сложности, связанные с достаточно быстрым зарастанием отдельных гарей растительностью. Второе направление может давать оперативные оценки повреждений сразу после завершения периода действия конкретного пожара. Основная задача при построении подобных оценок — установление связи между определяемой на основе спутниковых наблюдений интенсивности горения и степенью повреждения растительного покрова. До настоящего времени для

построения данных зависимостей использовались довольно ограниченные ряды данных наблюдений, для которых имелась как информация об интенсивности горения, так и информация о повреждениях лесов. Также подобные работы сосредотачивались на анализе данных по достаточно ограниченным территориям. Все это в конечном итоге затрудняет получение зависимостей повреждений лесов для различных типов пожаров. Различные условия, в которых действуют пожары, как показано во многих работах, могут существенно влиять на связь интенсивности горения с возникающими повреждениями лесов. Поэтому **задачи построения методов и алгоритмов обработки космических данных наблюдения Земли, обеспечивающих оценку и ведение мониторинга последствий действия пожаров на больших территориях в различных типах лесов, являются важными и актуальными.** К таким задачам также относится адаптация методов мониторинга природных пожаров для работы с данными, поступающими от различных спутниковых систем. Эффективное решение поставленных задач требует разработки новых методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений. **Именно этому направлению посвящена представленная диссертационная работа, что и определяет ее актуальность.**

Цель и задачи исследований. Цель проведенных исследований заключается в развитии и создании новых методов и алгоритмов обработки спутниковых данных в интересах исследования и мониторинга лесных пожаров и их последствий.

Данная цель достигается решением следующих задач:

- Проведение анализа текущего состояния методов космического (спутникового) мониторинга пожаров и их последствий с целью выявления актуальных задач, для которых в настоящее время могут быть получены новые решения на основе современных научных и технических возможностей космических наблюдений Земли.
- Разработка методов, позволяющих проводить оценку повреждений лесного покрова пожарами по данным спутниковых измерений интенсивности горения с учетом условий наблюдения и типов лесов, в которых действовали пожары.
- Разработка алгоритма автоматического оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия.
- Разработка метода адаптации алгоритма детектирования пожаров для работы с данными различных спутниковых систем.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые на основе массового сравнения данных космических наблюдений интенсивности горения пожаров и постпожарных повреждений лесов получены статистически обоснованные зависимости вероятности гибели растительности от интенсивности горения для различных условий действия лесных пожаров на территории РФ. Это позволило разработать новый метод оценки гибели лесов от пожаров и создать новый алгоритм обработки данных космических наблюдений для проведения оперативных оценок последствий действия лесных пожаров. Также в работе разработан новый подход к адаптации алгоритмов детектирования активного горения для работы с данными различных космических систем наблюдения Земли.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- **Метод обработки данных космических наблюдений** для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения, разработанный на основе массового автоматизированного сравнения многолетних рядов спутниковых наблюдений интенсивности горения в период действия пожаров и постпожарных повреждений на всей территории России. Метод позволил получить на основе обработки космических наблюдений по территории России за период с 2006 по 2021 г. (более 380 тыс. пожаров) статистически обоснованные зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности горения для различных условий действия лесных пожаров (*соответствует п. 5 паспорта научной специальности*).
- **Метод обработки данных космических наблюдений для полностью автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами** в зависимости от их типа и сезона действия, разработанный на основе зависимостей вероятности гибели лесов от интенсивности горения (*соответствует п. 5 паспорта научной специальности*).
- **Алгоритм автоматизированной оперативной оценки повреждений лесов** для обеспечения космического мониторинга природных пожаров, разработанный на основе метода автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами (*соответствует п. 5 паспорта научной специальности*).
- **Универсальный подход к адаптации алгоритма обработки космических данных для детектирования активного горения по данным прибора MODIS (алгоритм MOD14) для работы с данными различных спутниковых систем**, разработанный на основе анализа многолетних рядов космических наблюдений, полученных различными спутниковыми системами, который позволил, в том числе, реализовать алгоритм детектирования температурных аномалий на основе данных российских спутников серии «Метеор-М» (*соответствует п. 5 паспорта научной специальности*).

Практическая значимость. Разработанные методы и алгоритмы обработки космических данных важны для развития научных и прикладных систем дистанционного мониторинга природных пожаров. При этом следует обратить внимание, что результаты данной работы в части, связанной с оценкой гибели лесов от пожаров, уже сегодня интегрированы и используются в ряде таких систем. Например, в информационно-аналитической системе «Углерод-Э» (<https://start.carbon.geosmis.ru>), развивающейся в интересах создания национальной системы мониторинга климатически активных веществ и в информационной системе мониторинга лесов Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) (https://nffc.aviales.ru/secure/secure_main_pages/index_s.shtml). В рамках последней системы были получены результаты, имеющие особую прикладную значимость. Они связаны с адаптацией алгоритмов детектирования лесных пожаров к работе с данными различных спутниковых систем, в первую очередь, российских. Это позволяет в перспективе перевести работу национальных систем мониторинга пожаров на работу с данными российских космических систем и систем дружественных стран.

Теоретическая значимость. В результате работы удалось создать новые подходы к развитию методов и алгоритмов мониторинга и обработки космических данных. Разработан метод, позволяющий на основе данных космических наблюдений строить зависимости между интенсивностью горения лесных пожаров и постпожарными повреждениями. Полученные зависимости легли в основу разработанного вероятностного метода оценки гибели лесов с учетом условий, в которых действовал пожар. Созданные методы позволили получить принципиально новую информацию о последствиях лесных пожаров и исследовать их долговременную изменчивость в XXI в., включая многолетние ряды гибели лесов от лесных пожаров на территории РФ и в циркумполярной зоне. Анализ сформированного ряда данных о повреждениях лесов в XXI в. на территории РФ позволил выявить значимый многолетний тренд увеличения летальности (процента гибели лесов от площадей, пройденных пожарами).

Методы научного исследования. В основе диссертационной работы лежат методы и технологии обработки и использования космических наблюдений Земли. В работе также использовались методы математической статистики, численные методы и методы работы с базами данных.

Достоверность результатов работы подтверждается результатами верификации разработанных методов и алгоритмов, а также их успешным использованием при решении различных задач в составе научных и прикладных систем дистанционного мониторинга лесных пожаров.

