

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н. Лупян Евгений Аркадьевич

Москва, 2025

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ	11
1.1 Характеристики спутниковых систем, применимых для оперативного мониторинга пожаров	12
1.2 Оценка интенсивности горения пожаров	15
1.3 Оценка пирогенной гибели лесов на основе спутниковых данных.....	23
1.4 Оценка площадей пожаров на основе данных активного горения	27
1.5 Детектирование тепловых аномалий и их интенсивности по данным различных спутниковых систем	29
Заключение к 1 главе:	43
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК ПЛОЩАДЕЙ ВОЗМОЖНОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА MODIS	44
2.1 Оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения в период действия пожара	45
2.2 Оценка повреждений лесного покрова пожарами на основе оценок вероятности гибели лесов	57
2.3 Оценка пройденных пожарами площадей с учетом данных об интенсивности горения	62
2.4 Автоматизированная оперативная оценка повреждений лесного покрова на основе спутниковых наблюдений	67
Заключение к 2 главе	77
ГЛАВА 3. АДАПТАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИБОРА MODIS К РАБОТЕ С ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ.....	79
3.1 Адаптация метода оценки вероятности гибели лесов для работы с данными прибора VIIRS	80
3.2 Метод адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными приборов различных спутниковых систем	88
3.3 Адаптация алгоритма MOD14 для детектирования пожаров по данным с прибора МСУ-МР.....	95
3.4 Адаптация алгоритма MOD14 для детектирования пожаров по данным с приборов SLSTR, MERSI-II	105

Заключение к 3 главе	109
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ	111
4.1 Оценка динамики гибели лесов от пожаров на северных территориях Земли в XXI веке	111
4.2 Анализ особенностей гибели лесов от пожаров на территории России в XXI веке.....	118
4.3 Создание технологии автоматизированной обработки данных МСУ-МР в интересах систем дистанционного мониторинга лесных пожаров	130
Заключение к 4 главе	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155
Приложение 1. Акты внедрения результатов работы	155
Приложение 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	157
Приложение 3. Основные публикации по теме диссертации.....	158

ВВЕДЕНИЕ

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 (Giglio, Justice, Wooster, Барталев, Лупян, Пономарев и др.), в которых были созданы различные методы и алгоритмы обработки спутниковых данных, позволяющие осуществлять мониторинг природных пожаров и производить оценку их различных характеристик. Одной из значимых задач исследований природных пожаров является 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 являются 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 (Morgan, Ryan, Heward, Стыценко, Барталев, 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. Основной задачей при построении подобных оценок является установление связи между определяемой на основе спутниковых наблюдений интенсивности горения и степенью повреждения растительного покрова. До настоящего времени для построения данных зависимостей использовались достаточно 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. Целью проведенных исследований является развитие и создание 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 год (более 380 тысяч 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/>). 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 21 веке, включая многолетние ряды гибели лесов от лесных пожаров на территории РФ и в циркумполярной зоне. Анализ сформированного ряда данных о повреждениях лесов в 21 веке 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 2020г. 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). Так же в 2024 году 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 (см. приложение 2).

Внедрение результатов работы. Диссертационная работа выполнена в ИКИ РАН. Результаты работы использованы при выполнении проектов Минобрнауки в рамках тем «Мониторинг» № 122042500031-8 и «Эмиссия» № 122101700045-7.

Результаты работы в настоящее время используются в рамках информационно-аналитической среды (ИАС) «Углерод-Э» (<https://start.carbon.geosmis.ru>), центре коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») (<http://ckp.geosmis.ru/>), Дальневосточном центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии ПЛАНЕТА» и главном управлении национального центра управления в кризисных ситуациях министерства чрезвычайных ситуаций (ГУ НЦУКС МЧС). В приложении 1 приведены акты о внедрении.

Соответствие паспорту специальности 1.3.1. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия» в части пункта 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, четырех глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем диссертации составляет - 153 страницы, включая – 53 рисунка и – 16 таблиц. Библиографический список содержит – 112 литературных источников.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Лесные пожары являются одним из природных явлений, имеющих широкое распространение на территории России и оказывающих значимое влияние на глобальные изменения окружающей среды. Ежегодно пожары проходят площадь порядка нескольких миллионов гектар территории нашей страны (Лупян и др. 2017, Бондур и др. 2022). Последствия пожаров вносят серьезный вклад в изменение окружающей среды и носят глобальный характер. Без должного контроля деятельность пожаров может нанести большой материальный ущерб вплоть до катастрофических последствий. Тем самым крайне важным является обеспечение глобального мониторинга лесных пожаров, предназначенного для решения комплекса функциональных задач, связанных с оценкой и прогнозом пожарной опасности в лесах, обнаружением и контролем динамики лесных пожаров, послепожарной инвентаризацией лесов, управлением работой лесопожарных служб (Валендик Э.Н. и др., 1983). Помимо традиционных наземного и авиационного мониторинга пожаров, так же существует космический (спутниковый) мониторинг пожаров. Его методы позволяют осуществлять контроль пожарной обстановки на территории всей страны, включая пространства, на которых наземный и авиационный мониторинг не производится. Именно использование спутниковых методов позволяют обеспечить глобальность мониторинга. Одними из основных задач спутникового мониторинга являются:

- оперативное обнаружение пожаров
- наблюдения за динамикой развития пожаров
- оценка последствий действия пожаров
- оценка различных характеристик пожаров (площадь, интенсивность горения итд)

Решению задач спутникового мониторинга пожаров посвящено значительное число работ, как у нас в стране, так и за рубежом (Барталев и др.,

2008, Лупян и др. 2017, Пономарев и др. 2019, Giglio et al. 2020, Wooster et al. 2012). В настоящей главе будут рассмотрены основные результаты таких работ, посвященных вопросам, связанным с темой настоящей диссертационной работы.

1.1 Характеристики спутниковых систем, применимых для оперативного мониторинга пожаров

Оперативность спутникового мониторинга пожаров достигается при обеспечении периодичности съемки одного и того же участка Земли в 1-2 раза за сутки. Такая периодичность достигается при полосе обзора прибора более 1000 км, что в свою очередь обычно соответствует пространственному разрешению в 1 км. Известно, что тепловые аномалии хорошо определяются при съемке на длинах волн в 4 и 11 мкм (Kaufman, Justice et al. (1998)). Съемка в диапазоне около 4 мкм наиболее чувствительна к температурам, соответствующим лесным пожарам, в то время как съемка в 11 мкм соответствует фоновой температуре поверхности. Разница снимков в 4 и 11 мкм позволяет выделять тепловые аномалии от фона. Дополнительно при осуществлении детектирования пожаров необходимо осуществлять фильтрацию облачности. Для этого используется съемка в 0,6, 0,8 и 12 мкм. Так же для фильтрации бликов солнца используется канал в 2 мкм. В таблице 1.1 и таблице 1.2 представлены основные характеристики орбит спутников и приборов, которые соответствуют представленным требованиям.

На сегодняшний день автоматическое детектирование пожаров ведется для всех из перечисленных в таблице 1.2 приборов кроме отечественного МСУ-МР. Базы данных с результатами детектирования по данным каждого прибора оперативно обновляются и имеют открытый доступ к получению информации. Для приборов MODIS, VIIRS и SLSTR для длины волны 4 мкм доступны специальные «пожарные» каналы. Такие каналы дублируют обычные каналы 4 мкм и отличаются от них значительно большей температурой насыщения. Недостатком таких каналов является значимо (в 3 -10 раз) больший уровень выраженной в температуре характеристики шума. Однако для определения реальной радиояркостной температуры при высокой термодинамической

температуре горения такой уровень шумов является допустимым. Гораздо важнее, что такие каналы позволяют определять интенсивность горения пожара.

Таблица 1.1 - Сравнение характеристик орбит спутников и приборов, используемых при детектировании пожаров

Спутник	TERRA	AQUA	Метеор M2-2 ¹	Метеор M2-3	Метеор M2-4	SNPP	NOAA- 20	NOAA- 21	Sentinel 3A	Sentinel 3B	FY-3D
Дата запуска	18.12. 1999	04.05. 2002	05.11. 2019	27.06. 2023	29.02. 2024	28.10. 2011	18.11. 2017	10.11. 2022	16.02. 2016	25.04. 2018	14.11. 2017
Орбита	Солнечно-синхронная										
Перигей/апогей, км	690/693	689/692	810/813	809/815	812/823	826/827	827	826/828	802/803		825/829
Прибор	MODIS		МСУ-МР			VIIRS			SLSTR		MERSI-II
Разрешение, км (канал 4 мкм)	1			0,375			0,75		1		
Периодичность съемки, сутки	1-2										
Полоса обзора, км	2230		2800			3000			1400		2900

Таблица 1.2 - Сравнение каналов различных приборов, используемых при детектировании пожаров

MODIS			МСУ-МР			VIIRS 375м			VIIRS 750м			SLSTR			MERSI-II		
№ кан	Спектр. диапаз [мкм]	Темп. насыщ. [К]	№	Сп. диап. [мкм]	Т [К]	№	Сп. диап. [мкм]	Т [К]	№	Сп. диап. [мкм]	Т [К]	№	Сп. диап. [мкм]	Т [К]	№	Сп. диап. [мкм]	Т [К]
1	0,62-0,67		1	0,5-0,7		I1	0,6–0,68		M5	0,66 – 0,68		S2	0,65-0,67		7	0,63-0,68	
2	0,84-0,88		2	0,7-1,1		I2	0,85–0,88		M7	0,85 – 0,89		S3	0,86-0,88		12	0,84-0,89	
7	2,11-2,12		3	1,6-1,8		I3	1,58–1,64		M11	2,23 – 2,28		S6	2,23-2,28		19	2,08-2,18	
21	3,93-3,99	500	4	3,5-4,1	327	I4	3,55–3,93	367	M13	3,97–4,13	659	S7	3,54-3,94	311	20	3,55-3,95	380
22	3,93-3,99	331										F1	3,54-3,94	500			
31	10,8-11,3	400/340	5	10,5-11,5	400	I5	10,5–12,4	380	M15	10,26–11,26	363	S8	10,47-11,24	350	24	10,3-11,3	330
32	11,8-12,3		6	11,5-12,5		-			M16	11,54–12,49		S9	11,5-12,5		25	11,5-12,5	

¹ Данные со спутника Метеор M2-2 перестали быть доступны с 16.07.2024

1.2 Оценка интенсивности горения пожаров

Физические основы измерения интенсивности горения по спутниковым данным

Тепловое излучение огня представляет собой энергию, высвобождаемую при горении растительности. Инфракрасные спектро радиометры, установленные на спутниках на околоземной орбите, могут напрямую измерять это испускаемое тепловое излучение. Однако при наблюдении активных пожаров с околоземной орбиты след каждого «пожарного пикселя» обычно будет далеко не однородным и может считаться состоящим из n тепловых компонентов, каждый из которых имеет различную температуру и субпиксельную площадь. Для каждой горячей точки общую энергию от всех тепловых компонентов пожара (не включая фон окружающей среды) согласно закону Стефана-Больцмана, можно рассчитать, как:

$$E = A_{pix} \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_i T_i^4 \quad (1.1)$$

где: E - энергия излучения огня с площадки пикселя за единицу времени [Вт], A_{pix} - площадь пикселя [м^2], σ - постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт/К}^4 \cdot \text{м}^2$), A_i - площадь i -го теплового компонента в пределах пикселя [м^2], T_i - температура i -го теплового компонента [К], ε - излучательная способность, составное значение, зависящее от соотношения смешивания пылающего и тлеющего горения.

Уравнение (1.1) описывает общее излучение пожара в спектре волн, тогда как приборы на космических системах обычно измеряют инфракрасное излучение только в дискретных диапазонах длин волн. Чтобы преодолеть это ограничение при измерении излучения, необходимо установить взаимосвязь между измерениями в узких спектральных диапазонах, получаемыми с помощью инфракрасных спектро радиометров, и общим количеством энергии, излучаемой огнем на всех длинах волн.

Метод дистанционного измерения величины теплового излучения от горения был предложен Кауфманом и др. (1996), основанный на полуэмпирических взаимосвязях между энергией излучения и инфракрасным спектральным излучением, зарегистрированными с помощью бортового

симулятора MODIS. В работе Кауфман, Клейдман и др. (1998) было обнаружено, что энергия излучения от пожара коррелирует с яркостной температурой пиксела в канале 4 мкм спектро радиометра MODIS больше, чем с температурой любого другого канала. Это связано с тем, что канал 4 мкм наиболее чувствителен к излучению от пылающего и тлеющего горения. На основе сравнения имеющихся данных о температуре горения пожаров и радиояркостной температуре в канале 4 мкм MODIS была получена следующая связь:

$$E = 4,34 \times 10^{-19} (T_4^8 - T_{4b}^8) \text{ [Вт/м}^2\text{]} \quad (1.2)$$

где T_4 - яркостная температура пиксела в канале 4 мкм, T_{4b} - яркостная температура фона, получаемая как среднее значение температуры окружающих целевой негорячих пикселей.

В работе Wooster et al 2003 предложенный подход был переосмыслен в аналитическом ключе. Основная идея нового метода заключалась в аппроксимации функции Планка (1.3), характеризующей спектральное излучение тела более простой функцией (1.4) (Wooster & Rothery, 1997)

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} \quad (1.3)$$

$$L(\lambda) = aT^b \quad (1.4)$$

где λ – длина волны [м], T – температура [K], L – спектральное излучение [Вт м⁻² ср⁻¹ мкм⁻¹], C_1 и C_2 – константы (1,19*10⁻¹⁶ Вт м² ср⁻¹ и 1,44*10⁻² мкм К), a и b константы, получаемые эмпирически.

Для $\lambda=4$ мкм было установлено, что при температурном диапазоне, соответствующему большинству пожаров (600 – 1500 К,) функция Планка наиболее близко аппроксимируется T^4 , то есть приближается к закону Стеффана-Больцмана. Таким образом, утверждается, что для диапазона температур, в котором это предположение справедливо, отношение полной мощности, излучаемой пожаром по всем длинам волн (E), к мощности, излучаемой на длине волны 4 мкм (L'_4), примерно постоянно. Данное утверждение позволяет определить суммарное излучение от n тепловых компонент пожара внутри пожарного пиксела, как

$$L'_4 = a\varepsilon_4 \sum_{i=1}^n A_i T_i^4 \quad (1.5)$$

где ε_4 – излучательная способность и a – эмпирическая константа, для канала 4мкм MODIS равная $3,0 \cdot 10^{-9}$ Вт м⁻⁴ ср⁻¹ мкм⁻¹ К⁻⁴. Объединение выражений (1.1) и (1.5) приводит к (1.6)

$$E = \frac{A_{pix}\varepsilon\sigma}{a\varepsilon_4} L'_4 \quad (1.6)$$

В данном случае L'_4 – излучение от пожара, которое определяется как разность между излучением пожарного пиксела L_4 и излучением от фоновых пикселей $\overline{L_4}$. Дополнительно используя предположение, что пожары излучают как серые тела (т.е. $\varepsilon = \varepsilon_4$), в результате получилось выражение (1.7), которые на данный момент используется для расчета величины теплового излучения от пожаров внутри пиксела MODIS:

$$FRP = \frac{A_{pix}\sigma}{a} (L_4 - \overline{L_4}) \text{ [Вт]} \quad (1.7)$$

где L_4 - энергетическая яркость термически активного пиксела (цели) в канале 21 радиометра MODIS λ 4 мкм, $\overline{L_4}$ - энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне, A_{pix} - площадь пикселя MODIS (которая варьируется как функция угла сканирования), $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8}$ Вт м⁻²К⁻⁴ - постоянная Стефана-Больцмана, $a = 3.0 \cdot 10^{-9}$ Вт м⁻²ср⁻¹мкм⁻¹К⁻⁴ - эмпирическая постоянная. Позже данная величина получила название FRP (Fire Radiative Power, Wooster et al. 2004).

Использование данных спутниковых измерений интенсивности горения

Наиболее развитым направлением научных работ, связанных с использованием спутниковой информации об интенсивности горения пожаров, является получение оценок выбросов пирогенных веществ. Основная идея заключается в существовании связи между суммарной тепловой энергией, выделяемой при пожаре (Fire Radiative Energy (FRE) интеграл FRP по времени), и количеством сжигаемой сухой топливной биомассы, которая в свою очередь связана с выбросом пирогенных веществ [Andreae and Merlet, 2001]. В работе

(Wooster et al. 2005) был проведен полевой эксперимент, в котором средствами спектродиометра, по своим свойствам съемки аналогичным MODIS, наблюдалось горение мискантуса, расположенного на измерительных весах. В результате сравнения показателей FRE и изменения массы сгораемого вещества во времени была установлена статистически значимая связь между расходом топлива и выбросами FRE ($r^2 = 0,98$, $n = 29$, $p < 0,0001$). Таким образом, был сделан первый шаг к полностью дистанционной оценке общего расхода топлива посредством количественного определения интегральной радиационной мощности пожара. Главным преимуществом такого подхода является отсутствие необходимости в измерениях содержания биотоплива на единицу площади и полноты его сгорания. На настоящий момент идея дистанционного расчета сгоревшей биомассы по информации об интенсивности горения пожаров была доведена до реализации соответствующих информационных глобальных продуктов GFAS (J.W. Kaiser et al. 2012), QFED (Anton S. Darmenov, Arlindo da Silva, 2015) и FEERv1.0 (Ichoku and Kaufman, 2005; Ichoku and Ellison, 2014).

Работы, использующие спутниковые данные FRP пожаров, велись и в других направлениях. Так, в (Mottram et al. 2005) было установлено уменьшение средней интенсивности горения с увеличением широты, где наблюдается пожар. Так же было обнаружено, что большая часть пожаров и теплового потока регистрируется при углах сканирования близким к надиру. При этом характерно небольшое смещение пика распределения к правому краю изображения, что связано с лучшей регистрацией пожаров в сумеречной зоне. Помимо этого, FRP пожаров было сопоставлено с картой следов от пожаров (СЕН, Balzter et al., 2004) на территории Сибири за лето 2003 года. Важно отметить, что при сопоставлении все данные были спроецированы в сетку с размером ячейки в 1 км таким образом, что FRP горячей точки равномерно распределялось между всеми ячейками сетки, в которые такая точка попадала. Тем самым FRP в данной сетке имело размерность МВт/км². Результатом такого сопоставления стало выделение 6 классов пожаров по их средней интенсивности горения. Было отмечено, что 1 класс пожаров почти никогда не оставлял за собой видимых повреждений, тогда

как 6 класс, напротив, почти всегда сопоставлялся с огненными шрамами. Так же была найдена определенная связь пожаров низкой интенсивности с видимыми разрушениями, которые были обнаружены только на следующий год. Такое наблюдение объяснялось потенциальным уничтожением корневой системы низовыми пожарами низкой интенсивности с последующим вымиранием лесной растительности.

Связь между интенсивностью горения пожаров и последующей гибелью растительности в дальнейшем более детально была изучена в работе (Heather Heward, 2013). На 16 пожарах, прошедших в 2005 и 2006 годах на территории запада США, данные FRP сопоставлялись в пространстве с разностным индексом RdNBR, характеризующем постпожарное разрушение лесной растительности. Такой индекс рассчитывается на основе двух изображений, обзорающих растительность до и после пожара. Изображения рассматриваются в ближнем и среднем ИК-каналах. Для сопоставления использовались горячие точки MODIS, зарегистрированные при угле сканирования меньше 27. Тем самым фильтровались данные с большой площадью пиксела, имеющие внутри себя большую неопределённость в реальной субпиксельной площади горения. Для отобранных точек, попавших на контуры исследуемых пожаров, вокруг их центра строился буфер радиусом в 0.5 км. Для области внутри буфера далее рассчитывалось среднее значение RdNBR, которое сопоставлялось с FRP соответствующей горячей точки. Таким образом была собрана выборка из 1716 сопоставленных пар значений. Анализ выборки показал, что вариативность значений RdNBR значительно уменьшается с увеличением FRP. Такой результат авторы соотносят с широким разнообразием постпожарных последствий, которые в реальности наблюдаются после пожаров низкой интенсивности, тогда как пожары высокой интенсивности обычно приводят к полной гибели растительности (Lentile et al. 2006). Далее выборка была сгруппирована по исследуемым пожарам. Для каждого пожара были посчитаны среднее FRP и RdNBR. Сравнение получившихся пар значений позволило установить зависимость между величинами. При этом зависимость отличалась для пожаров

на территории, покрытой деревьями менее и более 60 %. Таким образом, в работе был показан потенциал данных FRP для их использования в получении прогнозируемых оценок гибели растительности от действия пожара.

Цикл работ, посвященный возможностям использования данных FRP, был проведен Е.И. Пономаревым с соавторами. В работе (Пономарев 2014) были проанализированы пожары на территории Сибири за 2012 год. Суммарное FRP было рассчитано для каждого наблюдения отдельно взятого пожара по данным MODIS. Сами пожары были проаннотированы по карте типов растительности, с учетом разных древесных пород. На основе полученных данных было показано, что среднее FRP пожаров меньше для ночных, чем для дневных наблюдений вне зависимости от типа лесной растительности. Отдельно был проведен анализ динамики FRP для пожаров, развивающихся в одинаковых условиях, но проходящие на разных типах лесных насаждений (сосновых и лиственничных). Для этого были выбраны 4 пожара, действующие в одно время и разнесенные в пространстве в радиусе 35 километров. В результате оказалось, что максимальные FRP в лиственничниках вдвое превышают показатели в сосновых насаждениях. Тем самым был подтвержден факт зависимости интенсивности горения пожара от типа территории, на котором он проходит. Дополнительно в работе была предложена общая классификация пожаров, в зависимости от средних и максимальных FRP этих пожаров.

В работе (Швецов, Пономарев 2014) пожары Сибири исследовались за период с 2008 по 2013 год, при этом FRP нормировалось на площадь горячей точки. Данное возвращение к плотностной единице измерения для FRP ($\text{МВт}/\text{км}^2$) обосновано требованием однородности исследуемых данных, так как для горячих точек больших площадей, зарегистрированных на краях изображения, FRP, рассчитанное по формуле (7), естественным образом завышалось. Как и в прошлой работе, было установлено, что FRP пожаров, действующих в лесах с преобладанием лиственницы, в среднем больше, чем для пожаров в сосняках и лиственных лесах. Тот же вывод относительно FRP был сделан для периодов высокой горимости (сезоны с большим количеством

пожаров) по сравнению с периодами низкой горимости. Показано, что частота регистрации горячих точек с $FRP > 50 \text{ МВт/км}^2$ повышается во второй половине пожарного сезона (июль-начало августа). Помимо этого, в работе было проведено сопоставление средних и интегральных значений FRP с индексом пожарной опасности FWI (Fire Weather Index, Van Wagner, 1987), рассчитанными за каждый день по всей рассматриваемой области. В результате была выведена экспоненциальная функциональная зависимость между двумя показателями вида $FRP = a \exp(b \cdot FWI)$, где a и b меняются для разных лесных районов и сезонов.

Вопрос связи интенсивности горения пожаров с постпожарными повреждениями так же был рассмотрен в (Понномарев 2017). Здесь данные FRP так же нормировались на площадь горячей точки, а затем сопоставлялись с данными классов повреждений растительности, выделяемые по изображениям Landsat, для полигона пожара. Было установлено, что экстремально высокие значения FRP в основном соответствуют наибольшему уровню повреждения растительности. Дополнительно данные FRP были сопоставлены с верховыми пожарами, определенными средствами наземной и авиационной охраны лесов. Оказалось, что около 65% рассматриваемых верховых пожаров сопровождались экстремальными FRP , превышающими более, чем в 2 раза среднее FRP по полигону пожара. FRP горячих точек так же было сопоставлено с площадью высокотемпературной зоны горячих точек. Такая площадь рассчитывалась методом Дойзера (Doizer, 1981) с использованием информации о тепловом излучении, регистрируемым в каналах 4 мкм и 11 мкм MODIS. Результатом стало нахождение линейной связью между двумя признаками, что на практике показывает возможность инструментальной оперативной оценки площади активной зоны верховой фазы горения.

В (Ponomarev et al. 2021), FRP так же было использовано для оценки выбросов пирогенных веществ. Для этого за основу был взят подход, ранее используемый в модели GFED, основанный на информации о площадях пожаров и о биотопливе. Данное решение принципиально отличается от предложенных ранее методов оценки выбросов по FRP . Главным преимуществом таких методов,

как ранее было отмечено, являлось отсутствие необходимости в информации о свойствах сгораемого биотоплива. Вместо этого в описываемом подходе данные FRP использовались для уточнения получаемых оценок. Для этого было предложено разделять область пожара на три класса, в зависимости от величины FRP – классы низкой, средней и высокой интенсивности горения. Такое разбиение было сделано по пороговым значениям, рассчитанным по всей имеющейся статистике горячих точек с FRP. Далее, для каждого класса внутри области пожаров, выбросы считались со своим добавочным коэффициентом. Таким образом, помимо свойств биомассы и площади пожара в оценке выбросов теперь учитывалась и интенсивность горения. Дополнительно была получена статистика процентного вхождения пожаров разных классов интенсивности для разных широтных поясов. Так как разные широтные пояса Сибирских лесов характеризуется различным видом составом растительности, была показана связь между интенсивностью пожаров и типами лесных насаждений.

Актуальные задачи

В приведенных работах, как и в большинстве подобных исследований, до настоящего времени использовались достаточно ограниченные ряды данных наблюдений, для которых имелась информация как об интенсивности горения, так и о повреждениях лесов и/или измерениях выбросов углерода. Также работы обычно сосредотачивались на анализе данных по довольно ограниченным территориям. Это в конечном итоге затрудняет получение таких зависимостей для различных типов пожаров, действующих в разных условиях. Вместе с тем, результаты приведенных работ показывают возможность использования данных FRP, для получения оценок пирогенной гибели лесов, что обеспечило бы их оперативность. Поэтому до сих пор остаётся актуальным развитие методов построения обсуждаемых связей, которые основывались бы на анализе больших наборов данных для построения статистически обоснованных зависимостей степени повреждения лесного покрова от интенсивности горения (FRP) для различных территорий, пожарных сезонов и типов лесного покрова.

Другим потенциальным преимуществом метода, основанного на использовании информации об активном горении пожаров, является глобальное территориальное и долговременное покрытие данных FRP Collection 6 MODIS ActiveFire. Таким образом, открывается возможность к существенному расширению области исследования (в пространстве и времени) при изучении пирогенной гибели лесов, что создает потенциал для получения новых научных результатов.

Отдельный интерес представляет создание системного подхода к получению оценок гибели лесов от пожаров по данным интенсивности горения. Законченное решение, позволяющее в оперативном режиме строить ежедневно обновляющиеся ряды данных интенсивности горения пожаров и оценок возможной гибели лесной растительности в результате их действия, существенно усилит функционал прикладных систем глобального мониторинга пожаров, в том числе представляя новые инструменты для более глубокого изучения последствий пожарной активности.

1.3 Оценка пирогенной гибели лесов на основе спутниковых данных

Стандартный информационный продукт гарей

Набор данных MODIS Collection 6 помимо информационного продукта по активному горению имеет информационный продукт гарей MCD64A1 (Giglio 2020). Данный продукт строится на основе объединения данных об активном горении с данными отражения поверхности, с дополнительным использованием данных о растительном покрове. Алгоритм использует данные наблюдений за активными пожарами для получения статистической характеристики изменений коэффициента отражения, связанных и не связанных с пожарами, за период наблюдения, а затем применяет правило Байеса, дополненное вероятностными тестами, для классификации отдельных ячеек сетки как сгоревших или не сгоревших (Rodrigues 2019). Данные доступны ежемесячно на глобальную территорию Земли за период с конца 2000 года по настоящее время.

Несмотря на ряд преимуществ, такой набор данных о видимых повреждениях лесной растительности имеет и ряд недостатков. Это, во-первых, довольно высокий уровень завяленной ошибки (37% ложных срабатываний и 37% пропусков (Clelland 2024)), но главное, отсутствие градации степени повреждений – выделяются только классы гарь и не гарь.

Данные о степени повреждений лесной растительности

Распространенный подход к оценке пирогенной гибели лесов с использованием спутниковых данных основан на том, что под воздействием огня происходит снижение содержания хлорофилла и влажности древесных растений, что приводит к изменению их отражательной способности в видимой, ближней ИК и средней ИК областях спектра (White et al., 1996). Рядом авторов была установлена зависимость между наземными оценками биомассы погибших от пожаров лесов и спутниковыми измерениями значений различных вегетационных индексов (Doerr et al. 2006, García- Haro et al. 2001). Полученная связь была использована в большом количестве работ (Isaev et al., 2002, Zhu et al. 2006, Hall et al., 2008, Jin et al., 2012, Wu et al. 2013), посвященных оценке постпожарных повреждений. Отдельно среди них можно выделить метод, представленный в работе (Стыщенко и др. 2013). Главным преимуществом данного метода является построенный на его основе информационный продукт карт постпожарных повреждений с покрытием на территорию Российской Федерации. Такие карты строятся на каждый год, начиная с 2006. Степень повреждения лесов здесь характеризуется величиной средневзвешенной категории состояния – СКС (Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, 2007)). Таким образом, ряд карт имеет глобальное пространственное и временное покрытие и согласован с характеристикой степени повреждения лесов, применимой в лесном хозяйстве. В методе используется нормализованный разновременной коротковолновый вегетационный индекс RdSWVI (Miller et al., 2007), который вычисляется на основе анализа спутниковых наблюдений до и после воздействия пожаров следующим образом:

$$RdSWVI = \frac{SWVI_{pre} - SWVI_{post}}{\sqrt{SWVI_{pre} + 1}} \quad (1.8)$$

$$SWVI = \frac{R_{nir} - R_{swir}}{R_{nir} + R_{swir}} \quad (1.9)$$

R_{nir} и R_{swir} - значения коэффициента отражения поверхности в ближнем и среднем ИК диапазонах длин волн соответственно, $SWVI_{pre}$ - значение индекса, полученное по изображению на заданную дату в год предшествующий пожару, а $SWVI_{post}$ - значение индекса после воздействия огня.

Результаты работ показали, что между $RdSWVI$ и СКС наблюдается связь, которая может быть выражена линейной зависимостью (Барталев и др., 2010).

$$СКС = a * RdSWVI + b \quad (1.10)$$

где коэффициенты a и b определяются экспериментально на основе совместного анализа данных спутниковых наблюдений и наземных лесопатологических обследований.

Традиционно устанавливаются следующие верхние границы интервалов значений СКС для отнесения насаждения к категориям состояния: 1,5 – здоровое насаждение (класс 1); 2,5 – ослабленное (класс 2); 3,5 – сильно ослабленное (класс 3); 4,5 – усыхающее (класс 4). Насаждения со средневзвешенной категорией состояния выше 4,5 относятся к погибшим (класс 5).

Еще одним видом данных, позволяющем более детально анализировать процессы горения лесной растительности и разрушения лесов, является информация о преобладающем типе лесного покрова. На основе подходов, подробно описанных в публикациях (Барталев и др., 2011; Уваров, Барталев, 2010) был построен ежегодно обновляемый ряд карт по всей территории Российской Федерации, содержащий информацию об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016).

Совместный анализ оценок пирогенной гибели лесов с информацией о типе лесного покрова позволил получить ряд результатов, представляющих интерес в области лесного хозяйства (Барталев и др. 2017; Барталев, Стыценко, 2021). Так были посчитаны площадные оценки различных степеней повреждений лесной

растительности на территории Российской Федерации. Помимо этого, была исследована сезонная динамика показателя летальности (доли площади погибших лесов (4 и 5 СКС) по отношению к их общей затронутой огнем площади) для разных типов лесной растительности (рисунок 1.1).

Метод оценки степени повреждения лесов пожарами, представленный в разделе 1.3, основан на анализе наблюдений до и после действия пожаров. Такой подход позволяет получить довольно точные оценки повреждений, однако эта информация может быть получена только через некоторый период после завершения пожаров (иногда через несколько месяцев). Таким образом, данный метод не обеспечивает оперативность получаемых оценок.

Однако, такой долговременный ряд данных, содержащий информацию о повреждениях лесного покрова пожарами на территории РФ, может служить опорой при проведении исследования по установлению связи между интенсивностью горения пожаров и постпожарными повреждениями. Большой объем данных о повреждениях может позволить обеспечить достаточно представительную выборку сопоставленной информации, что в свою очередь обеспечит устойчивость результатов такого исследования.

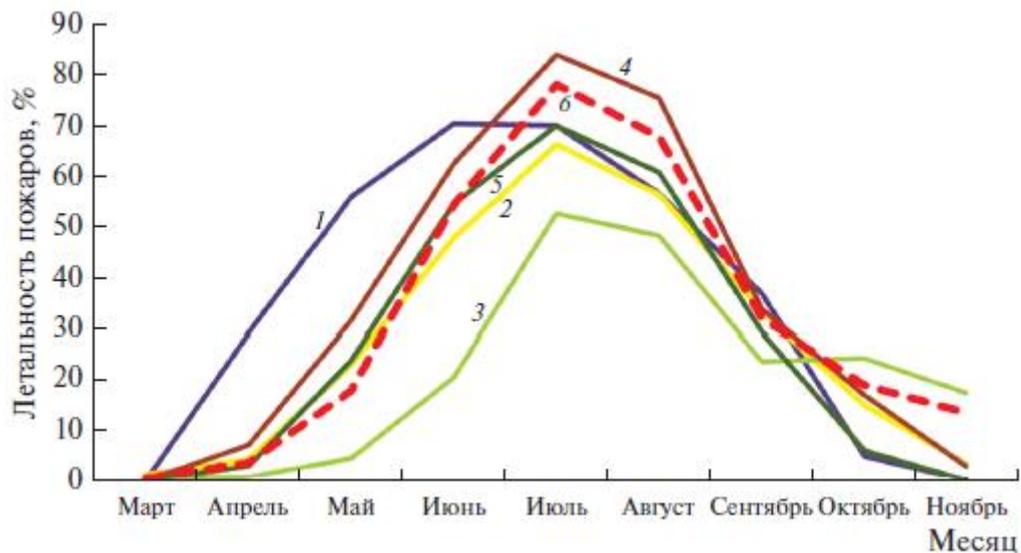


Рисунок 1.1 - Среднемноголетнее сезонное распределение летальности пожаров в лесах России, в том числе для различных групп древесных пород. 1 –

темнохвойный лес, 2 – светлохвойный лес, 3 – лиственный лес, 4 – хвойный листопадный лес, 5 – смешанный лес, 6 – все леса.

1.4 Оценка площадей пожаров на основе данных активного горения

Одной из традиционных задач глобального мониторинга лесных пожаров является получение оценок площадей, пройденных пожарами. В случае дополнительного требования оперативности получаемых оценок наиболее распространенным решением является метод, основанный на анализе результатов детектирования активного горения. Как было отмечено ранее, одним из наиболее достоверных информационных продуктов, содержащих информацию о ГТ с глобальным покрытием, является Collection 6 MODIS ActiveFire/HotspotData (MCD14DL)). Для оценки площадей пожаров так же необходима схема автоматического объединения ГТ в пожары. Такая схема, в частности, описана в (Лупян и др. 2017 Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке). Предложенная схема позволяет сделать переход от БД ГТ к БД пожаров, что позволяет получать геометрические оценки площадей пожаров. Однако, относительно низкое пространственное разрешение ГТ в 1 км и определенное количество пропусков активного горения пожаров в данных, приводит к возможным ошибкам в такой оценке (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др., 2003, 2016; Пономарев, Иванов, 2012; Пономарев, Швецов, 2015; Стыценко и др., 2016; Loboda, Csiszar, 2005). Таким образом, возникает необходимость в коррекции (перенормировке) таких оценок.

Подходы к решению такой задачи, в частности, представлены в работах (Барталев и др., 2012, 2014; Лупян и др. 2021). Эти подходы ориентированы на выполнение оценок площадей лесных пожаров, которые в целом менее быстротечные, чем нелесные пожары, и для них в значительной мере можно пренебречь эффектами, связанными с низкой частотой наблюдения. Предлагаемые подходы основываются на проведении сравнения геометрических площадей, получаемых на основе анализа контуров пожаров, полученных по

данным наблюдения активного горения и результатов картографирования гарей (площадей, пройденных огнём), получаемых на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения (10–30 м). В (Лупян и др. 2021) была сформирована выборка из 5474 пожаров, сопоставленных с гарями, общей площадью 9,0 млн га, включая 3,9 млн га лесной площади, которые наблюдались на территории России в период с 2009 по 2020 г. На основе анализа сопоставленных значений площадей пожаров было получено выражение, проводящее коррекцию площадей пожаров, оцененных по данным активного горения:

$$S_{i_{MOD_k}} = K(S_{i_{MOD}}) * S_{i_{MOD}} \quad (1.11)$$

Где $S_{i_{MOD_k}}$ — скорректированная площадь активного горения; $K(S_{i_{MOD}})$ — коэффициент коррекции, зависящий от значения геометрической площади полигона пожара $S_{i_{MOD}}$. Для получения зависимости $K(S_{i_{MOD}})$ была построена зависимость значений $K_{инт}$ от средних площадей пожаров в интервале (см. рисунок 1.2), которая для пожаров площадью от 800 до 80 тыс. га хорошо описывается уравнением:

$$K(S_{i_{MOD}}) = 0,009S_{i_{MOD}}^{0,21} \quad (1.12)$$

Для пожаров общей площадью более 80 тыс. га коррекция площадей фактически не требуется и описывается уравнением $K(S_{i_{MOD}}) = 1$.

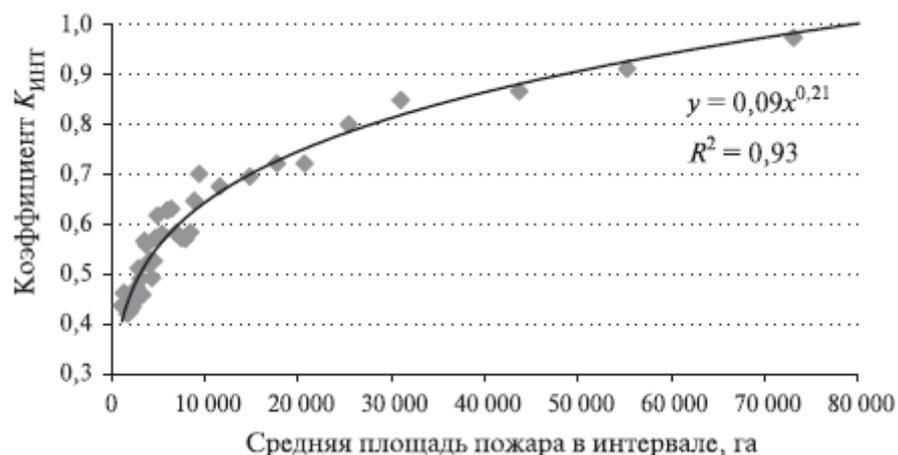


Рисунок 1.2 - Зависимость коэффициента $K_{инт}$ от средней площади пожара в интервале

Коррекция оценок площадей, пройденных пожарами, полученных по данным активного горения является задачей, где потенциально возможно использование данных FRP. Так как интенсивность горения пожара внутри пиксела связана с субпиксельной площадью, на которой фактически происходит горение, реализация такого подхода теоретически может привести к более точной коррекции оценок площадей, в сравнении с представленным методом.

1.5 Детектирование тепловых аномалий и их интенсивности по данным различных спутниковых систем

Измерение интенсивности горения прибором VIIRS

Как было отмечено в разделе 1.1, прибор VIIRS обладает специальным «пожарным» каналом 4 мкм с высокой температурой насыщения, что позволяет использовать данные прибора для оценки интенсивности горения пожаров. Глобальный информационный пожарный продукт VNP14IMG, формируемый на основе обработки данных VIIRS, содержит информацию о FRP. Для данного прибора FRP рассчитывается аналогично MODIS (см. формула 1.7), с отличием в эмпирической постоянной $a = 2.88 * 10^{-9} \text{Вт м}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{мкм}^{-1} \text{К}^{-4}$. В работе (Li 2018) проводилось сравнение измерений FRP, полученных по данным MODIS и VIIRS на предмет их однородности. При этом рассматривались данные, получаемые со спутников AQUA и SNPP, так как одни и те же участки Земли с этих спутников обозреваются в близкое друг к другу время. Было реализовано четыре различных подхода к сопоставлению. Для трех подходов за один год были отобраны ГТ с двух приборов, зарегистрированные в практически одинаковое время (разница меньше 5 минут) и на одной и той же территории. Первый подход представлял из себя изучение зависимости значения FRP от угла сканирования прибора. Оказалось, что FRP MODIS намного чувствительнее к углу сканирования, чем FRP VIIRS. Это связано с разной геометрией съемки – размер пиксела MODIS от надира к углу скана увеличивается практически в 10 раз, тогда

как для VIIRS такой показатель не превышает 4.5 раз. Другой способ сопоставления состоял в изучении разницы между дневными и ночными измерениями FRP. Для этого сопоставлялись только ГТ со временем детектирования 1:30 ночи и 1:30 дня местного времени (номинальное время пролета экватора для рассматриваемых спутников). В результате была установлена высокая степень корреляции в измерениях FRP дневных пожаров и меньшая степень для ночных пожаров, что объяснялось гораздо меньшими размерами и более низкой температурой пожаров, возникающих ночью, по сравнению с дневными. Для третьего подхода в 5 различных экосистемах вручную были отобраны порядка 600 пожаров, для которых были отобраны ГТ VIIRS и MODIS, имеющих небольшую разницу во времени детектирования (меньше 20 минут) и в угле сканирования (меньше 15 градусов). В результате оказалось, что для крупных пожаров в бореальных лесах Сибири суммарное FRP VIIRS оказывалось практически в 2 раза меньше, чем FRP MODIS. Авторы объясняют такое существенное различие для крупных пожаров более широкой полосой канала 4 мкм, пересекающуюся с окном поглощения углекислого газа. Четвертый подход представлял из себя сравнение сумм всех измерений FRP с отобранных ГТ двух приборов за год по всему миру в градусной сетке. Такое сопоставление снова обнаружило значимую разницу в измерениях FRP VIIRS и MODIS в бореальных лесах.

