



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ЭФА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Применение спутниковой съёмки при обнаружении природных
пожаров»

Исполнитель Кугузова Анна Эдуардовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Федосеева Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« » 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ	7
1.1 Основные этапы развития спутникового обнаружения природных пожаров	7
1.1.2 Развитие технологий.....	8
1.1.3 Интеграция данных и развитие алгоритмов.....	9
1.1.4 Современные тенденции	10
1.2 Спутниковое обнаружение природных пожаров в настоящее время.....	11
1.2.1 Использование спутников на геостационарных и полярных орбитах	13
1.2.2 Действующие метеорологические спутники и приборы	15
1.2.3 Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения (AVHRR)	16
1.2.4 Использование канала 3.9 мкм	17
1.2.5 Использование дополнительных каналов	19
1.2.6 Спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS)	20
1.2.7 Комплект радиометров для визуализации в видимом инфракрасном диапазоне (VIIRS)	21
1.3 Ограничения работы датчиков VIS/IR.....	22
2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ	24
2.1 Методы спутникового обнаружения лесных пожаров.....	24
2.1.1 Использование геостационарных спутников для непрерывного наблюдения	24
2.1.2 Тепловая инфракрасная (TIR) детекция	25
2.1.3 Детекция видимого и ближнего инфракрасного (VIS/NIR) излучения.....	27
2.1.4 Использование индекса термической мощности пожара (FRP – Fire Radiative Power).....	29
2.1.5 Анализ изменений в нормализованном индексе растительности (NDVI)	31
2.1.6 Использование алгоритмов автоматического обнаружения пожаров (AFD – Automated Fire Detection)	32

2.2 Виды природных пожаров	33
2.2.1 Низовые пожары	34
2.2.2 Верховые пожары	35
2.2.3 Почвенные пожары.....	37
2.3 Описательные характеристики последствий природного пожара.....	38
2.3.1 Интенсивность пожара	39
2.3.2 Степень тяжести пожара	40
2.3.3 Тяжесть ожогов.....	41
2.4 Синоптические условия, благоприятствующие возникновению природных пожаров.....	43
2.5 Обнаружение природных пожаров в Российской Федерации	45
3. ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	48
3.1 Предварительный анализ спутниковых данных.....	48
3.2 Тематическая обработка спутниковых изображений, расчет и анализ индексов NDVI и FRP	49
3.3 Анализ синоптических условий	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	76
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	79

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), частота и интенсивность природных пожаров увеличивается во многих регионах мира из-за изменения климата, экстремальных погодных условий и человеческой деятельности, такой как вырубка лесов и несанкционированные сжигания. Это создает потребность в эффективных методах обнаружения пожаров для быстрого реагирования и минимизации ущерба.

Российская Федерация занимает ведущее место в мире по площади лесных массивов. По данным Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), леса покрывают около 8.8 миллионов квадратных километров, что составляет примерно 49% территории страны. Это эквивалентно 20% всех лесов мира, что делает Россию лидером по площади лесных ресурсов.

Леса имеют огромное экономическое значение. К примеру, деревообрабатывающая и бумажная промышленности России, полностью зависящие от лесных ресурсов, занимают немаловажное место в национальной экономике. Эти отрасли сильно зависят от стабильности структуры лесного хозяйства, поэтому сохранение и рациональное использование лесов критически важны для устойчивого развития страны.

Некоторые площади лесного фонда страны могут быть повреждены или уничтожены в результате природных пожаров. Раннее обнаружение активных очагов возгорания может существенно сократить ущерб и ограничить площадь пострадавших территорий. Настоящее исследование посвящено применению спутниковых методов дистанционного зондирования для своевременного выявления природных пожаров.

Спутниковая съемка предоставляет уникальную возможность наблюдать за природными территориями в реальном времени и в глобальном масштабе. Она позволяет оперативно обнаруживать пожары на больших территориях и в труднодоступных регионах, что делает ее важным инструментом в борьбе с природными пожарами.

В последние десятилетия произошел значительный прогресс в области обработки изображений, машинного обучения и анализа данных, что позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы для автоматического обнаружения пожаров на спутниковых снимках с высокой точностью и скоростью.

Исследования в области обнаружения природных пожаров находят прямое применение в системах мониторинга и управления чрезвычайными ситуациями. Полученные результаты могут использоваться для предупреждения и тушения пожаров, а также для оценки их воздействия на окружающую среду, здоровье и безопасность людей. Развитие технологий спутникового обнаружения и совершенствование алгоритмов обработки данных откроют новые перспективы для более точного и оперативного обнаружения природных пожаров. Будущее развитие в этой области может включать использование искусственного интеллекта и машинного обучения для автоматической идентификации пожаров и прогнозирования их распространения.

Целью данной работы является апробирование различных методов тематической обработки спутниковых изображений и индексов в задачах обнаружения очагов возгорания, дымовых шлейфов и выгоревших областей. Для выполнения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Формирование архива спутниковых снимков природных пожаров на основании данных ежедневной спутниковой съемки MODIS/Aqua, Terra – ресурс для скачивания спутниковых снимков LAADS Web EOSDIS;
2. Проанализировать синоптические условия, предшествующие возникновению природных пожаров;
3. Применить известные виды тематической обработки с целью улучшения дешифрирования различных аспектов природных пожаров с помощью программного пакета SNAP;

4. Рассчитать радиационные температуры с целью определения термических аномалий (пожаров) и получения маски пожаров с использованием программного пакета SNAP;

5. Рассчитать и проанализировать индексы NDVI (Normalized difference vegetation index) – нормированный относительный индекс растительности и FRP (Fire radiative power) – мощности теплового излучения пожара с использованием программных пакетов SNAP и ArcGIS для определения площади выгоревших участков, оценки интенсивности и возможного ущерба.