Апробация. Основные положения диссертации и полученные результаты доложены на 14 международных и российских конференциях. Среди них международные конференции: «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2019–2024), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2022, 2023), «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2022), «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, Беларусь, 2023). В 2020 г. автор, представляя первые результаты, которые легли в основу диссертации, стал призером (2-я премия) конкурса молодых учёных Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва). В 2024 г. автор представлял результаты диссертационной работы в финале IX Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов «Наука будущего – наука молодых» (Самара). Также в 2024 г. автор, представив результаты диссертации, стал призером (3-я премия) международного соревнования 10th China Graduate Future Flight Innovation Competition of the “YOP-HPC Supercomputing Cup” (Шеньчжень, Китай).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 11 статьях (в том числе 8 статьях в рецензируемых изданиях, включённых в перечень ВАК) и в 20 тезисах докладов в материалах международных и всероссийских конференций. Получено 1 свидетельство о регистрации программы.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы при выполнении проектов Минобрнауки в рамках тем «Мониторинг»

№ 122042500031-8 и «Эмиссия» № 122101700045-7, также в рамках ИАС «Углерод-Э», ЦКП «ИКИ-Мониторинг», ДЦ и СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета».

Соответствие паспорту специальности 1.3.1. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия» в части п. 5 «Научные приборы и комплексы, экспериментальные методы и алгоритмы мониторинга и обработки данных космических исследований, включая исследования Земли из космоса».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем диссертации составляет 160 страниц, включая 53 рисунка и 16 таблиц. Библиографический список содержит 114 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору современных алгоритмов и методов спутникового мониторинга лесных пожаров.

В первом параграфе представлены характеристики спутниковых систем, применяемых для оперативного мониторинга пожаров, включая задачи детектирования и оценки интенсивности горения.

Во втором параграфе приведено описание физических основ, позволяющих использовать спутниковые данные для количественной оценки интенсивности горения пожаров FRP (*англ.* Fire Radiative Power). Также приведено актуальное состояние существующих работ, использующих измерения FRP. Отмечается, что одним из перспективных направлений исследований является создание методов обработки данных об интенсивности горения пожаров для оценки постпожарных повреждений. На основе анализа представленных материалов сделан вывод, что текущие работы подтверждают возможность достоверного функционирования методов оценки постпожарных повреждений с помощью FRP, однако они основаны на ограниченном объеме рассматриваемых данных и не предлагают полностью автоматических решений. Тем самым для данного направления показана необходимость проведения дальнейших исследований и разработки алгоритма автоматизированной оценки повреждений лесного покрова на основе спутниковых измерений FRP пожаров.

Третий параграф посвящен описанию метода оценки повреждений лесов пожарами с использованием спутниковых данных на основе анализа наблюдений участков леса, пройденных огнем, до и после действия пожаров. Показано, что в настоящий момент данный метод позволил получить обширную информацию о повреждениях лесов пожарами, действовавшими на территории России (информация о более чем 180 тыс. пожаров за период с 2006 по 2021 г.). Отмечено, что данная информация может служить основой для изучения связей и получения зависимостей между FRP и степенью повреждений лесов пожарами.

В четвертом параграфе рассматриваются вопросы, связанные с оценкой площадей, пройденных огнем, на основе анализа данных детектирования активного горения. Показано, что существующий метод дает достаточно хорошие результаты при оценке интегральных площадей, пройденных огнем. В то же время отмечено, что в методе не проводится анализ субпиксельной площади, на которой

происходит реальное горение, поэтому разработка дополнительных методов оценки площадей, пройденных пожарами, может быть актуальна для получения более точных оценок площадей конкретных пожаров.

В пятом параграфе приведены результаты сравнения измерений FRP прибором MODIS и аналогичным прибором VIIRS, отмечена разница в измерениях для интенсивности пожаров бореальной зоны. Также приведено краткое описание особенностей работы алгоритма MOD14 детектирования пожаров по данным приборов MODIS, высокое качество работы которого подтверждено многолетним опытом его эксплуатации. Проведен детальный анализ основных существующих информационных продуктов пожаров, получаемых на основе алгоритма MOD14, и имеющихся у них недостатков. Показано, что качество практически всех из представленных продуктов хуже, чем для продукта по данным MODIS.

Таким образом, проведенный анализ позволил выявить наличие нерешенных в области спутникового мониторинга лесных пожаров проблем. При этом показано наличие научной и информационной основы (накопленной информации) для их решения. Для разрабатываемого в рамках настоящей работы метода оценки по данным активного горения показано, что его основными преимуществами над методом, основанном на анализе наблюдений до и после действия пожаров, являются оперативность получаемых оценок и расширение области покрытия данными. Также отмечена перспективность и востребованность задачи создания универсального подхода к адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными других спутниковых систем, в том числе российских.

Вторая глава посвящена описанию разработанных методов и алгоритмов получения оценок площадей погибших лесов на основе анализа интенсивности горения по данным приборов MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. Как мера интенсивности пожара в работе использовалось FRP, нормированное на площадь элемента наблюдения (FRPS). Как мера оценки повреждения лесного покрова используется СКС (средневзвешенная категория состояния леса). Всего имеется пять категорий от здоровой растительности до полностью погибшей.

В первом параграфе описан предложенный метод, позволяющий строить зависимости повреждения лесного покрова от FRPS. Метод основан на анализе результата сопоставления многолетних рядов данных об интенсивности горения, о повреждениях лесов пожарами, полученными на основе анализа постпожарных изменений лесов, о типах лесного покрова, ежегодно обновляемых по данным MODIS в УНУ «Вега-Science». Главной особенностью метода является приведение всех видов данных к представлению, позволяющему проводить их сопоставление. Для реализации такого сопоставления было предложено для каждого пожара после его завершения осуществлять построение постпожарных карт FRPS (maxFRPS). Каждой точке такой карты приписывается максимальное значение FRPS, зарегистрированное за время действия пожара или за пожароопасный сезон (с учетом того, что информация постпожарных повреждений, которая использовалась для проведения сопоставления, также фактически является интегрированной за весь сезон).

Схема работы предложенного метода представлена на Рисунке 1. Для построения зависимостей в работе использовались данные по всей территории

России за период с 2006 по 2021 г., для которых имелась информация о FRPS (карты maxFRPS) наблюдавшегося горения и степени повреждения лесного покрова (карты СКС, полученные на основе анализа постпожарных изменений лесов). Это позволило провести сопоставление и получить данные по более чем 10 млн участкам (точкам). При этом по каждому участку также анализировалась информация о времени (сезоне), в которое действовал пожар, и о преобладающем типе лесного покрова. Наличие данной информации и представительной статистики позволило получить вероятности гибели лесов (лесов, в которых наблюдается 5-й класс СКС) от интенсивности пожара с учетом группы древесных пород, поврежденных огнем, и времени (сезона) действия пожара.