Таким образом, можно констатировать, что измерения FRP по MODIS и VIIRS неоднородны для больших пожаров в бореальной зоне, что требует более глубокого анализа для определения причин возникающей разницы.

Алгоритм детектирования тепловых аномалий MOD14

Необходимым условием обеспечения мониторинга пожаров является получение оперативной, достоверной и однородной информации по большим территориям. Как отмечено в работах многих авторов (см., например, Абушенко и др., 1998, Пономарев и др., 2017, Лупян и др. 2017, Пономарев и др. 2019), решение подобных задач возможно только при использовании полностью

автоматических алгоритмов детектирования пожаров. Одним из наиболее устойчивых и надежных автоматических алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным является алгоритм MOD14 (Justice et al. 2002; Kaufman et al. 1998; Giglio et al., 2003; 2016; 2020), рассчитанный на работу с данными прибора MODIS (Bobbe et al. 2002), установленного на спутниках TERRA и AQUA. Соответствующий данному прибору информационный продукт пожаров ((Collection 6 MODIS ActiveFire/HotspotData (MCD14DL)) (<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-realtime/firms/c6-mcd14dl>) доступен с 2000 года, имеет пространственное разрешение в 1 км и покрывает всю площадь Земли, при этом обладая высоким уровнем достоверности данных (Giglio et al., 2018). Использование данных MODIS позволяет наблюдать один пожар до двух раз за сутки, что примерно соответствует динамике распространения лесных пожаров. Благодаря всему вышеперечисленному, продукт Collection 6 является одним из самых широко применяемых как для глобального, так и для регионального мониторинга пожаров и решения широкого круга научных задач (например, Chen et al. 2013; Chuviesco et al. 2008; Ichoku et al. 2005; McCarty et al. 2007; Mollicone et al. 2006; Peterson et al. 2014; Vadrevu et al. 2012; Wooster et al. 2004, Lee et al. 2020).

Задачей алгоритма детектирования пожаров MOD14 является определение на анализируемых спутниковых изображениях горячих точек (ГТ) – пикселей, в которых наблюдается горение. Описание набора характеристик данных прибора, используемых в алгоритме, представлено в таблице 1.3. Подробно работа данного алгоритма описана в (Giglio et al., 2020), здесь будут лишь кратко перечислены его особенности. На первых этапах работы алгоритма для каждого изображения MODIS определяются потенциальные ГТ. Для этого вначале на данных фильтруются гарантированно ошибочные значения, после чего проходит выделение пикселей, покрывающих водную поверхность и облачность (см. табл. 4, Секция «маскирование облачности»). Из оставшихся пикселей с помощью набора тестов определяются потенциальные ГТ (см. Таблица 4, Секция «Определение потенциальных ГТ»). Для каждого такого пикселя рассчитываются

характеристики окружающего фона. Вначале из фона отбрасываются все пиксели, выделенные как облачные или водные. Затем из оставшихся выделяется высокотемпературная часть фона (см. таблицу 1.4, Секция «Перегретые точки»). Для перегретых точек их среднее значение и отклонения считаются отдельно, все оставшиеся пиксели используются для расчета статистики фона потенциального пикселя (T_4_mean , T_5_mean , DT_mean , T_4_mad , T_5_mad , DT_mad). Далее к каждой потенциальной ГТ применяется набор пороговых тестов. В случае успешного прохождения части из этих тестов (см. таблицу 1.4 Секция «Пороговые тесты»), пиксель помечается как ГТ. На последних этапах работы алгоритма все ГТ проверяются на предмет возможных ложных детектирований (ЛД), которые могут возникать вследствие высокой температуры подстилающей поверхности, бликов солнца и ложных срабатываниях на побережье.

Таблица 1.3 - Описание характеристик, используемых в алгоритме MOD14

Значения в каналах MODIS	
Характер истика	Спектральные диапазоны каналов MODIS [мкм] (номер канала)
R_1	0,62-0,67 (1)
R_2	0,841-0,876 (2)
R_3	2,105-2,155 (7)
T_4	3,929-3,989 (21/22)
T_5	10,78-11,28 (31)
T_6	11,77-12,27 (32)
Разностное значение и характеристики фона	
Характер истика	Краткое описание
DT	$T_4 - T_5$
T_4_mean ,	Средние значения фона вокруг

T ₅ _mean, DT_mean	рассматриваемого пиксела	
T ₄ _mad, T ₅ _mad, DT_mad	Абсолютное отклонение фона	среднее
Bkg_fire_ mad	Абсолютное отклонение высокотемпературной части фона	среднее

В таблице 1.4 приведен набор критериев, рассчитываемых для каждого пикселя изображения, которым должны соответствовать детектируемые ГТ (названия параметров (порогов) выделены жирным шрифтом). В таблице 1.5 представлены значения соответствующих параметров.

Таблица 1.4 Параметризованный набор тестов MOD14, использующий описанные в таблице 1.3 характеристики анализируемых точек для выявления ГТ

Секция	Тесты
Маскирование облачности	$R_1 + R_2 > \mathbf{cloud_r1r2}$ $T_6 < \mathbf{cloud_t6}$ $R_1 + R_2 > \mathbf{cloud_and_r}$ and $T_6 < \mathbf{cloud_and_t}$
Определение потенциальных ГТ	$T_4 > \mathbf{low_t4}$ and $R_2 < \mathbf{cloud_r2}$ and $DT > \mathbf{low_dt}$
Характеристика фона (Перегретые точки)	$T_4 > \mathbf{bkg_t4}$ and $DT > \mathbf{bkg_dt}$
Пороговые тесты	test1: $T_4 > \mathbf{hot_t4}$ test2: $DT > (DT_mean + \mathbf{sigma1} * DT_mad)$ test3: $DT > (DT_mean + \mathbf{deldt})$

test4: $T_4 > (T_4_mean + \mathbf{sigma2} * T_4_mad)$ test5: $T_5 > (T_5_mean + T_5_mad - \mathbf{del31})$ test6: $Bkg_fire_mad > \mathbf{minbkg}$ hotspot = test1 test2*test3*test4*(test5 test6 night)
--

Прибор VIIRS для задачи детектирования пожаров

Другим прибором, так же используемым для решения задачи детектирования пожаров, является VIIRS (Schroeder, 2017 Product User's Guide Version 1.3), установленном на спутниках Suomi NPP, NOAA-20 и NOAA-21. Прибор по своим спектральным характеристикам является аналогом MODIS, при этом ведя съемку

В

Таблица 1.5 - Набор значений параметров основных секций MOD14, использующихся для разных приборов

Параметр	MODIS Collection 6	VIIRS 375	VIIRS 750	SLSTR	MERSI-II
cloud_r1r2	1,2	0,9	0,9	0,9	-
cloud_t6	265 К	265 К	265 К	273 К/265 К	-
cloud_and_r	0,7	0,7	0,7	0,7	-
cloud_and_t	285 К	285 К	285 К	285 К	-
low_t4	300 К ²	295 К/ 325 К ¹	305 К/310 К (ночь/ день)	среднее по скану	-
cloud_r2	0,35	-	0,3	-	-
low_dt	10 К ¹	10 К/25 К	10 К	среднее по скану	-
bkg_t4	315 К/325 К	300 К/335 К	310 К/325 К	310 К/320 К	-
bkg_dt	10 К/20 К	10 К/30 К	10 К/20 К	20 К	-
hot_t4	320 К/360 К	-	320 К/360 К	326 К/360 К	-
sigma1	3,5	3/2	3,5	3,2/5	3,5
deldt	6 К	9 К/ 10 К	6 К	5,6 К/10 К	2 К -4 К
sigma2	3	3/3,5	3	3/5	3

² Для некоторых вариантов low_t4 и low_dt являются динамическими и считаются отдельно для каждого скана. В таблице приведены минимальные получаемые значения данных порогов

del31	4 К	4 К	4 К	-	-
minbkg	5 К	5 К	5 К	-	-

двух вариантах пространственного разрешения 750м и 375м (см. таблицу 1.2). Этим вариантам соответствуют два глобальных информационных продукта пожаров VNP14 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/vnp14v002/>) и VNP14IMG (<https://lpdaac.usgs.gov/products/vnp14imgv002/>), данные доступны с 2012 года. Оба продукта полностью основаны на алгоритме MOD14. Для продукта VNP14 используется копия MOD14 с частичными изменениями пороговых параметров (см. таблицу 1.5) (Schroeder and Giglio, 2017 Algorithm Theoretical Basis Document 1.0). Для продукта VNP14IMG (Schroeder et al. 2014 Algorithm description and initial assessment) алгоритм MOD14 был несколько доработан. Помимо изменения некоторых пороговых параметров (см. таблицу 1.5) была добавлена секция, обрабатывающая случаи, связанные с насыщением канала I4. Добавлены дополнительные условия для фильтрации ЛД на горячих поверхностях. Так же переработана секция определения потенциальных ГТ – исключена проверка видимого канала, оставшиеся условия сделаны альтернативными (or вместо and), при этом нижнее пороговое значение для дневных данных определяется при обработке статистики фоновых пикселей в окне 501 на 501, и лежит в диапазоне 325-330 К.

Таким образом, информационные продукты VNP14 и VNP14IMG технически являются практически полными аналогами MCD14DL. Однако разность в пространственном разрешении данных продуктов является существенным различием. Это приводит к неоднородности оценок характеристик пожаров, сделанных по разным наборам данных относительно друг друга. Тем самым, с точки зрения потенциального продления ряда пожарных данных по прибору MODIS, интерес представляют приборы с тем же разрешением в 1 км.

Прибор SLSTR для задачи детектирования пожаров

Прибор SLSTR (Polehampton et al. 2023)), установленный на спутниках Sentinel-3A,B, так же ведет съемку в схожих с MODIS диапазонах длин волн (см.

таблицу 1.2), при этом обладая тем же пространственным разрешением в 1км. С 2022 года по данным данного прибора выпускается информационный продукт SL_2_FRP (Product Data Format Specification - SLSTR Level 2 Fire Products 2021), так же созданный на основе алгоритма MOD14. Алгоритм был адаптирован поэтапно сначала для ночных (W. Xu, et al. 2020), а затем для дневных данных (W. Xu and M.J. Wooster 2023). В обоих случаях, так же, аналогично VNP14IMG, была переработана секция определения потенциальных ГТ. В секции так же было исключена проверка видимого канала, при этом пороговые значения для обоих условий определяются по среднему значению фоновых пикселей. Так же были изменены пороговые значения (см. таблицу 1.5). Главным нововведением для варианта детектирования по дневным данным стало использование синтетических данных ВТ, объединяющих данные каналов S7 и F1. Подобное решение так же используется и для данных MODIS, где данные 22 канала, меньше подверженные шумовым эффектам, при насыщении заменяются данными канала 21, имеющего высокую температуру насыщения в 500 К. Однако для данных канала F1 SLSTR характерен дефект, выражающийся в аномально низких температурах для сильно перегретых пикселей и аномально высоких температурах для очень холодных пикселей. Для устранения этого дефекта простой замены одного канала другим при достижении температуры насыщения оказалось недостаточно, из-за чего был создан отдельный алгоритм построения синтетических данных ВТ. Это позволило убрать ЛД, возникающие на дневных данных SLSTR, что привело к созданию сопоставимого с MCD14DL продукта.

Прибор MERSI-II для задачи детектирования пожаров

MERSI-II - еще один прибор, имеющий аналогичные MODIS спектральные характеристики (см. таблицу 1.2) и пространственное разрешение. Спектрорадиометр установлен на спутнике FY-3D, ему соответствует глобальный информационный продукт MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily) (https://fy4.nsmc.org.cn/data/en/support/dataset.html?code=FY3D_MERSI_GBAL_L2_GFR_MLT_GLL_YYYYMMDD_POAD_1000M_MS.HDF), доступный с апреля

2019 года. Алгоритм для данного продукта был так же переработан (Chen et al. 2022). В данном варианте изменения коснулись и осуществления обработки самих данных – для FY-3D данные разделяются на квадраты 5 на 5 градусов и обрабатываются отдельно. При этом тестовые проверки проходят все пиксели, секция определения потенциальных ГТ была исключена. Секция фильтрации облачности была фактически создана заново, с учетом специфики данных. Пороговые значения для определения высокотемпературной части фона рассчитываются динамично для каждого случая. В секции пороговых тестов были оставлены только тесты 2 и 4 (см. таблицу 1.5), с опциональной возможностью использования теста 3 при малых или больших значениях DT_{mad} .

Методы оценки качества пожарных продуктов

Важным вопросом, касающегося представленных информационных продуктов пожаров, является оценка их достоверности. Основным подходом валидации пожарного продукта, получаемого по данным MODIS, представленным в (Giglio et al. 2003) и усовершенствованным в (Giglio et al. 2016), является сопоставление с пожарами, определяемыми по данным с прибора ASTER (ASTER Users Handbook), установленного на спутнике TERRA. Это прибор, ведущий съемку в высоком разрешении 15м одновременно с MODIS. Таким образом, единственной неопределенностью такого способа оценки достоверности продукта по данным MODIS являются возможные ошибки определения пожаров по данным ASTER. Для данных этого прибора в (Giglio et al. 2008) описан алгоритм автоматического определения пожаров. Результат работы данного алгоритма в свою очередь был проверен визуально на 100 сценах ASTER, с декларируемыми близкой к нулю ошибкой ЛД и ошибкой пропусков порядка 15% на территории РФ. Необходимые для определения пожаров данные доступны с 2001 до мая 2007 года, когда из-за неисправности датчика стали недоступны данные в канале SWIR. За указанный период времени было

подобрано 2466 снимков ASTER с определенными на них пожарами и соответствующие им данные MODIS. Данные были сопоставлены, после чего для каждого пиксела снимка MODIS определялось соответствующее ему количество пикселей со снимка ASTER, помеченных алгоритмом, как пожарные. Затем ошибка пропусков определялась по доле количества пикселей MODIS, не помеченных MOD14 как пожарные, но имеющие определенное количество сопоставленных пожарных пикселей ASTER, относительно всех пожарных пикселей MODIS. В результате оказалось, что для размеров пожаров в 250 пикселей ASTER и больше такая ошибка устанавливается на уровне 5%. Ошибка ЛД определялась по доле пожарных пикселей MODIS, не имеющих сопоставленных пожарных пикселей ASTER. При этом для таких пикселей дополнительно определялось, обозревали ли они существующую гарь (может быть уже не горящую) или нет. Также определялось доля пиксела, заполненная биомассой, с помощью данных Hansen et al. (2003). В результате оказалось, что для данных Collection 6 MODIS такая ошибка для пикселей, более чем на 75% покрытых лесом, составляет порядка 6% при учете только случаев, обозревающих гарь (что косвенно можно допускать, как правильное детектирование), и 1,2% при учете только случаев, гарь не обозревающих. Отдельно ошибки пропусков и ЛД представлены для зоны, соответствующей территории РФ (15% и 1,5% соответственно).

Основной подход валидации информационного продукта пожаров VNP14IMG по данным VIIRS, представленный в (Oliva, Schroeder et al. 2015), так же представляет собой сопоставление с пожарами, определенными по данным высокого разрешения. Для этого использовались данные со спутника Landsat 8 с разрешением в 30м. В отличие от данных ASTER, пожары по данным Landsat 8 определялись по анализу изменений в NIR канале (0.85 - 0.88 мкм) до и после пожара ((Eva & Lambin, 1998; Key & Benson, 2005; Pereira, Chuviesco, Beudoin, & Desbois, 1997;)). В работе по всему миру было выбрано несколько областей, для которых подобраны соответствующие данные Landsat 8. В результате в каждой из областей за 2013 год (для одной области за 2014) было автоматически оконтурено

определенное количество гарей. Данные гари геометрически сопоставлялись с контурами, полученными объединением пожарных пикселей продукта VNP14IMG за это же время. Принимая области внутри контуров пожаров по данным Landsat 8 за ожидаемый результат детектирования, по доле областей, полученных по данным VIIRS, не сопоставленных с гарями по Landsat 8, оценивалась ошибка ЛД. Ошибка пропусков оценивалась по доле гарей Landsat 8, не сопоставленных с данными VIIRS. На территории РФ в работе было исследовано всего 7 пожаров определенных по данным Landsat 8, площадь большинства из которых была больше 5000 га. Для этих пожаров ошибка ЛД составила порядка 20%, а оценка пропусков порядка 25%. Такая сильная разница показателей качества с цифрами, полученными для MODIS связана с тем, что для VIIRS ошибка оценивалась геометрически, а для MODIS событийно. Далее будет отмечено, что площади пожаров получаемых по MODIS так же значительно отличаются от площадей пожаров, получаемых на основе данных высокого разрешения (см. раздел 1.5).

Для валидации пожарного продукта SL_2_FRP, получаемого по данным SLSTR, использовался подход, представленный в (Freeborn et al. 2014). Он основан на сопоставлении полученных ГТ с пожарными данными, полученными по MODIS. Для этого заранее подбираются пары сеансов, наблюдавших один и тот же пожар за небольшой временной интервал (для SLSTR +/-10 минут, W. Xu and M.J. Wooster 2023). Далее для таких сеансов берутся ГТ по двум приборам и проводятся два сопоставления. Сначала для всех ГТ MODIS по отдельности строится буфер радиусом в 1 пиксель (получается окно 3 на 3 вокруг ГТ MODIS; для SLSTR радиус был увеличен до 3 и окно было размером 7 на 7). ГТ MODIS считается сопоставленной, если в ее буферной зоне была найдена хотя бы одна ГТ SLSTR. Таким образом, ошибка пропусков SLSTR относительно ГТ MODIS определяется как отношение несопоставленных ГТ MODIS ко всему их количеству. Далее наоборот, для всех ГТ SLSTR строится такая же буферная зона и аналогично ищется сопоставление с ГТ MODIS. Ошибка ЛД SLSTR относительно MODIS определяется как отношение несопоставленных ГТ SLSTR

ко всему их количеству. При этом для обоих приборов исключались ГТ с большим углом сканирования, максимальная площадь пиксела обоих приборов достигала 1,7 км. Такой эксперимент был проделан за март 2022 года и для 3380 ГТ MODIS сопоставилось 70% ГТ SLSTR, а для 4610 ГТ SLSTR сопоставилось 84% ГТ MODIS. Таким образом, ошибки пропусков и ЛД составили 30% и 16% соответственно. Важно отметить, что в оригинальном методе отдельно оценивалось количество ГТ MODIS, попавших на облачность снимка другого прибора. Тем самым, ошибка пропусков корректировалась. Для SLSTR этого проделано не было.

Глобальный информационный продукт пожаров MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily) проверялся несколькими способами (Chen et al. 2022). Первым из них являлась визуальная проверка 2188 ГТ, полученных по прибору MERSI-II за 2018-2019 года в различных регионах мира. В результате 94% были признаны правильными (зафиксированными не дальше, чем в радиусе 0.02 градуса от опознанного пожара), ошибка ЛД составила 6%. Второй способ, как и в случае с SLSTR, основан на сравнении с данными MODIS. ГТ MERSI считалась сопоставленной если в радиусе 0.03 градуса обнаруживалась ГТ MODIS, при этом отличающая по времени детектирования не более, чем на 1 час. Обратное сопоставление (MODIS к MERSI) не проводилось, поэтому далее приводятся только ошибки ЛД. Данное сопоставление было изучено в разных фильтрах – сначала сопоставления искались для всех точек FY-3D, зафиксированных по всему миру за 2019 год. Оказалось, что 1866920 точек не сопоставилось 370794, ошибка ЛД таким образом составила 17,6%. Помимо этого, сопоставление было проведено для каждого месяца. Оказалось, что самая маленькая ошибка ЛД наблюдалась в Июле (10%), а самая большая в Апреле (29%). Так же сопоставление проводилось для различных типов территории, наиболее низкий процент ошибки (7%) наблюдался для различных лесных территорий. Наконец сравнение ошибок для различных глобальных регионов показало, что самый низкий процент ошибок ЛД характерен для Азии (20%), одновременно с тем, что отдельно в Китае наблюдался самый большой процент ошибки ЛД (35%). Третий

способ валидации пожарного продукта по данным MERSI-II состоял в эксперименте, проведенном на южных территориях Китая. Он состоял в том, что в 2020 году пожарный мониторинг в этих регионах осуществлялся дронами, что позволило сформировать независимый набор пожарных данных. Этот набор был сопоставлен с продуктами пожаров по MERSI-II и MODIS. В результате оказалось, что для MERSI-II 1201 ГТ были подтверждены, 133 ГТ были потенциально пропущены, а 172 ГТ были не сопоставлены с данными дронов. Для MODIS данные показатели равнялись 1201, 112 и 306 соответственно. Таким образом, ошибка пропусков была оценена в 10% для MERSI-II и 8,5% для MODIS; ошибка ЛД 12,5% и 20,3% соответственно.

Актуальные задачи

На сегодняшний день информационный продукт MCD14DL, получаемый по данным MODIS, позволяет осуществлять оперативный контроль за пожарной активностью в объеме, соответствующем требованиям глобального мониторинга лесных пожаров, в силу его высокой степени достоверности и доступности данных с 2000 года. Однако, в 2023 году в связи с опустением запасов топлива планово была прекращена эксплуатация спутников TERRA и AQUA (Request for Information for NASA's Terra, Aqua, and Aura Data Continuity Workshop), являющихся единственными носителями прибора MODIS. Таким образом, в 2026-2027 годах данные с MODIS станут недоступны, до этого периода так же ожидается их деградация. Данный факт ставит вопрос о полноценной замене данного источника данных.

Имеющиеся на сегодняшний момент альтернативные информационные продукты пожаров в силу различных причин не могут в полной мере полноценно заменить данные Collection 6 MODIS. Проблемой прямого наследника MODIS VIIRS на первый взгляд парадоксально является более высокое разрешение прибора. Данное отличие является причиной неоднородности данных двух источников, что приводит к возникновению различий при оценке площадей, пройденных огнем. Таким образом, переход с данных MODIS на данные VIIRS

требует проведения большого объема работ по созданию схем приведения данных VIIRS к сопоставимому с данными MODIS виду. Информационные продукты пожаров, созданные на основе данных SLSTR и MERSI-II, в версиях, сопоставимых с Collection 6 MODIS, доступны с относительно недавнего времени (W. Xu and M.J. Wooster 2023; Chen et al. 2022), что требует дополнительной проверки достоверности получаемого результата. Такое положение дел делает актуальной задачу о поиске других возможных источников данных для оперативного детектирования ГТ.

Как было показано ранее, на борту отечественных метеорологических спутников Метеор - М №2-2, №2-3, №2-4, функционирует прибор МСУ-МР, который ведет съемку в 6 спектральных диапазонах, аналогичных каналам MODIS (см таблицу 1.2). Данные МСУ-МР имеют примерно такое-же пространственное разрешение, как и данные прибора MODIS, которые используются для детектирования пожаров (около 1 км). Орбита спутников Метеора – М №2-2, №2-4 примерно соответствует орбите спутника AQUA, орбита Метеора – М №2-3 – орбите TERRA. Все это позволяет считать, что возможности прибора МСУ-МР в целом сопоставимы с возможностями прибора MODIS, использующимися для решения задачи детектирования пожаров.

Тем самым, с целью потенциальной замены Collection 6 MODIS, встает задача обобщения примененных ранее подходов к адаптации MOD14 для создания общей схемы. Далее такую схему предлагается использовать, чтобы, во-первых, сделать применимым MOD14 для работы с данными МСУ-МР, а во-вторых, провести адаптацию MOD14 для данных MERSI и SLSTR, чтобы улучшить качество получаемого по этим приборам результата детектирования.

Такая задача в свою очередь делает необходимым создание универсальной единой схемы оценки качества информационных пожарных продуктов. Текущие решения являются независимыми для различных приборов, из-за чего отсутствует фактическая возможность сравнения их показателей качества. Так же во всех предложенных методах (кроме оценок для MERSI-II) использовался весьма ограниченный набор данных, что, во-первых, вызывает вопросы в возможности

обобщения получаемых оценок качества на весь набор пожарных данных, а во-вторых, не предоставляет возможности оценивать качество данных в реальном времени. Еще одной важной нерешенной проблемой существующих схем, основанных на сопоставлении с данными других приборов, является неопределенность при сопоставлении ГТ, получаемых со снимков приборов за разное время. Даже небольшая разница во времени (<10 минут) может привести к тому, что активное горение, наблюдаемое на сеансе одного прибора, станет закрыто облачностью или просто закончится во время съемки другим прибором. Последнее наиболее актуально для нелесных пожаров. Таким образом, отсутствие сопоставления для ГТ может быть обусловлено объективными причинами и не объясняться ошибкой детектирования. Тем самым получаемые оценки точности могут оказываться существенно ниже фактических.

Заключение к 1 главе:

Спутниковый мониторинг пожаров является актуальной темой, в рамках которой выполнено значительное число работ. В то же время остается целый ряд задач, не имеющих завершенных решений, к которым, в том числе, следует отнести следующие:

- Несмотря на то, что исследованию вопроса связи степени повреждения лесов с наблюдаемой интенсивностью горения (FRP) посвящено множество работ, в силу недостаточности информации, используемой для построения таких связей (данные, полученные по ограниченному числу тестовых полигонов), в целом остается открытым вопрос о получении таких зависимостей для пожаров в различных типах лесов и различные сезоны года. Это в свою очередь затрудняет построение и использование таких связей для получения оценок площадей погибших лесов на больших территориях. В тоже время следует отметить, что сейчас существует достаточно много информации о постпожарных повреждениях лесного покрова, которая может быть использована для получения обсуждаемых связей и зависимостей.

- Отсутствует разработанная и реализованная методология полностью автоматизированной обработки данных для получения как постпожарных, так и оперативных оценок повреждений лесов на основе данных о FRP на всей территории России с учетом типа лесного покрова, на котором действовал конкретный пожар, и сезона его действия.

- Актуальной остается задача адаптации методов и алгоритмов обработки данных для оценки характеристик лесных пожаров, созданных для конкретных спутниковых систем, к работе с данными других аналогичных систем. Это касается как методов оценок повреждений, так и детектирования моментов активного горения. При этом особое значение имеет задача адаптации различных методов к данным российских спутниковых систем, в первую очередь, к данным прибора МСУ-МР (спутники серии Метеор М).

Поэтому настоящая работа была посвящена решению задач в данных актуальных направлениях.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ОЦЕНОК ПЛОЩАДЕЙ ВОЗМОЖНОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА MODIS

Настоящая глава посвящена исследованию связи интенсивности горения и степени повреждения лесов, связанных с действием пожаров. При этом как мера интенсивности пожара используется FRP, нормированная на площадь элемента наблюдения (далее FRPS). В ней представлен метод, позволяющий строить зависимости повреждения лесного покрова от FRPS. В методе используется информация о FRPS, получаемая на основе баз данных, сформированных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) с помощью данных прибора MODIS о наблюдении горения на территории России (см. например, Лупян и др. 2021, Галеев и др. 2005) и информации о степени повреждения лесного покрова на основе сравнения его состояния до и после пожаров, описанного в (Стыщенко и др. 2013). В главе представлено применение

метода к набору данных, полученных по всей территории России за период с 2006 по 2021 годы. Представлен анализ значительного числа участков (более 10 млн точек), в которых имеется информация о FRPS наблюдавшегося горения и информации о степени повреждения лесного покрова. При этом по каждому анализируемому участку (точке) также анализировалась информация о времени (сезоне), в которое действовал пожар, и преобладающем типе лесного покрова. Наличие данной информации и представительной статистики позволило получить вероятности гибели лесов от интенсивности пожара с учетом типа лесного покрова и времени (сезона) действия пожара. В главе представлены полученные зависимости и краткий анализ их особенностей.

Также в главе предложен метод оперативной оценки площадей погибшего лесного покрова на основе использования полученных зависимостей. Приведена оценка площадей погибших в различные годы лесов на территории РФ и проведено сравнение данной информации с оценками, полученными на основе сравнения наблюдений до и после пожаров.

В главе также представлено описание метода оценки площадей, проходимых пожарами на основе анализа наблюдаемой интенсивности горения и числа наблюдений горения отдельных пикселей.

В конце главы представлено описание алгоритма автоматизированной оперативной оценки повреждений лесов по данным спутниковых наблюдений интенсивности горения.

2.1 Оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения в период действия пожара

Используемые данные

В работе использовалась информация об интенсивности горения, повреждениях лесов пожарами и типах лесного покрова, накопленная в архивах Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). При этом использовались данные по всей территории России за период с

2006 по 2021 годы. Особенности этих данных кратко описаны в настоящем разделе.

Данные об интенсивности горения.

В работе использовалась база данных (БД) с информацией о природных пожарах, которые были детектированы на территории России в период с 2001 по 2021 годы, сформированной на основе архива наблюдения «горячих точек» (ГТ), детектированных на основе шестой коллекции данных приборов MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL)) (<http://earthdata.nasa.gov>). Особенности построения данной БД достаточно подробно описаны, в частности, в (Галеев и др., 2005). Данная БД содержит в том числе, информацию о всех ГТ на территории России за обсуждаемый период. Для каждой ГТ в БД имеется информация о FRP, наблюдавшейся в данной точке.

Как уже отмечалось, FRP характеризует поток энергии, приходящей со всей площади отдельной ГТ (пиксела). Поэтому изменение площади пиксела для «однородно горящей» территории должно приводить к росту FRP по сравнению с наблюдающимся для пикселов более малых размеров. Для того, чтобы можно было сопоставлять в анализе информацию, приходящую от пикселов разного размера, необходимо использовать не значение FRP, а это значение, поделенное на площадь пиксела (FRPS), т.е. не суммарный поток энергии от пиксела, а удельный поток с единицы площади для наблюдаемой ГТ. Этот факт отмечался в различных работах, например, в работе (Пономарев и др., 2017).

Данные о степени повреждения лесов пожарами

В работе использовалась также информация о степени повреждения лесов пожарами, полученная на основе подходов, предложенных в работах (Стыценко и др., 2013, Барталев и др., 2015). Использована БД повреждений на территории России за период с 2006 по 2021 год.

Информация о лесном покрове.

Для анализа повреждений пожарами лесов различных типов использовалась информация о преобладающем типе лесного покрова, получаемая по данным прибора MODIS на основе подходов, подробно описанных в работах (Уваров и

др., 2010, Барталев и др., 2011). В работе использовался ежегодно обновляемый ряд карт по всей территории РФ, содержащий информацию об основных типах лесного покрова (Барталев и др., 2016).

Метод обработки данных космических наблюдений для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения

При сопоставлении информации о FRPS и постпожарных повреждениях лесов следует учитывать, что эти данные имеют различную логику наблюдений и различное пространственное разрешение. Поэтому оба вида информации необходимо привести к представлению, позволяющему проводить их сопоставление.

Проблема различной логики наблюдений связана с тем, что горение может наблюдаться в одной и той же точке некоторое время. При этом для таких точек будет иметься не одно измерение FRPS, а несколько. В то же время информация о постпожарном повреждении лесов формируется как одно значение для заданной точки. Таким образом, фактически требуется сопоставить временной ряд FRPS с «одномоментными» данными о повреждениях лесного покрова. Для проведения такого сопоставления было предложено проводить сопоставление максимального значения FRPS в ряду наблюдений для конкретного пожара со значением постпожарного повреждения лесного покрова. Логика такого сопоставления основывается на том, что в момент максимальной интенсивности горения происходит «максимальное» повреждение леса на анализируемом участке. Именно этот уровень повреждения и будет оценен по завершению пожара по спутниковым данным.

Для реализации такого сопоставления было предложено для каждого пожара после его завершения осуществлять построение постпожарных карт FRPS. Каждой точке такой карты приписывается максимальное значение FRPS, зарегистрированное за время действия пожара или за пожароопасный сезон (с учетом того, что фактически информация постпожарных повреждений, которая

использовалась для проведения сопоставления, также фактически является интегрированной информацией за весь сезон).

Отметим, что описанная выше информация о лесном покрове и его повреждениях получается на основе данных прибора MODIS и хранится в растровом виде в равновеликой конической проекции Альберса с размером одного пикселя 230 метров. Для максимально точного сопоставления разных данных постпожарные карты FRPS строились в той же проекции и разрешении, хотя изначально разрешение данных в каналах, которые используются для детектирования горения, не лучше 1,1 на 1,1 км. Таким образом, в области каждого пожара имеется ряд различных данных (растровых карт) для сопоставления. Пример таких карт для конкретного пожара представлен на рисунке 2.1.

После приведения всех данных в один вид, появилась возможность попиксельного сравнения полученных слоев для каждого года. Это позволило проводить простое сопоставление между FRPS, СКС и типом лесного покрова. Общая схема метода обработки данных космических наблюдений для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения представлена на рисунке 2.2.

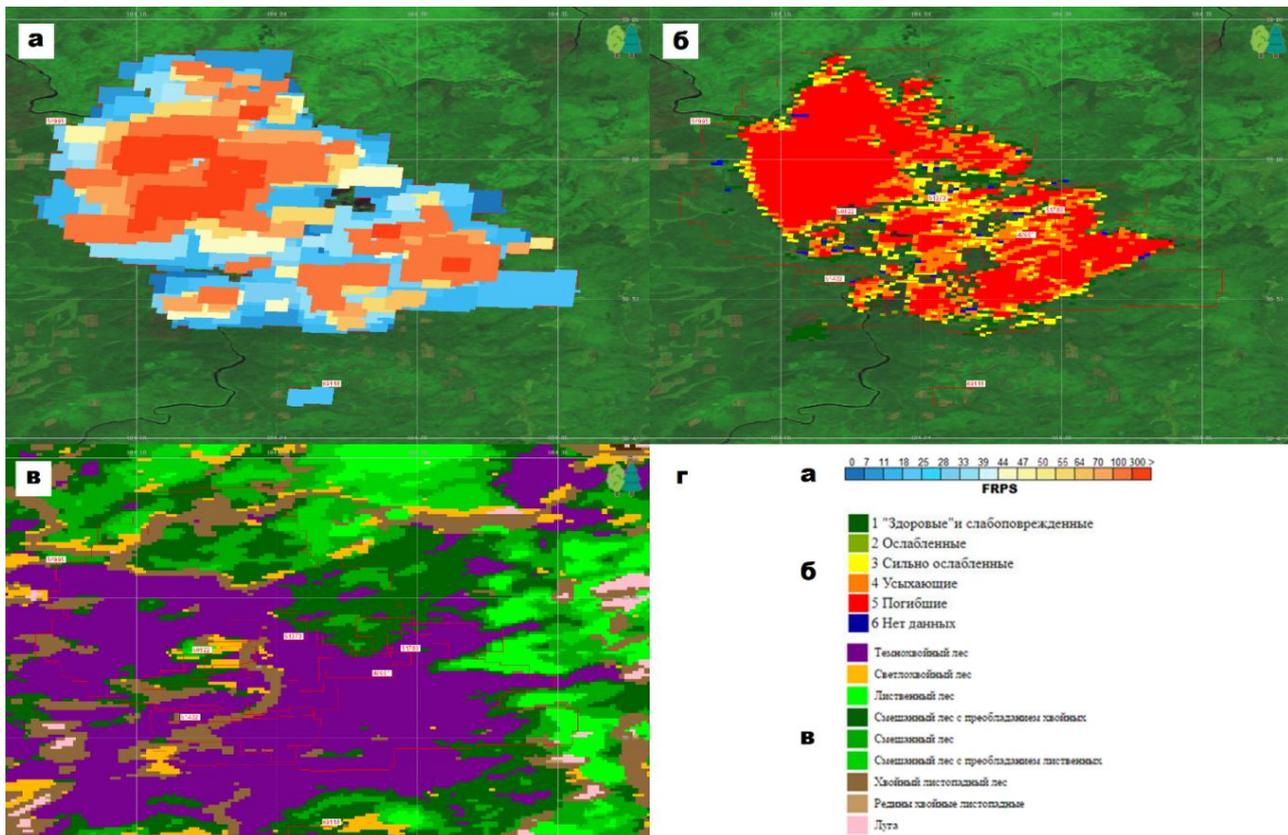


Рисунок 2.1 - Пример сопоставляемых растровых карт для области пожара, действовавшего на территории Тунгусско-Чунского района Красноярского края в период с 5 по 13 августа 2018 года» а) постпожарная карта FRPS, б) карта СКС, в) карта типов лесного покрова, г) легенды карт

Анализ связи степени повреждения лесов и FRPS

Описанный в предыдущем разделе метод позволил провести массовое сопоставление информации о FRPS, наблюдавшихся во время действия пожаров со степенью повреждения лесов на участках горения. Такое сопоставление было проведено для наблюдений по территории РФ за период с 2006 по 2021 год. Всего было проанализировано около 36 млн точек построенных постпожарных карт, в которых имеется информация о FRPS. Для этих точек был определен класс повреждений и тип лесного покрова. Следует отметить, что точки, в которых был зафиксирован FRPS, но отсутствовало значение СКС относились к классу неповрежденных лесов («здоровое насаждение»). Различные зависимости, которые были получены в результате данного сопоставления, представлены в настоящем разделе.



Рисунок 2.2 - Схема метода обработки данных космических наблюдений для оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения

Распределения FRPS для разных классов поврежденных лесов пожарами.

Анализ распределений наблюдаемых FRPS для точек, относящихся к различным классам категорий состояния лесного покрова, приведены на рисунке 2.3. Здесь и далее первый и второй класс будут объединены. Это связано с тем, что в используемых наборах данных об СКС эти классы достаточно слабо разделяются. Хорошо видно, что распределения для разных классов достаточно сильно различаются. Для классов, соответствующих сильным повреждениям, распределения смещаются в сторону более высоких значений FRPS (включая положения пиков). Также наблюдается устойчивый рост средних значений FRPS по мере увеличения класса повреждений (см. таблицу 2.1). Особенно сильно сдвинуто в область больших FRPS распределение для пятого класса, соответствующего погибшему в год пожара лесам. Также среднее значение FRPS для пятого класса повреждений лесов значительно выше, чем для других классов. В целом все это подтверждает вывод, сделанный многими исследователями, о существовании устойчивой связи между интенсивностью горения и степенью повреждения лесов. В то же время следует отметить, что представленные распределения показывают, что не существует какого-то однозначного порога FRPS, после которого лесной покров следует считать погибшим, а до которого только поврежденным. Хорошо видно, что даже при достаточно малых значениях FRPS (<50) может наблюдаться гибель лесного покрова и она может быть существенной. В то же время даже при достаточно больших значениях FRPS (около 100) на части территорий может не наблюдаться «полной гибели» лесного покрова (присутствовать не только пятый, но и другие классы). Эти эффекты видимо отчасти могут объясняться достаточно тем, что в пикселе прибора MODIS, по которому производится оценка FRPS, может происходить горение только части территории. В целом данные эффекты, на наш взгляд, нельзя не учитывать. Поэтому целесообразно для проведения оценок повреждения лесов на основе анализа наблюдаемой интенсивности горения не пытаться найти пороговые значения FRPS, соответствующие разным классам, а оценивать

вероятность наблюдения разных классов для конкретной наблюдаемой интенсивности горения (FRPS).