1. РАЗВИТИЕ СПУТНИКОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Спутниковое обнаружение пожаров является одним из важнейших инструментов для мониторинга и контроля природных бедствий. В течение десятилетий научное сообщество и инженеры разработали и усовершенствовали методы и технологии, позволяющие обнаруживать и отслеживать пожары из космоса. В этом параграфе рассматривается процесс развития спутникового обнаружения природных пожаров, начиная с первых экспериментов в 1970-е годы и заканчивая современными тенденциями и инновациями в этой области.

1.1 Основные этапы развития спутникового обнаружения природных пожаров

1.1.1 Пионерские исследования

В 1970-е годы научные сообщества начали исследовать возможности применения спутников для обнаружения природных пожаров. Анализ данных, полученных с помощью спутников, позволил выявлять тепловые аномалии на земной поверхности, которые могли свидетельствовать о наличии пожаров. Экспериментальные тепловые и инфракрасные камеры, установленные на борту спутников, стали неотъемлемым инструментом в обнаружении пожаров.

Одним из ранних научных исследований в этой области была статья J. R. Carr, опубликованная в 1973 году в журнале «Applied Meteorology». В этой работе подробно рассматривались методы наблюдения за пожарами с использованием данных, собранных как спутниками, так и самолетами. Использование спутниковых данных позволило исследователям охватывать большие территории и быстро реагировать на возможные пожары.

Однако в период пионерских исследований качество и разрешение изображений были ограниченными, что затрудняло точное обнаружение и мониторинг пожаров. Тем не менее, этот период стал отправной точкой для дальнейших исследований и разработок в области спутникового мониторинга природных бедствий, включая лесные пожары [1].

1.1.2 Развитие технологий

Период развития технологий в области спутникового обнаружения лесных пожаров, охватывающий примерно 1990-2000 годы, был characterized значительным технологическим прогрессом и новаторскими методами обработки данных со спутников.

Одним из ключевых событий этого периода стал запуск спутников MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту спутников Terra и Aqua NASA. Система MODIS представляла собой высокопроизводительный инструмент для сбора данных о состоянии Земли, включая обнаружение лесных пожаров. Основными преимуществами системы MODIS были высокое пространственное разрешение и частота наблюдений, что позволяло получать оперативную и достоверную информацию о пожарах.

В статье «The MODIS Fire Products» авторами Джастис, К. О., Джильо, Л., Коронтци, С. И др. был представлен инновационный метод обнаружения пожаров, основанный на данных, полученных с помощью прибора MODIS. «Один из наиболее используемых алгоритмов – это «Thermal Anomalies/Fire» (аномалии тепла/пожар), который широко применяется для автоматического обнаружения пожаров на основе анализа тепловых аномалий.

Этот метод стал неотъемлемой частью работы с данными MODIS, играя важную роль в отслеживании и борьбе с пожарами. Он обеспечивает быстрое реагирование на пожары и позволяет специалистам эффективно

контролировать их распространение, что способствует улучшению ситуации в области пожарной безопасности.

Алгоритм «Thermal Anomalies\Fire» (аномалии тепла\пожар) определяет наличие пожара на основе обнаружения тепловых аномалий, которые характерны для активного горения. Этот алгоритм анализирует изображения, полученные с помощью инфракрасных каналов спутников MODIS, и выявляет области (пиксели), в которых наблюдаются аномально высокие температуры, превышающие окружающую среду и свидетельствующие о наличии пожара» [2].

1.1.3 Интеграция данных и развитие алгоритмов

В период с 2000 по 2010 годы произошел существенный прогресс в интеграции данных с различных спутниковых систем и разработке алгоритмов обнаружения пожаров.

Процесс развития алгоритмов включал в себя несколько ключевых этапов:

1. Интеграция данных: в этот период происходила интеграция данных с различных спутниковых платформ и приборов, что позволяло получать более полную информацию о состоянии поверхности Земли и обнаруживать пожары с большей точностью.

2. Улучшение алгоритмов: активные исследования и разработки в области алгоритмов способствовали совершенствованию методов обработки данных и выявления характерных признаков пожаров на изображениях, что повысило скорость и точность их обнаружения.

3. Тестирование и оценка эффективности: новые алгоритмы проходили тестирование на реальных данных и подвергались оценке их эффективности и точности. Это позволило уточнить и оптимизировать параметры алгоритмов для лучшего обнаружения пожаров.

4. Практическое применение: наиболее эффективные алгоритмы были успешно внедрены в современные системы мониторинга пожаров, значительно повысив оперативность и точность лесных пожаров.

Развитие методов обработки данных и алгоритмов анализа позволило повысить точность и оперативность обнаружения пожаров. Новые алгоритмы, основанные на анализе теплового излучения и изменениях в растительности, были успешно внедрены в современные системы мониторинга [3].

1.1.4 Современные тенденции

В наши дни в новейшие системы детектирования очагов возгорания внедряют данные с различных спутниковых платформ и применяют методы искусственного интеллекта и машинного обучения для автоматического распознавания и классифицирования природных пожаров. Появление современных спутниковых систем, таких как «Sentinel» серии Европейского космического агентства, дополнило возможности мониторинга пожаров, обеспечивая более широкий охват и улучшенное разрешение изображений.