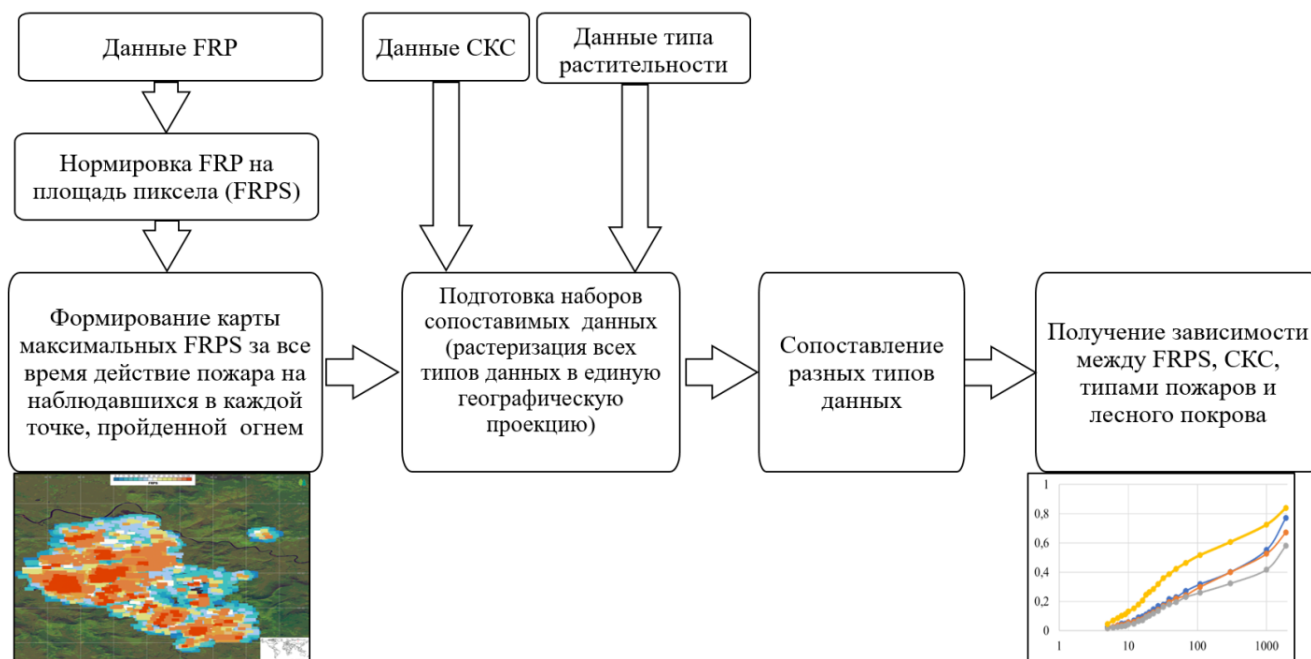


Рисунок 1 — Схема метода обработки данных для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения

Во втором параграфе описан метод оценки площадей погибших лесов на основе зависимости вероятности гибели лесов от FRPS. Метод основан на предположении, что в конкретном пикселе происходит гибель не всего лесного покрова, а только его части в зависимости от значения максимального FRPS, которое наблюдалось в пикселе в течение пожароопасного сезона. Дополнительно проводится линейная коррекция (K_{forest}), которая учитывает, что не вся территория пиксела, полученная по данным прибора MODIS, может быть покрыта лесом. Таким образом, площадь S_{dam} (в га) погибшей растительности в ячейке карты FRPS рассчитывается по формуле:

$$S_{dam} = S_{pix} K_{forest} P_{dam}(FRPS, month, terr_type), \quad (1)$$

где $S_{pix} = 5,9$ га — площадь ячейки карты; $K_{forest} = 0,81$ — коэффициент линейной коррекции; FRPS — максимальная за год интенсивность горения пожаров в ячейке; month — месяц, в который действовал соответствующий пожар; terr_type — группа древесных пород в ячейке; P_{dam} — вероятность гибели лесной растительности в ячейке. Схема работы предложенного метода представлена на Рисунке 2.