Вероятностные кривые гибели растительности по значению FRPS

Поскольку наибольшее значение в задачах оценки последствий лесных пожаров представляет оценка гибели лесного покрова от пожаров, в данной работе мы далее сосредоточимся на анализе именно этой проблемы. На основе имеющихся результатов сопоставления FRPS и классов СКС лесов была построена зависимость вероятности гибели (наблюдения пятого класса) леса в зависимости от интенсивности наблюдавшегося горения. Для этого были выбраны интервалы FRPS, внутри которых за все годы было зарегистрировано примерно одинаковое количество горячих точек с соответствующим значением FRPS (под горячей точкой понимается пиксель постпожарной карты FRPS). Далее внутри каждого из этих интервалов рассчитывалась доля содержания горячих точек, в которых наблюдалась гибель леса (пятый класс). Получившиеся значения долей приписывались верхним границам созданных диапазонов. Полученная информация позволяет построить зависимость вероятности гибели леса (наблюдения пятого класса) от значения FRPS. Эта зависимость представлена на рисунке 2.4. На полученной зависимости хорошо видно увеличение вероятности гибели с увеличением интенсивности горения пожара (максимального значения FRPS в анализируемой точке пожара за все время его действия).

В то же время достаточно хорошо известно, что уровень гибели лесов от пожаров может зависеть от различных факторов, например, периода в пожароопасном сезоне, в который действовал пожар (см., например, Барталев, Сыценко 2021) и породной структуры лесов, в которых действуют пожары (Барталев и др., 2017). Поэтому нами был проведен анализ зависимостей вероятностей гибели лесов с учетом данных факторов.

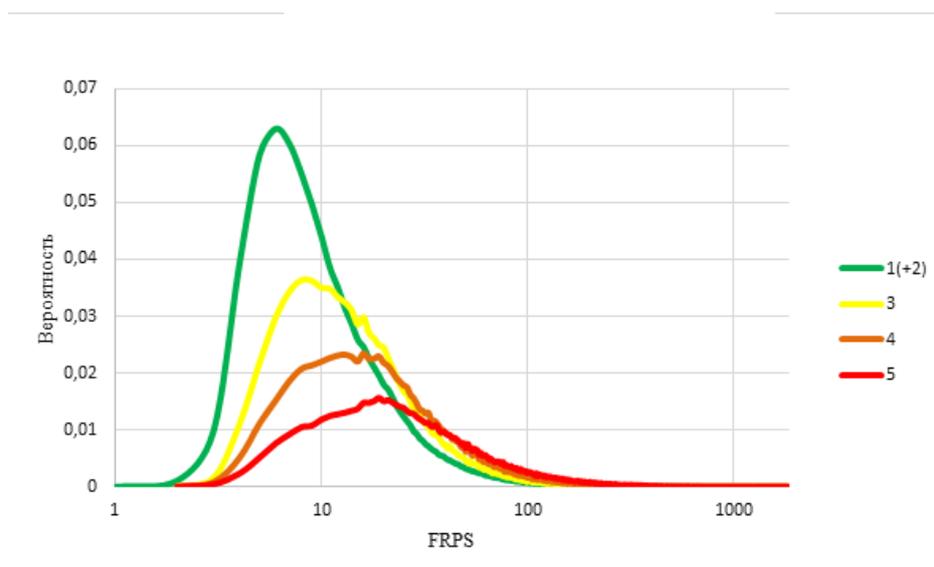


Рисунок 2.3 - Распределение FRPS горячих точек с 2006 по 2021 на территории РФ различных классов категорий состояния лесного покрова. Распределения нормированы на общее число точек в соответствующем классе.

Таблица 2.1 - Среднее значение FRPS для различных классов категории состояния

Класс СКС	среднее FRPS
1(+2)	31,4
3	37,8
4	56,4
5	117,0

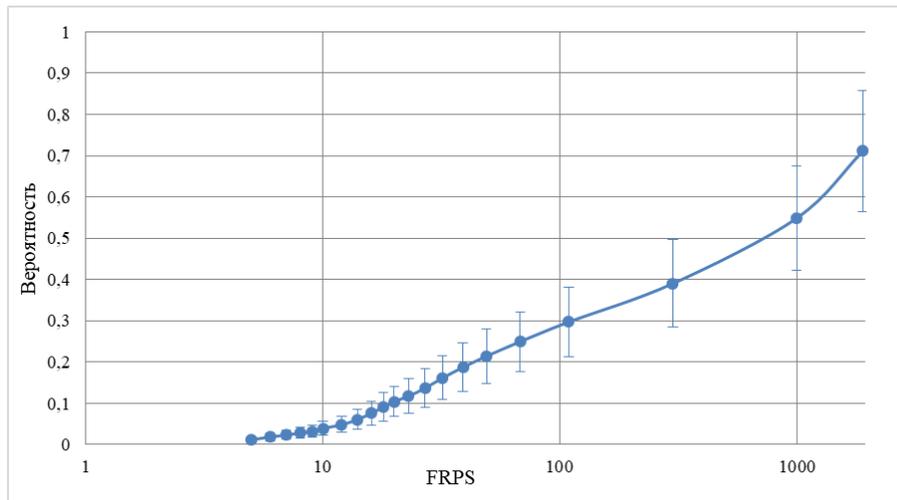


Рисунок 2.4 - Вероятность гибели леса (пятого класса состояния) от интенсивности горения (FRPS). На графике отображено стандартное отклонение значений, полученных в различные годы от среднего значения вероятности гибели за весь анализируемый период (2006 – 2021 годы)

На рисунке 2.5 представлены зависимости, полученные для «весенних» (действовавших в период до 15 июня) и летних (действовавших в период после 15 июня) пожаров. На этих зависимостях хорошо видно, что вероятность гибели леса при тех же значениях FRPS в весенний период ниже, чем в летний. Это может быть связано в том числе с тем, что в весенний период значительный вклад в наблюдаемый тепловой поток дают быстро распространяющиеся низовые пожары, а в летний период высокие FRPS в основном, видимо, соответствуют верховым пожарам, которые приводят к значительной гибели леса. Это в целом согласуется с объяснением особенностей распределения по FRPS точек, в которых наблюдается гибель растительного покрова (5 класс СКС) для весенних и летних пожаров, представленного на рисунке 2.6. На нем хорошо видно, что доля погибших лесов для весенних пожаров смещена в область достаточно малых FRPS, что, видимо, связано с относительно низкой гибелью лесов в весенний период и большим числом пожаров с малыми FRPS. При этом следует учитывать, что как показал анализ имеющихся данных (информация наблюдений с 2001 по 2021 годы), для весенних пожаров только около 3% точек, в которых наблюдалось

горение (есть измерения FRPS), соответствовали 5 классу СКС. Для летних пожаров это значение возрастает до примерно 20%.

На рисунке 2.7 представлены зависимости вероятности гибели лесов от пожаров для основных групп древесных пород, встречающихся на территории России. На представленных графиках также хорошо видно, что на зависимость вероятности гибели лесов от интенсивности пожара достаточно сильное влияние оказывает породная структура поврежденного огнем насаждения. Отметим, что при оценке устойчивости той или иной породы к воздействию пожаров следует учитывать не только вероятность гибели леса в зависимости от FRPS, но и вероятность наблюдения высоких FRPS в лесах конкретного типа. Именно два этих фактора в совокупности в конечном итоге определяют процент повреждения лесов конкретного типа.

На рисунке 2.8 представлены зависимости, полученные при одновременном учете как периода, в который действует пожар, так и преобладающей породы на территории действия пожара. При этом важно отметить, что устойчивость полученных зависимостей подтверждает оправданность подхода использования максимального значения FRPS в точки на этапе сопоставления данных интенсивности горения с данными о постпожарных повреждениях.

Далее полученные зависимости были использованы при создании метода оперативной оценки гибели лесов от пожаров на основе наблюдений интенсивности горения.

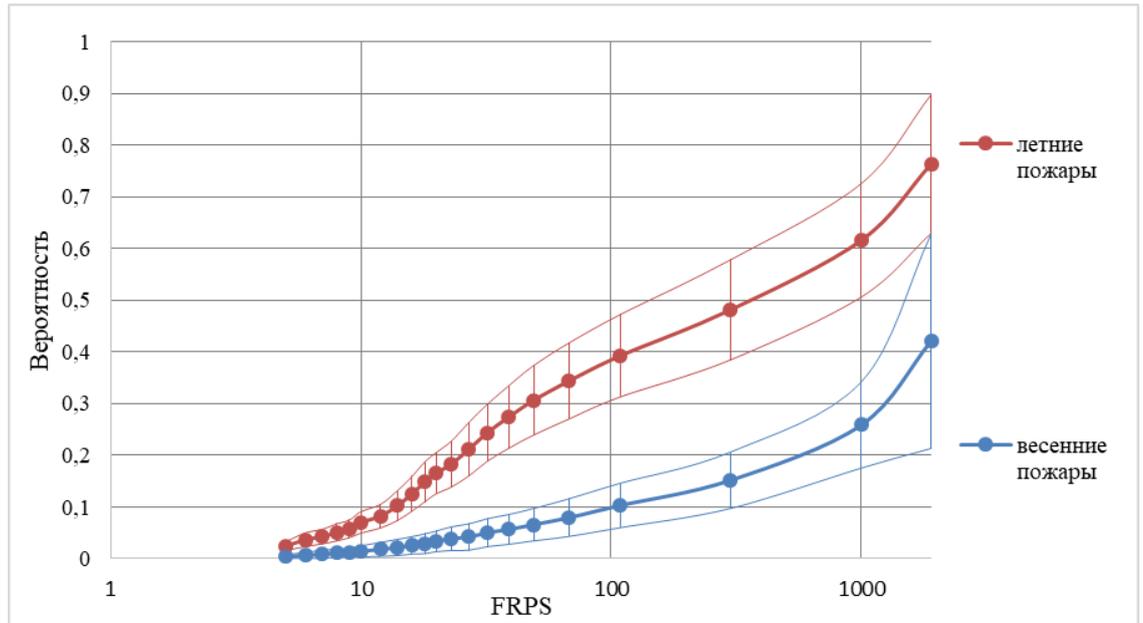


Рисунок 2.5 - Вероятность гибели лесов при различных значениях FRPS в зависимости от сезона

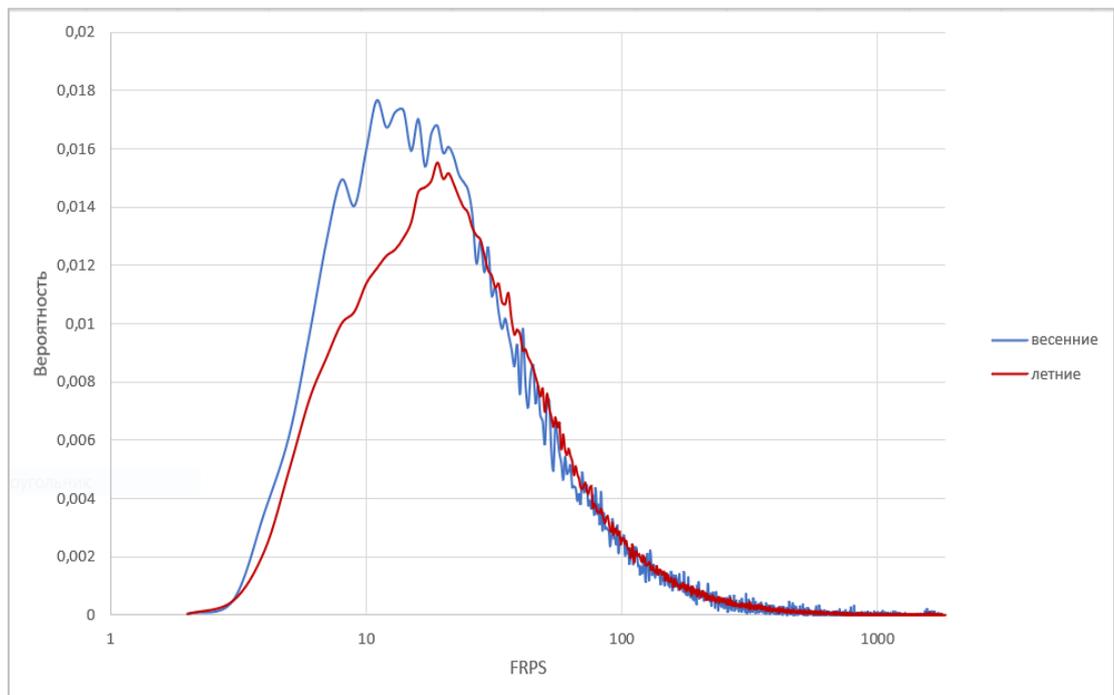


Рисунок 2.6 - Распределение по FRPS точек, в которых наблюдается гибель лесов (5 класс СКС), для весенних и летних пожаров

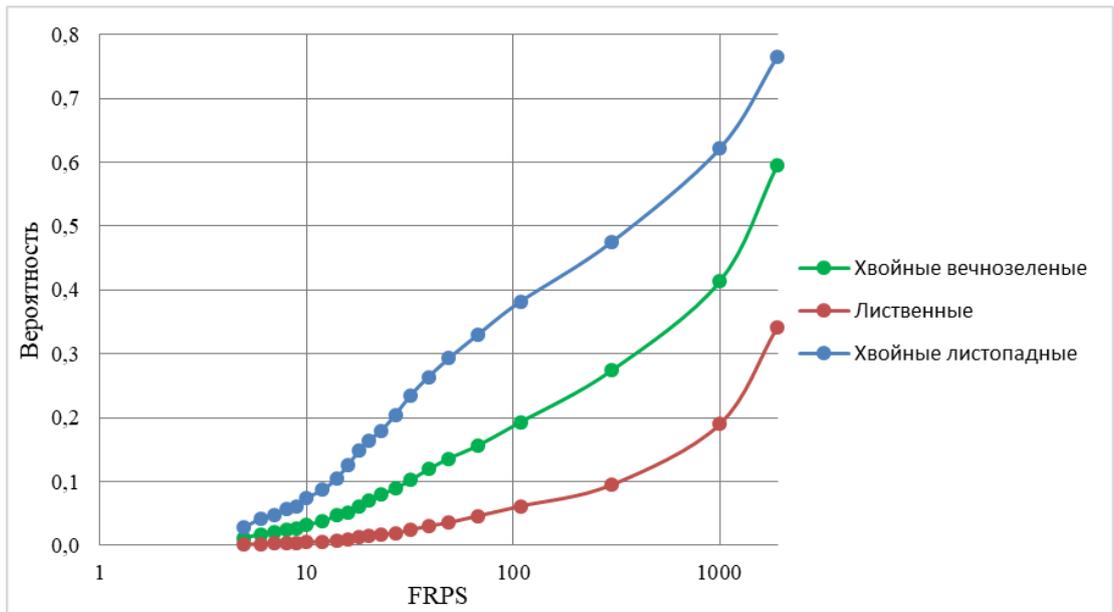


Рисунок 2.7 - Вероятность гибели лесов разных групп древесных пород в зависимости от интенсивности пожаров (FRPS)

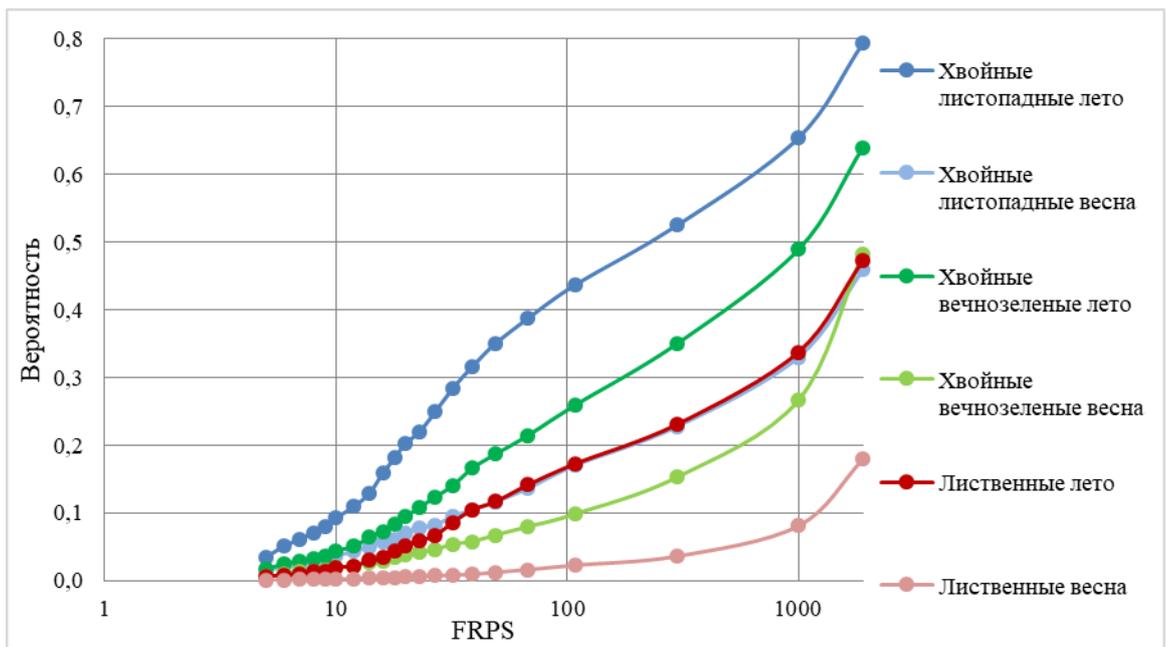


Рисунок 2.8 - Вероятность гибели леса от интенсивности горения (FRPS) с учетом сезона и групп древесных пород на территории действия пожара

2.2 Оценка повреждений лесного покрова пожарами на основе оценок вероятности гибели лесов

Используя полученные зависимости вероятности гибели лесов от FRPS с учетом времени действия пожара и группы древесных пород поврежденных огнем насаждений, предложен следующий метод (см. рисунок 2.9) обработки данных космических наблюдений для полностью автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами (лесов, в которых наблюдается 5 класс СКС). С использованием постпожарных карт FRPS, по информации о типе растительности и месяце пожара для каждой точки (пикселей) карты выбирается соответствующая вероятностная кривая, определяющая зависимость между FRPS и вероятностью гибели леса внутри ячейки карты. Полученная по FRPS вероятность умножается на площадь ячейки карты (5,9 га), в результате чего получается площадная оценка погибшей растительности в точке. Такой подход основан на предположении, что в конкретном пикселе происходит гибель не всего лесного покрова, а только его части, в зависимости от значения FRPS, которое наблюдалось в пикселе.

При получении оценок площади погибших лесов на основе постпожарных карт FRPS следует также учитывать, что не вся территория пиксела, полученная по данным прибора MODIS, может быть покрыта лесом. Поэтому для каждого пиксела следует учитывать лишь покрытую лесом площадь, находящуюся в нем. С целью коррекции оценок был проведен следующий эксперимент – площадь погибшей растительности на территории РФ была посчитана с использованием маски леса высокого разрешения (около 27 на 27 метров) Hansen (Hansen et al., 2013), полученной по данным спутников Landsat. На основе сравнения полученных с помощью карт разного разрешения оценок с 2002 по 2017 год (таблица 2.2) был выведен коэффициент коррекции $K_{forest}=0,81$, на который так же умножается получаемая оценка погибшей растительности в точке. Таким образом, площадь погибшей растительности в ячейке карты FRPS рассчитывается по формуле (2.1)

$$S_{dam} = S_{pix} * K_{forest} * P_{dam}(FRPS, month, terr_type) \text{ [га]} \quad (2.1)$$

$$S_{dam} = 4,285 * P_{dam}(FRPS, month, terr_type) \text{ га}$$

Далее оценка суммируется по всем ячейкам карты FRPS в результате чего получается интегральная оценка площадей погибшей растительности на территории РФ. Следует отметить, что использование при таком расчете зависимостей вероятности гибели лесов от значения FRPS, учитывающие сезон действия лесных пожаров и тип (преобладающую породу) для конкретного пиксела, могут приводить к существенно отличающимся оценкам площадей гибели лесов. Это хорошо видно на рисунке 2.10. При этом максимальные расхождения наблюдаются в годы значительных изменений пропорций весенних и летних пожаров (см. рисунок 2.11), которые также приводят к изменению пропорций пожаров, проходящих на территориях, покрытых различными древесными породами.

Таблица 2.2 - Отношение полученных с помощью карт разного разрешения оценок погибшей растительности (Sldecvr - карта типов территории (Барталев и др., 2016), SHsn – маска леса высокого разрешения (Hansen et al., 2013))

Год	Sldecvr/ SHsn
2002	0,80
2003	0,74
2004	0,78
2005	0,77
2006	0,85
2007	0,70
2008	0,80
2009	0,76
2010	0,79
2011	0,88
2012	0,86
2013	0,84
2014	0,89
2015	0,85

2016	0,87
2017	0,76
среднее	0,81

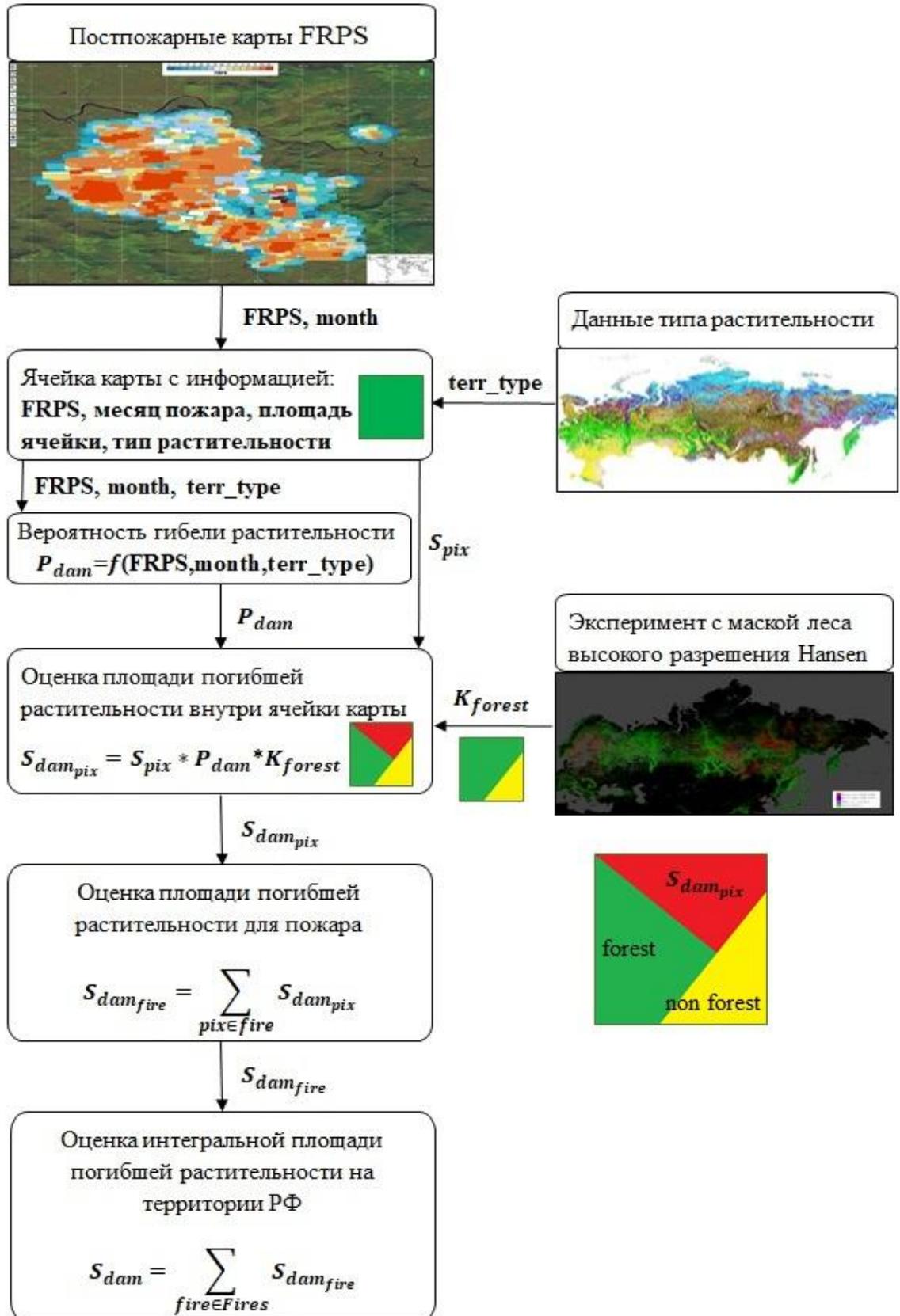


Рисунок 2.9 - Схема метода обработки данных космических наблюдений для полностью автоматизированной оценки повреждений лесов пожарами

Совместный анализ данных, представленных на рисунках 2.10 и 2.11 наглядно показывает, что отсутствие учета различий вероятности гибели лесов при разных FRPS, связанных с сезонностью и различными породами, в годы, когда преобладают весенние пожары, приводит к завышению оценок площадей погибшего леса, а в годы преобладания летних пожаров наоборот к занижению таких оценок.

Следует также отметить, что оценки площади погибших лесов (территорий, на которых наблюдается 5 класс СКС), получаемые на основе предложенного метода, достаточно хорошо согласуются с оценками площадей на основе выделения постпожарных повреждений по результатам анализа изменений лесного покрова после пожаров. Это хорошо видно из данных, представленных на рисунке 2.12.

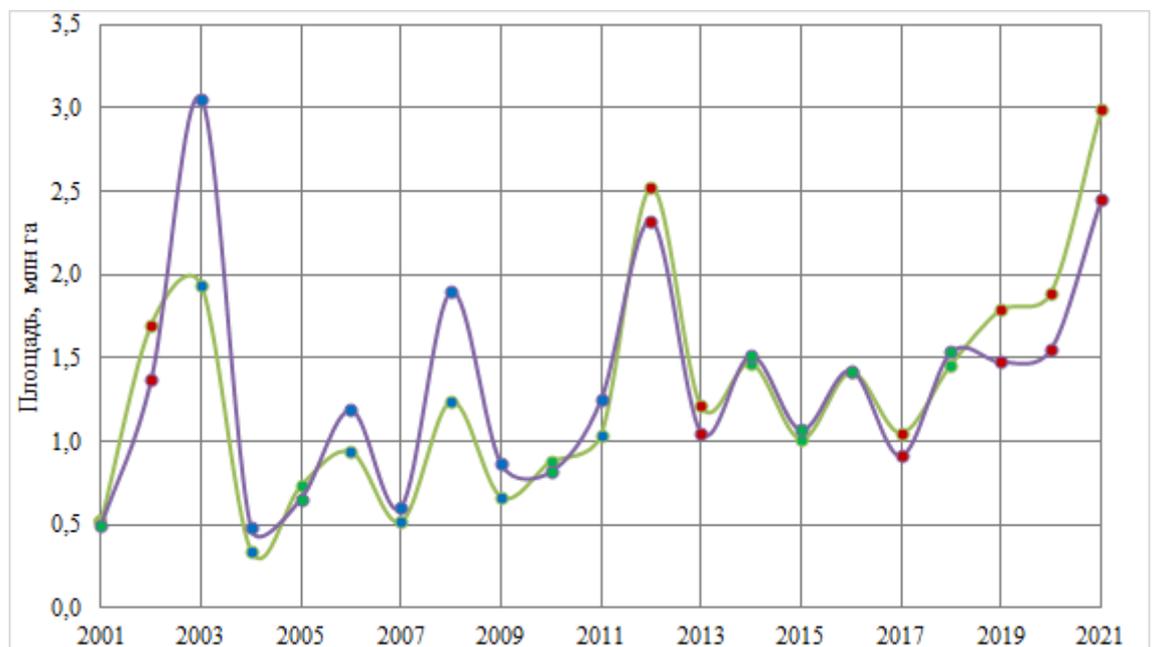


Рисунок 2.10 - Оценка площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2021 год. Фиолетовый график – без учета зависимости гибели от сезона действия пожара и типа леса, в котором действовал пожар. Зеленый график - с учетом зависимости от сезона и типа леса. Цвет точек на графике отображает величину

доли горячих точек, относящихся к летним пожарам (синий цвет – доля меньше 40%, зеленый – от 40% до 60%, красный – больше 60%)

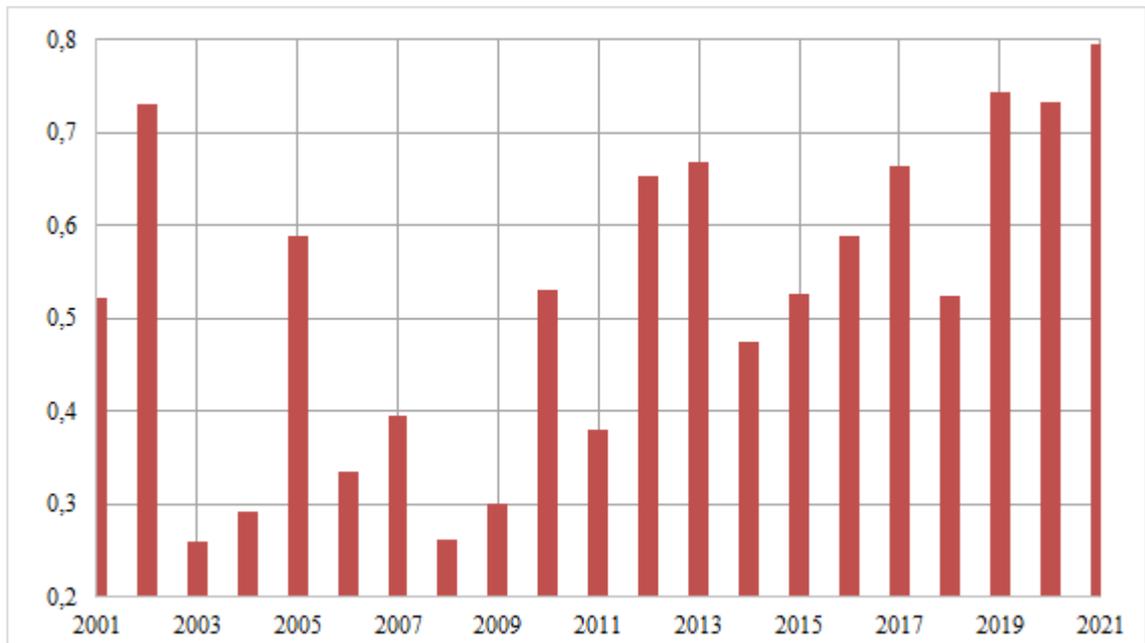


Рисунок 2.11 - Доля горячих точек, относящихся к летним пожарам

Полученная скорректированная оценка площади погибших от пожаров лесов по данным MODIS (230 м) учитывала влияние следующих двух видов погрешностей:

- погрешности определения значения СКС лесов в пикселе MODIS;
- погрешности, связанные с пространственным разрешением данных MODIS, поскольку на соответствующей пикселу территории могут находиться участки леса различных категорий состояния.

Коррекция погрешностей определения СКС лесов в пикселе MODIS была выполнена на основе их сравнения с результатами наземного обследования поврежденных насаждений СКС и анализа спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (10-30 м) для фильтрации спектрально неоднородных участков. Оценка погрешностей, связанных с пространственным разрешением данных MODIS, была выполнена на основе анализа распределения значений СКС, полученных по данным высокого пространственного разрешения для различных классов повреждения по данным MODIS.



Рисунок 2.12 - Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2025 гг., полученные на основе анализа FRPS (красный график) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров, предложенного в (Стыценко и др., 2013). (голубой график).

2.3 Оценка пройденных пожарами площадей с учетом данных об интенсивности горения

Информация об интенсивности горения пожаров так же может использоваться в традиционной задаче коррекции оценки площадей, пройденных пожарами, полученных по данным активного горения (см. рисунок 2.13). Для этого был использован тот же подход, что при исследовании связи между интенсивностью горения пожаров и постпожарными повреждениями лесного покрова, описанного в предыдущих разделах.

Алгоритм строится на предположении, что площадь, пройденная огнем в конкретной области (пикселе результирующей Карты maxFRPS), зависит от значения maxFRPS и числа наблюдений горения в данной области за все время действия пожара (N). Поэтому можно построить зависимость наиболее вероятного процента площади, пройденного пожаром в анализируемой области

(конкретном пикселе) от $\max FRPS$ и N . Данная зависимость может быть построена на основе сравнения информации о наблюдениях горения пожара и площадях, пройденных огнем, полученных по постпожарным наблюдениям гарей (видимым повреждениям растительного покрова) на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения.

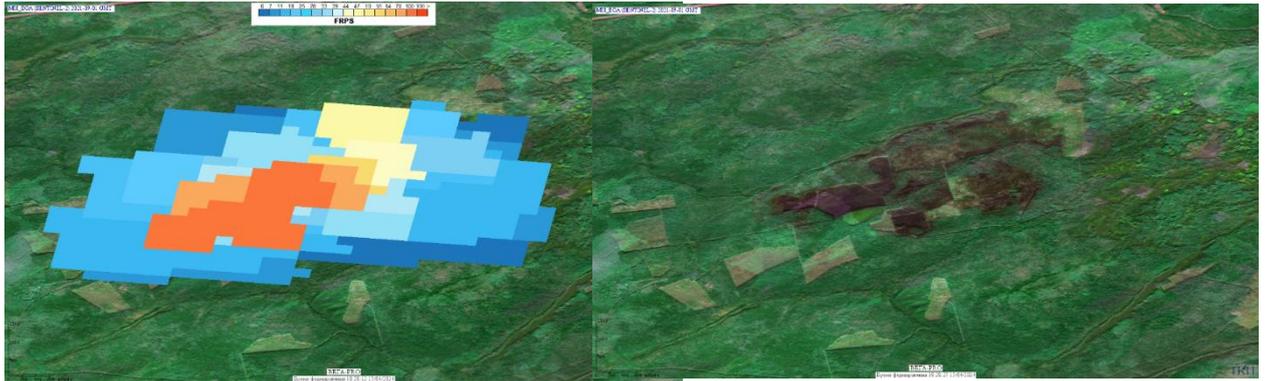


Рисунок 2.13 - Карта максимального FRPS (слева) для пожара, последствия которого запечатлены на снимке Sentinel-2 MSI (справа). Пиксели с низкими FRPS в основном выходят за край гары

Для решения данной задачи использовались:

- Границы пройденных огнем площадей (контура), построенных на основе данных высокого разрешения (Landsat TM/ETM/OLI 30м и Sentinel-2 MSI) 10м. Всего было использовано 5465 контуров гарей на всей территории РФ в период с 2009 по 2019 год.
- Карты $\max FRPS$ и информации о количестве детектирований за время действия пожара, которые были построены для всех анализируемых пожаров по данным наблюдений прибора MODIS (коллекция MC6).

Общая схема сопоставления данных представлена на рисунке 2.14. Для каждой ячейки (пиксела) используемых карт $\max FRPS$, на основе границ площадей гарей, полученных по данным высокого разрешения, была посчитана площадь, которая в данном пикселе была пройдена пожаром. После этого были построены зависимости средней доли площади, проходимой пожаром в пикселе, от значений $\max FRPS$ $f(FRPS)$ и числа наблюдений $f(N)$. Полученные

зависимости представлены на рисунках 2.15 и 2.16. Для оценки площади, пройденной огнем в конкретном пикселе, предлагается использовать следующую схему:

$$S_{pix_fire} = \max(f(FRPS), f(N)) * S_{pix} \quad (2.2)$$

где S_{pix_fire} площадь, пройденная огнем в пикселе, S_{pix} площадь пиксела. Выбор данной схемы основан на сопоставлении различных вариантов оценок с использованием $f(FRPS)$ и $f(N)$ с оценками, получаемыми на базе традиционного метода расчета площадей по данным наблюдения активного горения (далее - Стандартная коррекция).

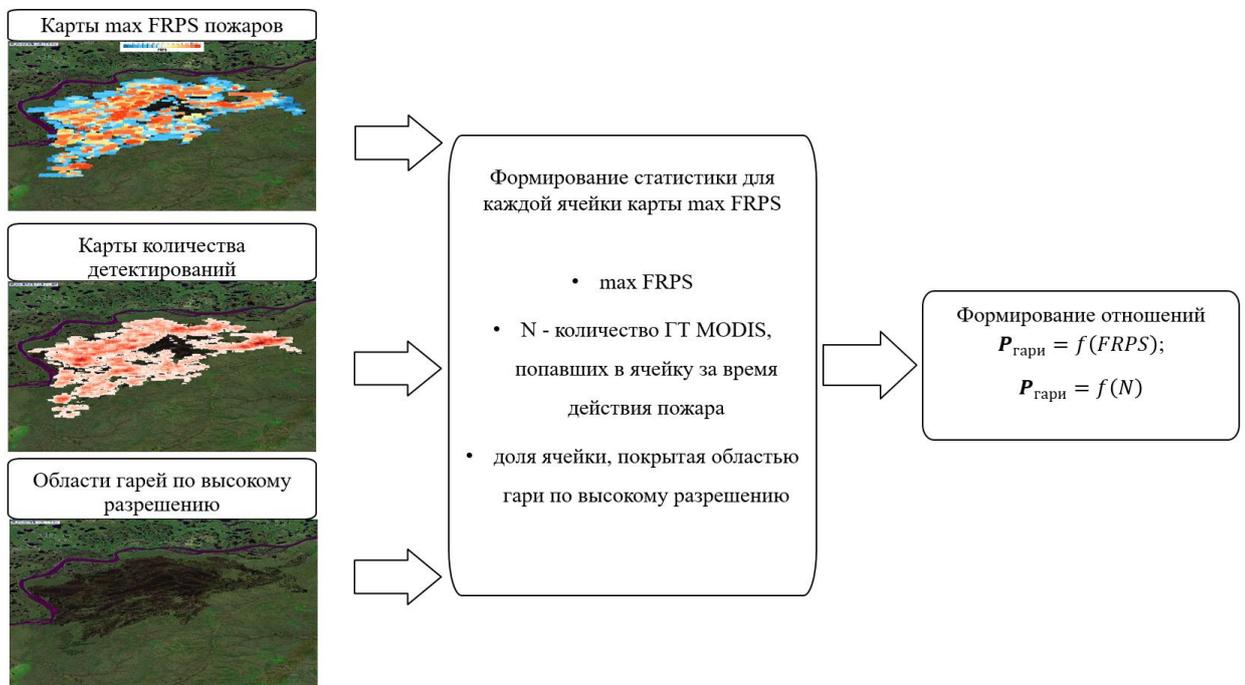


Рисунок 2.14 - Построение зависимости между интенсивностью горения и субпиксельной площадью, пройденной пожаром

Оценки площадей для отдельных пожаров, получаемых на основе предложенной схемы, показали высокий уровень корреляции с оценками, получаемыми на основе Стандартной коррекции. Интегральные оценки площади, пройденной лесными пожарами в различные сезоны с 2001 по 2024 год территорию РФ, полученные двумя методами (см. рисунок 2.17), так же хорошо согласуются друг с другом.

Точность оценки интегральных площадей, ежегодно проходимых пожарами на территории России, получаемой с использованием Стандартной коррекции, около 4%. В тоже время анализ поведения распределений ошибок оценок площадей, пройденных отдельными пожарами на основе Стандартной методики и на основе предлагаемого подхода с использованием FRPS показал, что эти распределения в большой степени совпадают. При этом оценки площадей, получаемые на основе данных методов для тестового набора пожаров (более 5 тысяч пожаров) также практически совпадают (см. рисунок 2.18). Все это позволяет сделать предположение, что точность оценки интегральных площадей, проходимых лесными пожарами на территории РФ, получаемых на основе предлагаемого метода с использованием FRPS, также будет составлять порядка 4%.