Современные тенденции в области спутникового обнаружения лесных пожаров включают в себя следующие аспекты:

1. Интеграция данных с различных спутниковых платформ: в современных системах обнаружения пожаров активно используются данные с различных спутников, таких как «MODIS», «Landsat», «Sentinel» и других, что позволяет получать более полную информацию о состоянии поверхности Земли и обнаруживать пожары с большей точностью и оперативностью.

2. Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта в современных системах обнаружения пожаров становится всё более распространённым. Эти методы используются для автоматического анализа и классификации данных, что ведёт к повышению эффективности

и точности выявления пожаров, и снижению количества ложных срабатываний.

3. Развитие инструментов и программного обеспечения: в это периоде активно развиваются инструменты и программное обеспечение для обработки и анализа данных спутникового мониторинга, что делает процесс обнаружения и оценки пожаров более эффективными и доступными для широкого круга пользователей.

Процесс развития спутникового обнаружения лесных пожаров прошел через несколько ключевых этапов, начиная с первых экспериментов и заканчивая современными тенденциями и инновациями в этой области. Спутниковые технологии играют важную роль в мониторинге природных бедствий, например, лесных пожаров, и обеспечивают оперативную информацию для эффективного управления чрезвычайными ситуациями [4].

1.2 Спутниковое обнаружение природных пожаров в настоящее время

В литературе по дистанционному зондированию и пожарной экологии было применено множество методов для описания характеристик активного пожара (см. табл. 1.1)

Таблица 1.1 – Примеры измерений характеристик активного очага возгорания.

Характеристика	Тип измерения
Длина и высота пламени	Термочувствительные объекты; Прямые наблюдения; Видео
Продолжительность пожара	Термопары
Температура горения	Термочувствительная краска или керамика; Термопары; Тепловые инфракрасные камеры
Интегрированная температура по времени	Термопары
Скорость распространения	Термопары; Видеозаписи; Секундомеры;
Прямые пирогенные выбросы	Газоанализаторы; Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье

Продолжение таблицы 1.1:

Характеристика	Тип измерения
Сгоревшее топливо	Сжигание лесного топлива на месте; Изменение данных лазерного профилирования мощности/энергии излучения при пожаре
Выделяемая при пожаре энергия	Интенсивность линии огня; Излучаемая огнем энергия

Однако дистанционная оценка характеристик активного пожара может быть разделена на две основные области применения:

1. Обнаружение активно горящих участков с использованием оптических и телевизионных изображений и их комбинирование.
2. Использование изображений (с воздуха и со спутника) оценка энергии, излучаемой огнем во время горения.

Международные исследовательские организации, включая Международную программу по геосфере и биосфере (IGBP), подчеркивают важность точного обнаружения пожаров для понимания их влияния на глобальные экологические процессы. Для выявления и учета пожаров используются тепловые инфракрасные диапазоны (3,6-12 мкм), благодаря датчикам с высоким пространственным расширением, таким как усовершенствованный радиометр (VIIRS), а также спектрометрический среднего разрешения (MODIS).

Современные спутниковые платформы предоставляют мощные инструменты для непрерывного мониторинга Земли. В зависимости от характеристик орбиты и приборов на платформе, данные о состоянии атмосферы и поверхности Земли могут быть получены в короткие сроки с высоким разрешением для большинства регионов. Спутники оснащены разнообразными приборами, выполняющими различные задачи.

Тепловое излучение от пожаров значительно превышает фоновое излучение, что позволяет надежно обнаруживать очаги возгорания, даже если огонь охватывает менее 0,01% пикселя (например, 1 га на 1км²).

Датчики, работающие в видимом (VIS), среднем инфракрасном (MIR) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах (приблизительно 0,3-1,1 мкм для VIS/NIR и 3-15 мкм для MIR), давно используются для мониторинга растительности. Комбинация различных спектральных каналов позволяет получать детальную информацию о состоянии и здоровье растительности. Например, данные о сухости могут быть интегрированы в оценку пожарной опасности, а после крупных лесных пожаров эта информация помогает оценить выгоревшую площадь и оценить масштаб ущерба [5].

1.2.1 Использование спутников на геостационарных и полярных орбитах

Национальное управление океанографии и атмосферы США (NOAA) и Европейская организация спутниковой, оснащенных датчиками для работы в различных областях спектра. Эти спутники работают в солнечно-синхронном режиме, что обеспечивает регулярные и точные наблюдения, необходимые для краткосрочных прогнозов погоды. Данные, полученные с этих спутников, обычно быстро обрабатываются и становятся доступными вскоре после наблюдения, что позволяет применять их для детектирования природных пожаров практически в реальном времени.

Спутники, которые располагаются на орбите примерно на высоте 36 000 км над экватором и совершают оборот вокруг Земли за 24 часа, оставаясь над одной и той же точкой на экваторе принято называть геостационарными. Основное преимущество использования спутников с таким типом орбит заключается в том, что все снимки делаются с одного и того же места, но в разное время. Для визуальных и инфракрасных приборов снимки обычно делаются каждые 15 минут, что предоставляет уникальные возможности для раннего обнаружения и мониторинга природных пожаров [6].

Для высоких широт, например, таких как северные регионы России, использование геостационарных спутников менее оптимально. Измерения становятся зависимыми от геометрии наблюдений, и с увеличением угла падения луча обзора наземных пикселей значительно увеличивается. Это делает невозможным эффективное наблюдение за лесными пожарами в этих регионах учитывая их типичные размеры.