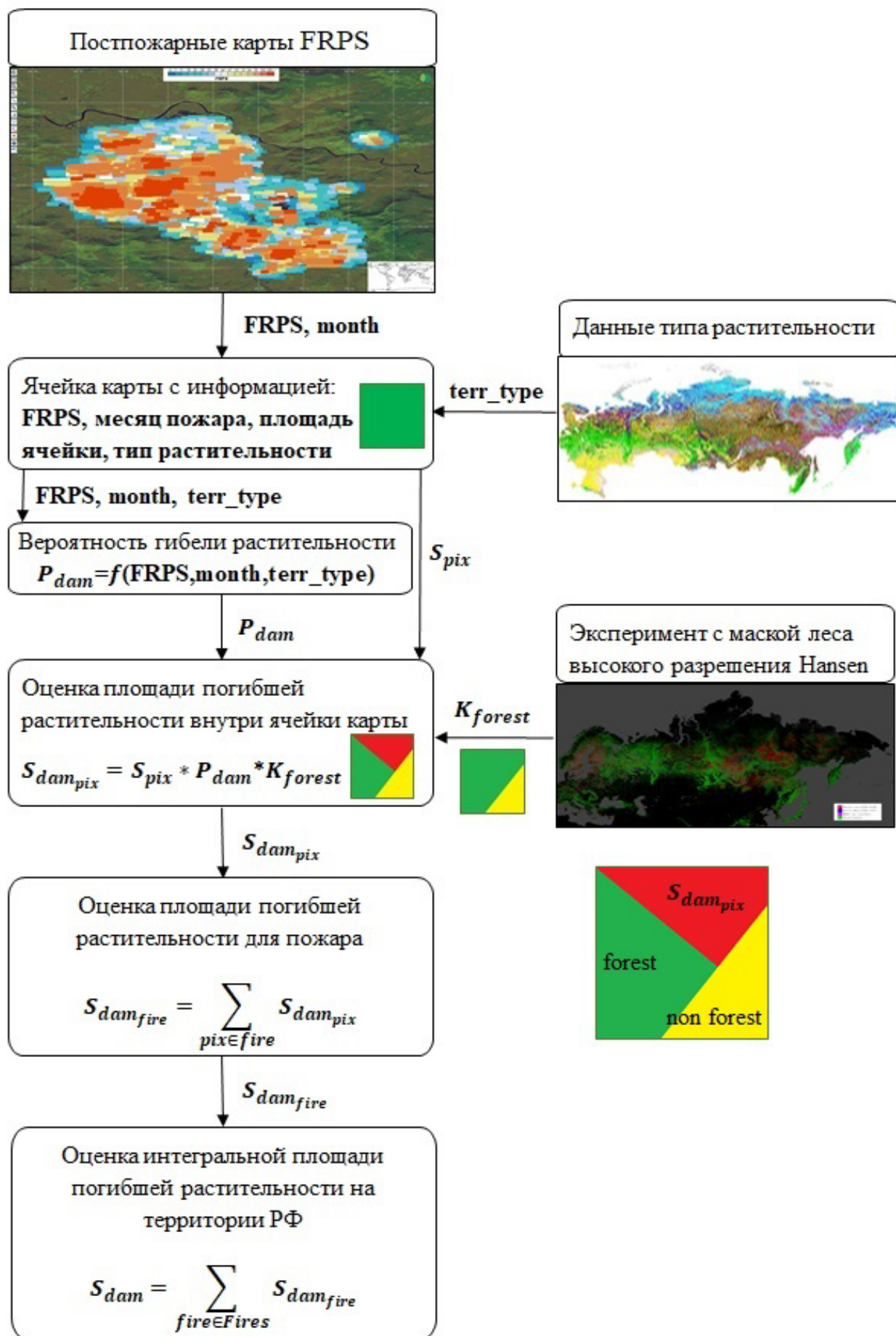


Рисунок 2 — Общая схема метода оценки повреждений
лесного покрова по данным интенсивности горения

В параграфе также приведены оценки площадей погибших от пожаров лесов на территории РФ в период с 2001 по 2024 г. При этом, в частности, показано, что оценки площади погибших лесов (участков, на которых наблюдается 5-й класс СКС), получаемые на основе предложенного метода, достаточно хорошо согласуются с оценками, получаемыми на основе анализа постпожарных изменений лесов (Рисунок 3а).

В третьем параграфе представлено описание метода оценки площадей, проходимых пожарами, на основе анализа наблюдаемой интенсивности горения и числа наблюдений горения отдельных пикселей. Метод построен на основе сравнения информации о наблюдениях горения пожара с площадями, пройденными огнем, полученными по спутниковым данным высокого пространственного разрешения. Для этого были построены две зависимости $f(\text{FRPS})$ и $f(N)$ средней доли площади, проходимой пожаром в пикселе, от значений maxFRPS и числа наблюдений N . Для оценки площади, пройденной огнем в конкретном пикселе, используется следующая схема:

$$S_{\text{pix_fire}} = \max(f(\text{FRPS}), f(N)) S_{\text{pix}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{pix_fire}}$ — площадь, пройденная огнем в пикселе; S_{pix} — площадь пикселя. В параграфе также приведены полученные на основе предложенного метода интегральные оценки площади, пройденной лесными пожарами с 2001 по 2024 г. на территории РФ. Показан уровень совпадения полученных оценок с данными, полученными на основе традиционного метода оценки площадей, пройденных огнем. Описание данного метода представлено в 4-м параграфе 1-й главы настоящей работы (Рисунок 3б).

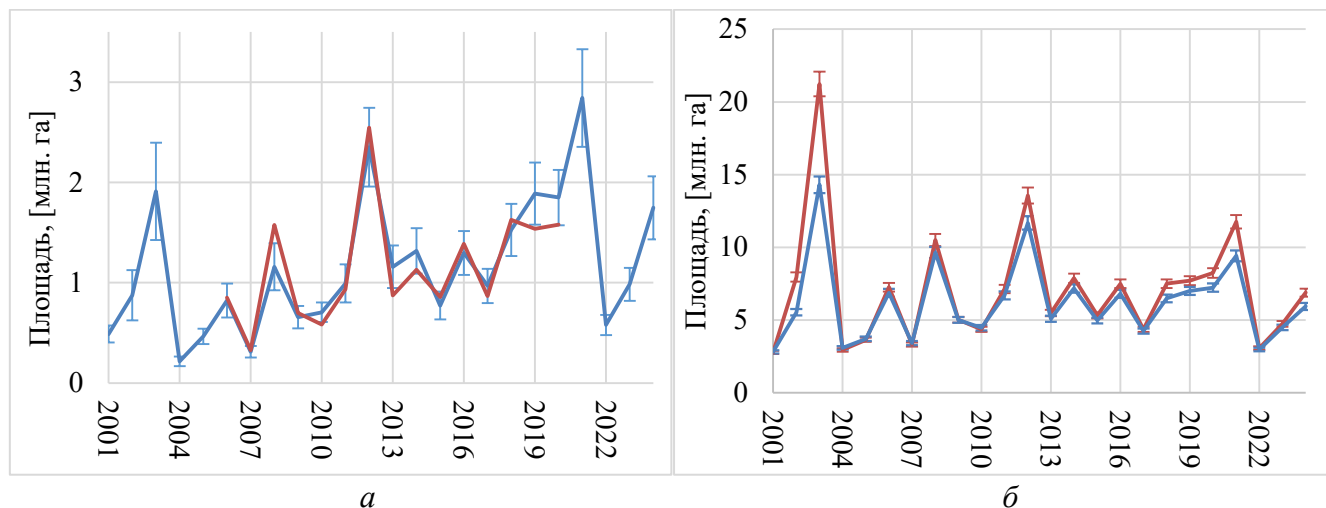


Рисунок 3 — Сопоставление интегральных площадных оценок на территории РФ с 2001 по 2024 г., полученных на основе анализа FRPS (голубой цвет) и существующих методов (красный цвет): *а* — площадь погибших от пожаров лесов (красный график — метод, основанный на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров); *б* — площади, пройденные огнем (красный график — традиционный метод коррекции площадей)

В четвертом параграфе представлено описание алгоритма автоматизированной оперативной оценки повреждений лесов по данным спутниковых наблюдений интенсивности горения. Алгоритм разработан на основе предложенных в работе методов и ориентирован на обеспечение работы систем

дистанционного мониторинга лесных пожаров. Схема предложенного алгоритма представлена на Рисунке 4. Одним из основных достоинств предложенного алгоритма является возможность оперативного получения оценок, которые, в частности, могут использоваться в задачах, требующих принятия решения по организации тушения пожаров. В настоящее время предложенный алгоритм реализован и постоянно работает в рамках ИАС «Углерод-Э».