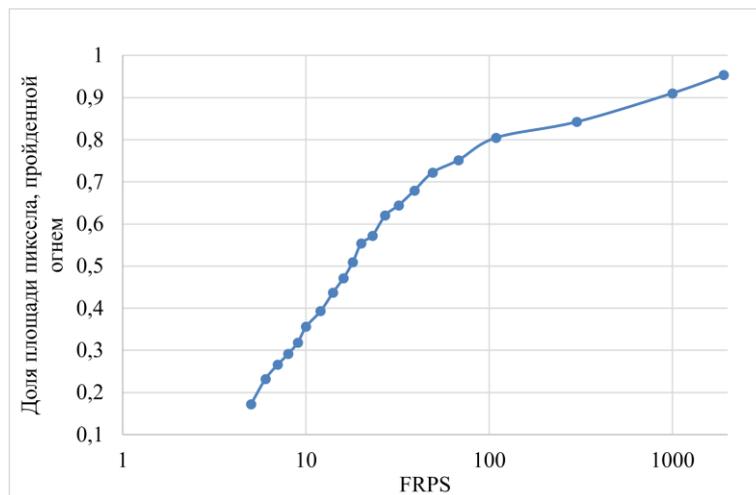


Рисунок 2.15 - Средняя доля гари внутри пиксела при различных значениях FRPS

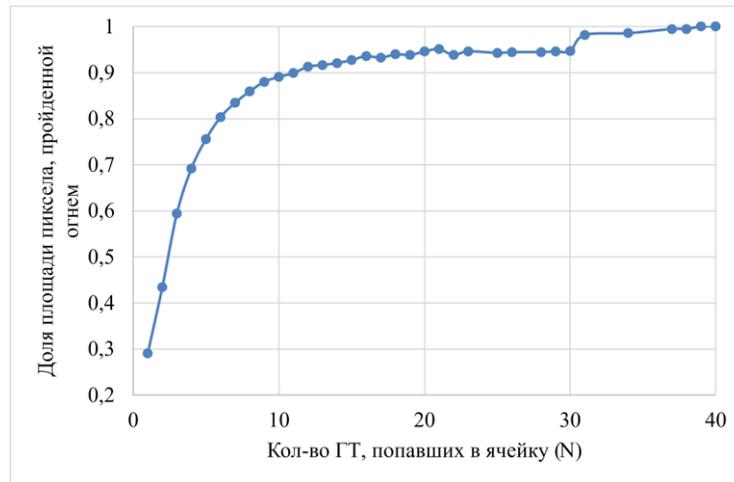


Рисунок 2.16 - Средняя доля гари внутри пиксела при разном количестве детектирований, зарегистрированных внутри пиксела

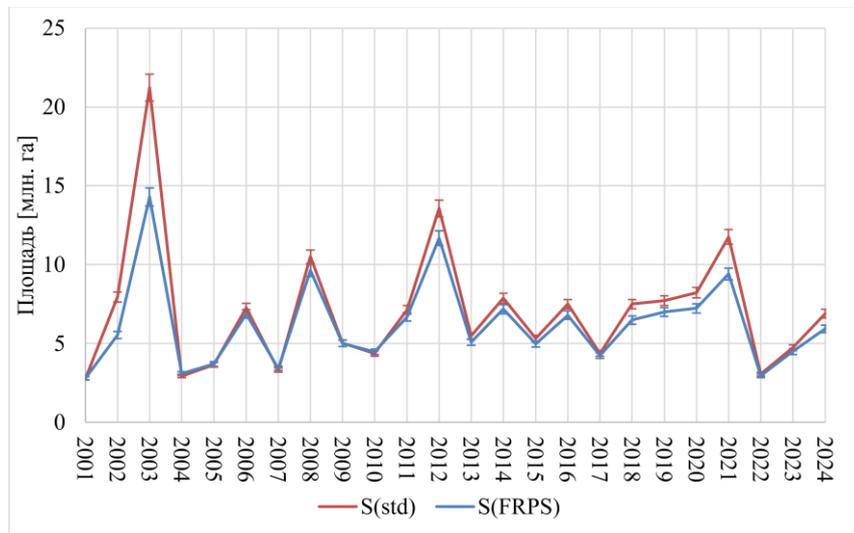


Рисунок 2.17 - Динамика интегральной площади, пройденной огнем на территории РФ по годам (2001-2024). S(std)- стандартная коррекция, S(FRPS) – коррекция по FRPS

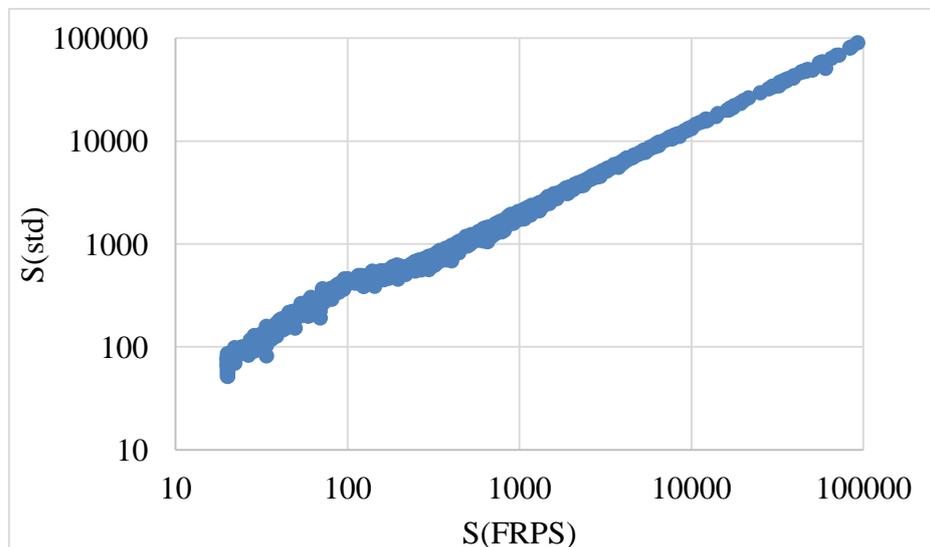


Рисунок 2.18 - Соотношение оценок значений площадей 5465 пожаров, полученных на основе FRPS (S((FRPS)) и Стандартной коррекцией (S(std))

2.4 Автоматизированная оперативная оценка повреждений лесного покрова на основе спутниковых наблюдений

На основе предложенного метода в составе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>) был разработан алгоритм автоматизированной оперативной оценки повреждений лесов по данным спутниковых наблюдений интенсивности горения (далее Система). В разделе представлены общие характеристики Системы, архитектура ее построения и некоторые особенности реализации. Также описаны основные особенности и получаемые в результате работы Системы информационные продукты, которые обеспечивают возможность оперативной оценки потенциальных повреждений лесного покрова пожарами. Кратко обсуждены вопросы возможности использования получаемых информационных продуктов и их интеграции в информационные системы «ВЕГА Лес» (<http://forest.geosmis.ru/>, Балашов и др., 2020) и ИАС «Углерод-Э» (<http://carbon.geosmis.ru/>), обеспечивающих инструменты для отображения и анализа продуктов для широкого круга пользователей.

Используемые в Системе данные

Основным источником входных данных для разработанной Системы является оперативная база данных (БД) пожаров, формируемая на основе шестой коллекции данных приборов MODIS (Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL)) (<http://earthdata.nasa.gov>). Помимо информации об интенсивности горения для каждой ГТ БД также содержит информацию о группах ГТ, объединенных по пространству и времени (ГТ, центры которых лежат на расстоянии меньше 0.5 км и время их регистрации отличается не более, чем на 5 дней). Такие группы в дальнейшем будут именоваться пожарами.

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

Реализованная схема алгоритма

Общая схема реализованного алгоритма представлена на рисунке 2.19. В первом блоке происходит преобразование исходной информации о пожарах в растровый вид. На выходе получается ежедневный ряд карт с информацией о максимальной интенсивности горения пожаров за сезон. Другим видом выходных данных является аналогичный ряд карт, дополненный информацией о дате зарегистрированного максимального FRPS в каждом пикселе карты. На втором этапе данные объединяются с информацией о типе растительности, после чего в каждом пикселе карты осуществляется преобразование трех значений (FRPS, месяц, тип растительности) в оценку доли пиксела, в которой прогнозируется гибель растительного покрова. В результате получается ежедневный ряд карт прогнозируемых постпожарных повреждений и интегральные оценки площади погибшей растительности, рассчитываемые по полученному ряду карт. На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. Для построения на основе полученных данных различной статистической информации о гибели лесов на различных территориях (лесничествах, субъектах, районах и т.д.) используются схемы и программные модули, реализованные в различных системах, созданных и функционирующих на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др. 2019).

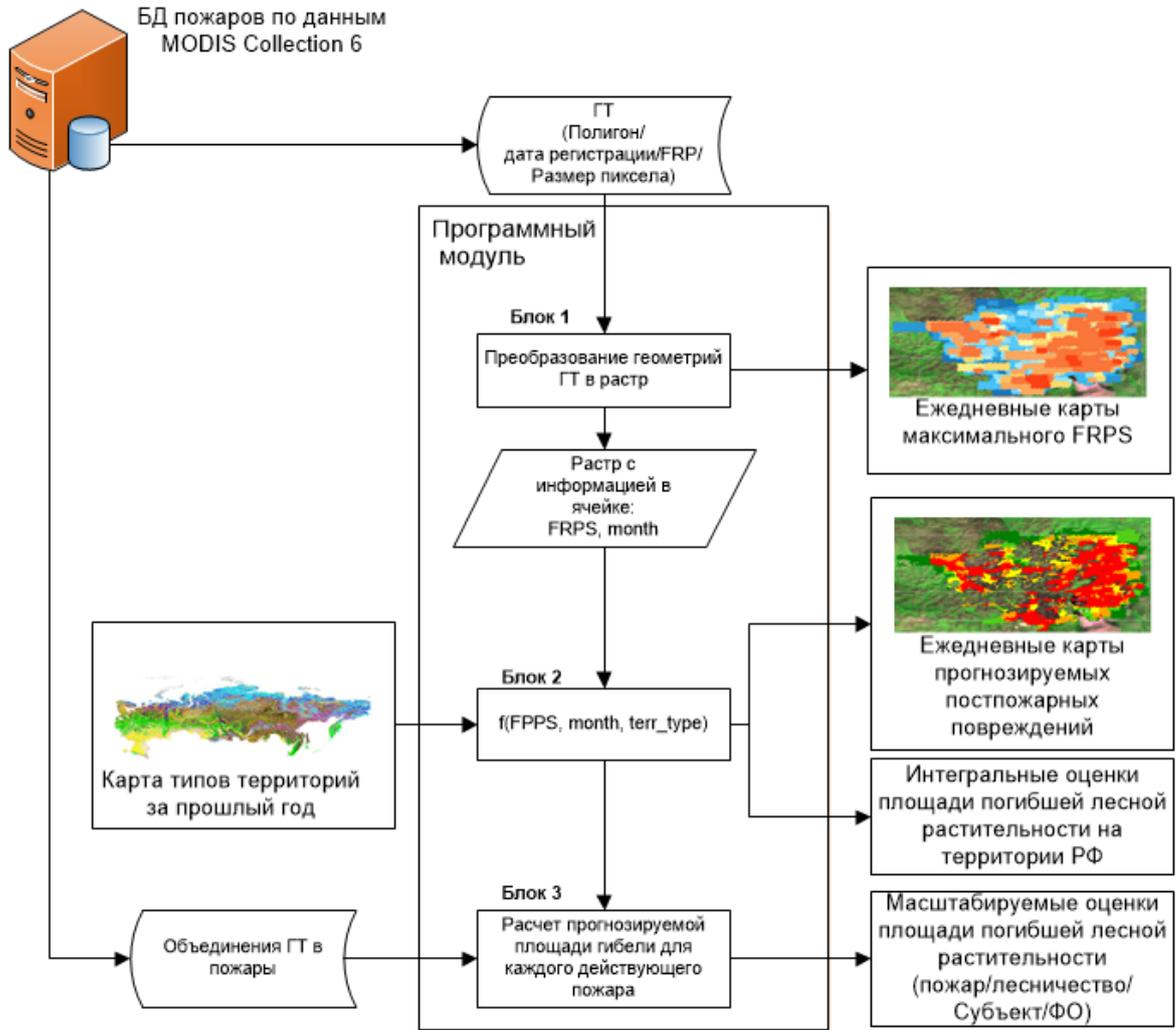


Рисунок 2.19 - Общая схема реализованного алгоритма

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

Построение карт максимального FRPS

Алгоритм действий первого блока программного модуля представлен на *рисунке 2.20*. Первым шагом является подключение к БД пожаров для получения информации о геометриях ГТ, детектированных с начала календарного года по

день запуска скрипта, вместе с датой их регистрации (*dt*), FRP и размерах ГТ (*size_x*, *size_y*). Как было отмечено ранее, для однородности представления FRP каждой ГТ нормируется на площадь этой точки ($FRPS = FRP / (size_x \times size_y)$).

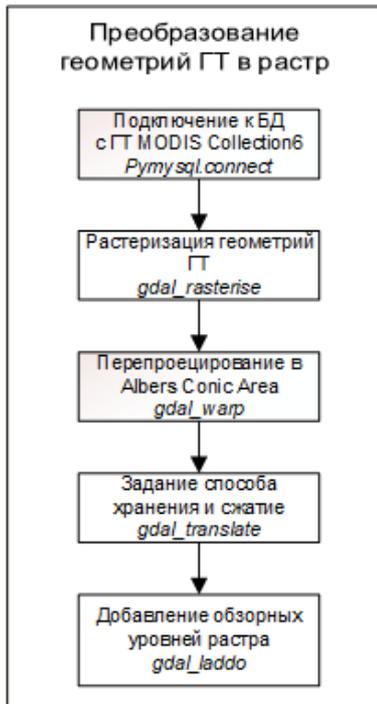


Рисунок - 2.20
Алгоритм действий первого блока программного

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

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

$$\text{round}(FRP / (size_x \times size_y)) \times 100000 + \text{DAYOFYEAR}(dt) \times 100 \quad (1)$$

На третьем шаге происходит перепроецирование изображения в равновеликую коническую проекцию Альберса с размером одного пикселя в 230 метров. Такой выбор был продиктован форматом данных о постпожарных повреждениях лесов, с которыми ранее сопоставлялись карты максимального FRPS (см. раздел 2.1). Так как сформированные зависимости, преобразующие FRPS в предсказываемую долю пикселя с погибшей растительностью, были получены именно для данных параметров пространственного изображения, было

принято решение сохранить их во избежание возможной ошибки в оценке площади погибшей растительности, связанной с другой проекцией и разрешением данных.

Последние два шага связаны с удобством хранения и визуализации полученных карт в «ВЕГА Лес» и ИАС «Углерод-Э». Задается тайловый способ хранения изображения и метод его сжатия (TILED=YES, COMPRESS=LZW, BIGTIFF=YES). В конце для растра создаются его обзорные уровни. На рисунке 2.22 в левом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт максимального FRPS, охватывающих развивающийся пожар.

Построение карт прогнозируемых постпожарных повреждений

На рисунке 2.21 представлена схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS (1а) и карт типов растительности (1б) в карты прогнозируемых постпожарных повреждений (9). Общая идея данного преобразования заключена в использовании полученных зависимостей вероятности гибели лесной растительности от величины FRPS пожара с учетом типа растительности и месяца действия пожара (см. раздел 2.1). На настоящий момент такие зависимости получены для всех лесных типов растительности используемой карты (Барталев и др., 2016) и всех месяцев года. Они представлены в табличном виде (6), где каждому ключу (5), состоящему из верхней границы диапазона FRPS, месяца пожара и индекса типа растительности, ставится в соответствие доля пикселя с прогнозируемой гибелью лесной растительности (7).

Более подробно, после получения карт (1а, 1б) в матричном виде (2а, 2б) и их объединения (3) в каждой ячейке (4) получившейся матрицы, как было отмечено ранее, одновременно содержится информация о типе растительности (разряды 1,2), день регистрации FRPS (разряды 3-5) и значение FRPS (разряды 7-10). Далее для каждой значимой ячейки по номеру дня в году определяется месяц, а для FRPS подбирается верхнее значение соответствующего ему диапазона значений FRPS, для которого была получена статистическая оценка

прогнозируемой гибели лесной растительности (см. раздел 2.1). В результате получается ключ (5) и по нему происходит обращение к таблице (6). Соответствующее ключу (5) значение (7) подставляется вместо ключа в обрабатываемую матрицу. После выполнения такого преобразования для всех ячеек, получившаяся матрица (8) растрируется в ту же проекцию, что и исходная карта (1б), в результате чего получается целевой растр (9) - карта прогнозируемых постпожарных повреждений. На рисунке 2.22 в правом столбце представлена серия фрагментов получаемых карт, соответствующих картам максимального FRPS из левого столбца того же рисунка. Можно заметить, что покрытие карты FRPS больше, чем карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Это связано с тем, что ГТ, геометрия которой покрывает одновременно лесную и нелесную растительность, целиком отображается на карте максимального FRPS. Для карты прогнозируемых постпожарных повреждений ГТ отображается не целиком, а только ее часть, соответствующая лесной растительности.

Ежедневно составляемые карты максимального FRPS и карты оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности описанным выше способом строятся с покрытием всей территории Российской Федерации. Постоянный размер ячейки таких карт позволяет перейти к интегральной площадной оценки погибшей растительности для территории страны. Для этого все значения в пикселях карты (dam_val) суммируются и полученная величина умножается на площадь ячейки $S_{pix} = 5,9$ [га].. Затем к результату применяется линейная коррекция с экспериментально выведенным коэффициентом $K_{forest} = 0,859$. Данная коррекция проводится с целью устранения погрешности, связанной с субпиксельной неопределенностью ячейки карты типов растительности. Таким образом, суммарная площадь погибшей в результате действия пожаров лесной растительности на территории Российской Федерации рассчитывается по формуле:

$$S_{dam} = S_{pix} \times K_{forest} \times \sum dam_val_{i,j}, \quad [га] \quad (2.3)$$

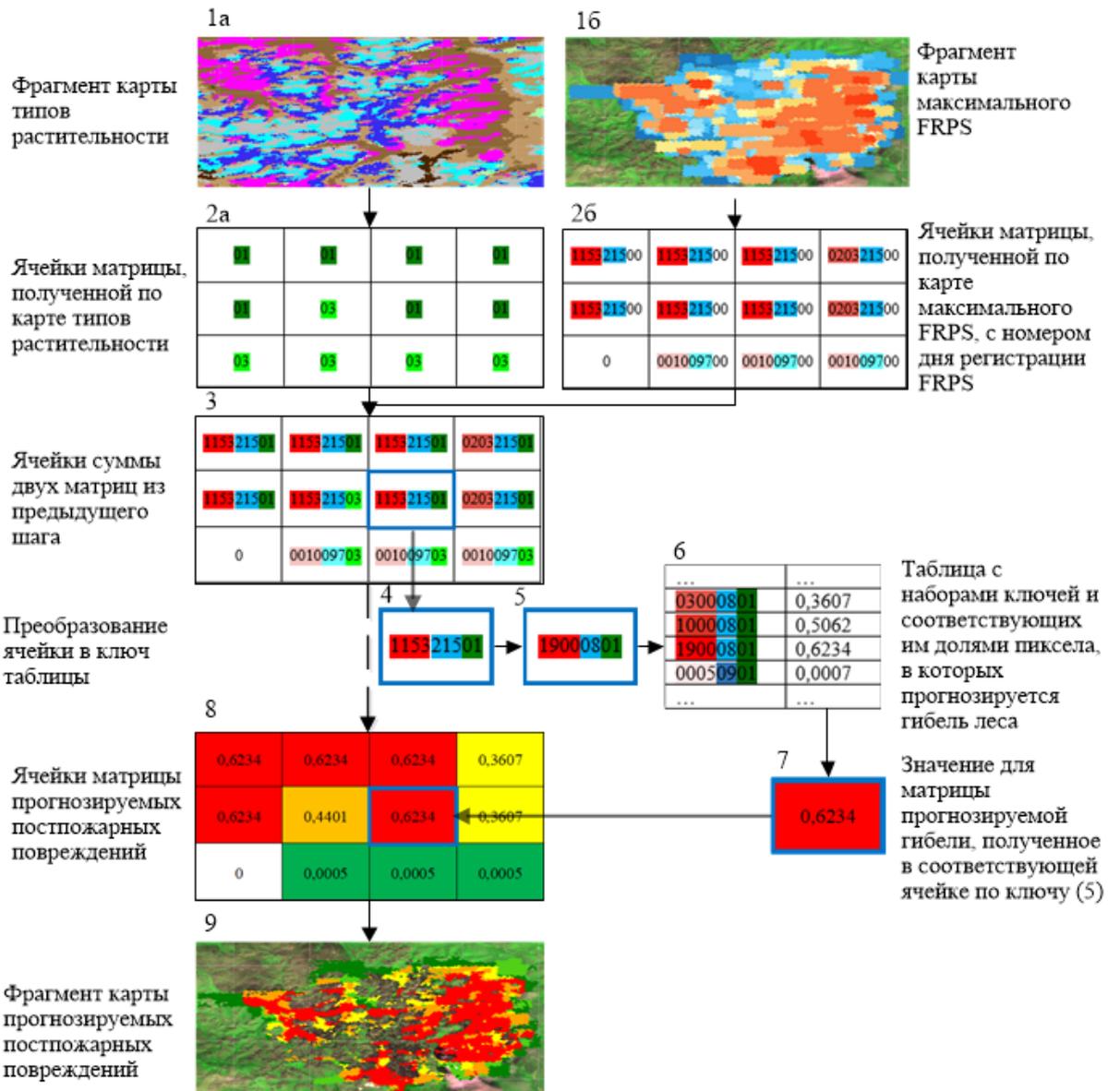


Рисунок 2.21 - Схема преобразования карт максимального FRPS, дополненных номером дня регистрации FRPS и карт типов растительности в карты прогнозируемых постпожарных повреждений

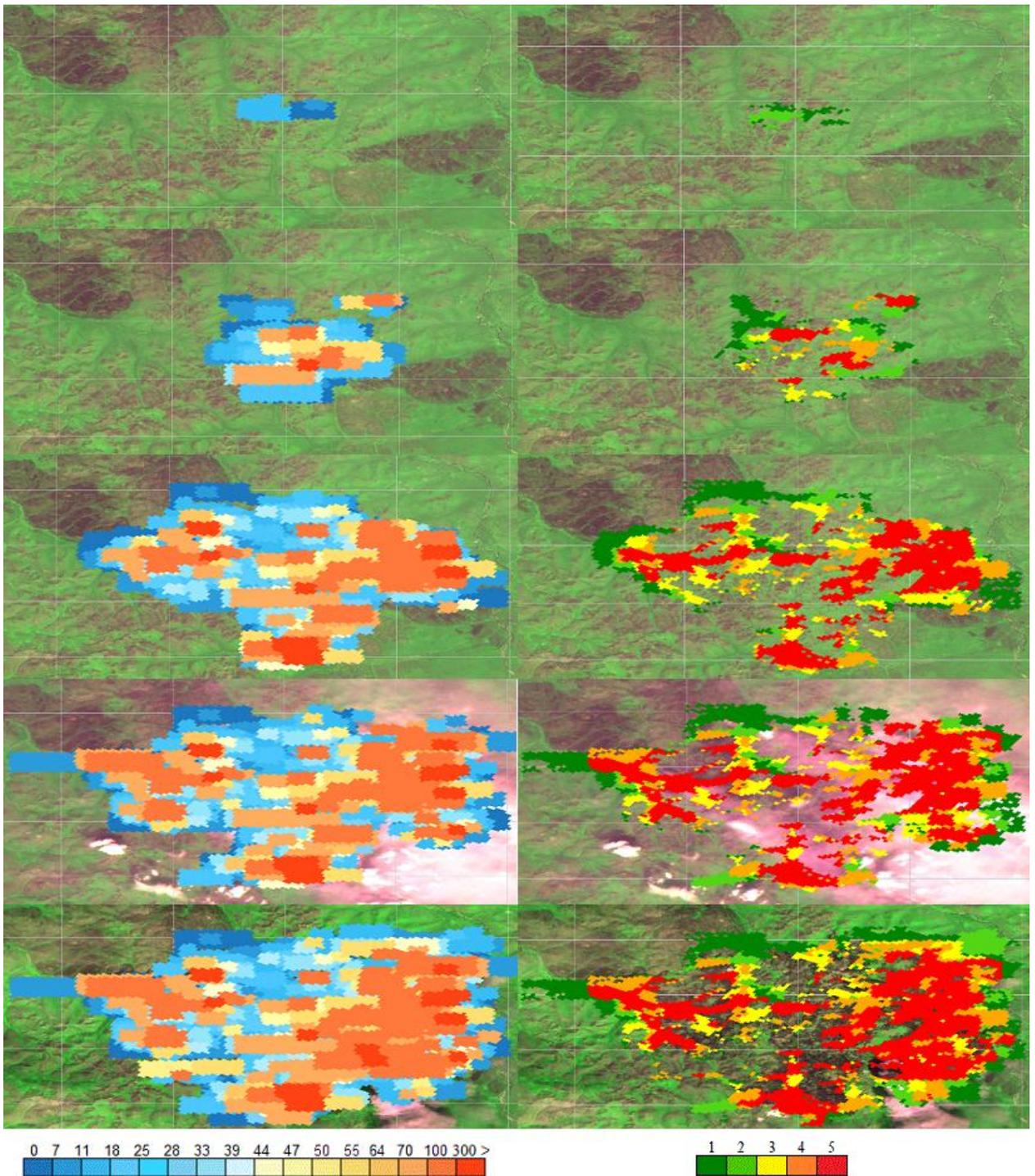


Рисунок 2.22- Серия фрагментов карт максимального FRPS (слева) и оперативной оценки постпожарных повреждений лесной растительности по FRPS (справа) для пожара, протекающего с 4 по 31 июля 2023 на территории Аяно-Майского района Хабаровского края. FRPS измеряется в $\text{МВт}/\text{км}^2$, повреждения оценены дискретными категориями от 1 до 5 (1 – отсутствие повреждений, 5 – полная гибель растительности) (Дата фрагментов карт сверху вниз: 4, 11, 18, 25, 31 июля).

Получение оценок площадей возможной гибели лесов на различных территориях

На последнем этапе пожары из исходной БД пересекаются с рядом карт постпожарных повреждений с целью получения оценок площади погибшей растительности для каждого отдельно взятого пожара. В связи с этим, в последнем блоке Системы действующие пожары соотносятся с составленной картой погибшей растительности. Общая схема блока представлена на рисунке 2.23.

После выгрузки информации о пожарах из БД запускается цикл по всем активным пожарам. На каждом шаге этого цикла выбирается один пожар (f_i) и для этого пожара происходит расчет S_{f_i} – оценки площади погибшей растительности в результате действия пожара f_i . После расчета для всех пожаров из цикла набор (S_f), состоящий из оценок S_{f_i} вместе с соотнесенными к ним идентификаторами пожаров f_i , заносится в БД. Важным требованием к расчету является аддитивность оценок для «связных» по территории пожаров – пожаров, контуры которых пересеклись в пространстве в течении сезона. Для этого при расчете S_{f_i} для каждого f_i сначала находится F_{intr} - множество завершенных пожаров за год, пересекшихся с f_i (в случае пересечения активных пожаров их объединение уже произведено в исходной БД). Данное множество также включает сам пожар из цикла f_i . Затем для этого множества строится его объединенный контур ($Cont$), а также рассчитывается S_{last} - сумма оценок площадей погибших для пожаров из F_{intr} (исключая пожар f_i), которые уже были рассчитаны ранее. Таким образом, в случае, если в F_{intr} входит только пожар f_i (пожар из цикла не пересекся ни с одним из пройденных за сезон пожаров), $Cont$ совпадет с контуром пожара f_i , а $S_{last}=0$. На следующем шаге происходит растеризация контура $Cont$ для получения маски в проекции карты прогнозируемых постпожарных повреждений. Маска в матричном виде пересекается с картой, в результате чего получается фрагмент глобальной карты, соответствующей объединениям пожаров F_{intr} . Для данного фрагмента по формуле 2.3 происходит расчет S_{dam} - прогнозируемой площади повреждений для F_{intr} . Так как все пожары из F_{intr} , кроме f_i , не

являются активными, S_{dam} отличается от S_{last} только за счет действия f_i . В связи с этим значение $S_{fi}=S_{dam}-S_{last}$ вместе с идентификатором пожара f_i добавляются в набор S_f и цикл переходит на следующий шаг.

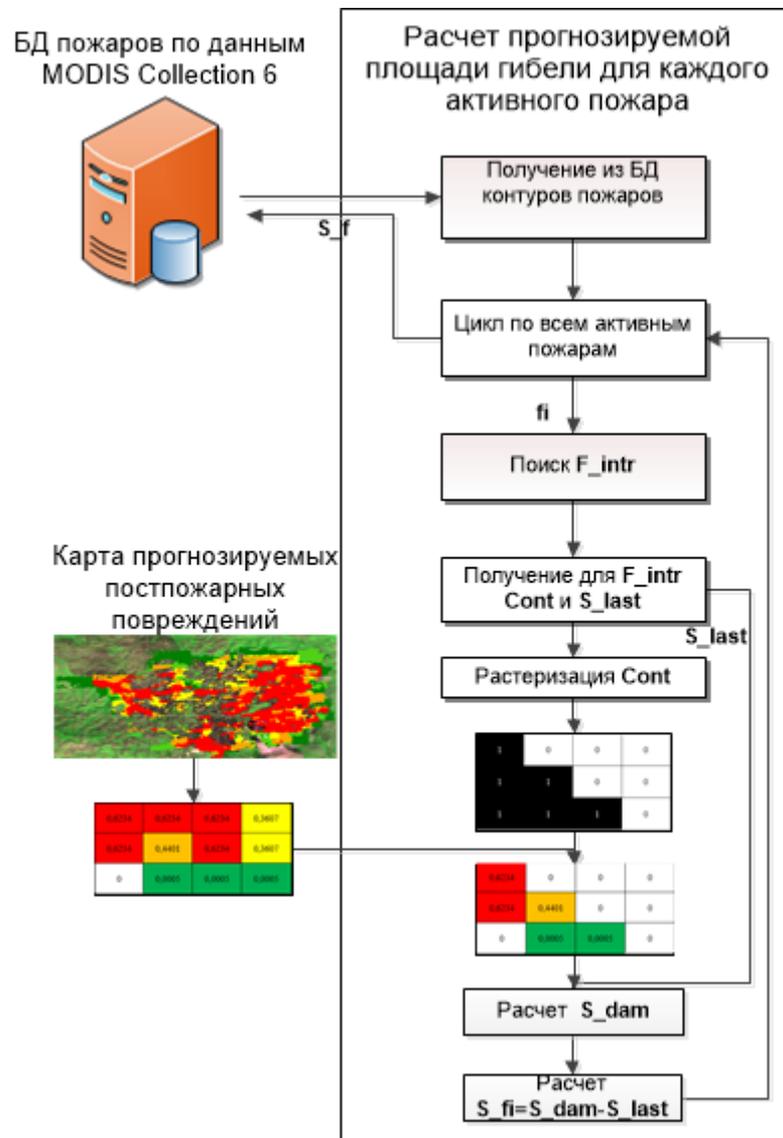


Рисунок 2.23 - Алгоритм действий третьего блока программного модуля. Здесь f_i – активный пожар i -го шага цикла, F_{intr} – множество завершенных пожаров за год, пересекающихся с f_i вместе с f_i , Cont – объединенный контур пожаров из F_{intr} , S_{last} – сумма оценок площадей погибших для пожаров из F_{instr} (исключая оценку для f_i), S_{dam} – оценка площади погибших, полученная для F_{instr} . S_{fi} – оценка площади погибших для f_i , S_f – набор S_{fi} с соотнесенными им соответствующими идентификаторами f_i .

Заключение к 2 главе

В главе были представлены следующие основные результаты:

- Примененный к наблюдениям лесных пожаров на всей территории России за период с 2006 по 2021 гг. метод оценки вероятности гибели лесов от интенсивности горения в период действия пожара позволил установить, что:
 - а) вероятность гибели лесов (5 класс СКС) имеется даже для пожаров с достаточно низкой интенсивностью горения (FRPS порядка 10), поэтому при оценках гибели лесов от пожаров с использованием анализа их интенсивности нельзя пользоваться пороговыми методами, в которых утверждается, что до какого-то значения интенсивности практически не происходит гибели лесов, а после достижения данного значения происходит практически полная гибель лесного покрова;
 - б) при повышении интенсивности горения вероятность гибели лесов устойчиво растет, что хорошо согласуется с результатами значительного числа работ (Morgan, 2001, Ryan, 2002, Пономарев, 2017), в которых показано, что гибель лесного покрова связана с интенсивностью лесных пожаров;
 - в) вероятность гибели лесов от FRPS существенно зависит от сезона, в который действует пожар, и типа лесного покрова (преобладающей породы) территории, на которой действует пожар.

Все перечисленные выше факторы следует учитывать при проведении оценок площадей, пройденных огнем, на основе данных об интенсивности пожара (FRPS). Без учета данных факторов могут возникать значительные (в разы) ошибки в оценках.

- На основе полученных оценок вероятности гибели лесов от интенсивности горения пожаров с учетом сезонных особенностей и типов лесов, в которых действовал пожар, предложен метод полностью автоматизированной оценки повреждений лесного покрова пожарами. Одним из преимуществ предложенного метода является то, что он позволяет делать оперативные оценки гибели лесов не только в момент завершения пожара, но и по мере его

развития. При этом проведенное сравнение результатов, получаемых на основе предлагаемого метода, достаточно хорошо согласуется с результатами оценок, получаемых на основе анализа состояния лесного покрова до и после лесного пожара.

- На основе предложенного метода в свою очередь был разработан алгоритм автоматизированной оперативной оценки возможных повреждений лесного покрова на основе данных спутниковых наблюдений интенсивности горения, ориентированный на обеспечение работы систем дистанционного мониторинга лесных пожаров. Алгоритм в настоящее время 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) Соответствующие ряды карт и оценок, полученные по архивным данным с 1 января 2001 года

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

- Разработан метод коррекции оценок пожаров, основанный на использовании данных об интенсивности горения пожаров и количестве детектирований за время действия пожара. Метод был апробирован на данных о пожарах за 2023

год, полученный результат оказался в целом сопоставим с данными, коррекция которых проводилась другим способом (Лупян и др. 2021).

ГЛАВА 3. АДАПТАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИБОРА MODIS К РАБОТЕ С ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Входным источником спутниковых данных, которые обрабатываются предложенными в прошлой главе методами и алгоритмами, являются данные с прибора MODIS. Как было отмечено ранее, существует множество спутниковых систем с аналогичными характеристиками (см. раздел 1.1). Тем самым актуальной является задача адаптации разработанных решений для работы с данными других систем.

Метод оценки вероятности гибели лесов основан на спутниковых измерениях FRP. Прибор VIIRS обладает «пожарным» каналом с высокой температурой насыщения, который позволяет правильно определять FRP при интенсивном горении. В первом разделе главы приведено описание особенностей съемки прибора VIIRS, значимых при расчете интенсивности горения, и проведенных работ по адаптации метода оценки вероятности гибели лесов для работы с данными данного прибора.

Другим актуальным направлением является адаптация алгоритма детектирования пожаров по данным MODIS (MOD14). Как уже было отмечено раньше, в настоящий момент для многих спутниковых систем существует собственная реализация данного алгоритма. Это приводит к неоднородности данных об активном горении пожаров, получаемых с разных систем, и к неопределённости при сравнении качества получаемых результатов. Во втором разделе главы представлен универсальный метод адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными различных спутниковых систем. Так же приведено сравнение качества штатных пожарных продуктов.

В третьем разделе описано применение разработанного метода для адаптации алгоритма к данным прибора MCSY-MP со спутников Метеор - М2-2/3/4.

Четвертый раздел посвящен применению метода для работы алгоритма с данными приборов MERSI-II (спутники серии FY) и SLSTR (спутники серии Sentinel 3).

3.1 Адаптация метода оценки вероятности гибели лесов для работы с данными прибора VIIRS

Разработанный метод оценки вероятности гибели лесов может быть применен для данных об интенсивности горения пожаров, получаемых с приборов, аналогичных MODIS. Как было отмечено ранее, одним из таких приборов является VIIRS, данные которого имеют свою специфику, что требует адаптации метода оценки.

Результаты применения метода оценки вероятности гибели лесов без адаптации

На первом этапе было проведено сопоставление данных FRPS VIIRS, полученных со спутника NPP с 2014 по 2022 год и с NOAA-20 с 2020 по 2022 год на территории РФ, с данными степени повреждения лесов на участках горения. Получившиеся распределения представлены на рисунке 3.1.

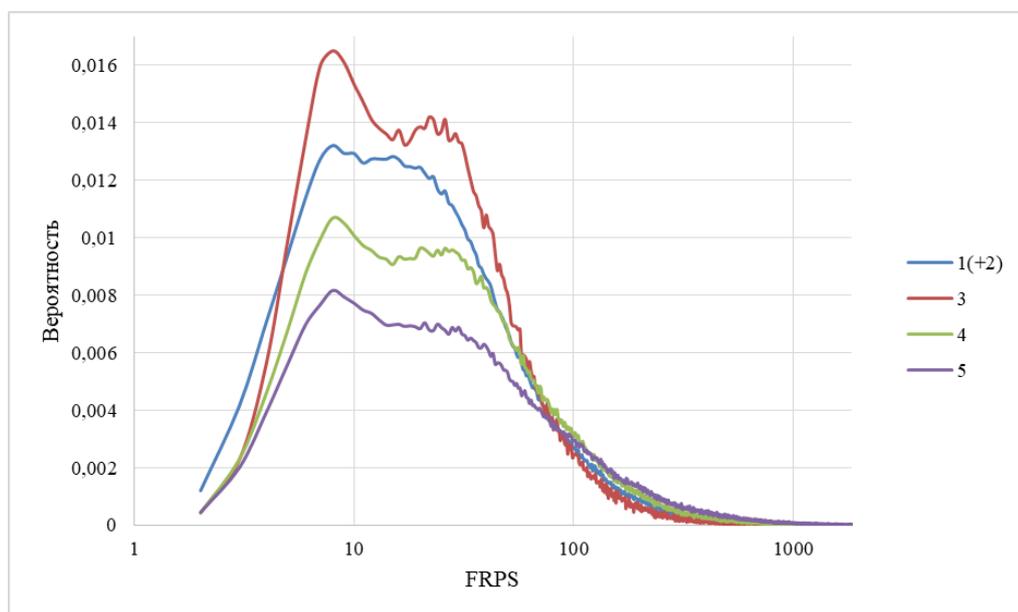


Рисунок 3.1 - Распределение FRPS ГТ VIIRS с 2014 по 2022 на территории РФ различных классов категорий состояния лесного покрова. Распределения нормированы на общее число точек в соответствующем классе

Особенностью распределений для всех классов является наличие выраженных двух пиков в районе значений 8 МВт/км² и 19 МВт/км², что не было характерно для аналогичных распределений, относящихся к данным MODIS. Данная особенность отражается и на вероятностных кривых гибели растительности по FRPS, построенных для данных VIIRS (рисунок 3.2). Для низких значений FRPS наблюдаются достаточно высокие показатели вероятности гибели, чего не было замечено для таких кривых, посчитанных по данным MODIS.

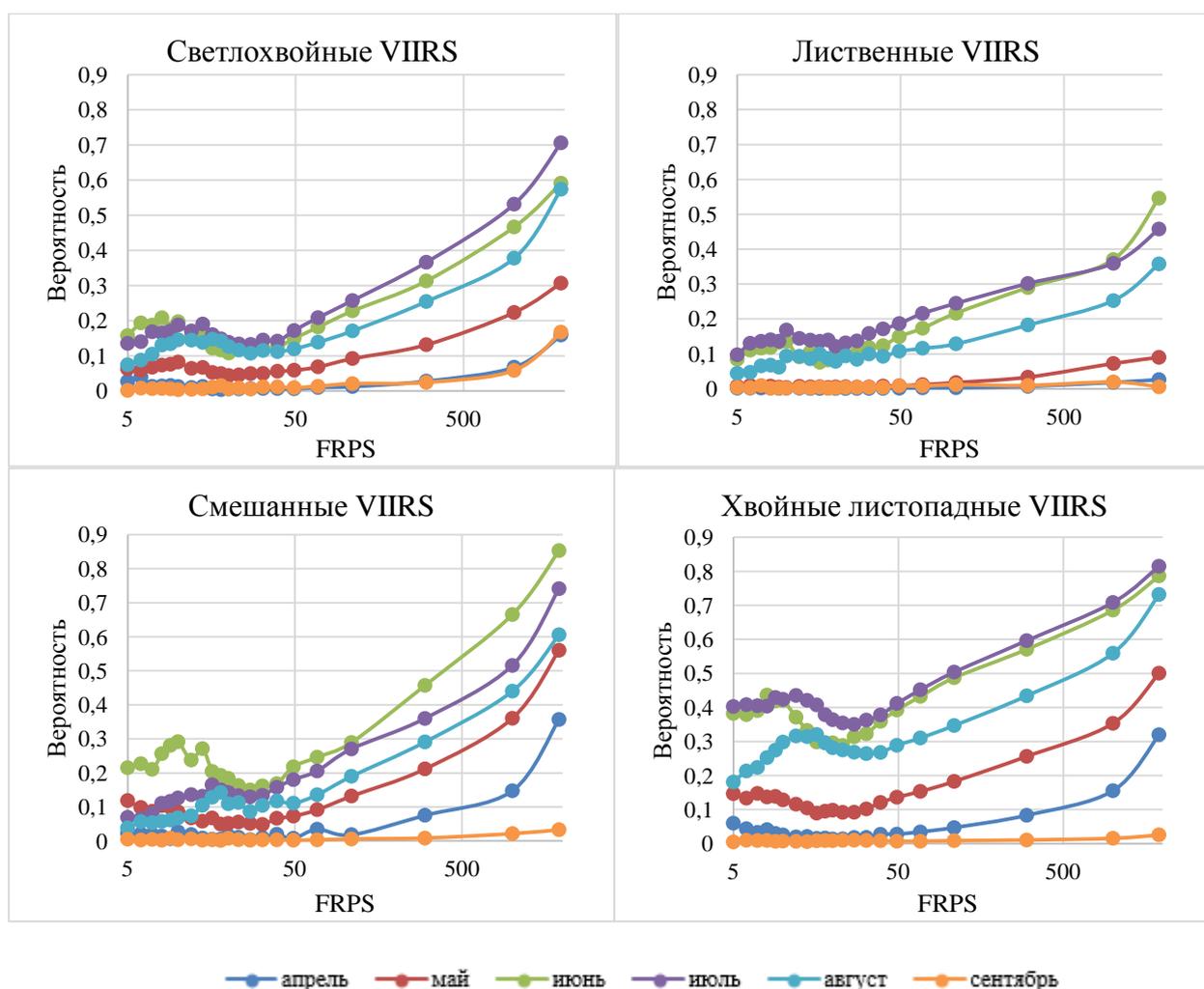


Рисунок 3.2 - Вероятность гибели леса от интенсивности горения (FRPS) по данным VIIRS с учетом сезона и групп древесных пород на территории действия пожара

Причины расхождения вероятностных кривых гибели, полученных по данным MODIS и VIIRS

Для иллюстрации причин такой разницы для FRPS низкой интенсивности по данным VIIRS и MODIS, как характерный пример, рассмотрен пожар, действовавший с 25 июня по 23 августа 2021 года в Республике Саха (рисунок 3.3). Сравнение карт maxFRPS для данных VIIRS и MODIS показало, что основное различие возникает при ночных наблюдениях (рисунок 3.3 б, г). Ночью практически все ГТ VIIRS имеют низкую интенсивность, тогда как значимое ГТ MODIS имеют высокие значения интенсивности. При этом ночные ГТ с обоих приборов соотносятся с растительностью, которая погибла в результате действия пожара (5 СКС). Анализ статистики значений FRPS, детектируемых приборами MODIS и VIIRS в разное локальное время (рисунок 3.4) показал, что распределения FRPS VIIRS и MODIS для ночных диапазонов (23-2, 3-6) практически совпадают. Главным же отличием между съемкой двух приборов является вечерний диапазон (19-22), наблюдаемый MODIS со спутника TERRA и не наблюдаемый прибором VIIRS (рисунок 3.5). При этом на рисунке 3.4б видно, что распределение FRPS для этого диапазона смещено в сторону более высоких значений относительно ночных диапазонов MODIS и VIIRS.