Датчики на полярных орбитальных спутниках широко используются для активного обнаружения лесных пожаров. К ним относятся AVHRR и MODIS и их общие характеристики приведены в таблице 1.2 ниже.

Таблица 1.2 – Датчики на полярных орбитальных спутниках.

Датчик	Спутник	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Ширина полосы пролета	Каналы и диапазоны для детектирования пожаров
AVHRR	NOAA	1,1 км	2 раза в 24 ч	2400 км	3а (1,6 мкм (ночь)); 3б (3,9 мкм (день)); 4 (11 мкм)
MODIS	Terra/Aqua	1 км в надире	4 раза в 24 ч (2 день, 2 ночь)	2330 км	21 и 22 (3,9 мкм); 31 (10,8 мкм)
VIIRS	SUOMI-NPP	375 м	2 раза в 24 ч	3040 км	M13 (3,9-4,2 мкм); M15 (10,3-11,3 мкм)

Спутники, находящиеся на полярной орбите, имеют временное разрешение, которое ограничивает их способность обеспечивать систему мониторинга пожаров в реальном времени (или близкому к нему) по сравнению с геостационарными спутниками. Хотя их пространственное разрешение выше, чем у геостационарных спутников, что немаловажно для обнаружения лесных пожаров, однако, природные пожары – это

динамичное явление, требующее спутников с высоким временным разрешением.

1.2.2 Действующие метеорологические спутники и приборы

Национально управление океанографии и атмосферы США (NOAA) и Европейская организация спутниковой метрологии (EUMETSAT) в настоящее время эксплуатируют семь операционных метеорологических и три научных спутника, которые могут использоваться для детектирования природных пожаров. Эти спутники работают на солнечно-синхронных орбитах, что позволяет вести наблюдение в одно и то же время суток. Орбиты спутников спроектированы таким образом, чтобы они пересекали экватор в одно и то же местное время.

Однако орбиты спутников не обеспечивают повторяемость прохождения над одним и тем же местом каждый день из-за уникальной геометрии движения. Например, спутники NOAA проходят над определенной точкой Земли примерно раз в 11 дней. Тем не менее, благодаря специальной конфигурации их оборудования, большинство спутников способны сканировать полосу шириной около 1000 км, что позволяет проводить наблюдения в средних и высоких широтах от 2 до 4 раз в день. Наблюдения, как правило, осуществляются в течении нескольких часов в определенное местное время для каждого прохода спутника.

В настоящее время для метеорологических и научных наблюдений используются спутники NOAA 15-19, Metop A, MetOp B, Terra и Aqua NASA(EOS), а также экспериментальный спутник SUOMI. Эти спутники расположены на различных орбитах, что позволяет проводить наблюдения в разное время суток для получения данных, необходимых для научных исследований, оперативных прогнозов погоды и обнаружения природных пожаров [6].

1.2.3 Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения (AVHRR)

AVHRR направлен на Землю прямо под спутником, что называется ориентацией в направлении надира. Система радиометра проводит сканирование, двигаясь перпендикулярно своей траектории полета и охватывая углы от 0° надира до 55° в обе стороны. Такой метод сканирования обеспечивает получение изображений с высоким разрешением. В центре полосы сканирования разрешение составляет около 1.1 км, а общая ширина полосы превышает 2500 км. Однако на краях разрешение ухудшается, а атмосферные искажения возрастают из-за особенностей геометрии измерений.

На спутниках NOAA и MetOp установлен усовершенствованный радиометр высокого разрешения. Он оснащен пятью видимыми и инфракрасными каналами, предназначенными для измерения температуры поверхности и облачности. Технические характеристики спектральных каналов AVHRR можно найти в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Спектральные каналы усовершенствованного радиометра высокого разрешения.

Канал	Диапазон, мкм	Источник
1	0,58 – 0,68	отраженный солнечный свет
2	0,725 – 1,1	
3 (3A)	1,58 – 1,64	
3 (3B)	3,55 – 3,93	отраженный солнечный свет/ИК-излучение
4	10,5 – 11,3	исходящее земное излучение
5	11,5 – 12,5	

Согласно закону смещения Вина, чем выше температура источника, тем короче длина волны, на которой наблюдается максимальное излучение. Например, для солнечного света это значение приходится на приблизительно 600 нм, что соответствует температуре поверхности Солнца, около 6000 К (или 5726.86 °С). Однако на поверхности Земли и в атмосфере наибольшая интенсивность излучения приходится на длины волн около 10 мкм. При температуре огня от 100 до 2000 °С, максимум излучения приходится на длины волн около 3.7 мкм. Следовательно, инфракрасные каналы, настроенные на регистрацию излучения с длиной волны около 3.7 мкм, могут быть использованы для обнаружения открытых пожаров, поскольку они соответствуют максимальной яркости излучения, характерного для огня [6].

1.2.4 Использование канала 3.9 мкм

В 80-х годах было установлено, что каналы с длиной волны около 3.9 мкм на спутниковых приборах дистанционного зондирования обладают высокой чувствительностью к очагам горения. Это открытие позволило применять данные каналы для оперативного выявления природных пожаров.

Однако канал 3.9 мкм имеет особенности в зависимости от времени суток: днем он регистрирует как отраженную солнечную энергию, так и тепловое излучение Земли, а ночью фиксирует только излучаемую земную энергию. Это приводит к тому, что его отклик различается в зависимости от времени суток, и днем он может достигать насыщения при повышении температуры.