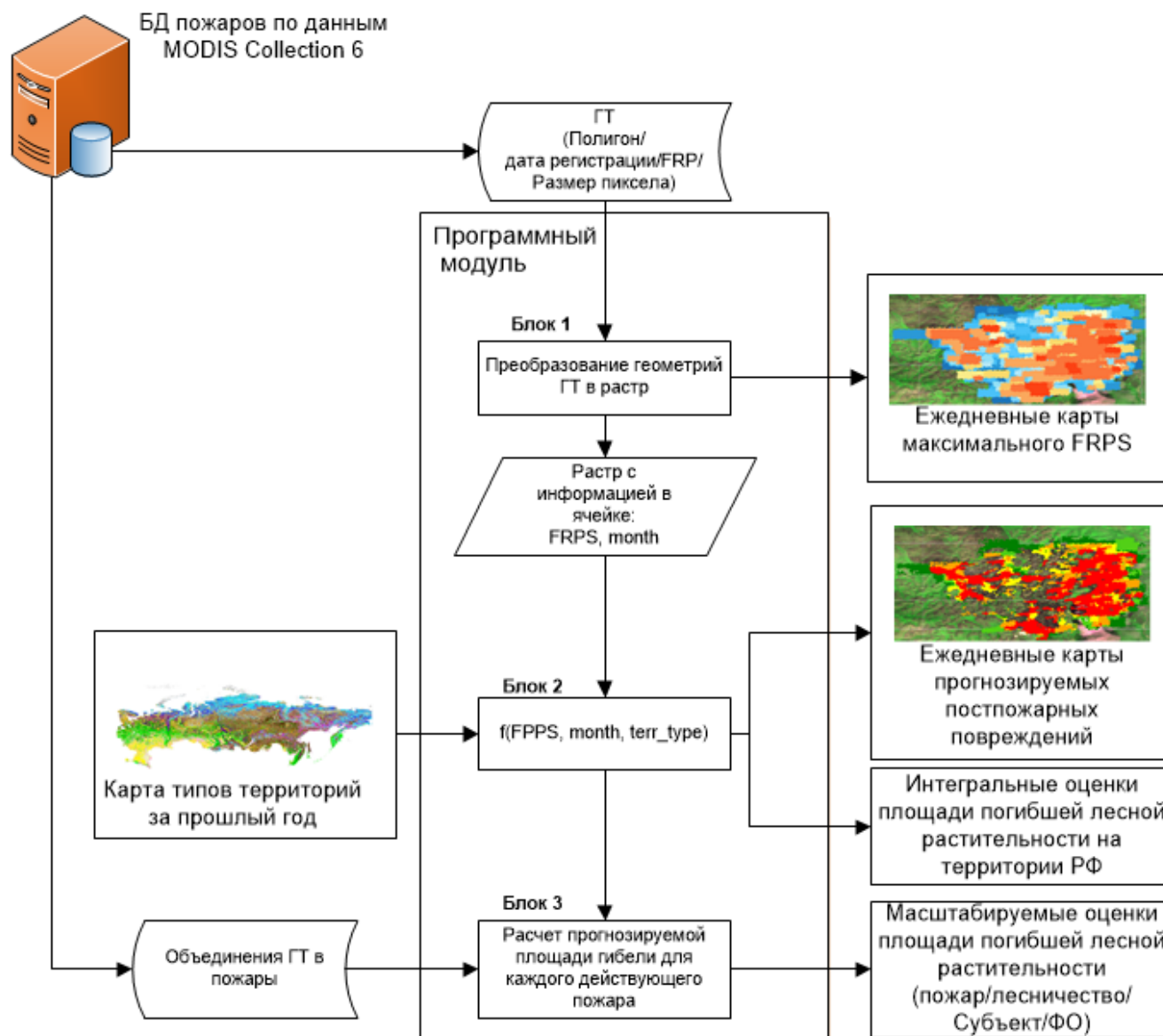


Рисунок 4 — Общая схема алгоритма автоматизированной оценки возможных повреждений лесного покрова на основе данных спутниковых наблюдений интенсивности горения

Алгоритм позволяет в полностью автоматическом режиме формировать следующие информационные продукты:

- а) ежедневно обновляемые карты максимального FRPS на территории Российской Федерации;
- б) ежедневно обновляемые карты прогнозируемых постпожарных повреждений лесной растительности на территории Российской Федерации;
- в) 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;

- г) долговременные (с 2002 г. по наст. время) ряды ежегодных карт максимального FRPS и постпожарных повреждений лесной растительности на территории Российской Федерации.

Данный набор продуктов может быть использован для широкого круга исследовательских и прикладных задач.

Третья глава посвящена адаптации разработанных для мониторинга пожаров методов и алгоритмов обработки данных прибора MODIS к работе с данными приборов различных спутниковых систем.

В первом параграфе описана схема адаптации разработанного метода оценки вероятности гибели лесов для работы с данными VIIRS. Установлено, что для данных VIIRS дополнительно необходимо учитывать время суток (день/ночь), в которое было зарегистрировано соответствующее FRPS. Такая особенность связана с тем, что в отличие от MODIS, съемка прибором VIIRS не ведется в вечернее местное время. Ночью пожары затухают, поэтому значения FRPS для ночных VIIRS значительно ниже дневных. В связи с этим вероятностные кривые гибели от FRPS для данных VIIRS были построены не только для различных сезонов действия пожара и типов лесного покрова, но и для ночных и дневных наблюдений отдельно.

Во втором параграфе представлен метод адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными различных спутниковых систем. В основе метода лежит разработанная схема оценки качества результата детектирования алгоритма, представленная на Рисунке 5. В ней осуществляется сопоставление проверяемого глобального пожарного продукта (Продукт 1) с проверочным глобальным пожарным продуктом (Продукт 2). Горячие точки (ГТ) Продукта 1 принимаются за ожидаемый результат детектирования Продукта 2, в процентах оценивается ошибка ложных детектирований и ошибка пропусков алгоритма. Принцип метода адаптации заключается в итерационном подходе — каждый шаг внешнего цикла соответствует увеличению объема данных, на котором проводится калибровка алгоритма (пожарный месяц, год или потоковая обработка). Общая схема предложенного метода представлена на Рисунке 6. Каждый такой шаг состоит из непосредственной обработки соответствующих данных алгоритмом MOD14 с актуальной версией порогов и проверки получаемых результатов детектирования ГТ. В случае несоответствия результата поставленным критериям выявляются ошибочные случаи, по которым определяется, являются ли они следствием ошибок в самих данных (помехи, ошибочные значения, ошибка привязки данных) или следствием неправильно подобранных порогов. Далее либо происходит уточнение данных (фильтрация помех, синтез каналов изображения, допривязка изображения), либо модифицируются пороги (параметры алгоритма MOD14). В случае модификации порогов происходит повторная обработка данных. При этом в целях экономии времени далее обрабатываются не сами исходные данные (набор каналов сцен вместе с матрицами широт и долгот), а прошлый результат детектирования. При успешном прохождении новым результатом проверки качества, текущая версия порогов становится актуальной и происходит повторная обработка исходных данных. Важной особенностью метода является разбивка

задачи минимизации ошибок на каждом шаге на две последовательные подзадачи — минимизация ЛД (Сопоставление 1) и минимизация пропусков (Сопоставление 2). Оба сопоставления происходят с использованием метода оценки качества.