Таким образом, можно сделать вывод, что в карту максимального FRPS MODIS в ночное время попадают данные со спутника TERRA, так как значения интенсивности в вечернее время выше, чем в ночное (которое для MODIS наблюдается со спутника AQUA). При этом вечером значения интенсивности пожаров еще не успевают сильно уменьшиться по сравнению с дневными, в результате чего эффект спада интенсивности горения ночью остается незаметен. Отсутствие вечерней съемки для VIIRS отражается и на соответствующих картах

максимального FRPS, для которых разница между дневными и ночными данными становится значимой.

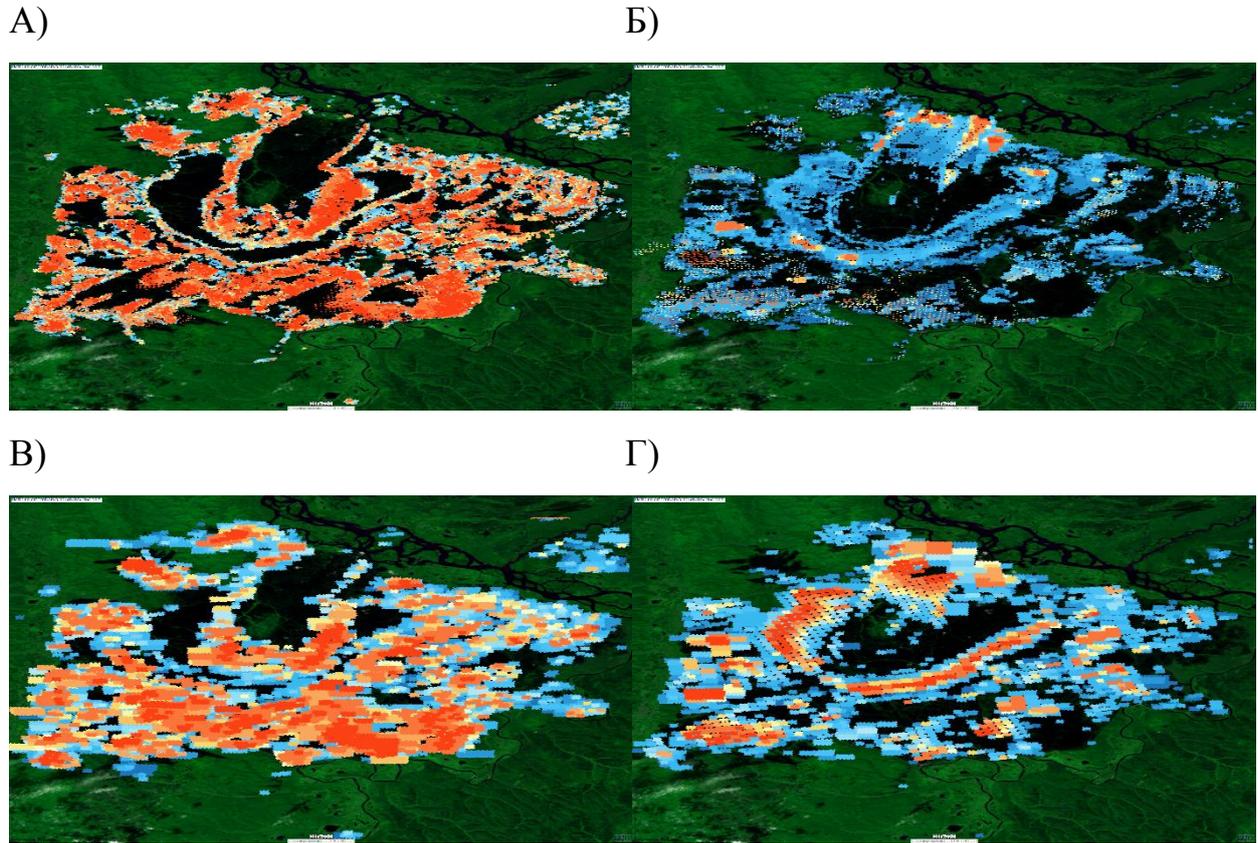
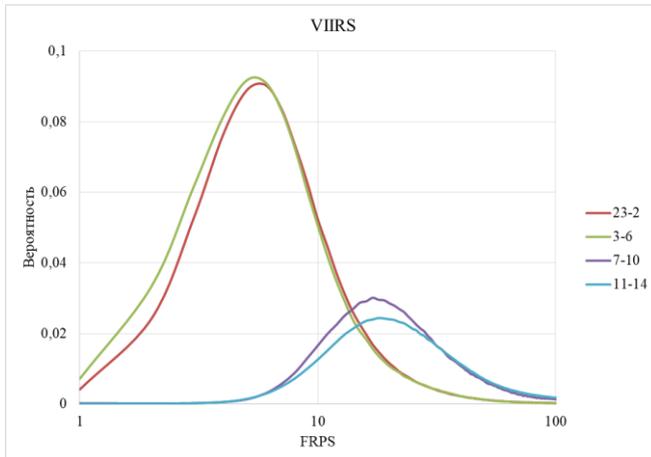


Рисунок 3.3 - Фрагмент карты максимальной интенсивности горения maxFRPS для пожара в Республике Саха (25.06 – 23.08.2021) А) Б) - по данным VIIRS, В) Г) - по данным MODIS (А) В) – дневные данные, Б)Г) – ночные)

А)



Б)

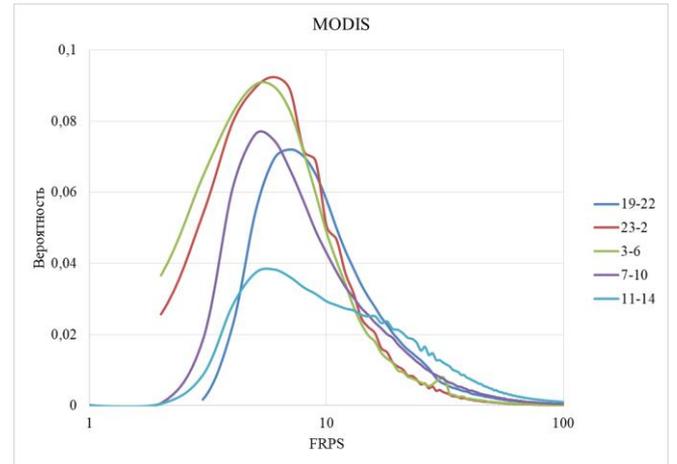


Рисунок 3.4 - Распределение FRPS для разных диапазонов локального времени детектирования ГТ на территории РФ А) - по данным VIIRS 2012-2024, Б) - по данным MODIS 2001-2024

Стоит так же отметить, что кривые дневных FRPS VIIRS сильно смещены в сторону высоких значений относительно MODIS. Причина такого различия кроется в меньших размерах пиксела VIIRS относительно MODIS. Тем самым для VIIRS процент площади пиксела, на котором реально наблюдается активное горение, больше, чем для MODIS. В связи с этим при детектировании ГТ по дневным данным VIIRS используется больший минимальный порог температуры (low_t4), относительно MODIS.

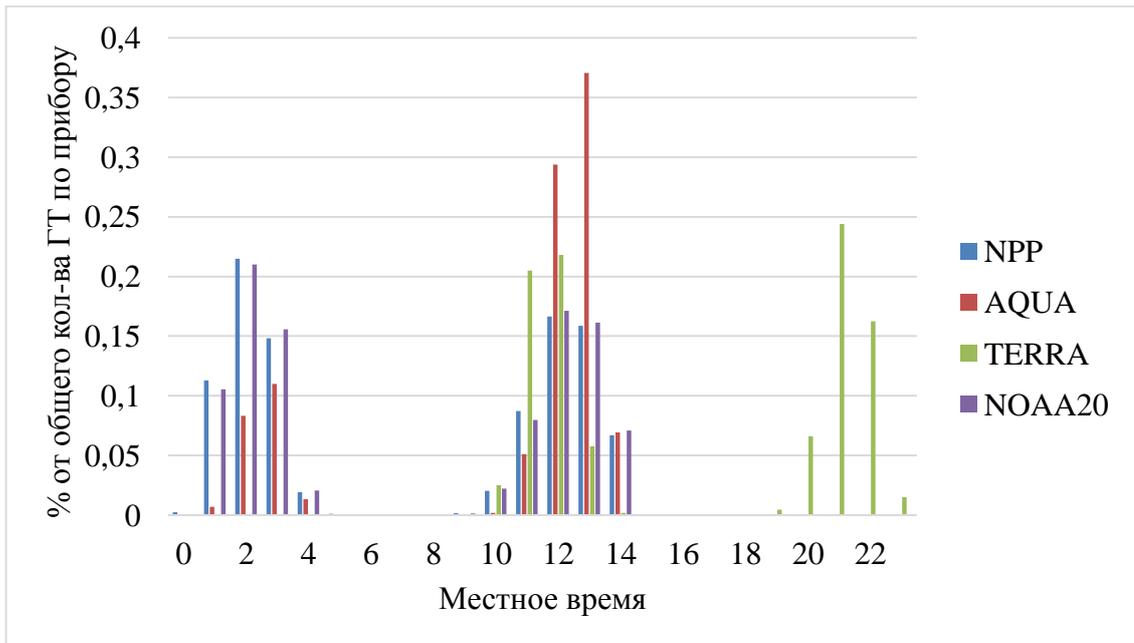


Рисунок 3.5 - Распределение количества ГТ с разным местным временем детектирования, снятых со спутников прибора VIIRS (NPP, NOAA20) и MODIS (AQUA, TERRA) на территории РФ за 2021 год

Применение метода оценки вероятности гибели лесов для данных VIIRS с учетом разделения день/ночь

В связи с найденной особенностью детектирования FRPS для прибора VIIRS, метод оценки вероятности гибели был повторно применен с предварительным разделением данных на дневные и ночные ГТ. При этом набор данных был несколько расширен (NPP – 2012 – 2023, NOAA – 2020 – 2023). На рисунке 3.6 представлены распределения для дневных и ночных FRPS VIIRS всего набора данных. На рисунке 3.7– распределения FRPS для разных классов СКС по ночным и дневным данным VIIRS. Для дневных данных VIIRS сохраняется общая тенденция к смещению распределений в сторону более высокой интенсивности с увлечением класса СКС, которая была характерна для данных MODIS. Однако для ночных данных такой тенденции нет и пиковые значения распределений для разных классов практически совпадают. Это приводит к разным градиентам вероятностных кривых гибели лесной растительности (5 СКС) от FRPS для ночных и дневных данных (см. рисунок 3.8).

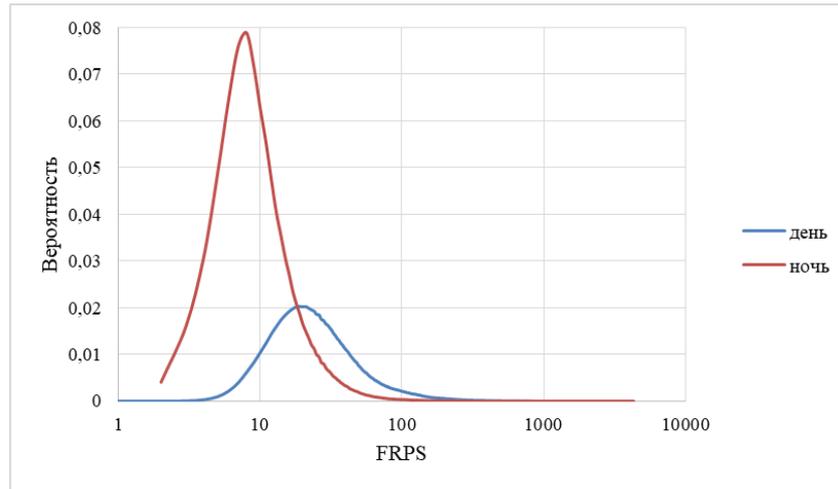
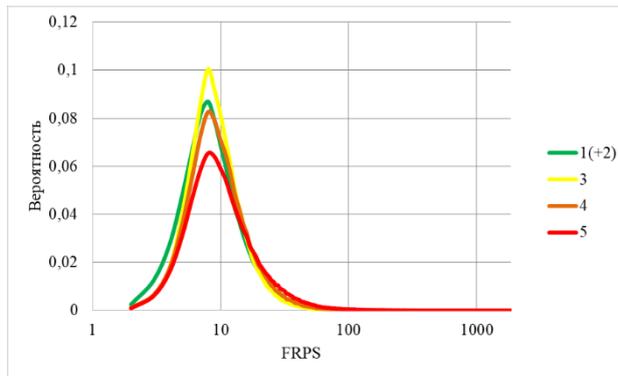


Рисунок 3.6 Распределение FRPS для дневных и ночных ГТ VIIRS (2012-2023 гг.)

А)



Б)

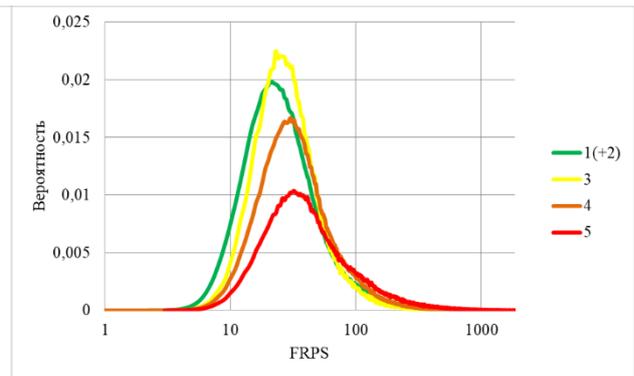


Рисунок 3.7 Распределение FRPS ГТ VIIRS с 2006 по 2021 на территории РФ для различных классов категорий состояния лесного покрова для А) – ночных, Б) – дневных данных

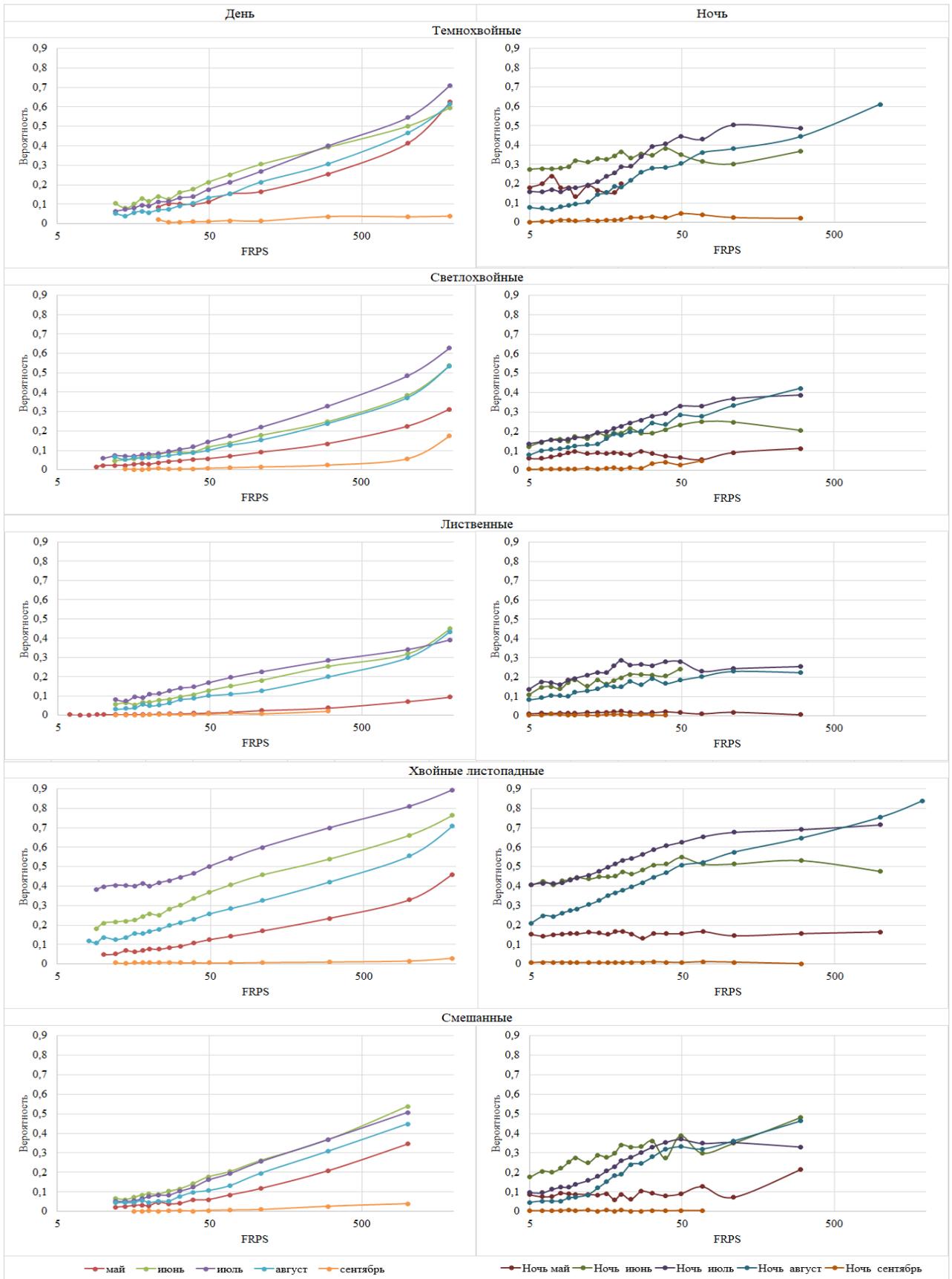


Рисунок 3.8 Вероятность гибели леса от FRPS по данным VIIRS с учетом сезона и групп древесных пород с 2006 по 2021 на территории РФ для дневных и ночных данных

Таким образом главной особенностью проделанной адаптации метода оценки вероятности гибели лесов к данным VIIRS является необходимость разделить ГТ на дневные и ночные, что связано с отсутствием вечерней съемки прибором.

3.2 Метод адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными приборов различных спутниковых систем

Оценка качества результата детектирования пожаров

В основе метода адаптации алгоритма детектирования пожаров MOD14 лежит универсальный метод оценки качества результата детектирования пожаров. Такая оценка фактически является гарантией того, что ГТ, детектируемые модифицированным алгоритмом, которые далее определяются как правильные или ложные, а также точки, определяемые как пропуски, являются таковыми в действительности. Таким образом оценка качества обеспечивает возможность проводить калибровку параметров алгоритма.

Предложенный метод оценки качества развивает идею проверки, представленную ранее в разделе 1.5 (Freeborn et al. 2014), основанную на сопоставлении полученных ГТ с пожарными данными, полученными по MODIS. Принципиальным отличием предлагаемого метода является сопоставление ГТ только лесных пожаров, а также использование только ГТ длительных пожаров при оценке пропусков. Такие условия призваны обеспечить устойчивость наблюдаемого процесса горения во времени, чтобы иметь высокую вероятность наблюдать горение как прибором, по данным которого получен проверяемый результат детектирования (далее Продукт 1), так и прибором, по данным которого получен проверочный результат детектирования (в схеме Freeborn et al. 2014 это данные MODIS, далее Продукт 2). Дополнительное условие принадлежности ГТ Продукта 2 к длительным пожарам при оценке пропусков позволяет полностью гарантировать, что такие ГТ должны были наблюдаться с прибора Продукта 1. Если таким ГТ Продукта 2 не будет сопоставлено ГТ из Продукта 1, то такие

случаи будут определены как пропуски в Продукте 1. Отметим, что при оценке ложных срабатываний аналогичное условие на Продукт 1 не накладывается, так как в данном случае отсутствует неопределенность, связанная с вопросом, могла ли наблюдаться рассматриваемая точка прибором Продукта 1.

Таким образом, необходимыми условиями для оценки качества результата детектирования являются:

- Одинаковое пространственное и временное покрытие Продуктов 1 и 2
- Аннотация ГТ Продуктов 1 и 2 по типам растительности, на котором были детектированы данные ГТ
- Объединение ГТ Продукта 2 в пожары

На рисунке 3.9 представлена схема метода оценки качества результата детектирования пожаров. Продукт 1 и Продукт 2 проходят предварительную обработку, обеспечивающую соответствие данных описанным выше условиям, после чего происходит их сопоставление. Отдельно ГТ Продукта 1 сопоставляются с ГТ Продукта 2 (проверка на ложные срабатывания) и ГТ Продукта 2 с длительных пожаров сопоставляются с ГТ Продукта 1 (проверка на пропуски). ГТ считается сопоставленной, если для нее находится ГТ из другого пожарного продукта, удовлетворяющая условиям (Условия нахождения сопоставления). По количеству сопоставленных и не сопоставленных ГТ для обоих случаев рассчитываются ошибки Продукта 1 (ошибка ложных срабатываний и ошибка пропусков).

Настраиваемые параметры метода (Параметры сопоставления) определяют максимальный радиус поиска ГТ для сопоставления R , а также их максимально допустимую разницу во времени детектирования T . Третьим параметром является нижний порог на время горения пожара T_{long} , для его определения, как длительный.

Таким образом, данный метод с высокой степенью достоверности позволяет оценить качество штатных пожарных продуктов в разрезе лесных пожаров, достаточно длительно развивающихся во времени. Основными преимуществами данного метода являются возможность получения однородных оценок для любых

штатных пожарных продуктов с одинаковым пространственным и временным покрытием, а также возможность подтверждать правильность ГТ в режиме реального времени (с задержкой в сутки) и для всех ГТ (метод подтверждающий все данные постоянно, а не разовое подтверждение тестовой выборки данных)

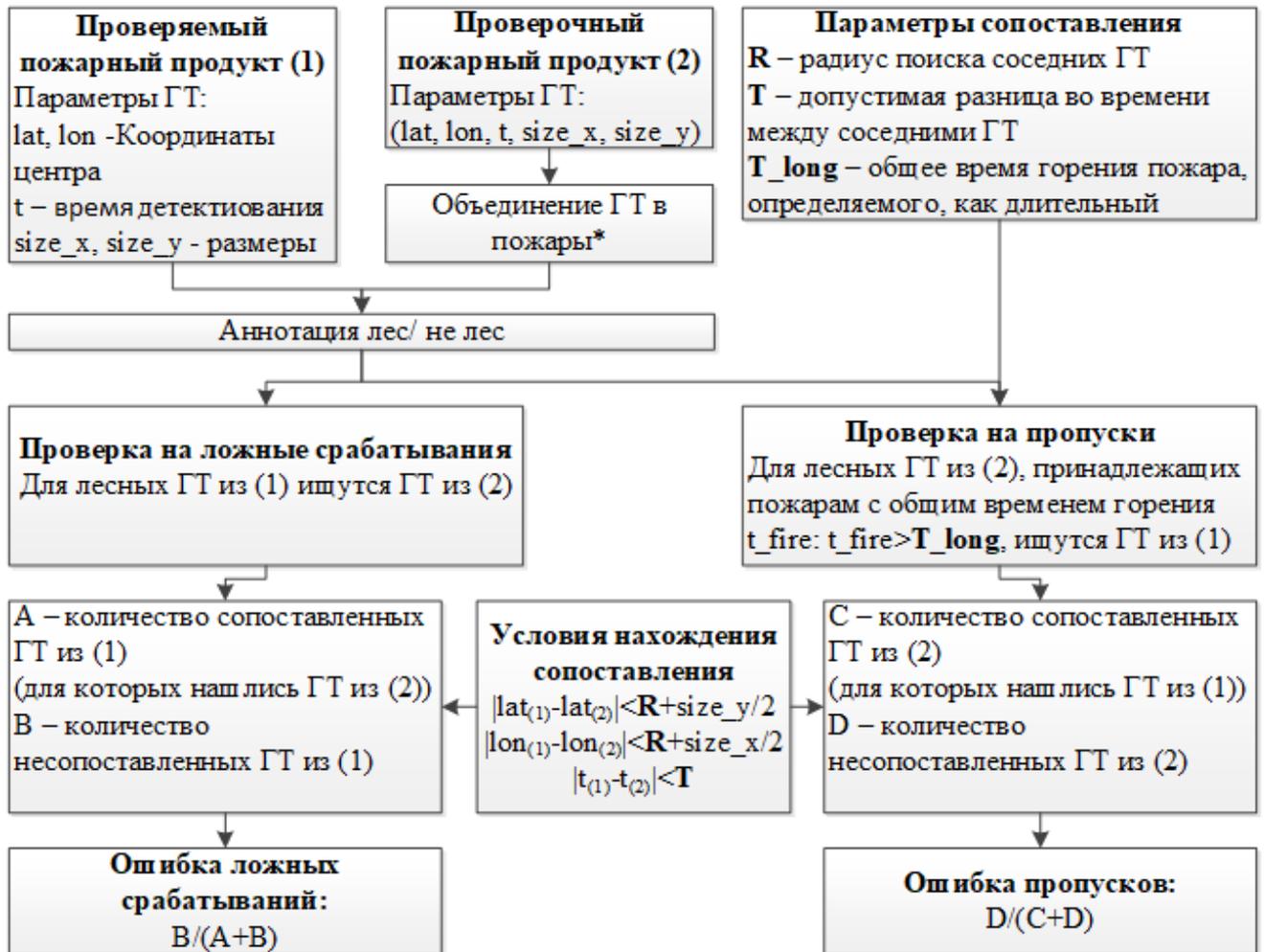


Рисунок 3.9 - Схема метода оценки качества результата детектирования пожаров

*группы ГТ объединенных по пространству и времени (Галеев и др., 2005)

Оценка качества штатных пожарных продуктов

Предложенный метод был использован для оценки штатных пожарных продуктов VNP14IMG (VIIRS), SL_2_FRP (SLSTR), MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily) (таблица 3.1). Рассматривались данные за 2024 год, покрывающие территорию РФ, в качестве Продукта 2 использовался MODIS Collection 6, имеющим наиболее высокий уровень достоверности среди глобальных пожарных продуктов. Правильность нахождения сопоставления

между ГТ Продукта 1 и Продукта 2 или определения отсутствия такого сопоставления была также проверена визуально. Анализ порядка 100 случаев отсутствия сопоставления результата детектирования с ГТ по MODIS показал правильность определения данных случаев, как ЛД. Что касается оценки пропусков, следует отметить, что она является оценкой «сверху», поскольку не учитывает того, что ГТ, обнаруженные по данным MODIS могут не детектироваться на данных других приборов в силу объективных причин (например, в период между наблюдениями различными спутниками: пожар может возникнуть, фронт пожара может существенно сместиться, развитие облачности может «закрывать» или «открывать» области в которых происходит горение). В результате некоторое количество точек определяются как пропуски неправильно. Однако, такая ошибка возникает в небольшом количестве случаев и становится заметной, только когда количество реальных пропусков близко к нулю.

Показатели пожарных продуктов по данным MERSI-II и SLSTR оказались значительно ниже продукта по данным VIIRS. Это послужило мотивацией в дальнейшем провести адаптацию алгоритма MOD14 не только для данных МСУ-МР, для которых задача детектирования пожаров в глобальном масштабе до этого не решалась, но и для данных MERSI-II и SLSTR, с целью возможного повышения качества соответствующих пожарных продуктов.

Таблица 3.1 - Оценки ошибок для данных детектирования лесных пожаров за 2024 год для различных глобальных продуктов на территории РФ (в качестве проверочного пожарного продукта использовался MODIS Collection 6)

Глобальный пожарный продукт	Прибор	Ошибка ЛД	Ошибка пропусков
MERSI-II Global Fire Spot Monitoring (Daily)	MERSI-II	7,8 %	4,8 %
SL_2_FRP	SLSTR	3,53 %	5,77 %
VNP14IMG	VIIRS	1,8 %	2,68 %

Метод адаптации

Задача адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными с других спутниковых систем наблюдения Земли, обладающих сопоставимыми с прибором MODIS характеристиками, может быть формализована как задача минимизации определяемых методом оценки качества показателей ошибок результата детектирования, полученного на исходном наборе данных рассматриваемого прибора в результате применения модифицированного алгоритма MOD14. При этом рассматриваются только пожары, определяемые на территории РФ. Для решения такой задачи был предложен соответствующий метод, схема которого представлена на рисунке 3.10. Общий принцип метода заключается в итерационном подходе – каждый шаг внешнего цикла соответствует увеличению объема данных, на котором проводится калибровка алгоритма (пожарный месяц, год или потоковая обработка). 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. 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 разбиение задачи минимизации ошибок на каждом шаге на две последовательные подзадачи – минимизация ЛД (Сопоставление 1) и минимизация пропусков (Сопоставление 2). Такое

разделение сделано по нескольким причинам. Во-первых, высокая ошибка ЛД означает, что алгоритм слабо различает пожары от не пожаров в целом. Это как правило возникает из-за проблем с различными фильтрациями (ЛД на горячих поверхностях, воде, рядом с облачностью, из-за ошибок в данных). Таким образом, первоначально необходимо правильно настроить работу фильтраций, без которых оценка пропусков перестает быть показательной. Во-вторых, процесс устранения ЛД с помощью модификации порогов использует в качестве входных данных только результат детектирования. Таким образом, можно избежать повторной обработки данных, что является затратной по времени операцией. При минимизации пропусков обойтись только работой с результатом детектирования невозможно, так как в нем отсутствуют данные пропущенных ГТ, которые можно восполнить только повторной обработкой данных с модифицированными порогами.

Оба сопоставления происходят с использованием метода оценки качества. Для них используются следующие параметры сопоставления – радиус поиска соседних ГТ $R = 0.01$ градуса, максимальная допустимая разница во времени между соседними ГТ $T = 1$ стуки, общее время горения пожара, определяемого, как длительный $T_long = 7$ суток. Проверочный пожарный Продукт 2 - MODIS Collection 6.

Целью Сопоставления 1 является минимизация ЛД до достаточно низкого уровня (количество ЛД много меньше количества пропусков и количества правильных детектировании). Количество пропусков при этом сопоставлении не является показательным, однако все же не может превышать критически большого значения. Критерием качества результата при Сопоставлении 1 является доля ЛД, не превышающая 10% и доля пропусков, не превышающая 70%. После успешного прохождения Сопоставления 1 достаточно низкий показатель ЛД позволяет перейти ко второму этапу (Сопоставление 2). Критерием качества результата при Сопоставлении 2 являются доля пропусков, не превышающая 10% и доля ЛД, не превышающая 3%. Целью второго этапа является минимизация пропусков при одновременном уменьшении ЛД. Успешное

прохождение данного сопоставления при актуальной версии порогов означает либо переход на следующий шаг внешнего цикла, либо окончание процесса адаптации в случае, если проверке подвергались данные, получаемые в потоковом режиме.

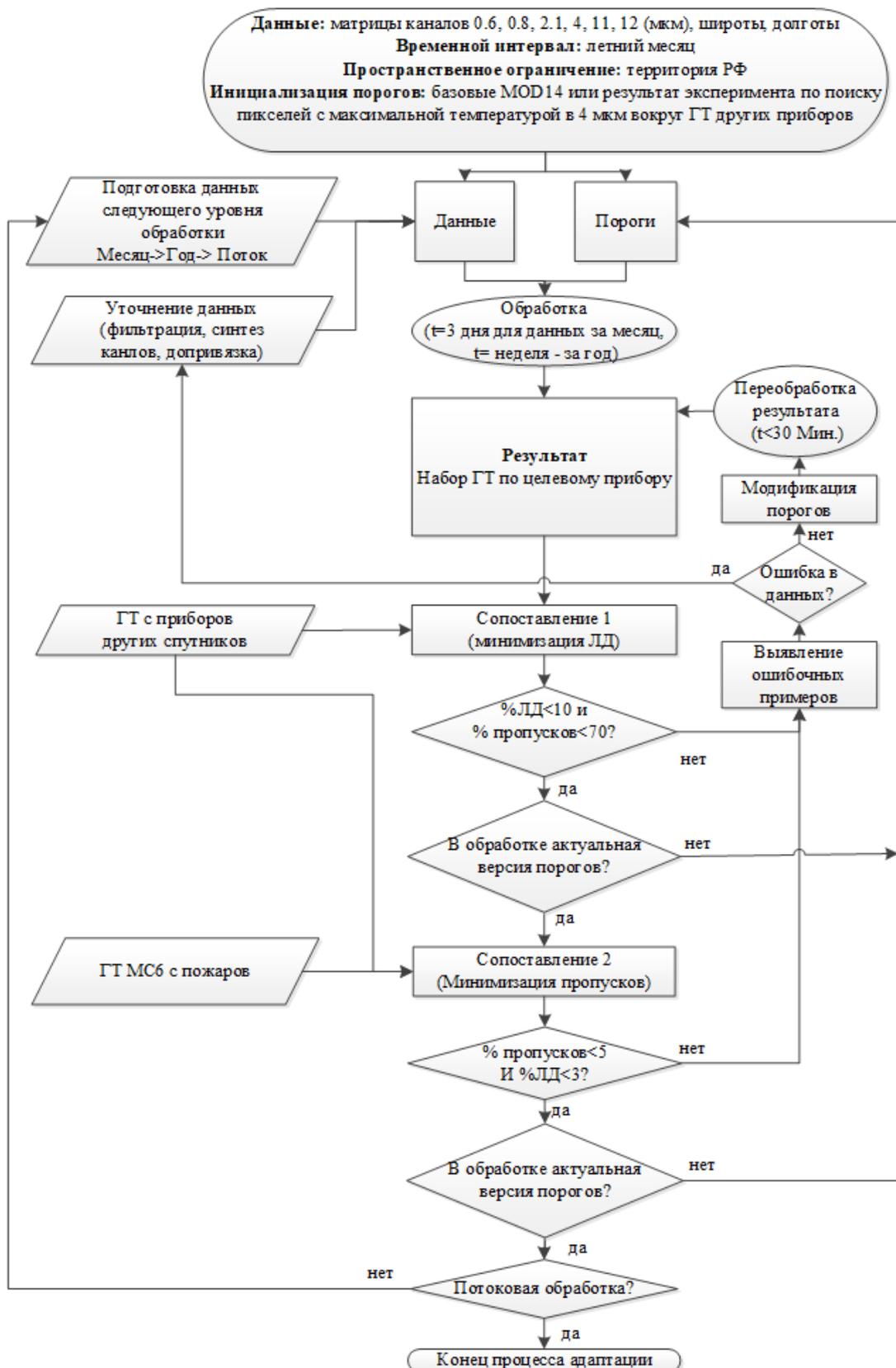


Рисунок 3.10 - Схема метода адаптации алгоритма детектирования пожаров MOD14 для работы с данными различных спутниковых систем

3.3 Адаптация алгоритма MOD14 для детектирования пожаров по данным с прибора МСУ-МР

Разработанный метод адаптации MOD14 в первую очередь был применен для работы с данными МСУ-МР. Для определения нулевой версии пороговых значений алгоритма было проведено сопоставление распределений температур, регистрируемых MODIS и МСУ-МР на пожарах. Информационный продукт пожаров MCD14DL содержит информацию о всех ГТ, зарегистрированных MODIS, включая температуры в 21/22 (4 мкм) и 31 (11 мкм) каналах. Для построения аналогичной выборки по данным МСУ-МР, пожары на снятых данным прибором сценах локализовались с опорой на ГТ продукта MCD14DL, которые были зарегистрированы на территории РФ за 2021 год. Каждой ГТ подбирался покрывающий ее набор данных МСУ-МР. Время съемки такого набора отличалось от времени регистрации ГТ не более, чем на 30 минут. На момент построения данной выборки учитывалась проблема с возможной ошибкой географической привязки сцен МСУ-МР, поэтому на сцене МСУ-МР выбиралась точка с максимальной яркостной температурой в 4 канале (4 мкм) в радиусе девяти километров вокруг центра с координатами ГТ MODIS. Она принималась за ГТ на сцене МСУ-МР, для нее рассчитывался описанный в *табл. 2* набор характеристик, после чего этот набор добавлялся в выборку. После этого в автоматизированном режиме выборка проходила различные фильтрации. Исключались дубли и точки, полученные со сбойных данных. Так же выделялись группы точек с похожим набором характеристик, относящиеся к данным, на которых не было подтверждено наличие пожара. В результате объём итоговой выборки превысил 12000 наборов. На рисунке 3.11 представлено сравнение распределений яркостных температур ГТ продукта MCD14DL и сформированного набора ГТ МСУ-МР в каналах со схожим спектральным диапазоном МСУ-МР (4 и 5 каналы) и MODIS (21/22 и 31 каналы).

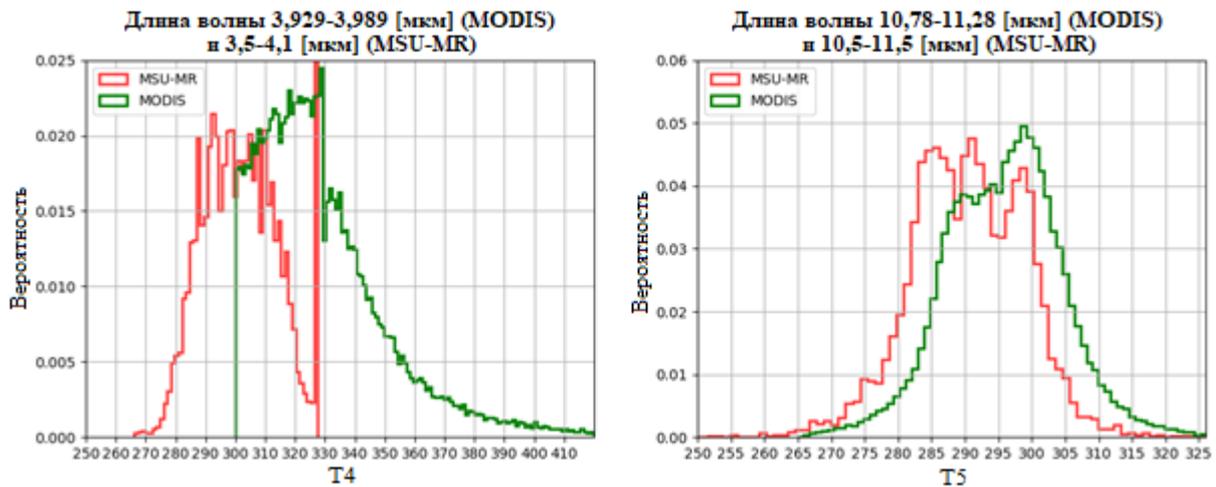


Рисунок 3.11 - Распределения яркостных температур горячих точек по данным МСУ-МР и MODIS. Слева: канал 4 МСУ-МР и канал 21 MODIS (значение по вертикальной оси красной линии в точке 327 К по горизонтальной оси достигает 0.345) Справа: канал 5 МСУ-МР и канал 31 MODIS

Анализ полученной статистики позволил выделить следующие факторы, определяющие разницу между температурами ГТ, полученных с двух разных приборов: температуры ГТ в 4 и 5 канале МСУ-МР в среднем ниже температур ГТ MODIS, для набора ГТ МСУ-МР распределения температур имеют более узкий диапазон, насыщение 4 канала МСУ-МР при температуре в 327 К приводит к большой доле ГТ, зарегистрированных с этой температурой (порядка 35%). Также было обнаружено, что для МСУ-МР ГТ, имеющие температуру $280 \text{ К} < T_4 < 300 \text{ К}$, в большинстве случаев были зарегистрированы на ночных данных. Такие различия говорят о необходимости изменения порогов MOD14 для работы с данными МСУ-МР.