Насыщение яркостной температуры означает максимальную температуру, которую датчик может измерить, что является ограничивающим фактором при использовании канала 3.9 мкм для оценки размеров и температуры пожаров. Это оказывает значительное влияние на точность обнаружения температурных аномалий. Следовательно, как

видно из рисунка 1.1, дневные спутниковые измерения температуры могут не точно отражать реальную температуру на месте пожара, поэтому для дневных и ночных условий необходимо применять разные алгоритмы.

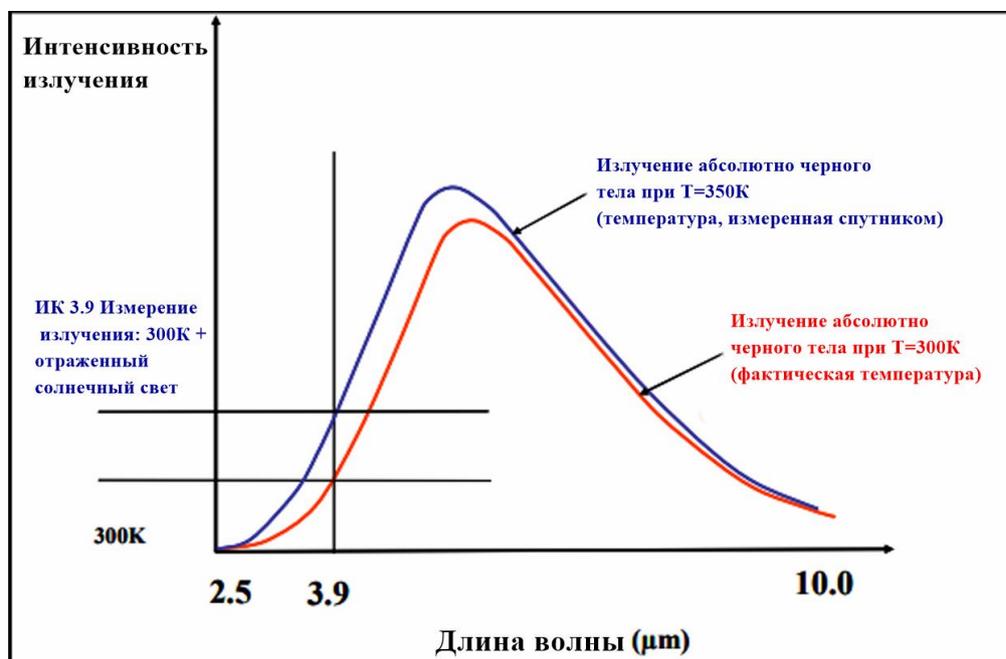


Рисунок 1.1 – Влияние солнечной компоненты на энергетическую светимость в канале 3.9 мкм

При использовании канала 3.9 мкм для обнаружения природных пожаров необходимо учитывать его характеристики, которые могут повлиять на эффективность этого процесса:

Площадь пожара: Даже небольшие пожары могут привести к увеличению площади пикселя, что делает его неоднозначным индикатором;

Непокрытые растительностью почвы или возвышенности: Поверхности без растительности так же могут нагреваться солнечным светом, создавая сигналы, схожие с теми, что создает лесной пожар;

Отраженный солнечный свет: В дневной время отраженный солнечный свет так же может затруднить отделение сигналов лесных пожаров. Эту проблему можно частично решить, исключив дневные наблюдения с углами зеркального отражения солнечного света;

Ночные наблюдения: В ночное время канал 3.9 мкм может быть более полезным, так как отсутствует сильное влияние солнечной радиации и отраженного света. Однако использование дополнительной информации из других каналов может улучшить надежность обнаружения пожаров;

Таким образом, хотя канал 3.9 мкм может быть полезным инструментом для обнаружения пожаров, его использование требует учета указанных факторов, чтобы получить более надежные результаты.

Канал 10.8 мкм не очень чувствителен к изменениям температуры по сравнению с каналом 3.9 мкм, поэтому разница энергетической светимости (радиометрической температуры) между 3.9 и 10.8 для «горящих» пикселей выше, чем для не покрытых огнем. Канал 3.9 обладает более сильным тепловым откликом по сравнению с каналом 10.8, даже если огонь охватывает небольшую часть пикселя. Небольшие, но очень горячие области подпикселей могут влиять на среднюю яркостную температуру пикселей в канале 3.9. Это важно поскольку, объясняет, почему каналы 3.9 и 10.8 используются при обнаружении лесных пожаров [6].

1.2.5 Использование дополнительных каналов

Упомянутые ранее характеристики канала 3.9 ограничивают его использование в определенных условиях, включая ночные наблюдения. Для расширения диапазона обнаружения до дневных измерений и фильтрации данных используются дополнительные каналы, включая 0.7-1.1 и 11 микрометров. Дополнительные требования к наблюдениям так же включают следующее: расстояние от края полосы наблюдения должно быть более 100 пикселей, исключение областей вокруг антропогенных источников тепло, таких как промышленные зоны, а также оценка тепловых характеристик поверхности для учета почвы без растительности, сухих лугов или пахотных земель. Эти условия в основном применимы к теплым и сухим периодам на равнинах северных регионов в конце сезона лесных пожаров [6].

Ниже представлены критерии фильтрации данных и исключения ошибочных наблюдений:

- Сигнал в канале 3.9 микрометра превышает предел насыщения в 320К, что является ключевым показателем природных пожаров;
- Сравнение наблюдаемого излучения между каналами 3.9 и 11 микрометров для убедительности исхода сигнала от огня, а не от теплой поверхности;
- Теплота поверхности должна быть достаточно выраженной, чтобы не маскировать облачные сигналы;
- Низкий коэффициент отражения в видимом диапазоне помогает избежать ложных солнечных сигналов в канале 3.9.