Рисунок 5 — Схема оценки качества глобальных пожарных продуктов
 (* группы ГТ объединенных по пространству и времени)

Во втором параграфе описано применение разработанного метода адаптации алгоритма для работы с данными прибора MCSU-MP со спутников «Метеор» М2-2/3/4. Результатом стал впервые полученный глобальный пожарный продукт по данным с отечественного прибора, покрывающий территорию РФ с 2022 по 2024 г.

В третьем параграфе представлены результаты применения метода адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными приборов MERSI-II (спутники серии FY) и SLSTR (спутники серии Sentinel-3). Сравнение результатов работы адаптированных алгоритмов со «стандартными» алгоритмами, использующимися для этих данных, представлены в Таблице 1.

Таблица 1 — Оценки ошибок для данных детектирования лесных пожаров за 2024 г. на территории РФ (относительно MODIS Collection 6). Используются следующие параметры сопоставления: $R = 0,01^\circ$, $T = 1$ сут, $T_{long} = 7$ сут

Глобальные пожарные продукты в открытом доступе				Продукты, полученные с использованием метода адаптации		
Название продукта	Прибор	ЛД, %	Пропуски, %	Прибор	ЛД, %	Пропуски, %
MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily)	MERSI-II	7,80	4,80	MERSI-II	4,69	9,93
SL_2_FRP	SLSTR	3,53	5,77	SLSTR	0,59	4,93
VNP14IMG	VIIRS	1,80	2,68	MCY-MP	2,00	0,50

В Четвертой главе приведены примеры использования разработанных методов и алгоритмов для исследования и мониторинга лесных пожаров.

В первом параграфе показано, как применение метода оценки повреждений лесного покрова пожарами по интенсивности горения к данным MODIS, покрывающим территорию северных стран, позволило впервые сравнить межгодовую динамику интегральных оценок площадей погибшей от пожаров растительности для различных глобальных регионов в XXI в. (Таблица 2).

Таблица 2 — Средние значения в анализируемых зонах за 2002–2011, 2012–2021 и 2002–2021 годы (площадь погибшей лесной растительности (в тыс. га)/доля (в %) площади погибших лесов от площади лесов страны в соответствующей зоне/доля (в %) площади погибших лесов от площади пройденных огнем лесов)

Зона/период, годы		Канада	Европа	Россия	США
Зона 60	2002–2011	140/0,16/26,4	6/0,01 /9,2	359/0,01/16,1	196/0,39/26
	2012–2021	196/0,22/24,5	4/0,01/8,8	1211/0,32/22,8	114/0,22/25,7
	2002–2021	168/0,19/25,2	5/0,01/9,0	785/0,2/20,8	155/0,31/25,9
Зона ПК	2002–2011	12/0,12/26,4	2/0,02/13,4	12/0,03/14,9	38/0,56/29,9
	2012–2021	14/0,13/28,5	1 /0,01/ 12,1	101/0,24/25,8	22/0,3/31
	2002–2021	13/0,13/27,5	2/0,01/12,9	56/0,13/24	30/0,43/30,3

Были получены следующие результаты:

- а) в последние десятилетия не наблюдается значимых изменений в числе пожаров в «Зоне 60» (севернее 60° с.ш.). Тем не менее, нельзя не отметить, что в «Зоне ПК» (севернее Полярного круга) в 2019–2020 гг. произошел резкий рост числа пожаров на территории России;
- б) во второе десятилетие анализируемого периода на территории России наблюдается рост гибели лесов от пожаров в анализируемых зонах. Этот рост обусловлен аномальными пожарами 2020 и 2021 гг.;

- в) в исследуемый период на территории США, Канады и Европы не наблюдалось значимых трендов на изменение процента площади погибших от пожаров лесов от общей площади лесов в анализируемых странах;
- г) такая же картина, как и в предыдущем пункте, наблюдается и для процента площади погибших от пожаров лесов от площадей, пройденных огнём;
- д) средний процент гибели лесов за весь анализируемый период сопоставим в России, США и Канаде и существенно ниже в странах северной Европы.

Во втором параграфе на основе разработанных методов проведен анализ особенностей динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI в. на территории РФ. При этом показано, что в анализируемый период наблюдался значимый рост летальности пожаров (отношение площади погибшего леса к общей площади, пройденной пожарами) (Рисунок 7). Данный рост, в основном, обусловлен ростом летальности пожаров, действующих в хвойно-листопадных лесах. Также можно отметить, что с начала XXI в. существенно увеличился процент сильно поврежденных пожаров (5-й класс СКС). Все это позволяет сделать вывод о значимом наблюдаемом тренде увеличения ущерба от лесных пожаров на территории РФ в XXI в. несмотря на то, что значимого тренда в площадях, пройденных пожарами, в то же время не наблюдается (Рисунок 3б).