Собранная выборка ГТ по МСУ-МР была дополнена отрицательной выборкой точек (порядка 200 тыс.), не являющихся горячими. Для этого был взят набор данных МСУ-МР, покрывающих области, на которых не было зарегистрировано ГТ MODIS в день съемки взятого набора данных. Далее параметры MOD14 изменялись таким образом, чтобы алгоритм срабатывал положительно на обучающей выборке горячих точек и отрицательно на выборке

точек, не являющимися горячими. В результате порог `hot_t4` был установлен в районе температуры насыщения прибора МСУ-МР (327 К). Так же изменениям подверглись параметры `sigma1` и `sigma2`, определяющие необходимую величину превышения значений T_4 и DT для ГТ от среднего по фону (произведение `sigma` и абсолютного среднего отклонения по фону вокруг точки). Уменьшение значений данных параметров позволило алгоритму увеличить количество правильных детектирований без значимых увеличений количества ЛД. Таким образом, в результате эксперимента по поиску пикселей с максимальной температурой в канале 4 мкм данных МСУ-МР вокруг ГТ MODIS было получена первая версия набора параметров, позволяющих использовать MOD14 с данными МСУ-МР.

На втором этапе была проведена тестовая обработка данных МСУ-МР за август 2022 года на территории РФ алгоритмом MOD14 с нулевой версией скорректированных параметров. Детектированные алгоритмом ГТ были изучены на предмет возможных пропусков и ЛД. В результате анализа ошибочных случаев `sigma1` и `sigma2` были повторно уменьшены.

Третьим этапом стало проведение аналогичной обработки данных МСУ-МР, покрывающих территорию РФ за весь 2022 год, алгоритмом с обновленной версией параметров. Такое увеличение объема обрабатываемых данных помогло выделить несколько групп случаев возникающих пропусков.

Первая такая группа связана с детектированием пожаров на ночных наборах данных. Для устранения пропусков изменениям подверглись сразу несколько параметров, которые были отдельно определены для ночных данных. Так порог `hot_t4` был уменьшен на 5 К относительно оригинального MOD14. Так же был изменен порог `low_t4`, определяющий минимальную температуру T_4 , ниже которой точка не считается ГТ. Как было отмечено ранее, для ночных данных МСУ-МР были зафиксированы ГТ с температурой 280-300 К, поэтому данный порог был соответствующим образом изменен для ночных сцен. Другим порогом, отдельно определенным для ночных данных является `low_dt`, определяющий минимально возможную для ГТ DT . Как и в случае с `low_t4`, оказалось, что на ночных данных в области пожаров наблюдалось минимальное расхождение в

разнице температур, что послужило мотивацией для уменьшения данного параметра для ночных данных до минимума. Важно отметить, что эксперимент по полному исключению данной проверки для ночных данных привел к возникновению большого количества ЛД.

Вторая группа пропусков оказалось связана с ложной фильтрацией облачности. Решением проблемы стало увеличение эмпирическим путем значений фильтрующих порогов в видимых каналах (cloud_r1r2, cloud_r2).

Третья группа пропусков наблюдалась для больших пожаров (больше соседних 10 ГТ на одном наборе данных). Оказалось, что проблема крылась в определении «перегретых точек» – пороги, по которым они определялись оказались слишком высокими для данных МСУ-МР. В результате, на больших пожарах при расчете фоновых характеристик большая часть пожара вокруг рассчитываемой точки не относилась к перегретым точкам, что приводило к завышению средних значений фона и последующему отрицательному срабатыванию тестов. Уменьшение порогов для определения перегретых точек (bkg_t4 и bkg_dt) стало решением данной проблемы и свело к минимуму количество пропусков на больших пожарах на рассматриваемых данных.

Некоторое улучшение в точности работы алгоритма так же удалось получить благодаря изменениям параметров del31 и minbkg. Del31 определяет минимальную необходимую разницу между T_5 ГТ и суммы среднего и абсолютного среднего отклонения по фону. Для МСУ-МР данный параметр был уменьшен на 1 К. Minbkg определяет величину абсолютного отклонения для перегретых точек – в случае, если оно превышает заданную величину, проверка разницы между T_5 и средним становится необязательной, так как в данном случае малое значение данной разницы скорее всего будет связана с действием большого активного пожара, которому принадлежит данная ГТ. Так как в «перегретые точки» в силу насыщения прибора при 327 К могут попадать только точки с $315 \text{ К} < T_4 < 327 \text{ К}$, максимально возможное абсолютное среднее отклонение для «перегретых точек» не может превышать 12 К, что сильно меньше, чем для

данных MODIS (до 185 К), что послужило мотивацией для уменьшения данного параметра до минимума.

Основными источниками ЛД на рассматриваемых данных оказались детектирования на водных и горячих поверхностях. Для устранения ЛД на водной поверхности в модифицированном алгоритме, как и алгоритме MOD14 используется маскирование воды. Для проведения фильтрации ЛД на горячих (перегретых) поверхностях для данных МСУ-МР, одной из основных сложностей данной задачи является низкая температура насыщения 4 канала. Эта особенность делает неприменимой для данных МСУ-МР большую часть тестов MOD14, фильтрующих горячие поверхности. Поэтому в настоящий момент области, на которых может возникать значительное число ошибок из-за перегрева поверхности, исключались из рассмотрения.

Вместе с тем, полное исключение таких областей из рассмотрения потенциально может ошибочно фильтровать правильные ГТ в этих областях. Все это послужило мотивацией для проведения работ по формированию секции фильтрации пустынь и других горячих поверхностей с учетом специфики данных МСУ-МР. Для этого была построена выборка ЛД на пустынях, где пожары заведомо исключены. Далее, аналогично описанному ранее первому этапу адаптации алгоритма, были проанализированы распределения температур из точек выборки в 4 (4 мкм) и 5 (11 мкм) каналах МСУ-МР. Для 4 канала обнаружилось, что порядка 94% ЛД имеют предельную температуру в 327 К. Анализ распределения температур в 5 (см. рисунок 3.12) позволил выявить явное смещение в сторону высоких температур (>310 К). Дополнительно на выборке ЛД был протестирован порог на 2 канал (0.9 мкм) МСУ-МР, позаимствованный из секции MOD14. Оказалось, что порядка 97% выборки имеют коэффициент отражения во втором канале $R_2 > 0,15$.

Полученные результаты далее использовались для составления набора тестов, фильтрующих горячие поверхности.

Целью в данном случае была одновременная максимизация количества срабатываний фильтрации на выборке точек с горячих поверхностей и

минимизация срабатываний на выборке ГТ. Сравнение результатов работы различных вариантов фильтров на двух выборках представлены в таблице 3.2.

Итогом проведённой работы стало включение набора тестов $R_2 > 0.15$, $T_5 > 310$ К, $T_4 = 327$ К в секцию фильтрации горячих поверхностях. Основываясь на результат проведенного исследования, можно утверждать, что данная секция будет фильтровать порядка 90% ложных срабатываний, при этом ошибочно фильтруя менее 1% настоящих ГТ. Такой результат может являться опорой для дальнейших исследований возможности фильтрации ЛД на горячих поверхностях для данных МСУ-МР.

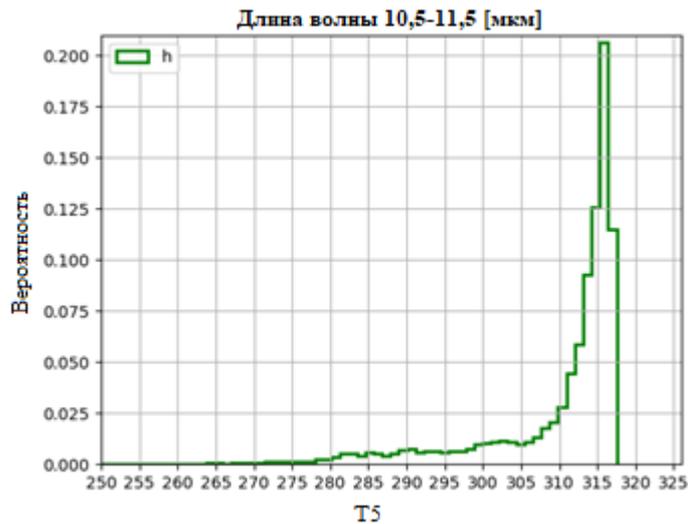


Рисунок 3.12 - Распределения яркостных температур ЛД на горячих поверхностях по данным МСУ-МР в 5 канале

Таблица 3.2. - Сравнение работы различных вариантов фильтраций на выборках ЛД на горячих поверхностях и горячих точек

	Всего в выборке	$T_4=327$ К	$T_5>310$ К	$T_5>310$ К $T_4=327$ К	$R_2>0.15$	$R_2>0.15$ $T_5>310$ К $T_4=327$ К
Выборка	164072	154332	156640	153424	159790	149404

ЛД		(94.1%)	(95.5%)	(93.5%)	(97.4%)	(91.1%)
Выборка	13351	4603	116	78	6201	53
ГТ		(34.5%)	(0.9%)	(0.6%)	(46.4%)	(0.4%)

Модифицированный алгоритм MOD14 для работы с данными МСУ-МР

Основным результатом проведенных работ по адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными МСУ-МР стал набор параметров (таблица 3.3), которые используются при расчете тестов для каждого пиксела изображения, представленных в *табл. 3*.

Таблица 3.3 - Набор параметров оригинального MOD14 и измененной версии для работы с МСУ-МР

Параметр	Значение для MOD14	Значение для модифицированного алгоритма по данным МСУ-МР
cloud_r1r2	1.2	0.9
cloud_t6	265 К	265 К
low_t4	300 К ³	280 К/300 К (ночной/дневной)
cloud_r2	0.35	0.39
low_dt	10 К ¹	1 К/10 К
bkg_t4	315 К/325 К	315 К
bkg_dt	10 К/20 К	10 К
hot_t4	320 К/360 К	315 К/325 К
sigma1	3.5	1.5
deldt	6 К	6 К

³ В Collection 6 low_t4 и low_dt являются динамическими и считаются отдельно для каждого скана. В таблице приведены минимальные получаемые значения данных порогов

sigma2	3	1.5
del31	4 К	3 К
minbkg	5 К	1 К

Данные изменения, вместе с переработкой других секцией MOD14 сделали алгоритм применимым к данным МСУ-МР (текущая схема модифицированного алгоритма представлена на рисунок 3.13)

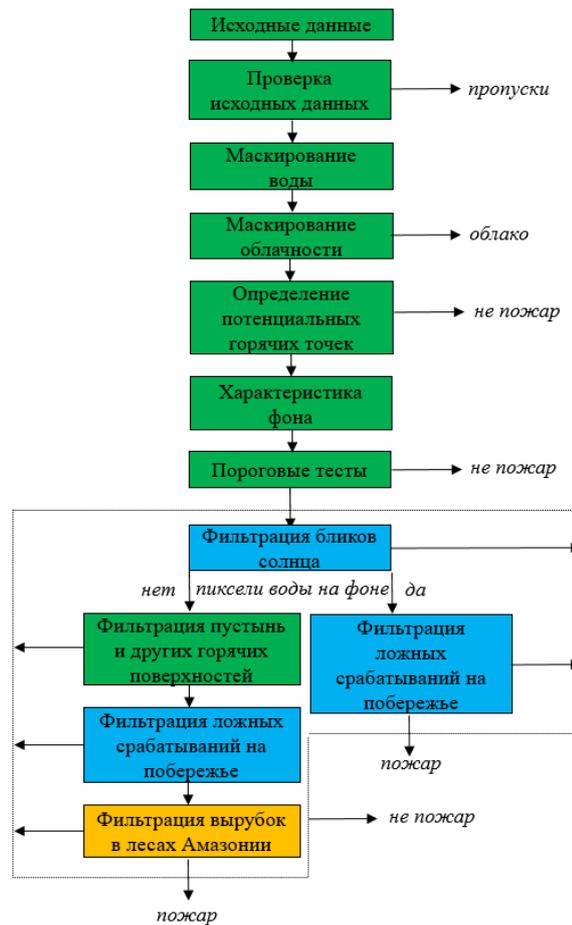


Рисунок 3.13 - Схема модифицированного алгоритма MOD14. Зеленым цветом выделены секции, которые так или иначе были изменены для работы с данными МСУ-МР, голубым – секции, оставшиеся без изменений, оранжевым – секция, исключенная из модификации алгоритма

Сравнение результатов детектирования ГТ по данным МСУ-МР и MODIS на территории РФ за 2022

При анализе имеющихся данных МСУ-МР оказалось, что часть этих данных являются недостоверными из-за проблем с географической привязкой или наличия ошибочных значений в пикселах. Для оценки качества работы модифицированного MOD14 ошибки в данных либо устранялись, либо такие данные отбрасывались. Таким образом, метод оценки качества был применен для результата работы модифицированного MOD14 на всех доступных достоверных наборах данных МСУ-МР за 2022 год, покрывающих территорию РФ. Результат сопоставления представлен в таблице 3.4. Как было отмечено ранее, получаемая оценка ошибок пропусков является оценкой «сверху». Поэтому, для уточнения оценки пропусков визуально был проанализирован 101 пожар MODIS, для которых не было сопоставлено ни одной ГТ МСУ-МР и при этом они покрывались хотя бы одной сценой МСУ-МР. В результате анализа оказалось, что только 19% таких пожаров были видны на сценах МСУ-МР. Остальные пожары были покрыты облачностью. Уточненная таким образом оценка ошибки пропусков приведена в столбце «уточненная ошибка пропусков» таблицы 3.4.

Полученные цифры, безусловно служат серьезной аргументацией в пользу применимости модификации MOD14 для детектирования ГТ по данным МСУ-МР. Большой объем данных, на котором проводилась проверка качества работы алгоритма, позволяют говорить об устойчивости результата детектирования (РД) для разных лесных зон и времени года на территории РФ. Что касается устойчивости алгоритма к изменчивости различных пожарных сезонов, проверка качества его работы на данных за 2023 год, проводимая в режиме реального времени, дает схожие с представленными показатели ошибок ЛД и пропусков.

Таблица 3.4 - Сопоставление ГТ МСУ-МР и MODIS на территории РФ за 2022 год

Дополнительная фильтрация ЛД рядом с облачностью и итоговый результат

ГТ МСУ-МР		ГТ MODIS		Ошибки для МСУ-МР		
сопост. с MODIS	не сопост. с MODIS	сопост. с МСУ-	не сопост. с МСУ-	Ошибка ЛД	Ошибка пропусков	Уточненная ошибка пропусков

			MP	MP			
всего	78842	6216	56406	1745	7,3%	3,0%	0,57%
лесных	61895	1848	49724	911	2,9%	1,8%	0,37%

27 июня 2023 года был произведен запуск на орбиту спутника Метеор М2-3, так же оборудованного прибором МСУ-МР. Адаптированный алгоритм детектирования пожаров был апробирован для работы с данными этого прибора. Результат обработки данных за конец августа - начало сентября 2023 показал, что прибор на М2-3 оказался более чувствителен к ЛД рядом с облачностью. Дополнительная калибровка параметров алгоритма, связанных с фильтрацией облачности решила проблему на рассматриваемом наборе данных. Однако, после обработки данных МСУ-МР с Метеора М2-3 за лето 2024 года оказалось, что в результате работы алгоритма по-прежнему наблюдалось значимое количество ЛД (около 10-30%), возникающих на дневных данных рядом с облачностью. Ошибочные детектирования в большинстве случаев возникали на данных с большим количеством небольших облаков, не соединенных между собой. Тень от таких облаков может занижать фоновую температуру для точек, находящихся рядом с тенью, что приводит к случаю ЛД. В результате анализа ошибочных случаев было обнаружено, что ЛД на данных не объединяются в группы по пространству (расстояние между точкой в группе и ближайшем соседом из этой группы меньше 0,5 км) более, чем в три точки. Исключение групп с тремя точками и меньше полностью решало возникшую проблему, однако при этом ошибочно фильтровалась и часть правильных детектирований. Поэтому было предложено несколько простых проверок точек в малых группах (таблица 3.5), при прохождении которых такие точки также определялись как правильные детектирования. Реализация такой схемы позволило окончательно решить проблему ЛД рядом с облачностью без значимого увеличения ошибки пропусков.

Таблица 3.5 - Условия, по которым проводится общая фильтрация ЛД на облачности. ГТ определяется как правильная при прохождении одного из трех условий, иначе определяется как ЛД

1. Принадлежность к большой группе ГТ	Количество ГТ в группе >3
2. Достаточно «теплые» ГТ	$T_4 > 305$ and $T_5 > 290$
3. Ночные ГТ	$R_2 = 0$

29 февраля 2024 года был проведен запуск на орбиту спутника Метеор М2-4. Данные с МСУ-МР, установленном на этом спутнике, в надлежащем объеме доступны с 30 мая 2024 года, при их обработке так же использовалась дополнительная фильтрация ЛД рядом с облачностью. Отдельно нужно отметить, что с 17 июля 2024 года перестали поступать данные с МСУ-МР Метеора М2-2. Все имеющиеся за 2024 год данные МСУ-МР с трех спутников были обработаны, полученный результат был сопоставлен с ГТ MODIS, что позволило определить ошибку ЛД в 2 % и ошибку пропусков в 0,5% (без уточнения) для лесных ГТ (см. таблицу 3.8). Данные показатели сопоставимы с оценкой качества продукта по данным прибора VIIRS (см. таблицу 3.1) и позволяют утверждать, что адаптированный алгоритм детектирования пожаров исправно работает на данных МСУ-МР со спутников Метеор М2-2, М2-3, М2-4.

3.4 Адаптация алгоритма MOD14 для детектирования пожаров по данным с приборов SLSTR, MERSI-II

Адаптация для работы с данными SLSTR

Метод адаптации был применен к алгоритму MOD14 для работы с данными прибора SLSTR. Калибровка алгоритма последовательно проводилось на данных за август 2022, июль/август 2023 и всего 2024 года. В нулевом варианте были взяты пороговые значения, предложенные в методе (W. Xu and M.J. Wooster 2023), описанном ранее в разделе 1.2. Первая итерация адаптации алгоритма показала необходимость в воспроизведении схемы построения синтетических данных ВТ, объединяющих данные каналов S7 и F1. Следующая итерация позволила выявить основную причину возникновения ошибок ЛД. Оказалось, что

ошибки часто возникают в ситуациях, когда над достаточно теплой поверхностью наблюдается разрывная облачность. Такая облачность довольно проблематично фильтруется пороговыми тестами, в результате чего ошибочно попадает в выборку для расчета статистики фона потенциальных ГТ. Тем самым, фоновые температуры искусственно занижаются за счет холодных температур на облаках, что приводит к возникновению ЛД на краях облачности. Для их устранения была сделана дополнительная фильтрация результата детектирования. Такая фильтрация делается с помощью масок облачности The SLSTR Level1B ('cloud_an') (SLSTR ATBD for Level 1), технически получаемых в одном комплекте с каналными данными SLSTR. Данное решение позволяет фильтровать ЛД без значимого увеличения ошибки пропусков.

Адаптация для работы с данными MERSI-II

Метод адаптации так же был применен к MOD14 для работы с данными прибора MERSI-II. Калибровка алгоритма проводилась для данных за август 2022, весну/лето 2022 и всего 2024 года. В нулевом варианте были взяты оригинальные параметры MODIS. Главной проблемой получавшегося результата детектирования являлось большое количество ЛД, возникающих на облачности. Для их устранения в первой итерации были изменены пороги фильтрации облачности, а во второй внедрена секция фильтрации облачности, которая используется при формировании пожарного продукта китайскими коллегами (Chen et al. 2022). В итоге большинство параметров модифицированного MOD14 по данным MERSI-II осталось неизменным, по сравнению с оригинальным MOD14 (см. таблицу 3.6).

Общее решение фильтрации ЛД рядом с облачностью для данных SLSTR, MERSI-II и МСУ-МР (с Метеора М2-3)

Проведенная адаптация алгоритма MOD14 для работы с данными SLSTR и MERSI-II позволила оценить работу алгоритмов на данных за весь пожарный сезон (для MERSI-II данные были доступны только по 20 июля). Оказалось, что

проблема с ЛД рядом с облачностью, ранее описанная для МСУ-МР Метеора М2-3 и М2-4, сохранялась и для данных с рассматриваемых приборов. Поэтому для них была реализована аналогичная схема фильтрации, с разницей в параметризации значений, определяющих принадлежность к большой группе ГТ и условия, по которым ГТ из таких групп все еще считались правильными (таблица 3.7).

Таблица 3.6 - Набор параметров оригинального MOD14 и измененной версии для работы с данными SLSTR и MERSI-II

Параметр	MODIS Collection 6	Значение для модифицированного алгоритма по данным SLSTR	Значение для модифицированного алгоритма по данным MERSI-II
cloud_r1r2	1,2	0,9	1,2
cloud_t6	265 К	280 К	280 К
cloud_and_r	0,7	0,3	0,4
cloud_and_t	285 К	285 К	285 К
low_t4	300 К	300 К	300 К
cloud_r2	0,35	0,35	0,35
low_dt	10 К	10 К	10 К
bkg_t4	315 К/325 К	315 К/325 К	315 К/325 К
bkg_dt	10 К/20 К	10 К/20 К	10 К/20 К
hot_t4	320 К/360 К	320 К/360 К	320 К/340 К
sigma1	3,5	3,2/5	3,5
deldt	6 К	5,6 К/15 К	6 К
sigma2	3	3/7	3
del31	4 К	3 К/7 К	4 К / 3 К
minbkg	5 К	5 К	5 К

Таблица 3.7 - Условия, по которым проводится общая фильтрация ЛД на облачности. ГТ определяется как правильная при прохождении одного из трех условий, иначе определяется как ЛД

	1. Принадлежность к большой группе ГТ	2. Достаточно «теплые» ГТ	3. Ночные ГТ
	Количество ГТ в группе >N	$T_4 > c14$ and $T_5 > c15$	$R_2 = 0$

	N	c14	c15	
MCY-MP	3	305	290	
SLSTR	2			
MERSI-II	3	310	295	

Адаптированные версии алгоритмов детектирования пожаров, с внедренной схемой дополнительной фильтрации ЛД на облачности, были использованы для обработки данных за 2024 год на территории РФ. Оценки качества полученных результатов представлены в таблице 3.8. Полученные цифры отражают повышение качества пожарных продуктов в сравнении с существующими (для MERSI-II значимым результатом стало уменьшение показателя ошибки ЛД).

Таблица 3.8 - Оценки ошибок для данных детектирования лесных пожаров за 2024 год по приборам MERSI-II (по 20 июля), SLSTR и MCY-MP на территории РФ

Прибор	Ошибка ЛД	Ошибка пропусков
MERSI-II	4,69 %	9,93 %
SLSTR	0,59 %	4,93 %
MCY-MP	2 %	0,5 %

Заключение к 3 главе

По итогам представленных в главе работ по адаптации разработанных для мониторинга пожаров методов и алгоритмов обработки спутниковых данных к работе с данными различных спутниковых систем были получены следующие результаты:

- Проведена адаптация метода оценки вероятности гибели лесов к данным VIIRS, что позволило получить вероятностные кривые гибели лесов от интенсивности горения в период действия пожаров для соответствующего прибора, которые могут быть использованы для получения оперативных оценок гибели. Главной особенностью адаптации метода является дополнительное использование такого фактора, как время детектирования ГТ в сутках (день/ночь).
- Разработан метод оценки качества результата работы алгоритма детектирования пожаров, который в том числе позволил впервые единообразно сравнить уровень достоверности штатных пожарных продуктов, получаемых с разных приборов.
- На основе метода оценки качества разработан универсальный метод адаптации алгоритма MOD14 для использования данных с различных спутниковых систем, обладающих схожими с MODIS спектральными характеристиками используемых при детектировании каналов.

- Метод адаптации алгоритма был применен к данным прибора МСУ-МР со спутников Метеор - М2-2/3/4, что позволило впервые сформировать пожарный продукт с данными по территории РФ за 2024 год с ошибкой ложных детектирований 2% и ошибкой пропусков 0,5%, что свидетельствует об устойчивости получаемого при обработке большого объема данных результата.
- Метод адаптации так же был применен для данных с приборов MERISI-II, и SLSTR. Полученный результат прошел проверку качества по разработанному методу, которая показала повышение уровня достоверности в сравнении с текущими аналогичными глобальными пожарными продуктами.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Глава посвящена примерам использования разработанных методов и алгоритмов.

Показано, как применение метода полностью автоматизированной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе оценок вероятности гибели лесов от 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 21 веке.

Также представлены основные характеристики сформированной на основе разработанных методов оценки погибшей растительности БД, и результаты проведенного с использованием данной БД анализа основных особенностей динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI веке до настоящего времени, в том числе для различных типов лесов и в различные периоды пожароопасного сезона.

В конце главы описана технологическая цепочка обработки данных МСУ-МР для мониторинга пожаров. Данная цепочка позволяет в оперативном режиме получать информацию о динамике развития лесных пожаров на территории РФ.

4.1 Оценка динамики гибели лесов от пожаров на северных территориях Земли в XXI веке

Информация о гибели лесов от пожаров на северных территориях может представлять значительный интерес как в связи с процессами, связанными с глобальными изменениями климата, так и в связи с тем, что восстановление лесов на этих территориях происходит достаточно медленно и последствия пожаров могут вызывать значительные изменения в окружающей среде (Stocks et al. 2001, Li et al. 2021). Следует отметить, что на данных территориях находится значительное число лесов. По данным MODIS Land Cover Type Product (Friedl et

al. 2019) на территориях, расположенных севернее 60 гр. с.ш. находится около 582 млн га лесов, в том числе за полярным кругом 69 млн га⁴. Эти леса распределены по территории разных страны следующим образом: севернее 60 гр. с.ш. 15% лесов находится на территории Канады, 9% на территории США, 17% на территории Европейских государств и 66% на территории России. За полярным кругом в этих странах соответственно находится 15, 10, 17 и 58 процентов лесов.

Получение информации о происходящих изменениях в таком количестве лесов достаточно затруднено в первую очередь из-за того, что подавляющая часть территорий, на которых они расположены являются труднодоступными и малонаселенными. Поэтому основными источником информации происходящих в северных лесах изменения являются спутниковые данные. Быстрое развитие спутниковых технологий в последние десятилетия позволили как накопить достаточно длинные однородные ряды спутниковых наблюдений, так и создать новые методы и подходы автоматизированной обработки данных обеспечивающих получение однородной (сопоставимой) информации по различным регионам. В том числе, такие методы и подходы в настоящее время созданы для получения информации о состоянии лесов и повреждениях их пожарами (Morgan et al. 2001, Ryan 2002, Барталев и др. 2015). Все это позволяет анализировать как состояние лесного покрова на больших территориях, так и происходящие в нем изменения.

В настоящем разделе представлена информация о гибели лесов от пожаров, которые происходили на северных территориях в 21 веке, на основе анализа однородных рядов наблюдения пожаров с использованием приборов MODIS установленных на спутниках Terra и Aqua. Для проведения оценки использовался разработанный метод (см. раздел 2.2), основанный на использовании информации об интенсивности горения пожаров. В работе также представлен краткий анализ распределений пожаров и гибели лесов от них как по годам, так и по различным территориям (странам).

⁴ Данные цифры являются средними за период с 2002 по 2021 год.

Используемый подход к оценке гибели лесов от пожаров

Для получения оценок гибели лесов от пожаров были использованы описанные ранее методы. При этом для получения информации о типе лесного покрова в работе использовался ежегодно обновляемый ряд циркумполярных карт, полученных на основе MODIS Land Cover Type Product. Для построения зависимостей между FRPS и характеристиками повреждения разных типов лесов был проанализирован ряд наблюдений пожаров на территории северных лесов РФ (расположенных севернее 60 гр. с.ш.) в период с 2006 по 2021 год. Примеры полученных зависимостей вероятности гибели основных типов лесов, представленных в используемых картах от FRPS представлены на рисунке 4.1. В силу того, что северные леса обладают примерно одинаковыми характеристиками во всей циркумполярной зоне, можно сделать предположение, что полученные зависимости характерны для всех лесов этой зоны.

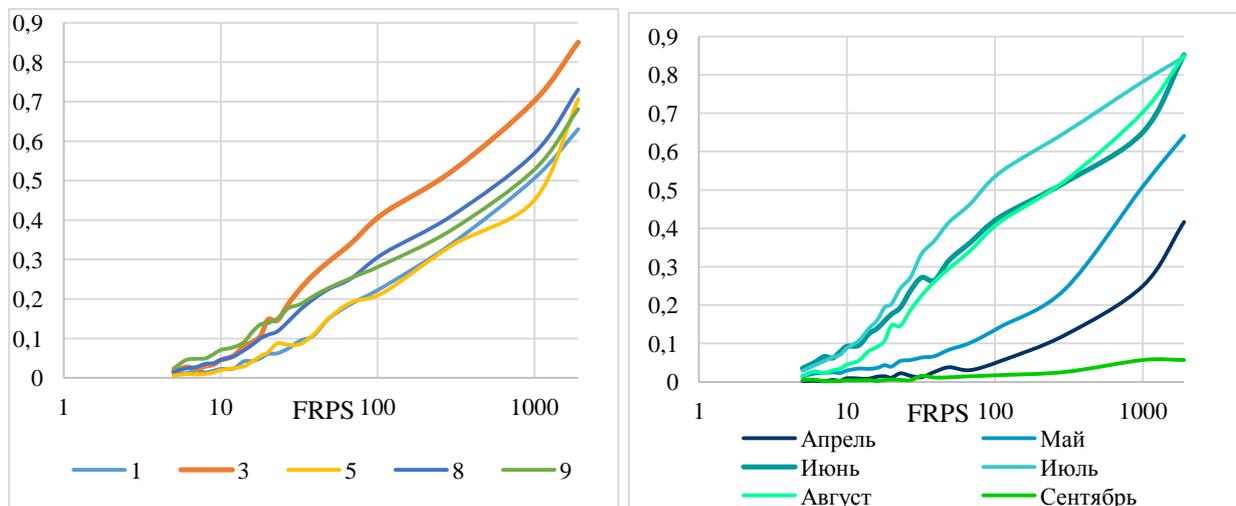


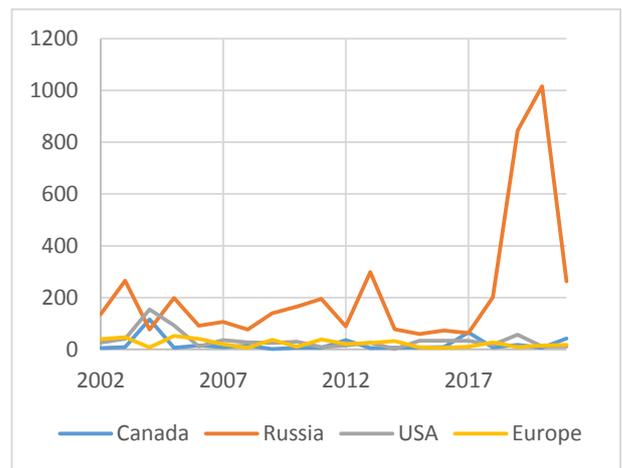
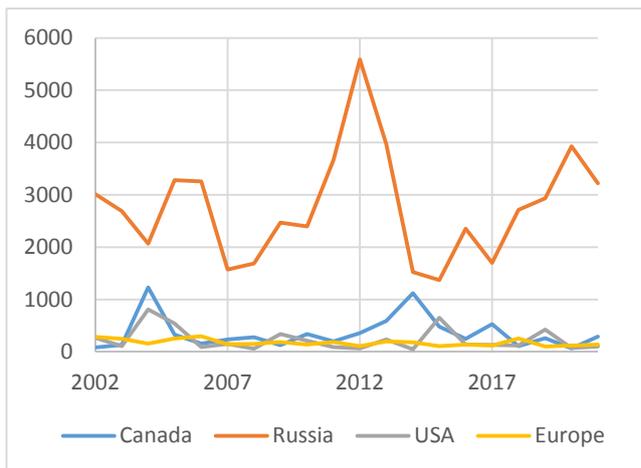
Рисунок 4.1- Вероятность гибели леса в зависимости от интенсивности горения (FRPS) для пожаров августа, действующих на разных типах растительности⁵ (слева) и для пожаров разных месяцев, действующих в хвойных листопадных лесах (справа)

⁵ Используются типы растительности карты MODIS Land Cover Type Product (Friedl et al. 2019). 1 - Evergreen Needleleaf Forests, 3 - Deciduous Needleleaf Forests, 5 - Mixed Forests, 8 - Woody Savannas, 9 - Savannas

Результаты анализа оценок гибели лесов в циркумполярной зоне

В настоящем разделе представлены первые результаты оценок гибели лесов в результате действия северных пожаров. В разделе будут приведены данные для пожаров, которые развивались севернее 60 гр. с.ш. (далее зона 60) и севернее полярного круга (66,562 гр. с.ш.) (далее зона ПК).

В период с 2002 по 2021 год в зоне 60 было зарегистрировано 70 659 пожаров, а в зоне ПК 5 997 пожаров. При этом для зоны 60 33 892 пожара было зарегистрировано в период с 2002 по 2011 год и 36 767 пожаров с 2012 по 2021. В зоне ПК с 2001 по 2011 год было зарегистрировано 2 395 пожаров, а с 2012 по 2021 3 602 пожара. Распределение пожаров в этих зонах по годам и территориям

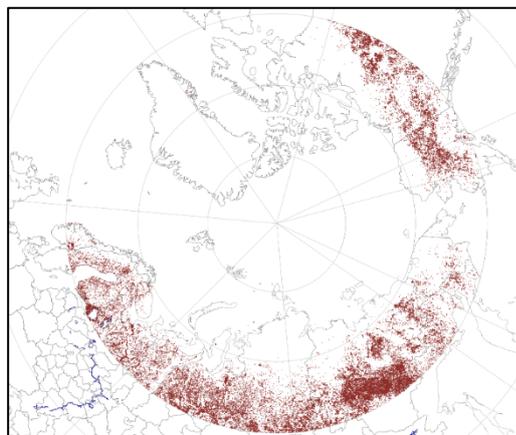


(странам) приведено на рисунках 4.2 и 4.3.

Рисунок 4.2 - Распределение пожаров, наблюдавшихся в период с 2002 по 2021 год

Рисунок 4.3 - Территории на которых возникали северные пожары в период с 2002 по 2021 год

В период с 2002 по 2021 год в зоне 60 пожарами было пройдено 102 млн га

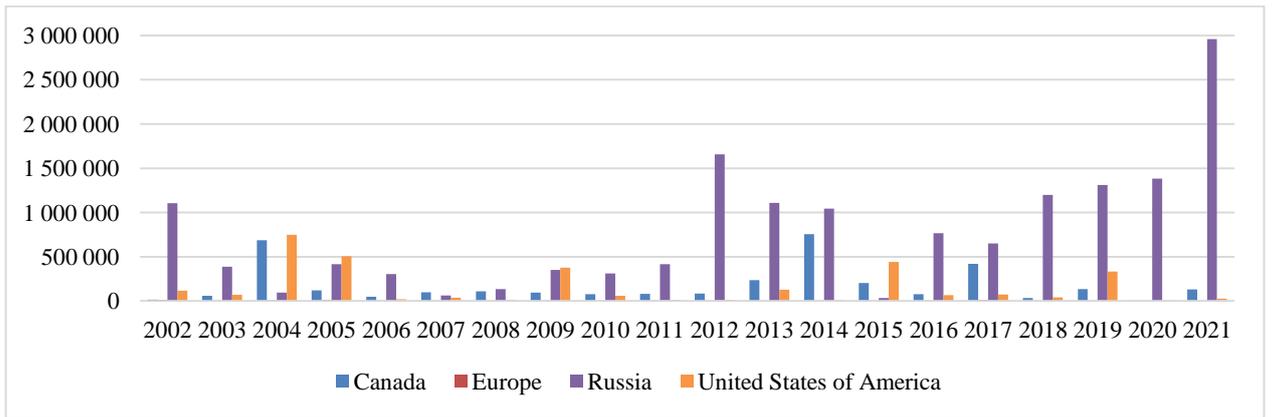


лесной территории, а в зоне ПК 8 млн га. При этом в зоне 60 погибло более 22 млн га лесов, а в зоне ПК более 2 млн га лесов⁶. Распределение площадей гибели лесов от пожаров по годам и территориям (странам) приведено на рисунках 4.4 и 4.5. Следует отметить что за периоды 2002-2011 и 2012 – 2021 в зоне 60 погибло соответственно 7 015 тыс. га лесов (1.2% от всей лесной растительности в зоне; в среднем 19.6% от площади, пройденной огнем) и 15 372 тыс. га лесов (2.6% и 23.3% соответственно), а в зоне ПК 641 тыс. га лесов (2.8% и 23.7% соответственно) и 1 379 тыс. га лесов (1.9% и 26.5% соответственно). Распределение гибели лесов по территориям (странам) и зонам приведено в таблице 4.1.