1.2.6 Спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS)

MODIS (Спектрометр среднего разрешения) – еще один прибор, обладающий характеристиками, подходящими для обнаружения лесных пожаров, установленный на борту американских спутников EOS Aqua и EOS Terra. Terra и Aqua – это исследовательские спутники, предназначенные для долгосрочного мониторинга. Современные приборы предоставляют возможность использования полученных данных практически в реальном времени в момент пролета спутника, что делает их неотъемлемой частью процесса наблюдения за природными пожарами.

Однако в отличие от AVHRR, канал 3.9 мкм у MODIS претерпел некоторые коррекции для уменьшения влияния таких факторов, как коэффициент отражения солнечного света и поглощение водяного пара. Разрешение прибора составляет 1 км, а некоторые каналы и вовсе имеют более высокое разрешение, предоставляя дополнительную информацию, с ними можно ознакомиться в таблице 1.4. Схема и полоса сканирования очень похожи на AVHRR, что позволяет объединять его данные с данными MODIS, а также адаптировать алгоритмы.

Таблица 1.4 – Номер канала и диапазон данных MODIS.

Канал	Диапазон, мкм
1	0,620 – 0,670
2	0,841 – 0,876
6	1,628 – 1,652
7	2,105 – 2,155
8	0,405 – 0,420
20	3,660 – 3,840
21	3,929 – 3,989
22	3,929 – 3,989
31	10,780 – 11,280
32	11,770 – 12,270

Помимо первичных измерений национальное управление по аэронавтике и исследованиям космического пространства (NASA) предоставляет информационные продукты MOD14 и MOD40, обнаруживающие тепловые аномалии и чувствительные к пожарам и сжиганию биомассы. Эти продукты имеют более продвинутую обработку, они так же могут быть полезны для анализа и оценки обнаруженных очагов возгорания и надежности обнаружения лесных пожаров [2].

1.2.7 Комплект радиометров для визуализации в видимом инфракрасном диапазоне (VIIRS)

В 2011 году на спутнике SUOMI, находящемся на полярно орбите, был установлен прибор VIIRS (комплект радиометров для визуализации в видимом инфракрасном диапазоне). Этот прибор представляет собой значительное улучшение в области наблюдения Земли, обеспечивая более широкий спектр данных для мониторинга природных явлений, включая лесные пожары. VIIRS разработан на основе технологии MODIS и представляет собой широкоугольный (3034 км) сканирующий радиометр, который собирает данные о земной поверхности в 22 видимых инфракрасных диапазонах спектра (400-12500 нм). Среди 22 спектральных

полос есть 15 отражающих полос (RSB) и 7 теплоизлучающих полос (TEB).

Схожесть с приборами AVHRR и MODIS позволяет эффективно применять алгоритмы, разработанные для обнаружения лесных пожаров и адаптировать их к данным, полученным от VIIRS.

Однако следует отметить, что VIIRS обладает рядом преимуществ, таких как повышенное разрешение и более широкий спектр наблюдений. Эти характеристики позволяют более точно обнаруживать и отслеживать лесные пожары, что делает его ценным инструментом для мониторинга природных катастроф [6].

1.3 Ограничения работы датчиков VIS/IR

Наблюдательные системы Земли, функционирующие в различных областях видимого и инфракрасного спектра, подвержены влиянию атмосферных условий. Каналы, используемые для обнаружения лесных пожаров, находятся в хонах, известных как «окна». В ясные дни излучение, достигающее приборов, может происходить от поверхности Земли или быть отраженным от нее. Однако датчики, находящиеся в области видимого и инфракрасного спектра, очень чувствительны к воздействию облачности. Тонкие перистые облака могут быть полупрозрачными как для видимого, так и для инфракрасного излучения, что приводит к ослаблению сигнала, исходящего от поверхности Земли, из-за поглощения. В зависимости от плотности облачности, условия для обнаружения пожаров могут не быть выполнены. То же самое относится и к небольшим облакам, которые могут частично заслонять очаги возгорания.

На спутниках также присутствуют другие датчики, менее чувствительные к облачности, работающие в микроволновой области спектра. Однако у них относительно низкое пространственное разрешение, и их способность обнаруживать лесные пожары ограничена из-за слабой

спектральной чувствительности к изменениям температуры поверхности, требующей для обнаружения пожаров значительного размера [6].

2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

2.1 Методы спутникового обнаружения лесных пожаров

Способы детектирования природных пожаров с помощью спутниковых изображений включает в себя использование различных спектральных диапазонов и алгоритмов для выявления очагов горения и оценки их интенсивности. В совокупности они позволяют комплексно и эффективно обнаруживать активные природные пожары, оценивать их интенсивность и последствия, что является важным инструментом для борьбы с пожарами и минимизации их ущерба. Далее рассмотрим подробнее каждый метод.

2.1.1 Использование геостационарных спутников для непрерывного наблюдения

Геостационарные спутники представляют собой метод наблюдения Земли, при котором они находятся на орбитах, синхронных с вращением Земли. Это означает, что они остаются над определённой точкой, обеспечивая непрерывное и постоянное наблюдение за конкретным районом. Такой подход особенно ценен для мониторинга изменений в атмосфере, климате, погоде и окружающей среде, поскольку позволяет получать данные в режиме реального времени без перерывов [7].