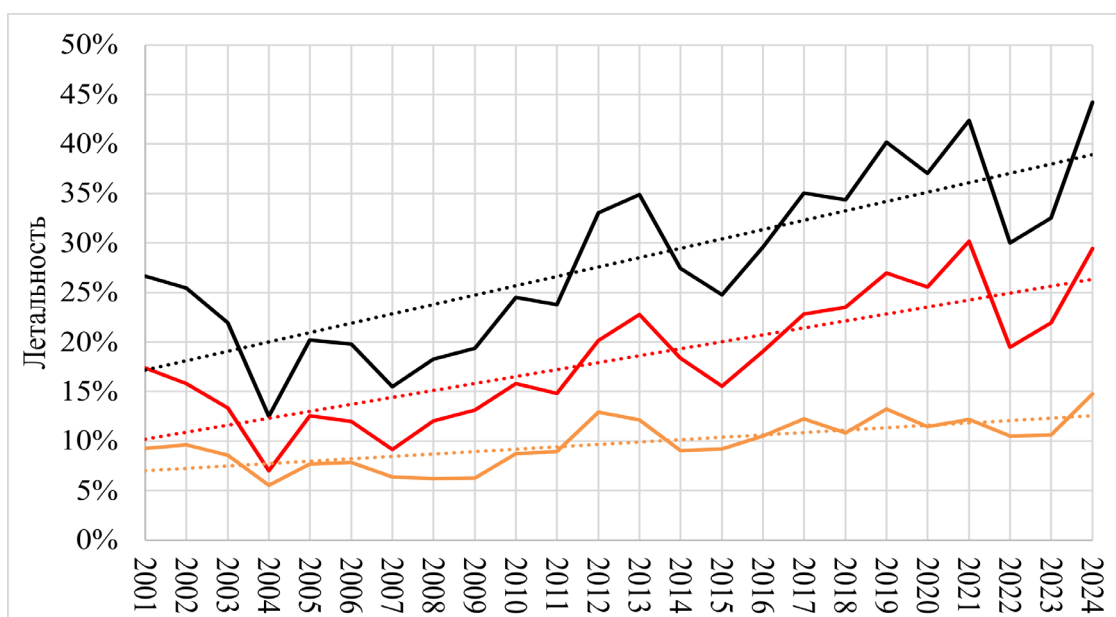


Рисунок 7 — Динамика летальности лесов на территории РФ с 2001 по 2024 г., где под погибшей растительностью считается только 4-й класс СКС (оранжевый цвет), 5-й класс СКС (красный), 4-й и 5-й класс СКС вместе (черный)

Также на основе предложенных методов проведен анализ сезонной динамики повреждений лесного покрова пожарами (Рисунок 8). Приведены данные для лесов с различными видами преобладающих пород и для пожаров, действующих в различные месяцы. Показано, что летальность весенних и летних пожаров может различаться почти в 6 раз. Это, в частности, приводит к тому, что на летние месяцы приходится более 80 % площадей сильных повреждений, связанных с лесными пожарами, при этом около 50 % таких площадей приходится на июль.

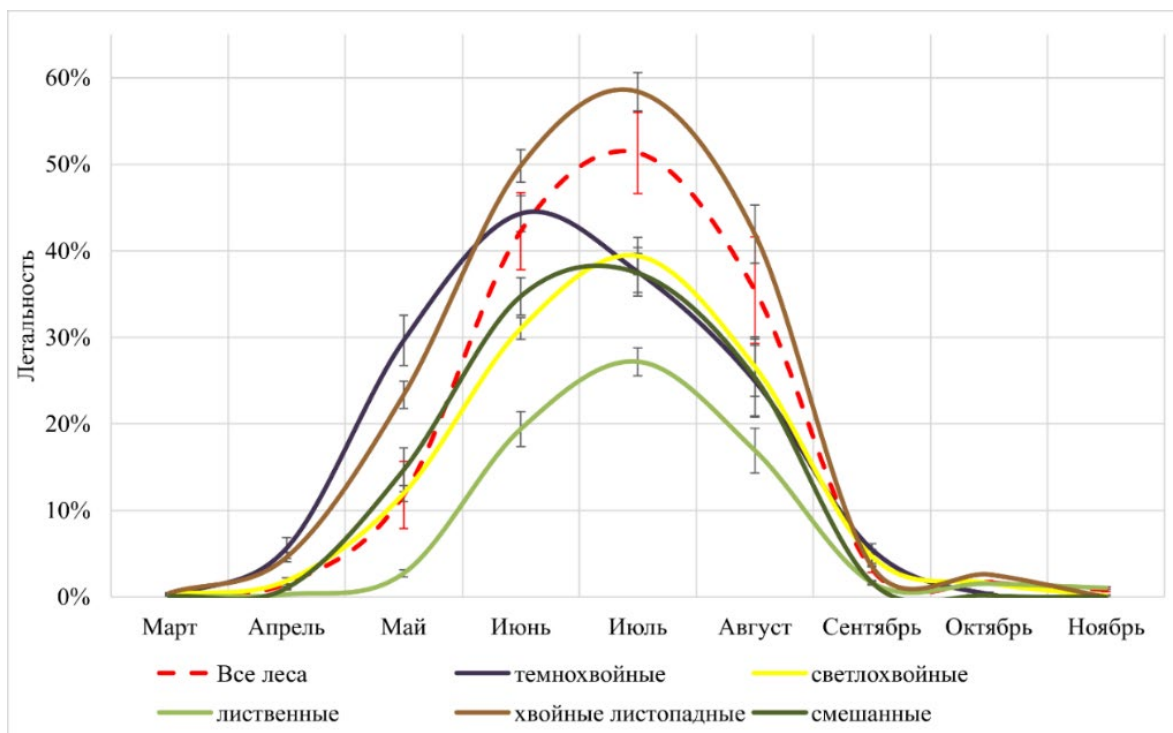


Рисунок 8 — Сезонная динамика средних значений летальности по месяцам для лесов с различной преобладающей породой