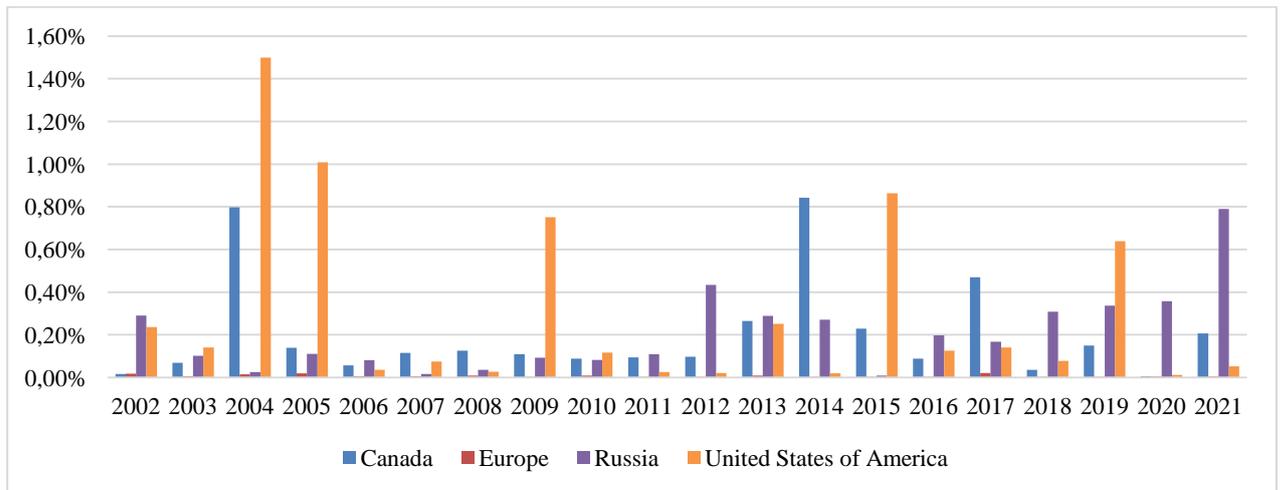
Таблица 4.1 - Средние значения в анализируемых зонах за периоды 2002-2011, 2012-2021 и 2002-2021 годы (площади погибшей лесной растительности (тыс. га)/ процента площади погибших лесов от площади лесов страны в соответствующей зоне/ процента площади погибших лесов от площадей пройденных огнем лесов)

Зоны/ период	Канада	Европа	Россия	США
«Зона 60» 2002-2011 гг	140 / 0.16% / 26.4%	6 / 0.01% /9.2%	359 / 0.01% / 16.1%	196 / 0.39% / 26%
«Зона 60» 2012-2021 гг	196 / 0.22% / 24.5%	4 / 0.01% / 8.8%	1 211 / 0.32% / 22.8%	114 / 0.22% / 25.7%
«Зона 60» 2002-2021 гг	168 / 0.19% / 25.2%	5 / 0.01% / 9.0%	785 / 0.2% / 20.8%	155 / 0.31% / 25.9%
«Зона ПК» 2002-2011 гг	12 / 0.12% / 26.4%	2 / 0.02% / 13.4%	12 / 0.03% / 14.9%	38 / 0.56% / 29.9%
«Зона ПК» 2012-2021 гг	14 / 0.13% / 28.5%	1 / 0.01% / 12.1%	101 / 0.24% / 25.8%	22 / 0.3% / 31%
«Зона ПК» 2002-2021 гг	13 / 0.13% / 27.5%	2 / 0.01% / 12.9%	56 / 0.13% / 24%	30 / 0.43% / 30.3%

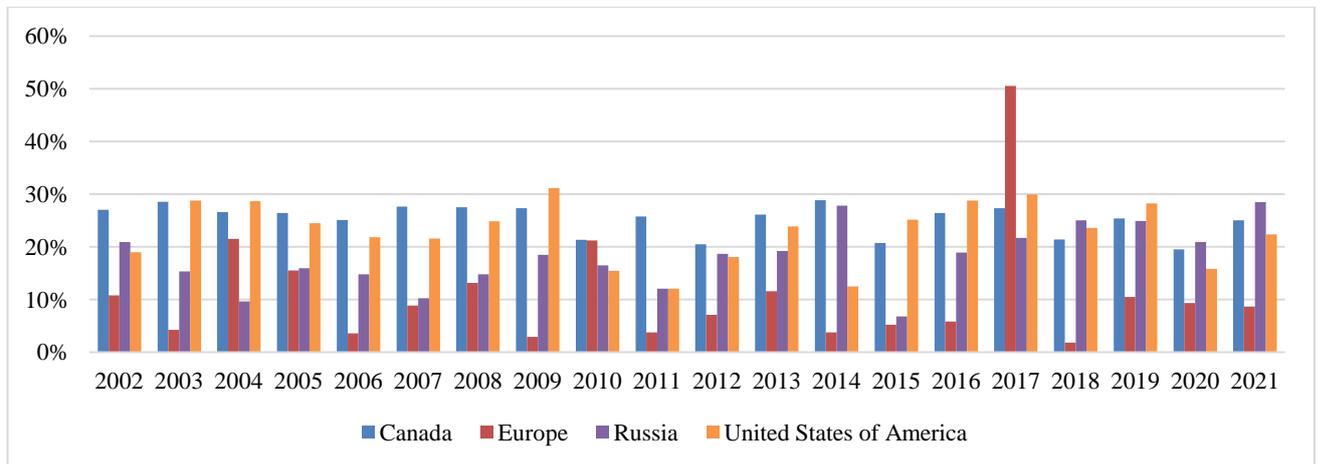
⁶ Под погибшими лесами в данном случае понимаются леса с 5 средневзвешенной категории состояния - СКС



a)



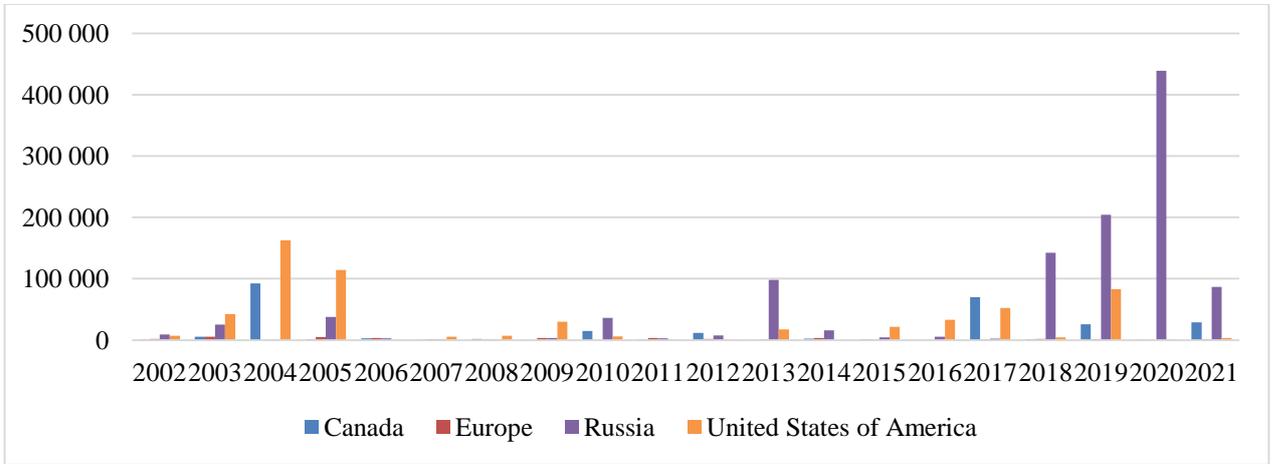
б)



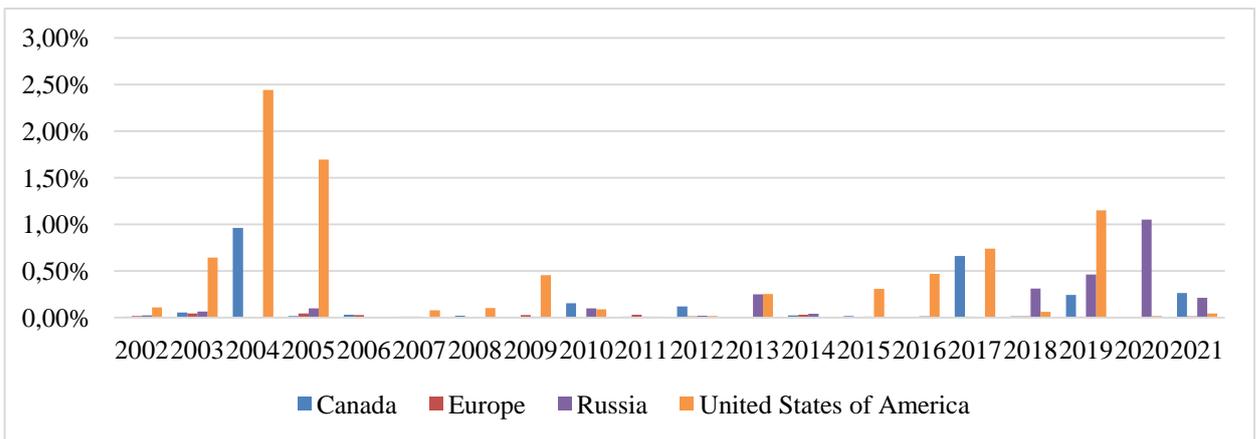
в)

Рисунок 4.4 - Распределение гибели лесов от пожаров в зоне 60 в период с 2002 по 2021 год

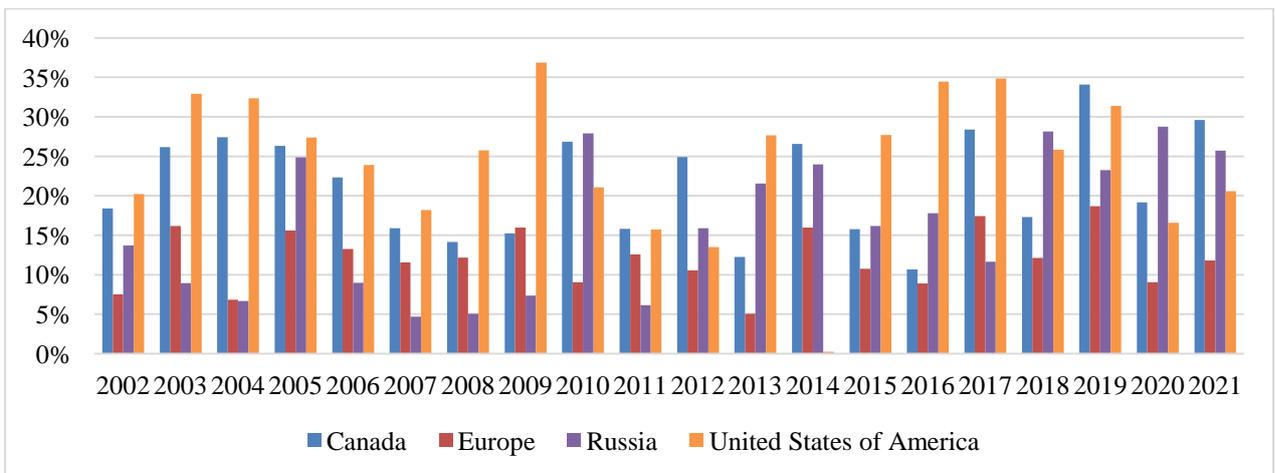
а) площади в га б) процент погибших лесов на территории различных стран (от площади лесной территории соответствующих стран) в) процент погибших лесов от площадей лесов пройденных огнем на территории различных стран



а)



б)



в)

Рисунок 4.5 - Распределение гибели лесов от пожаров в зоне ПК в период с 2002 по 2021 год

а) площади в га б) процент погибших лесов на территории различных стран (от площади лесной территории соответствующих стран) в) процент погибших лесов от площадей лесов пройденных огнем на территории различных стран

4.2 Анализ особенностей гибели лесов от пожаров на территории России в XXI веке

Одной из важных характеристик лесных пожаров является их летальность (далее летальность или летальность пожаров) – отношение площади погибшего леса к общей площади, пройденной пожарами на исследуемой территории. Летальность позволяет характеризовать степень деструктивного воздействия пожаров на леса. Анализ временной, в том числе долговременной динамики летальности, позволяет, в частности, изучить динамику особенностей повреждений лесов и оценивать «опасность» пожаров, действующих в лесах различного типа и в различные моменты времени.

База данных информации, получаемой на основе анализа интенсивности горения, о повреждениях лесов пожарами и пройденными огнем площадях на территории России в XXI веке

Для проведения анализа повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения с использованием предложенных подходов за период с 2001 по 2024 год была создана серия растровых карт. В пикселах карт содержатся значения площадей повреждений (площади 4 и 5 класса СКС), общая площадь, пройденная пожарами в пикселе, и тип леса (преобладающая порода в пикселе). Для создания карт использовалась равновеликая коническая проекция Альберса (разрешение в 230 метров). Для анализа различных особенностей повреждений лесов пожарами на территории РФ на основе данной серии карт и БД пожаров была создана БД, содержащая следующую информацию по всем пикселям растровых карт, в которых за анализируемый период хотя бы один раз было детектировано горение:

- Год регистрации пожара
- Номер дня в году действия пожара
- FRPS
- Количество ГТ, попавших в пиксель за срок действия пожара
- Тип растительности, на котором происходил пожар
- Оценка площади усыхающей растительности (4 СКС)
- Оценка площади погибшей растительности (5 СКС)
- Оценка общей площади, пройденной огнем внутри пиксела (S(FRPS))

Данная БД (далее БД FRPSD) использовалась для расчета различной статистики о повреждениях, вызванных лесными пожарами, которая будет представлена в следующем разделе настоящей работы.

Анализ повреждений лесов пожарами России в XXI веке

В данном разделе представлена информация, полученная на основе описанных выше методов оценки повреждений лесов, вызванных лесными пожарами в период с 2001 по 2024 год. В нем будет рассмотрена как временная (по годам), так и сезонная (по месяцам в течение пожароопасного сезона) динамика повреждений. При этом рассматривается как динамика площадей, на которых наблюдались повреждения 4 и 5 классов СКС, так и динамика летальности, для которой под погибшей растительностью понималась только 4 СКС, 5 СКС и 4 и 5 СКС вместе.

Для общего понимания представленных ниже тенденций динамики рассматриваемых характеристик лесных пожаров можно условно считать, что 5 класс СКС соответствует лесам, погибшим в год пожара, а 4 класс СКС соответствует сильно поврежденным лесам, которые с большой вероятностью погибнут в последующие за пожарами годы.

Временная динамика повреждений лесов пожарами в период с 2001 по 2024

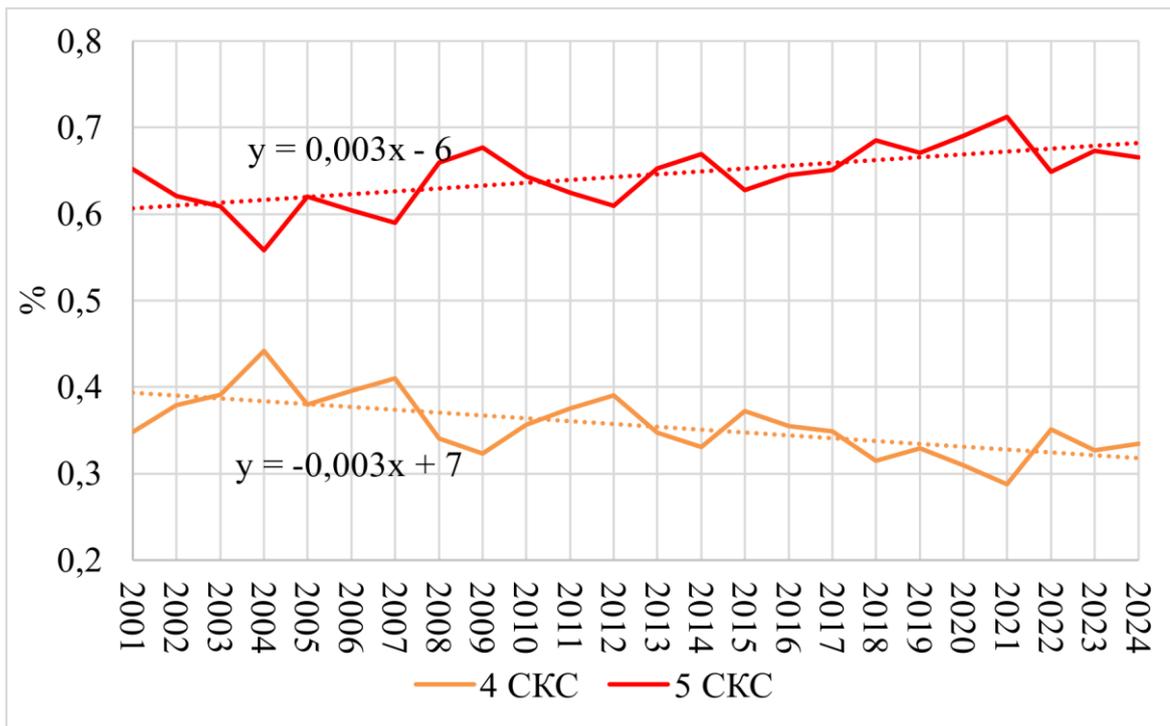
годы

На рисунке 4.6 представлена информация о динамике площадей, пройденными лесными пожарами, соответствующих 4 и 5 классам СКС. На представленных данных достаточно хорошо видно, что если площади, соответствующие 4 классу СКС, практически остаются стабильными в обсуждаемый период, то у площадей, соответствующих 5 классу СКС, наблюдается значимый положительный тренд. Временные изменения пропорции площадей, занятых лесами с повреждениями 4 и 5 классов от общей площади лесов, в которых наблюдаются сильные повреждения (4-го или 5-го класса) представлены на рисунке 4.7. Хорошо видно, что за анализируемый период достаточно существенно возросла доля лесов с повреждениями 5-го класса, т.е. тех, которые с большой вероятностью погибнут в год действия пожаров.

Следует отметить, что каких-либо значимых трендов в общей динамике площади, проходимой лесными пожарами в период с 2001 по 2024 год, не наблюдалось. Это видно, например, из данных представленных на рисунке 2.17. Данный факт также отмечался в (Лупян и др., 2017). Поэтому наблюдаемый рост площадей лесов со значительными повреждениями за рассматриваемый период должен приводить к заметному росту летальности. Это хорошо видно на рисунке 4.8. Суммарная летальность 4 и 5 класса СКС (т.е. летальность, связанная как с гибелью лесов в год пожара, так и последующей гибелью поврежденных лесов) в рассматриваемый период возросла более чем в 2 раза (с 15 до 35 %). При этом наиболее резкий рост наблюдается для летальности, соответствующей 5 классу СКС. Следует также отметить, что практически не наблюдается зависимость летальности лесов от площадей, проходимых пожарами в конкретные годы (см. рисунок 4.9). В частности, увеличение летальности не наблюдается в годы сильного или даже катастрофического горения лесов на территории РФ.

Интерес также представляют особенности повреждений, которые наблюдаются в лесах с различной преобладающей породой. Информация об этом представлена на рисунке 4.10. На нем, например, хорошо видно, что рост как площадей повреждений лесов, так и летальности пожаров в период с 2001 по 2024 год, в основном связан с их ростом в хвойных листопадных лесах.

Рисунок 4.6 - Динамика площади усыхающих (4 СКС) и погибших (5 СКС) лесов на территории РФ с 2001 по 2024



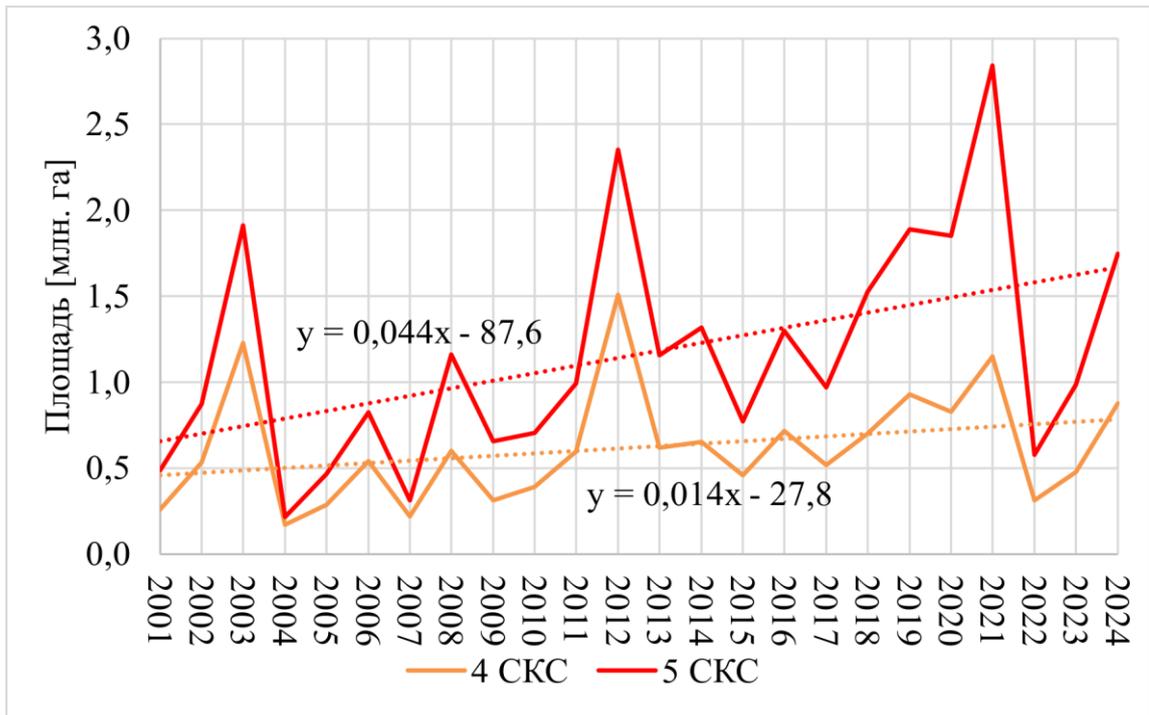


Рисунок 4.7 - Многолетняя динамика процента площадей, на которых наблюдается повреждения лесов 4 и 5 класса, от общей площади сильно поврежденных лесов (сумма площадей, занятых лесами с повреждениями 4 и 5 классов СКС)

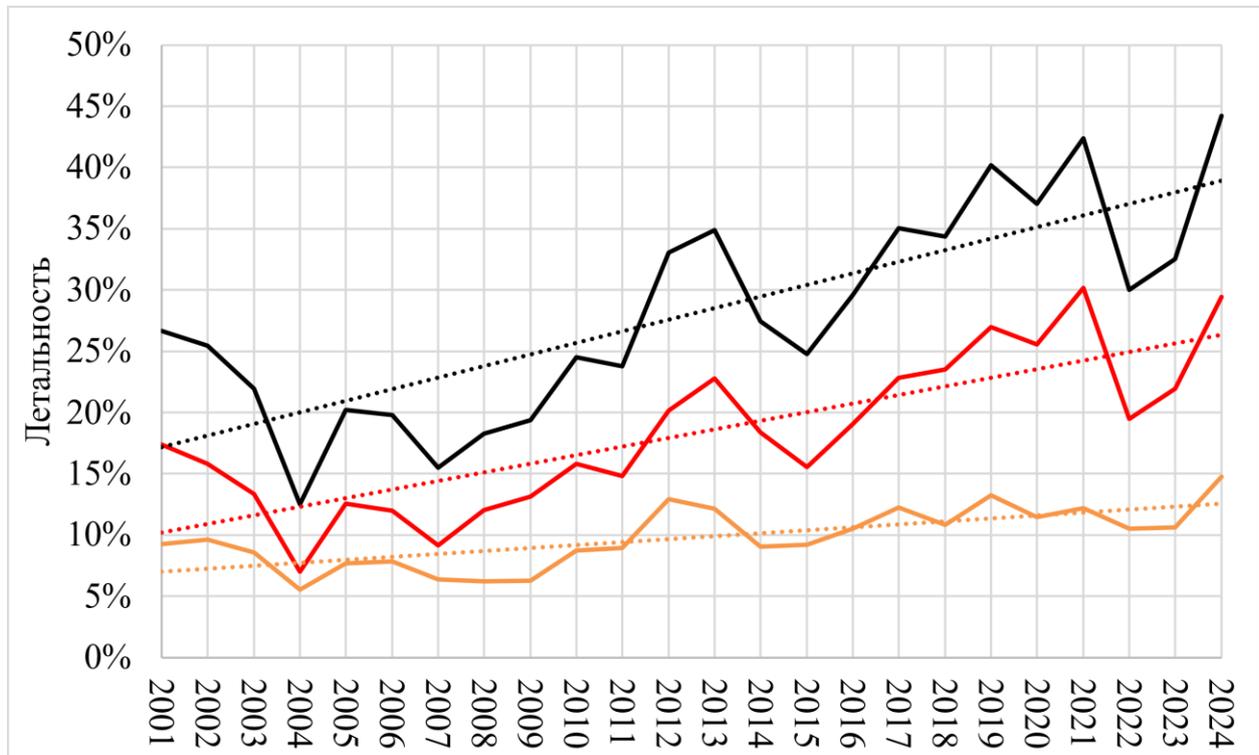


Рисунок 4.8 - Динамика летальности лесов на территории РФ с 2001 по 2024, где под погибшей растительностью считается только 4 СКС (оранжевая линия), 5 СКС (красная линия), 4 и 5 СКС вместе (черная линия)

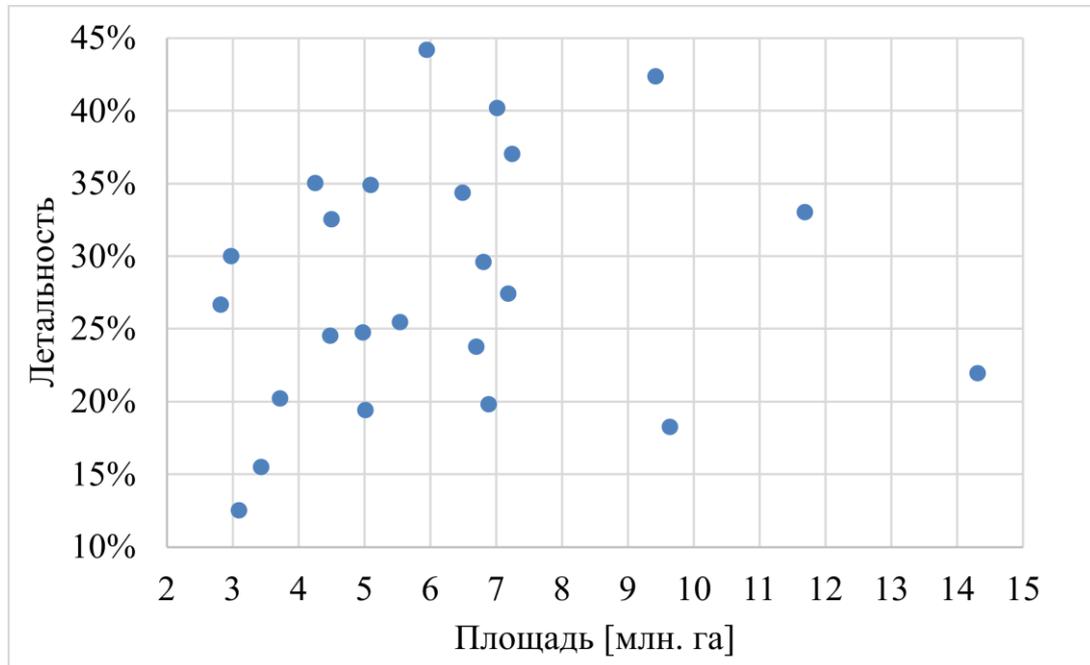


Рисунок 4.9 - Зависимость летальности (погибшие - 4 и 5 СКС) от площади, пройденной огнем в соответствующем году

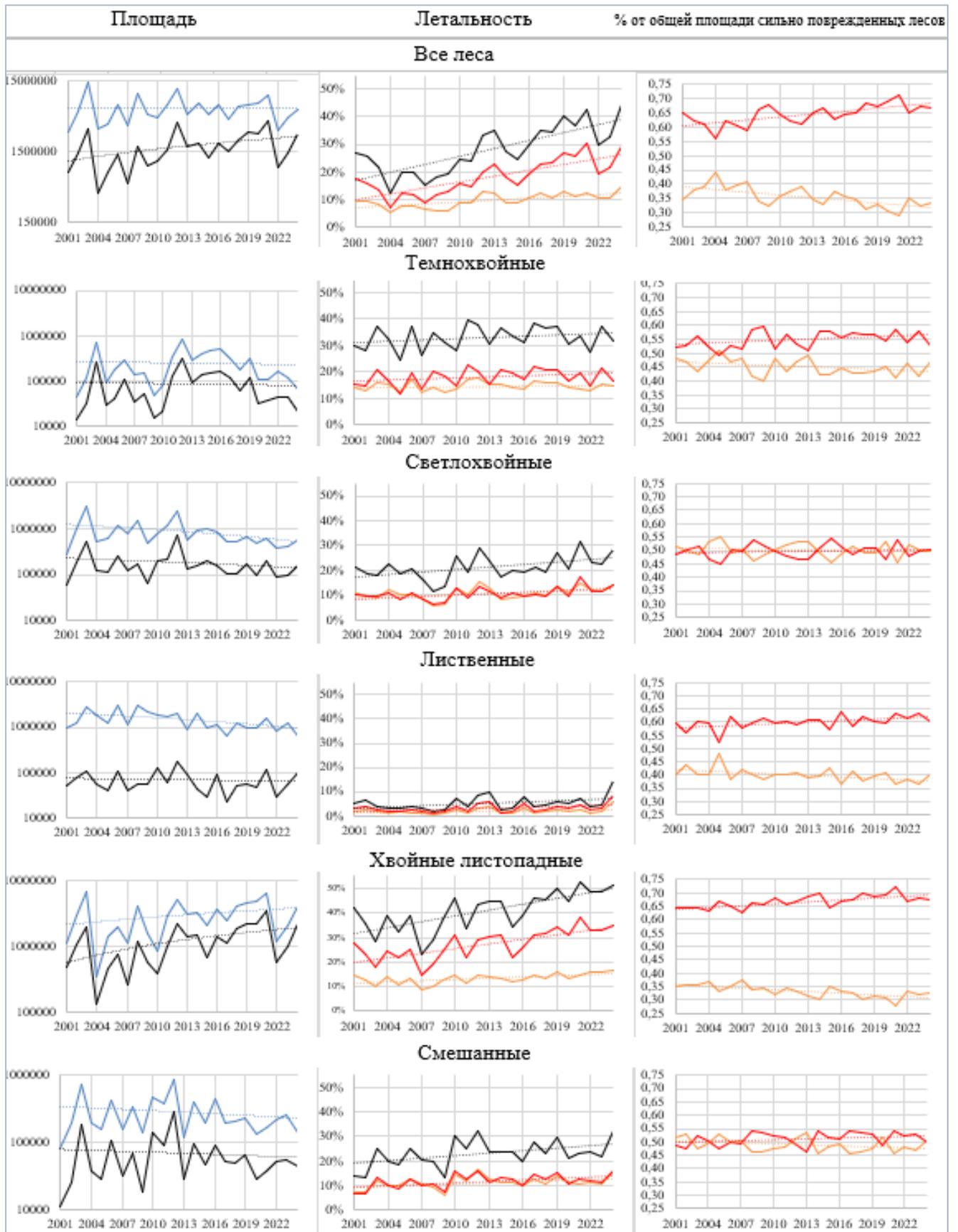


Рисунок 4.10 - Изменения площадей погибших лесов и летальности пожаров в лесах с различными типами преобладающий пород за период с 2001 по 2024.

Первая колонка – площади, пройденные огнем (синяя линия) и площадь усыхающей и погибшей растительности (черная линия). Вторая колонка – динамика летальности (под погибшей растительностью считается только 4 СКС (оранжевая линия), 5 СКС (красная линия), 4 и 5 СКС вместе (черная линия)).

Третья колонка – динамика процента площадей, на которых наблюдается повреждения лесов 4 и 5 класса, от общей площади сильно поврежденных лесов (отношение для 4 СКС – оранжевая линия, для 5 СКС – красная)

Анализ сезонной динамики гибели лесов

Особенности сезонной динамики площадей пожаров на территории РФ достаточно хорошо известны и изучены (см. в частности, Коровин и Андреев, 1988; Лупян и др., 2017). Хорошо известно, что в среднем в сезоне наблюдается два пика горения, соответствующих весенним и летним пожарам. Это хорошо видно на рисунке 4.11, где представлено среднее за период с 2001 по 2024 год распределение площадей, пройденных лесными пожарами по месяцам. На представленном распределении хорошо выделяются максимумы в мае и июне.

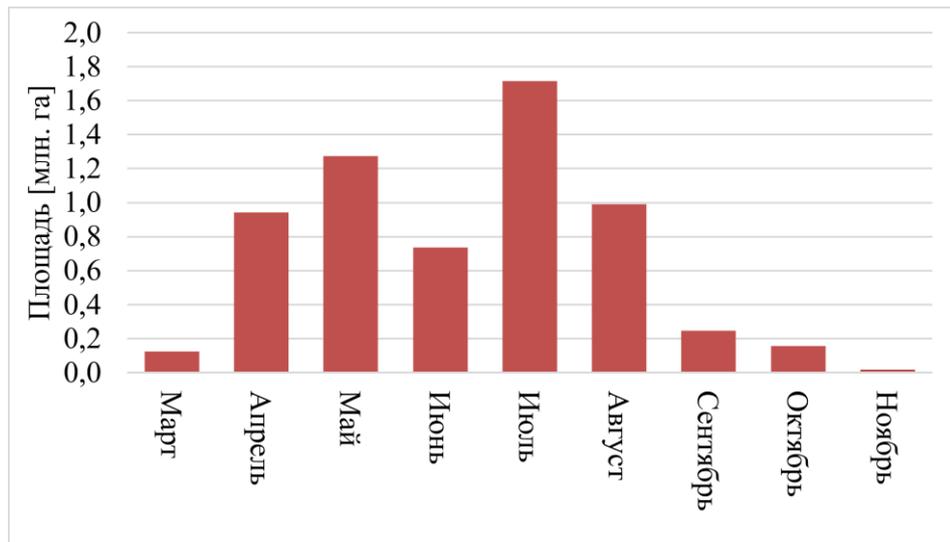


Рисунок 4.11 - Усредненное за период с 2001 по 2024 год распределение по месяцам площадей, пройденных лесными пожарами на территории РФ. Оценки площадей получены на основе предложенного в настоящей работе подхода на основе интенсивности горения

В отличие от анализа сезонного распределения площадей, проходимых лесными пожарами, вопросу изучения повреждений лесов от пожаров, действующих в различное время пожароопасного сезона, посвящено существенно меньшее число работ. Комплексно данный вопрос был впервые поднят в работе (Барталев С.А., Стыценко Ф.В., 2021), в которой, как уже отмечалось, было впервые введено определение летальности лесного пожара. Поэтому дополнительная информация по данному вопросу, на наш взгляд безусловно важна.

На основе имеющихся наблюдений пожаров за период с 2001 по 2024 годы с использованием предложенных в данной работе походов была получена следующая информация о распределении наблюдаемых в лесах сильных постпожарных повреждений (4 и 5 класс СКС) на территории РФ:

- *Зависимость летальности лесных пожаров* от времени действия пожара в сезоне. На рисунке 4.12 представлена средняя зависимость за анализируемый период. На рисунке представлен сезонный ход летальности как для лесов с различными преобладающими породами, так и интегральное распределение для всех типов лесов. Хорошо видно, что летальность пожаров в летние месяцы существенно (до 6 раз) выше, чем у весенних пожаров. Максимум летальности для всех типов лесов наблюдается в июле. Исключение составляют темнохвойные леса, для которых максимум летальности наблюдается в июне.
- *Зависимость площадей сильных повреждений* лесного покрова от времени действия пожара в сезоне. На рисунке 4.13 представлена средняя зависимость за анализируемый период. На рисунке представлены как распределения для лесов с различной преобладающей породой, так и интегральное распределение для всех типов лесов. Хорошо видно, что в отличие от сезонного распределения общей площади, проходимой лесными пожарами, распределения, представленные на рисунке 4.13, не имеют двух

максимумов в сезоне. Это связано с тем, что летальность пожаров в летние месяцы существенно выше, чем у весенних пожаров (см. рисунок 4. 12) и даже некоторое понижение общей площади проходимых лесными пожарами в начале лета (см. рисунок 4.11) не приводит к понижению площадей сильно поврежденных лесов.

- *Сезонная зависимость доли средней площади сильно поврежденных лесов от общей площади повреждений рассматриваемого типа леса за весь сезон* представлена на рисунке 4.14. На рисунке представлены зависимости как лесов с различной преобладающей породой, так и интегральное распределение для всех типов лесов. Видно, что основной процент повреждений для лесов различного типа приходится на июнь. При этом для всех типов лесов, кроме лиственных в сезоне наблюдается только один пик. У лиственных лесов в распределении кроме летнего наблюдается еще и весенний пик. Следует также обратить внимание, что на три летних месяца приходится более 80% сильно поврежденных пожарами площадей в сезоне, при этом на июнь приходится около 50% таких площадей.

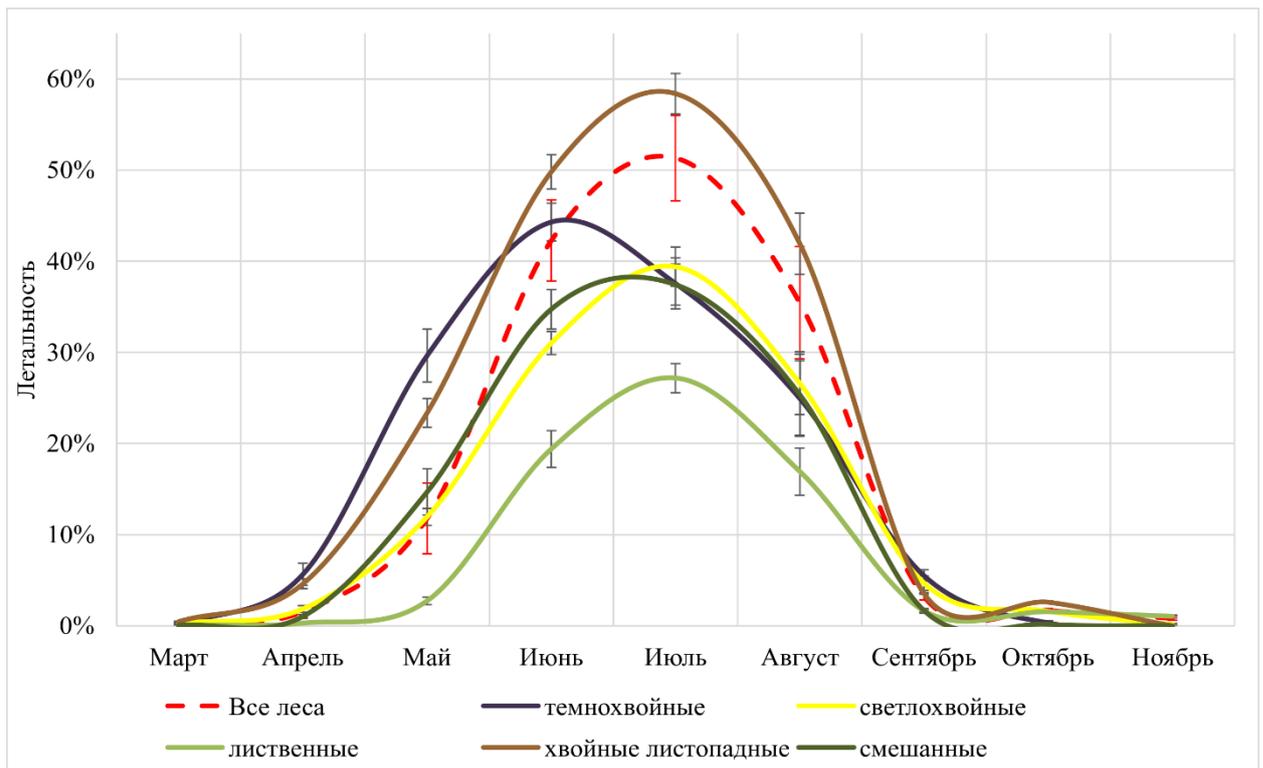


Рисунок 4.12 - Сезонная динамика средних значений летальности по месяцам для лесов с различной преобладающей породой

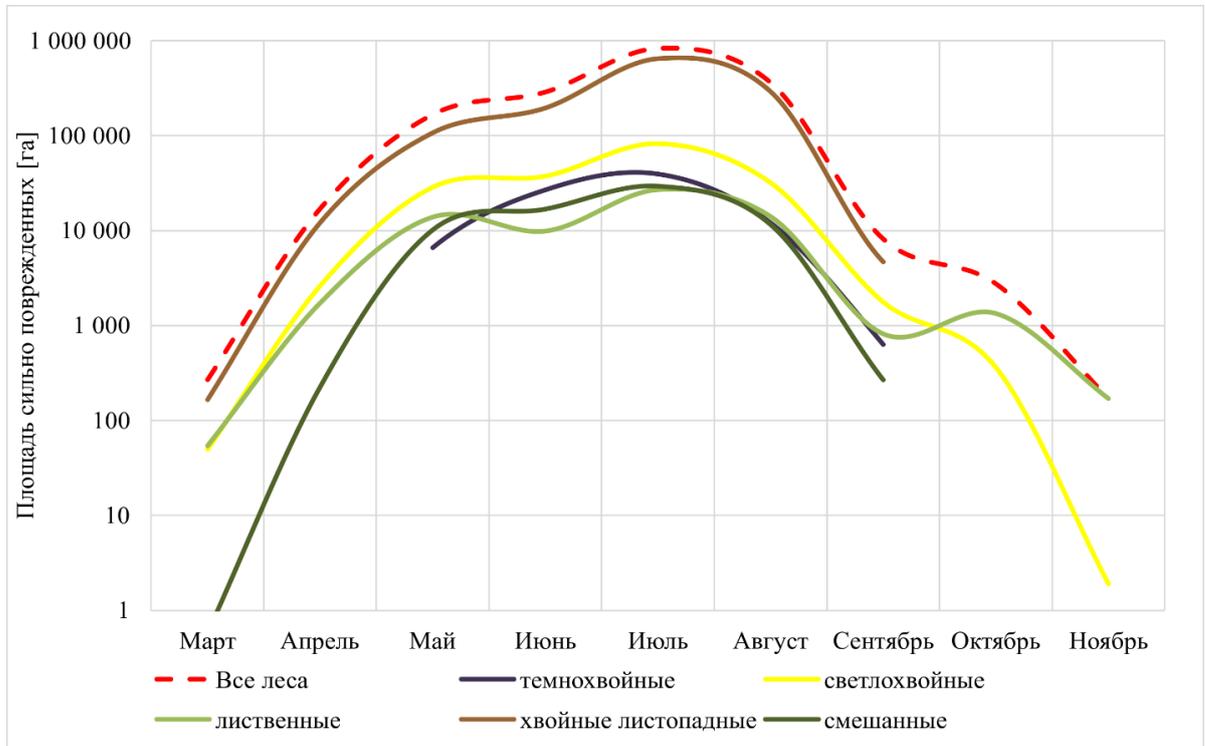


Рисунок 4.13 - Сезонная динамика средних значений интегральной площади сильно поврежденных лесов с различной преобладающей породой

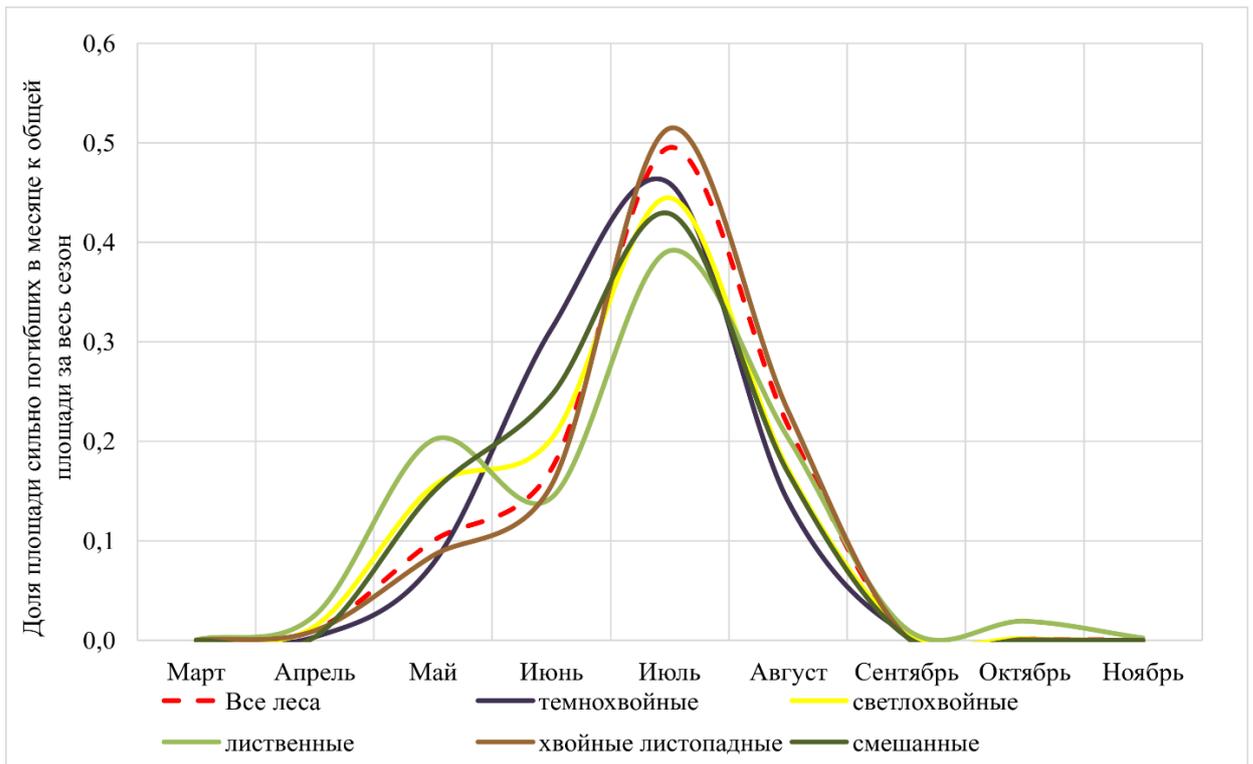


Рисунок 4.14 - Сезонная динамика доли средней площади сильно поврежденных лесов от общей площади повреждений рассматриваемого типа леса за весь сезон
Возможность оценки погибших на основе информации о площадях, пройденных пожарами с использованием средней летальности

Зависимость летальности лесных пожаров от времени действия пожара в сезоне (рисунок 4.12) была использована для альтернативного способа расчета оценок усыхающей и погибшей растительности. Для этого площадь, пройденная огнем пожара, умножалась на показатель летальности месяца и типа растительности, которым соответствовал пожар. Отдельно был посчитан вариант без учета типа растительности по линии для всех типов. Сравнение полученных оценок с полученными ранее с помощью FRPS (Рисунок 4.15) свидетельствует о возможности применения сезонного распределения летальности пожаров для оценок площадей усыхающей и погибшей растительности.