Принцип работы геостационарных спутников заключается в том, что они остаются на постоянном расстоянии от поверхности Земли и вращаются в таком же темпе, как и сама Земля. Это позволяет им постоянно наблюдать за одним и тем же регионом, что особенно полезно для мониторинга изменений в реальном времени, таких как погодные явления, природные бедствия и т. д.

Преимущества использованию геостационарных спутников для непрерывного наблюдения включают возможность оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, непрерывное покрытие региона

без пропусков и возможность предоставления постоянной связи и передачи данных [8].

Использование геостационарных спутников для обнаружения лесных пожаров:

- Принцип работы: непрерывный мониторинг определённой области с геостационарных орбит.
- Инструменты: спутники, такие как GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) и Meteosat.
- Применение: обнаружение пожаров в реальном времени и отслеживание их развития. Геостационарные спутники обеспечивают частые наблюдения (каждые 5-15 минут).
- Преимущества: высокая временная разрешающая способность позволяет быстро обнаруживать и отслеживать пожары.
- Недостатки: ограниченная пространственная разрешающая способность по сравнению с полярно-орбитальными спутниками, особенно на высоких широтах.

2.1.2 Тепловая инфракрасная (TIR) детекция

«Спутниковое обнаружение пожаров с использованием тепловой инфракрасной (TIR) детекции – это метод, основанный на обнаружении теплового излучения, испускаемого пожарами и горящими объектами с помощью инфракрасных датчиков, установленных на спутниках» [9].

Диапазоны термического инфракрасного излучения (TIR – Thermal Infrared) охватывают длинноволновую часть инфракрасного спектра, которая используется для измерения теплового излучения объектов. Обычно TIR диапазон охватывает следующие спектральные диапазоны:

Длинноволновое инфракрасное излучение (Long-Wave Infrared, LWIR) - от 8 до 14 микromетров (мкм) – широко используется в дистанционном зондировании Земли, в том числе для мониторинга

температуры поверхности, обнаружения пожаров и изучения тепловых характеристик объектов.

Средневолновое инфракрасное излучение (Mid-Wave Infrared, MWIR) – от 3 до 8 микрометров (мкм) – применяется для обнаружения тепловых аномалий, таких как пожары, вулканы и промышленные процессы. MWIR часто используется для съемок ночью, так как он чувствителен к более высоким температурам.

Примеры применения TIR диапазонов в дистанционном зондировании: Спутники MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

- Канал 31: 10.78-11.28 мкм
- Канал 32: 11.77-12.27 мкм

Тепловая инфракрасная детекция позволяет обнаруживать пожары даже в условиях низкой видимости из-за дыма или тумана, а также в ночное время благодаря тому, что тепловое излучение не зависит от освещения [10].

Спутниковые системы обычно используют многочисленные каналы и частотные диапазоны для более точного обнаружения и оценки характеристик пожаров, таких как их интенсивность и распространение. Кроме того, современные системы спутникового мониторинга пожаров часто комбинируют данные TIR с данными других датчиков, таких как оптические и радиолокационные, для создания комплексной картины происходящих пожаров и оценки их воздействия на окружающую среду и человеческие поселения.

Использование TIR для обнаружения лесных пожаров:

- Принцип работы: использование тепловых инфракрасных диапазонов для выявления горячих точек на поверхности Земли.
- Инструменты: например, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту спутников Terra и Aqua, оснащены каналами, чувствительными к тепловому излучению.

- Применение: этот метод позволяет обнаруживать активные пожары, измеряя излучение, исходящее от огня. Тепловые аномалии, наблюдаемые в диапазоне 3.7 мкм и 11 мкм, указывают на высокие температуры, характерные для пожаров.

- Преимущества: способен обнаруживать пожары даже через облачный покров и ночью.

- Недостатки: может давать ложные сигналы от других источников тепла, таких как горячие промышленные объекты.

Преимущества спутникового обнаружения пожаров с использованием тепловой инфракрасной детекции включают оперативность, широкий охват территории, возможность мониторинга за удалёнными и труднодоступными районами, а также независимость от климатических условий [11].

2.1.3 Детекция видимого и ближнего инфракрасного (VIS/NIR) излучения

«Детекция видимого и ближнего инфракрасного (VIS/NIR) излучения — это метод обнаружения объектов на основе измерения видимого и инфракрасного излучения, испускаемого или отражаемого объектами. Этот метод используется в различных областях, включая астрономию, медицину, экологию и технику» [12].

Принцип работы детекции видимого и ближнего инфракрасного излучения заключается в использовании специальных датчиков или камер, способных регистрировать световое излучение в широком диапазоне длин волн - от видимого до ближнего инфракрасного. Эти приборы обычно имеют разные фильтры и детекторы, которые позволяют измерять интенсивность света в различных спектральных диапазонах [13].

Пример применения VIS/NIR:

Видимый диапазон (VIS) - от 0.4 до 0.7 микрометров (мкм):

- Зелёные растения отражают много света в зелёной части видимого спектра (около 0.55 мкм), что делает их легко различимыми.

- Использование красного (около 0.66 мкм) и синего (около 0.47 мкм) света для оценки состояния и плотности растительности.

- VIS данные широко используются для создания цветных изображений поверхности Земли, что помогает в картировании и мониторинге изменений.

Ближний инфракрасный диапазон (NIR) - от 0.7 до 1.3 микрометров (мкм):

- Зелёные растения отражают значительное количество света в NIR диапазоне, что делает его важным для анализа состояния и здоровья растительности.