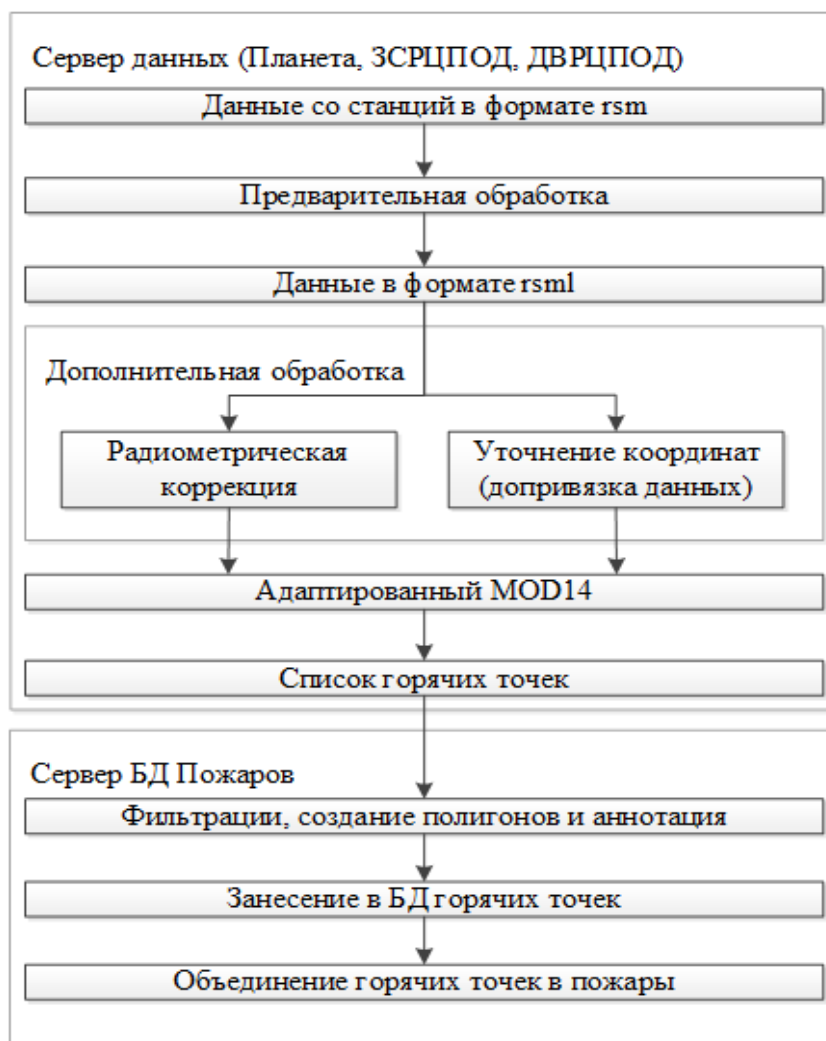


Рисунок 9 — Схема технологии обработки данных MCSU-MP

В третьем параграфе описана технологическая цепочка обработки данных МСУ-МР для мониторинга пожаров, реализованная в системах ИСДМ-Рослесхоз и УНУ «Вега-Science», входящей в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Рисунок 9). Данная цепочка позволяет в оперативном режиме получать информацию о динамике развития лесных пожаров на территории РФ. Сопоставимое значение интегральных величин площадей, пройденных огнем на территории РФ за 2024 г., рассчитанных на основе данных МСУ-МР и данных MODIS, подтвердили ранее сделанный вывод об эффективности работы адаптированного к данным МСУ-МР алгоритма MOD14 детектирования пожаров.

В заключении представлены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе массового автоматизированного сравнения многолетних рядов спутниковых наблюдений интенсивности горения в период действия пожаров и постпожарных повреждений на всей территории России разработан метод обработки данных космических наблюдений для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения. Это позволило получить статистически обоснованные зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности горения для различных условий действия лесных пожаров.
2. На основе полученных зависимостей вероятности гибели лесов от интенсивности горения разработан метод обработки данных космических наблюдений для полностью автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами в зависимости от их типа и сезона действия.
3. На основе разработанного метода автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами разработан алгоритм автоматизированной оперативной оценки повреждений лесов для обеспечения космического мониторинга природных пожаров. Основным преимуществом предложенного подхода является возможность получения оперативных оценок гибели лесов не только в момент завершения пожара, но и по мере его развития.
4. Разработанный алгоритм оперативного мониторинга повреждений лесов был интегрирован в ИАС «Углерод-Э» (<https://carbon.geosmis.ru/>), развиваемую в интересах создающейся национальной системы мониторинга климатически-активных газов.
5. На основе анализа многолетних рядов космических наблюдений различных спутниковых систем разработан универсальный подход к адаптации алгоритма обработки космических данных для детектирования активного горения по данным прибора MODIS (алгоритм MOD14) для работы с данными различных спутниковых систем.
6. Разработанный подход к адаптации позволил реализовать алгоритм детектирования температурных аномалий на основе данных приборов МСУ-МР, установленных на российских спутниках серии «Метеор-М». Это позволило впервые реализовать на основе данных отечественных КА систему автоматической обработки для мониторинга площадей, проходимых лесными пожарами. Таким образом, создана основа для

перевода различных систем дистанционного мониторинга лесных пожаров, в том числе ИСДМ-Рослесхоз (<https://nffc.aviales.ru>), на работу с данными отечественных космических систем наблюдения Земли.

7. Разработанные методы и алгоритмы оценки повреждений лесного покрова позволили получить уникальные научные результаты. Впервые проведено сравнение межгодовой динамики таких оценок для глобальных северных регионов в XXI в. Также был проведен анализ особенностей межгодовой и сезонной динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI в. на территории РФ, результаты которого дополнили и уточнили выводы, полученные в работах других авторов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, включённых в перечень ВАК:

1. **Лозин Д.В.**, Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Волкова Е.Е., Мазуров А.А., Матвеев А.М. Адаптация алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными прибора МСУ-МР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 231–245. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-231-245. (Белый список, РИНЦ, Scopus)
2. Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., **Лозин Д.В.**, Лупян Е.А., Втюрин С.А. Погрешность расчёта выбросов угарного газа от крупных лесных пожаров по балансовой методике на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-143-155. (Белый список, РИНЦ, Scopus)
3. Лупян Е.А., **Лозин Д.В.**, Барталев С.А., Балашов И.В., Стыценок Ф.В. Оценка повреждений российских лесов пожарами в XXI веке на основе анализа интенсивности горения по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 233–249. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-233-249. (Белый список, РИНЦ, Scopus)
4. Пашинов Е.В., **Лозин Д.В.**, Втюрин С.А., Кобец Д.А. Первые результаты расчёта баланса парниковых газов для регионов РФ по балансовой методике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 398–403. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-398-403. (Белый список, РИНЦ, Scopus)
5. **Лозин Д.В.**, Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А. Оценка гибели северных лесов от пожаров в XXI веке на основе анализа данных прибора MODIS об интенсивности горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 292–301. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-292-301. (Белый список, РИНЦ, Scopus, переводная версия WOS)

6. **Лозин Д.В.** Система оперативного построения карт интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 96–106. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-96-106. (Белый список, РИНЦ, Scopus)
7. **Лузян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.** 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. (Белый список, РИНЦ, Scopus, переводная версия WOS)
8. **Lozin D.V., Balashov I.V., Loupian E.A.** Possibilities of near real-time forest cover damage estimation based on fires radiative power data // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2021. V. 806. Article 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019. (Scopus)

Научные статьи в материалах конференций:

9. **Лозин Д.В., Лузян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.** Методика оперативной оценки площади пирогенной гибели лесов на основе данных об интенсивности горения пожаров // Материалы 12 Международной научно-практической конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко. Минск, 2023. С. 437–439.
10. **Лозин Д.В., Лузян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.** Оперативная оценка степени повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения // Материалы 9-й Международной научной конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» / науч. ред. Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. Красноярск, 13–16 сент. 2022. 2022. С. 256–259.
11. **Лозин Д.В., Балашов И.В., Лузян Е.А.** Возможности оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конф.-вебинара «Цифровые технологии в лесном секторе». Санкт-Петербург, 18–19 февр. 2021. 2021. С. 78–81.

Лозин Дмитрий Владиславович

**Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий
и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов**

Автореф. дис. ... канд. техн. наук

Подписано в печать 24.11.2025. Заказ № 4219.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,38. Тираж 100 экз.

Изд-во ИКИ РАН. Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