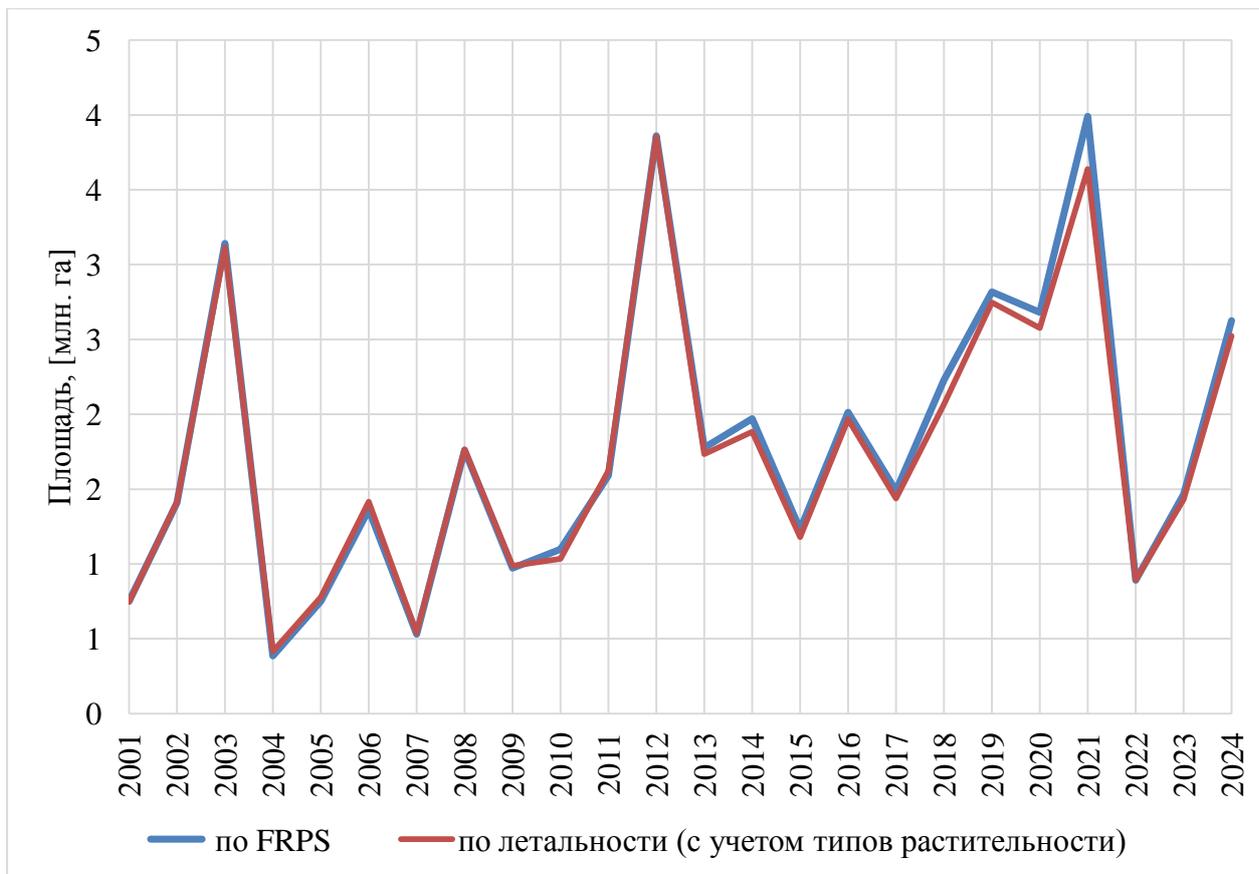


Рисунок 4.15 - Оценки площади погибшей и усыхающей растительности на территории РФ с 2001 по 2024 гг., полученные разными методами (синяя линия - на основе анализа FRPS, красная линия – по сезонному распределению

летальности, розовая линия - по сезонному распределению летальности без учета типов растительности, на котором проходил пожар)

4.3 Создание технологии автоматизированной обработки данных МСУ-МР в интересах систем дистанционного мониторинга лесных пожаров

Практическая реализация адаптированного для работы с данными МСУ-МР алгоритма MOD14 подразумевает его автоматическое применение к потоку исходных данных, принимаемых со спутников в соответствующих центрах. Результат детектирования при этом необходимо оперативно заносить в соответствующую БД пожаров. Таким образом, необходимо создать технологию автоматизированной обработки данных МСУ-МР в интересах систем дистанционного мониторинга лесных пожаров.

Схема такой технологии представлена на рисунке 4.16. Основные блоки этой схемы относятся к обработке исходных данных, проводимой на серверах центров приема и обработки данных, и к обработке результата детектирования, проводимой на сервере БД пожаров. Общая логика данной схемы заимствована из предыдущих работ, описывающих решение подобной задачи для оригинального MOD14 и данных MODIS (Галеев и др. организация блока обработки...). При этом использование данных МСУ-МР потребовало ввода шага дополнительной обработки исходных данных, а также усовершенствования фильтров, относящихся к обработке результата детектирования. Далее представлено краткое описание всех этапов технологии.

- **Данные со станций в формате rsm.** Исходные данные съемки МСУ-МР со спутников Метеор М2-2,3,4, принимаются в трех центрах приема и обработки данных:

ФБГУ НИЦ «Планета», г. Москва

ЗСРЦПОД, г. Новосибирск

ДВРЦПОД, г. Хабаровск

Этапы технологии, относящиеся к блоку обработки данных, технически выполняются на серверах данных центров.

- **Предварительная обработка.** В процессе распаковки потока пакетов данных уровня 0 в формате rsm данные приборов и телеметрическая информация вычитываются, группируются и записываются в файлы матричного вида (формат rsm1, уровень 1a). По орбитальным данным TLE проводится географическая привязка данных, также происходит калибровка данных.
- В результате получаются **данные rsm1 формата** уровня обработки 1b.



Рисунок 4.16 - Схема технологии обработки данных МСУ-МР

- **Дополнительная обработка.** Анализ большого объема данных МСУ-МР показал, что часть обрабатываемых данных качественно не отвечает

входным требованиям алгоритма MOD14. Это касается как ошибочных значений температур, регистрируемых прибором, так и качества произведенной географической привязки данных. На данном этапе данные проверяются на наличие указанных проблем, после чего производится попытка их устранения. В случае успеха выполнения соответствующих процедур происходит переход к следующему шагу цепочки, иначе проблемный набор данных исключается из дальнейшего процесса обработки.

Радиометрическая коррекция. На данном этапе фильтруются фрагменты матриц, содержащих каналные данные прибора МСУ-МР, в которых регистрируется значимое число ячеек с ошибочными значениями. Ошибочные значения соответствуют крайним технически допустимым значениям температур в соответствующих каналах. Обычно ошибочные значения регистрируются сразу во всей строке матрицы, что упрощает их автоматическое обнаружение и фильтрацию. Однако, для МСУ-МР ошибки могут возникать и в единичных случаях, причем для канала 4 мкм они могут быть технически неотличимы от пожарных ячеек, для которых весьма характерным является температура в 327К, соответствующая насыщению прибора. Возможность определять такие случаи и отличать их от пожаров существует благодаря тому, что такие одиночные помехи всегда возникают в данных всех каналов прибора, в том числе и в канале 11 мкм. Данный канал обладает меньшей чувствительностью к пожарам, поэтому для пожарных ячеек температура в этом канале не достигает насыщения прибора. Таким образом, одиночные ячейки матрицы данных 11 мкм с максимально допустимыми значениями температуры позволяют гарантировано определять такие ячейки, как ошибочные. В случае определения одного из вариантов наличия ошибочных значений (ошибки в строке или одиночные ошибки) фильтруется порция данных (строка с ошибками и набор соседних строк). Это означает, что такие строки не будут

обработаны MOD14, при этом неотфильтрованные строки матриц будут поданы на вход алгоритму.

Уточнение координат. В работе (Волкова и др., 2024) представлено описание метода географической допривязки данных МСУ-МР, для которых ошибка исходной привязки, произведенной на этапе предварительной обработки, превышает отклонение в 1 пиксель. Данный метод был реализован в рамках описываемой технологии. В нем автоматически оценивается качество привязки данных МСУ-МР по TLE, в случае определения средней ошибки более, чем в пиксель, производится процесс допривязки данных, после чего повторно оценивается качество. Если средняя ошибка привязки оказалась менее, чем в пиксель, обновленная информация о координатах сохраняется. Иначе, рассматриваемый набор данных исключается из дальнейшей обработки.

- **Адаптированный MOD14.** На вход алгоритму подается набор матриц с данными каналов МСУ-МР и матриц, содержащих информацию о географических координатах соответствующих ячеек
- На выходе алгоритм выдает **набор горячих точек.** Данный набор содержит информацию о данных, на которых были определены ГТ (дата/время съемки, спутник, прибор, центр обработки данных), координаты, размеры ГТ, температуру в каналах 4 мкм и 11 мкм и коэффициенты отражения в каналах 1 и 2. Далее полученный набор автоматически передается на сервер БД пожаров, где реализуются последующие этапы технологии.
- **Фильтрации, создание полигонов и аннотация.** На данном этапе происходит фильтрация по координатам (выбор ГТ по региону РФ) и фильтрация постоянных огней (с использованием БД постоянных огней, Флитман и др., 2011), создание полигонов ГТ по их координатам и размерам (Лупян и др., 2017) и их аннотация по карте лесного покрова (Барталев и др. 2011, 2016). Для МСУ-МР так же была реализована схема дополнительной фильтрации ЛД рядом с облачностью, описанной ранее в разделе 3.2. Для

этого проводится предварительное объединение ГТ в группы по пространству, для фильтрации ЛД в группах с малым количеством ГТ.

- Полученный набор горячих точек заносится в БД.
- Горячие точки объединяются в пожары по времени и пространству (Лупян и др., 2017).

Представленная технология обработки данных МСУ-МР была полностью реализована и введена в эксплуатацию в рамках ИАС ВЕГА-PRO и ИСДМ-Рослесхоз в 2024 году. Это позволило оценить качество функционирования, адаптированного MOD14, интегрированного в технологию обработки. Такая оценка была проведена с помощью сравнения показателей интегральных площадей, пройденных лесными пожарами на территории РФ. Оценка площадей пожаров проводилась по методике, представленной в разделе 1.6. Получение подобных оценок по данным МСУ-МР требует проведения работ по адаптации данной методики. Однако, для первичного сравнения, площади по полученным ГТ МСУ-МР были рассчитаны аналогичным образом с применением тех же коэффициентов коррекции, что и для MODIS (таблица 4.2). В результате оказалось, что интегральные величины площадей, пройденных огнем на территории РФ в 2024 году, полученные по данным разных приборов, имеют один порядок. Данный факт подтверждает, что развернутая цепочка обработки данных МСУ-МР позволяет получать результат, достоверность которого сопоставима с результатом детектирования по данным MODIS.

Таблица 4.2. Сопоставление интегральных площадей пожаров [га] на территории РФ за 2024 год, сформированных на основе ГТ МСУ-МР и MODIS

Прибор	Число лесных пожаров	Лесная площадь пожаров
МСУ-МР	14 175	7 335 340

MODIS	15 486	6 502 860
-------	--------	-----------

Заключение к 4 главе

Применение разработанных методов и алгоритмов обработки спутниковых данных позволило получить следующий ряд результатов, имеющих большую значимость для спутникового мониторинга пожаров:

- Метод автоматизированной оценки повреждений лесного покрова пожарами на основе данных об интенсивности горения был применен к набору данных MODIS, покрывающему территорию всех северных стран Земли, что позволило впервые сравнить межгодовую динамику интегральных оценок площадей погибшей от пожаров растительности для различных глобальных регионов в 21 веке. Были получены следующие результаты:
 - а) В последние десятилетия не наблюдается значимых изменений в числе пожаров в «Зоне 60». Тем не менее нельзя не отметить, что в «Зоне ПК» в 2019–2020 гг. произошёл 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 наблюдается 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.

- Представленные методы оценки повреждений лесного покрова пожарами также были использованы для проведения анализа особенностей динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI веке на территории РФ. При этом показано, что в анализируемый период наблюдался значимый рост летальности пожаров (более чем в два раза). Данный рост в основном обусловлен ростом летальности пожаров, действующих в хвойно-листопадных лесах. Также отмечено, что с начала XXI века существенно увеличился процент сильно поврежденных пожаров (5 класс СКС). Все это позволяет сделать вывод о значимом наблюдаемом тренде увеличения ущербов от лесных пожаров на территории РФ в XXI веке несмотря на то, что значимого тренда в площадях, пройденных пожарами, в то же время не наблюдается.
- Также, на основе предложенных методов проведен анализ сезонной динамики повреждений лесного покрова пожарами. 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.
- Реализована технологическая цепочка обработки данных МСУ-МР в интересах систем мониторинга пожаров. 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 год, рассчитанных на основе данных МСУ-МР и данных MODIS позволяет сделать вывод о достоверности результата и эффективной работе развернутой цепочки обработки. Тем самым обеспечена возможность для работы национальных систем мониторинга пожаров с данными российской космической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно выделить следующие основные результаты представленной к защите 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 различными спутниковыми системами 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 веке. Также был проведен анализ особенностей межгодовой и сезонной динамики повреждений лесов пожарами, наблюдавшихся в XXI веке на территории РФ, результаты которого дополнили и уточнили выводы, полученные в работах других авторов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БД	—	База данных
ГТ	—	Горячая точка
ДВРЦПОД	—	Дальневосточный региональный центр приема и обработки данных
ЗСРЦПОД	—	Западносибирский региональный центр приема и обработки данных
ИАС	—	Информационно-аналитическая система
ИК	—	Инфракрасный канал
ИКИ	—	Институт космических исследований
ИСДМ	—	Информационная система дистанционного мониторинга
ЛД	—	Ложное детектирование
МСУ-МР	—	Многозональное сканирующее устройство малого разрешения
НИЦ	—	Научно-исследовательский центр
ПК	—	Полярный круг
РАН	—	Российская академия наук
СКС	—	Средневзвешенная категория состояния
ФБГУ	—	Федеральное государственное бюджетное учреждение
ЦКП	—	Центр коллективного пользования
ASTER Radiometer	—	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

ETM	—	Enhanced Thematic Mapper
FEER	—	The Fire Energeics and Emissions Research
FRP	—	Fire Radiative Power
FRPS	—	Fire Radiative Power Standardized
FWI	—	Fire Weather Index
FY-3D	—	FengYun-3D
GFAS	—	Global Fire Assimilation System
MERSI-II	—	Medium Resolution Spectral Imager-II
MOD14	—	MODIS fire detection algorithm
MODIS	—	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	—	Multispectral Instrument
NOAA	—	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	—	Operational Land Imager
QFED	—	Quick Fire Emissions Dataset
RdNBR	—	Relativized Differenced Normalized Burn Ratio
RdSWVI	—	Relative Difference Short Wave Vegetation Index
SLSTR	—	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SNPP	—	Suomi National Polar-orbiting Partnership
SWVI	—	Short Wave Vegetation Index
TLE	—	Two-Line Element set
TM	—	Thematic Mapper
VIIRS	—	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абушенко Н.А., Барталев С.А., Беляев А.И. и др.* Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов // Исследование Земли из космоса. 1998. № 3. С. 89-95.
2. *Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А., и др.* Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
3. *Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В. и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
4. *Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М. и др.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215-225.
5. *Барталев С. А., Ершов Д. В., Коровин Г. Н. и др.* Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 419–429.

6. *Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. № 4. С. 285-302.
7. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
8. *Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., и др.* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 9–27.
9. *Барталев С. А., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., и др.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
10. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденных огнем площадей // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115-122.
11. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83-94.
12. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А.* Методология мониторинга и прогнозирования 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.
13. *Бондур В.Г., Гордо К.А., Зима А.Л.* Исследование из космоса последствий природных пожаров на территории России для разных типов растительного покрова // Исследование Земли из космоса. 2022. № 6. С. 74–86 DOI: 10.31857/S0205961422060033.

14. Буряк Л. В., Сухинин А. И., Каленская О. П., Пономарёв Е. И. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сибирский экологический журн. 2011. Т. 18. № 3. С. 331–339.
15. Волкова Е.Е., Андреев А.И., Бурыцев М.А. и др. Технология автоматической коррекции географической привязки данных прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 48–63 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-48-63
16. Галеев А.А., Прошин А.А., Ершов Д.В. и др. Организация хранения данных спутникового мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 367-371.
17. Кобец Д. А., Балашов И. В., Данилов И. Д., и др. Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 17–27.
18. Коровин Г. Н., Андреев Н. А. Авиационная охрана лесов. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
19. Лупян Е.А., Барталев С. А., Балашов И. В. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
20. Лупян Е. А., Мазуров А. А., Флитман Е. В. И др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы: аналитический обзор. Сер. «Экология». Вып. 70. Новосибирск: СО РАН. ИОА. ГПНТБ, 2003. Вып. 68. 134 с.
21. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурыцев М.А., и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

22. *Лушнян Е.А., Стыценко Ф.В., Сенько К.С. и др.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178-192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
23. *Пономарев, Е. И.* Классификация пожаров в Сибири по данным TERRA/Modis на основе показателя их радиационной мощности // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 56. – DOI 10.7868/S0205961414020080.
24. *Пономарев Е. И., Иванов В. А.* Спутниковый мониторинг динамики экстремальных пожаров Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. 30. № 3–4. С. 307–311.
25. *Пономарев Е. И., Харук В. И.* Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журн. 2016. №1. С. 38–46. DOI:10.15372/SEJ20160104.
26. *Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д.* Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журнал 2017 № 5. С. 25–36 DOI: 10.15372/SJFS2017050
27. *Пономарёв Е. И., Швецов Е. Г.* Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI:10.7868/S0205961415010054.
28. *Пономарев Е. И., Швецов Е. Г., Усатая Ю. О.* Регистрация энергетических характеристик пожаров в лесах Сибири дистанционными средствами // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0205961417040017.
29. *Пономарев Е.И., Харук В.И., Швецов Е.Г.* Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы // 2019. Сибирский федеральный университет, Красноярск. 220 с.
30. Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, утвержденные приказом Рослесхоза № 523 от 29.12.07.

31. *Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Иванова А. А., и др.* Возможности оценки площадей лесных пожаров в регионах России на основе данных спутникового детектирования активного горения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 6. С. 289–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-289-298.
32. *Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Луян Е.А.* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS. 2013. Т. 10. № 1. С. 254-266.
33. *Уваров И.А., Барталев С.А.* Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. № 1. С. 353-365.
34. *Швецов, Е. Г., Пономарев Е.И.* Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // *Сибирский экологический журнал*. – 2015. – Т. 22, № 3. – С. 413-421. – DOI 10.15372/SEJ20150308.
35. *Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России// *Лесоведение*. 2013. № 5. С. 50–61.
36. *Andreae, M. O. and Merlet, P.*: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cy.*, 15, 955–966, 2001.
37. *Baltzer, H., George, C., Rowland, C., et al.* Forest fires in Central Siberia and their impact on emissions of greenhouse gasses // In Proceedings of the Remote Sensing and Photogrammetric Society, Aberdeen, Scotland, 6-10 September 2004. The Remote Sensing and Photogrammetry Society, c/o School of Geography, The University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, UK. CD-ROM.
38. *Barnaba F., Angelini F., Curci G., and Gobbi G. P.* An important fingerprint of wildfires on the European aerosol load // *Atmospheric Chemistry and Physics*, V. 11, Issue 20, P. 10487–10501, 2011 DOI: 10.5194/acp-11-10487-2011.
39. *Bobbe T., Descloitres J., Finco M. et al.* MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection

and land cover change products from future moderate resolution sensors // NPOESS MAXI Review 2002, Silver Spring, MD.

40. *Boschetti L. and Roy D. P.* Strategies for the fusion of satellite fire radiative power with burned area data for fire radiative energy derivation // *Journal of geophysical research*, vol. 114, D20302, doi:10.1029/2008JD011645, 2009
41. *Bowman, D.M. J.S., Balch, J.K., Artaxo, P. et al.* Fire in the Earth System, *Science*, 324, 481–484, 2009
42. *Chen, J., Yao, Q., Chen, Z. et al.* The Fengyun-3D (FY-3D) global active fire product: principle, methodology and validation, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 3489–3508, <https://doi.org/10.5194/essd-14-3489-2022>, 2022.
43. *Chuvieco E.* Earth Observation of Global Change. 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-6358-9_6.
44. *Clelland A.A., Marshall G.J., Baxter, R.; et al.* Annual and Seasonal Patterns of Burned Area Products in Arctic-Boreal North America and Russia for 2001–2020 // *Remote Sensing* 2024, 16, 3306. . DOI: 10.3390/rs16173306/
45. *Darmeno, A., da Silva A.M.* The Quick Fire Emissions Dataset (QFED): Documentation of Versions 2.1, 2.2 and 2.4; Technical Report NASA/TM2015104606; Global Modeling and Assimilation Office, NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA, 2015.
46. *Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H. et al.* Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319, 2006, 295–311.
47. *Dozier J.* A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11, 221-229.
48. *Eva, H., & Lambin, E. F.* (1998). Burned area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3473–3497.
49. *Freeborn P.H., Wooster M.J., Roberts G., Xu W.D.* Evaluating the SEVIRI fire thermal anomaly detection algorithm across the Central African Republic using the MODIS active fire product. // *Remote Sensing* 2014. V. 6. P. 1890–1917. DOI: 10.3390/rs6031890.

50. *Friedl, M., D. Sulla-Menashe.* MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006. 2019, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>
51. *García-Haro, F. J., Gilabert, M. A., and Meliá, J.* Monitoring fire- affected areas using thematic mapper data // *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2001, pp. 533–549.
52. *Giglio L., Schroeder W., Hall J.V., Justice C.O.* MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision B // University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2018. P. 1–62.
53. *Giglio L., Boschetti L., Roy D. et al.* Collection 6 MODIS Burned Area Product User's Guide Version 1.3// University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2020. P. 1–34.
54. *Giglio L., Descloitresa J., Justice C.O., Kaufman Y.J.* An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment* 2003. V. 87. P. 273–282. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
55. *Giglio L., Schroeder W., Hall J.V., Justice C.O.* MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide. Revision B // University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2018. P. 1–62.
56. *Giglio L., Schroeder W., Hall J.V., Justice C.O.* MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision C // University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2020. P. 1–63.
57. *Giglio L., Schroeder W., Justice C.O.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment* 2016. V. 178. Issue 1. P. 31-41. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
58. *Hall, R.J.; Freeburn, J.T.; De Groot, W.J.; Pritchard, J.M.; Lynham, T.J.; Landry, R.* Remote sensing of burn severity: Experience from western Canada boreal fires. *Int. J. Wildland Fire* 2008, 17, 476–489.
59. *Hansen S., Otley D., Stede Wim.* Practice Developments in Budgeting: An Overview and Research Perspective. *Journal of Management Accounting Research*. 15. 2003. 10.2139/ssrn.410544.

60. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., et al. Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. Issue 6160. P. 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693.
61. Heward Heather, Smith Alistair M. S., Roy David P., et al. Is burn severity related to fire intensity? Observations from landscape scale remote sensing // *International Journal of Wildland Fire*. 2013. V. 22(7). P. 910-918. DOI: 10.1071/WF12087.
62. Hua, L., & Shao, G. The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing. // *Journal of Forestry Research*, 2017, V. 28(2), P. 215–229.
63. Ichoku, C. and L. Ellison Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 6643-6667, 2014, doi:10.5194/acp-14-6643-2014.
64. Ichoku C. and Kaufman Y. J. A Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* V. 43, No. 11, 2005. DOI: 10.1109/TGRS.2005.857328.
65. Isaev A.S., Korovin G.N., Bartalev S.A., et al. Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions // *Climate Change* - 55 (1-2), 2002. P.235-249.
66. Jin, Y.; Randerson, J.T.; Goetz, S.J.; Beck, P.S.A.; Loranty, M.M.; Goulden, M.L. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests. *J. Geophys. Res.* 2012, 117, G01036.
67. Justice C.O., Giglio L., Korontzi S. et al. The MODIS fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. Issues 1-2. P. 244-262. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7.
68. Justice C.O., Giglio L., Roy D., et al. MODIS-Derived Global Fire Products // *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. 2011. No. 29. P. 661–679.
69. Kaiser J. W., Heil A., Andreae M. O., et al. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences Discussions*. 2012. No. 9. P. 527–554.

70. Kaufman Y. J., Justice C., Flynn L., et al., Monitoring global fires from EOS-MODIS // Geophys. Res., V. 103, P. 32215–32239, 1998. DOI: 10.1029/98JD01644.
71. Kaufman, Y. J., Remer, L. A., Ottmar, R. D. et al. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C Experiment. In Global Biomass Burning, ed. J. Levine, 1996., 685-696. Cambridge, Mass., MIT Press.
72. Key, C.H., & Benson, M. L. (2005). Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, M. L. Benson, & L. J. Gangi (Eds.), FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system (pp. LA1–LA51). USDA Forest Service.
73. Kumar S.S., Roy D.P., Boschetti L., Kremens R. Exploiting the power law distribution properties of satellite fire radiative power retrievals: A method to estimate fire radiative energy and biomass burned from sparse satellite observations // Journal of geophysical research. 2011. V. 116. D19303. DOI:10.1029/2011JD015676.
74. Lee H., Won J.-S., Park W. An Atmospheric Correction Using High Resolution Numerical Weather Prediction Models for Satellite-Borne Single-Channel Mid-Wavelength and Thermal Infrared Imaging Sensors // Remote Sensing 2020. V.12. Issue 853. [DOI: 10.3390/rs12050853](https://doi.org/10.3390/rs12050853)
75. Lentile L., Holden Z., Smith A., et al. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. International Journal of Wildland Fire. 15. 319-345. 2006. 10.1071/WF05097.
76. Li F., Zhang X., Kondragunta S., Csiszar I. Comparison of fire radiative power estimates from VIIRS and MODIS observations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123,4545–4563. <https://doi.org/10.1029/2017JD027823>.
77. Li F., Zhang X., Kondragunta S., et al. Hourly biomass burning emissions product from blended geostationary and polar-orbiting satellites for air quality forecasting applications // Remote Sensing of Environment, V. 281, November 2022, Article 113237. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113237.

78. *Loboda T., Csiszar I.*, Estimating burned area from AVHRR and MODIS: validation results and sources of error, *Contemporary Earth Remote Sensing from Space*, 2005, Vol. 2, pp. 415–421.
79. *Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V. et al.* Satellite Monitoring of Forest Fires in Russia at Federal and Regional Levels // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. V.11. P. 113-145. DOI: 10.1007/s11027-006-1013-7.
80. *McCarty J.L., Justice C.O., Korontzi S.* Agricultural burning in the Southeastern United States detected by MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 108. P. 151-162. DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.020.
81. *Miller J.D., Thode A.E.* Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // *Remote Sensing of Environment*. 2007. No. 109. pp. 66–80.
82. *Mollicone D., Eva H.D. and Achard F.* Nature Human role in Russian wild fires // *Nature*. 2006. V. 440. P. 436–437. DOI: 10.1038/440436a.
83. *Morgan P, Hardy C.C., Swetnam T.W., et al.* Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns // *International Journal of Wildland Fire*. 2001. V. 10(4). P. 329–342. DOI:10.1071/WF01032.
84. *Mota B., Wooster M. J.* A new top-down approach for directly estimating biomass burning emissions and fuel consumption rates and totals from geostationary satellite fire radiative power (FRP) // *Remote Sensing of Environment* V. 206, 1 March 2018, P. 45-62 DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.016.
85. *Mottram G.N., Wooster M. J., Balzter H., et al.* The use of MODIS-derived Fire Radiative Power to characterise Siberian boreal forest fires 2005. p. 4.
86. NASA Earthdata Open Access for open science.
[URL:https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl](https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl).
87. *Oliva, P., Schroeder, W.* Assessment of VIIRS 375 m active fire detection product for direct burned area mapping, *Remote Sensing of Environment* Vol 160, 2015, P 144-155, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.010>

88. *Pereira, J. M. C., Chuvieco, E., Beudoin, A., & Desbois, N.* (1997). Remote sensing of burned areas: A review. In E. Chuvieco (Ed.), *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (pp. 127–184). Alcalá de Henares, Madrid: Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.
89. *Peterson, D. A., Hyer E. J., Campbell J. R. et al.* The 2013 Rim Fire: Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection, and smoke emissions // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014. V. 96. Issue 2 P. 229–247, DOI: 10.1175/bams-d-14-00060.1.
90. *Polehampton E., Cox C., Smith D. et al.* Copernicus Sentinel-3 SLSTR Land User Handbook. 2023. Ref. OMPC.ACR.HBK.002. 64p.
91. *Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V.* Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia. *Fire* 2023, 6, 246. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>
92. *Riggan, P., Tissell R., Lockwood R., et al.* Remote measurement of energy and carbon flux from wildfires in Brazil // *Ecol. Appl.*, V. 14(3), 2004, P. 855–872. DOI: 10.1890/02-5162
93. *Rodrigues J., Libonati R., Pereira A., et al.* How well do global burned area products represent fire patterns in the Brazilian Savannas biome? An accuracy assessment of the MCD64 collections// *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol 78, 2019, P 318-331, DOI: 10.1016/j.jag.2019.02.010.
94. *Roy D. P., Boschetti L., Justice C. O., Ju J.* The Collection 5 MODIS Burned Area Product — Global Evaluation by Comparison with the MODIS Active Fire Product // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. P. 3690–3707.
95. *Ryan K. C.* Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems // *Silva Fennica*. 2002. V. 36(1), P. 13–39.
96. *Schroeder W., Giglio L.* VIIRS 375 m & 750 m Algorithm Theoretical Basis Document For NOAA NDE VIIRS I-band (375m) Active Fire // *Satellite Products and Services Review Board*. 2017. P. 1–36.
97. *Schroeder W., Giglio L.* VIIRS 375 m & 750 m Active Fire Detection Data Sets Based on NASA VIIRS Land SIPS Reprocessed Data Version 1 Product User's

Guide Version 1.3 // University of Maryland, Department of Geographical Sciences. 2018. P. 1–62.

98. *Schroeder W., Olivia P., Giglio L., Csiszar I.* The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment, *Remote Sensing of Environment*, Vol 143, 2014, P 85-96, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>.
99. *Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M., et al.* An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting // *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 9, Issue 18, P. 6833–6847, 2009. DOI: 10.5194/acp-9-6833-2009.
100. *Stocks B. J., Wotton B. M., Flannigan M. D. et al.* Boreal Forest Fire Regimes And Climate Change // *Remote Sensing and Climate Modeling: Synergies and Limitations* 2001 pp 233–246 DOI: 10.1007/0-306-48149-9_10
101. *Vadrevu K.P., Ellicott E., Giglio L. et al.* Vegetation fires in the himalayan region – aerosol load, black carbon emissions and smoke plume heights // *Atmospheric Environment*. 2012. V. 47. P. 241-251. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.11.009.
102. Van Wagner, C. E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Forestry*, 51, Article No. 3. 1987.
103. *White J.D., Ryan K.C., Key C.C., Running S.W.* Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery // *International Journal of Wildland Fire*. 1996. No. 6. P. 125-136.
104. *Wooster M. J., Roberts G., and Perry G. L. W.* Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *Journal of geophysical research*. 2005. V. 110. Issue D24. DOI: 10.1029/2005JD006318.
105. *Wooster M., Xu W., Nightingale T.* Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets // *Remote Sensing of Environment*. 2012. No. 120. P 236–254.

106. *Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D.* Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products// *Remote Sensing of Environment*, V. 86, 2003, P. 83–107. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00070-1.
107. *Wooster, M. J., and Y.-H. Zhang,* Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America, *Geophys. Res. Lett.*, 2004 31,L20505, doi:10.1029/2004GL020805.
108. *Wu, Z.; He, H.; Liang, Y.; Cai, L.; Lewis, B.* Determining relative contributions of vegetation and topography to burn severity from LANDSAT imagery. *Environ. Manag.* 2013, 52, 821–836.
109. *Xiao-Ying Li, Hui-Jun Jin, Hong-Wei Wang, et al.* Influences of forest fires on the permafrost environment: A review // *Advances in Climate Change Research Volume 12, Issue 1, February 2021, Pages 48-65*
110. *Xu, W., Wooster, M.J., 2023.* Sentinel-3 SLSTR active fire (AF) detection and FRP daytime product - algorithm description and global intercomparison to MODIS, VIIRS and landsat AF data. *Science of Remote Sensing* 7, 100087. doi:10.1016/j.srs.2023.100087
111. *Xu W., Wooster M.J., He J., Zhang T.* First study of Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP retrieval: Night-time algorithm enhancements and global intercomparison to MODIS and VIIRS AF products, *Remote Sensing of Environment*, Vol 248, 2020, 111947, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111947>.
112. *Ying Zheng, Gui Zhang, Sanqing Tanm, Lanbo Feng* Research on Progress of Forest Fire Monitoring with Satellite Remote Sensing // *Agricultural & Rural Studies* V. 1 No. 2 (2023) <https://doi.org/10.59978/ar01020008>
113. *Zhao C., Chen S., Leung L.R. et al.* Uncertainty in modeling dust mass balance and radiative forcing from size parameterization // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013 V.13. Issue 21. P. 10733–10753. DOI: 10.5194/acp-13-10733-2013.

114. *Zhu, Z., Key, C. H., Ohlen, D., & Benson, N. C. (2006). Evaluate sensitivities of burnseverity mapping algorithms for different ecosystems and fire histories in the United States Accessed October 2008.*

ПРИЛОЖЕНИЯ**Приложение 1. Акты внедрения результатов работы**

УТВЕРЖДАЮ

Директор СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета»

для А.В. Калашников

ДОКУМЕНТОВ

«05» сентября 2025 г.

Акт**об использовании результатов кандидатской диссертации****Лозина Д.В.**

Настоящий Акт составлен в том, что научные результаты кандидатской диссертации Лозина Д.В. «Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов» используются в Сибирском центре Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА». Методы и алгоритмы разработанные в данной работе позволили реализовать технологическую цепочку автоматической обработки данных для мониторинга пожаров для получения оперативного детектирования тепловых аномалиях, по данным прибора МСУ-МР установленного на российских спутниках Метеор-М №3 и №4. Результаты работы данного решения используются для обеспечения информацией Объединенной системы работы с данными центров НИЦ «Планета» Росгидромета. В том числе для проведения опытной эксплуатации версии подсистемы учета лесных пожаров Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) для создания предпосылок перевода данной системы на работу с информацией, получаемой от российских спутниковых систем.

Зав. отделом НИР
К.Т.Н.

А.В. Калашников



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ИКИ РАН
 академик РАН
 А.А. Петрукович
 «31» августа 2025 г.

Акт

**об использовании результатов кандидатской диссертации
 Лозина Д.В.
 в информационно-аналитической среде «Углерод-Э»**

Настоящий Акт составлен в том, что научные результаты кандидатской диссертации Лозина Д.В. «Разработка методов и алгоритмов обработки данных спутниковых наблюдений тепловых аномалий и их интенсивности для исследования и мониторинга пожаров и повреждений лесов» используются в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в рамках информационно-аналитической среды (ИАС) «Углерод-Э» (<https://start.carbon.geosmis.ru>), созданной в рамках работ ИКИ РАН, выполненных в 2022-2024 годах в интересах важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (работы консорциума 4 «Углерод в Экосистемах: мониторинг»).

Предложенный Лозиным Д.В. метод оценки повреждений лесов на основе анализа данных об интенсивности лесных пожаров был использован для обработки данных приборов MODIS (спутники TERRA и AQUA), в результате чего были получены и интегрированы в ИАС «Углерод-Э» оперативные (предварительные) оценки повреждений лесов пожарами на территории РФ за период с 2001 по 2024 год. Данные были так же интегрированы в аналитический блок ИАС «Углерод-Э» что, в том числе, позволяет проводить оперативную оценку повреждений лесного покрова на территории РФ на различных уровнях интеграции, включая анализ внутригодовой динамики повреждений лесов пожарами.

Руководитель работ ИКИ РАН, выполняемых в интересах важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»

Д.т.н, профессор

С.А. Барталев

**Приложение 2. Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689057

**ПО оперативного построения карт интенсивности
горения пожаров и оценок возможной гибели лесной
растительности в результате их действия
(FRPSeverityMapping)**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт космических исследований
Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Лозин Дмитрий Владиславович (RU), Лупян
Евгений Аркадьевич (RU), Балашов Иван Васильевич (RU)*

Заявка № **2024688285**

Дата поступления **21 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **04 декабря 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение 3. Основные публикации 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., Стыценко 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. *Лупян 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 Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 806, 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012019. (Scopus)

Научные статьи в материалах конференций:

9. *Лозин Д.В., Лупян 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 VII Международной научно-практической конференции «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., Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Оперативная оценка степени повреждений лесов пожарами на основе данных об интенсивности горения // Материалы IX Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного

зондирования Земли". Научный редактор Е.А. Ваганов, отв. редактор Г.М. Цибульский . Красноярск. 13–16 сентября 2022 г, 2022. С. 256-259.

11.Лозин Д.В., Балашов И.В., Лупян Е.А. Возможности оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров // Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы II Всероссийской научно-технической конференции-вебинара. Санкт-Петербург. 18–19 февраля 2021 года, 2021. С. 78-81.