- Оценка водного стресса у растений - растения, испытывающие водный стресс, отражают меньше света в NIR диапазоне.

- Вода сильно поглощает NIR излучение, что делает этот диапазон полезным для определения водных объектов и их характеристик.

Использование VIS/NIR для обнаружения лесных пожаров:

- Принцип работы: использование видимого и ближнего инфракрасного спектров для выявления изменений в характеристиках поверхности, связанных с пожарами.

- Инструменты: спутники, такие как Landsat, используют каналы в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

- Применение: определение области возгорания по изменению спектральных характеристик растительности и почвы. Например, горящие участки отражают меньше видимого света и больше теплового излучения.

- Преимущества: высокая пространственная разрешающая способность позволяет детализировать структуру пожара и его последствия.

- Недостатки: ограниченная возможность наблюдения в ночное время и при облачности.

Преимущества детекции видимого и ближнего инфракрасного излучения включают широкий спектр применения, высокую разрешающую способность и возможность анализа характеристик объектов на основе их спектральных характеристик [14].

2.1.4 Использование индекса термической мощности пожара (FRP – Fire Radiative Power)

Применение индекса FRP (Fire Radiative Power) – метод оценки интенсивности пожаров на основе измерения теплового излучения, испускаемого пожарами. Этот метод позволяет определить количество энергии, выделяемое пожаром за определённый период времени, и является важным инструментом для мониторинга пожаров и оценки их воздействия на окружающую среду [11]. Общая формула для расчета индекса термической мощности пожара (1):

$$FRP = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A, \quad (1)$$

где: ε – Излучательная способность подстилающей поверхности (безразмерная величина, обычно около 0.95 для большинства природных поверхностей); σ – постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}^{-2}/\text{К}^{-4}$); T – температура поверхности (в Кельвинах); A – площадь поверхности в квадратных метрах).

Общепринятая градация индекса термической мощности пожара (FRP – Fire Radiative Power) по мощности:

1. Низкая мощность (Low Power)

- Диапазон: 0 – 100 мегаватт (МВт) на квадратный метр;
- Характеристики: Пожары с низкой тепловой активностью, часто маленькие или начинающиеся пожары, возможно не имеющие значительного воздействия на окружающую среду.

2. Средняя мощность (Medium Power)

- Диапазон: 100 – 500 мегаватт (МВт) на квадратный километр;
- Характеристики: Умеренно интенсивные пожары, которые могут быть средних размеров и иметь определённое воздействие на окружающие экосистемы и человеческие поселения.

3. Высокая мощность (High Power)

- Диапазон: 500 -100 мегаватт (МВт) на квадратный километр;
- Характеристики: Интенсивные пожары с высокой тепловой активностью, которые могут распространяться на большие площади и иметь серьёзные последствия для природы, экологии и людей.

4. Очень высокая мощность (Very High Power)

- Диапазон: более 1000 мегаватт (МВт) на квадратный километр;
- Характеристики: Экстремально интенсивные пожары, которые обладают огромной тепловой активностью и могут вызывать значительные разрушения, угрожая жизни и здоровью людей, животных и растений.

Принцип FRP заключается в использовании данных, полученных с помощью инфракрасных датчиков или камер, установленных на спутниках или летательных аппаратах. Эти датчики регистрируют тепловое излучение, испускаемое пожарами, и на основе этих данных вычисляется термическая мощность пожара [15].

- Принцип работы: оценка энергии, излучаемой пожаром, с использованием термических данных.
- Инструменты: спутники, такие как MODIS, предоставляют данные, необходимые для расчета FRP.
- Применение: расчет FRP позволяет количественно оценить интенсивность пожара и его потенциальное воздействие на окружающую среду. FRP рассчитывается на основе яркостной температуры, извлеченной из термических каналов.
- Преимущества: обеспечивает количественную оценку интенсивности пожара.

- Недостатки: требует точной калибровки данных и учета атмосферных влияний.

Преимущества использования индекса термической мощности пожара включают точную оценку интенсивности пожаров, возможность сравнения пожаров различной мощности и выявление наиболее активных очагов возгорания для направления усилий по их тушению [16].

2.1.5 Анализ изменений в нормализованном индексе растительности (NDVI)

Метод оценки состояния растительного покрова на основе анализа изменений в отражаемом свете, полученном с помощью спутниковых или аэрокосмических снимков. NDVI является одним из наиболее широко используемых индексов для оценки здоровья растений, степени зеленого покрова и изменений в растительности во времени и пространстве [17].

Формула для расчета NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (2)$$

где: NIR — отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне (обычно от 0.7 до 1.1 мкм); RED — отражательная способность в красном диапазоне видимого света (обычно от 0.6 до 0.7 мкм).

Принцип работы NDVI основан на различии в спектральных характеристиках растительного и растительного покрова. NDVI вычисляется как отношение разности инфракрасной и видимой частей спектра к их сумме. Высокие значения NDVI обычно указывают на здоровый и активный растительный покров, тогда как низкие значения могут свидетельствовать о наличии дефицита влаги, стрессе растений или других неблагоприятных условиях [18]. Принцип работы: сравнение

значений NDVI до и после пожара для выявления изменений в растительности.

- Инструменты: спутники, такие как Sentinel-2 и Landsat, предоставляют мультиспектральные изображения, необходимые для расчета NDVI.

- Применение: NDVI позволяет оценить степень повреждения растительности, вызванного пожаром, и отслеживать процесс восстановления.

- Преимущества: позволяет оценить долгосрочные последствия пожаров и восстановление экосистем.

- Недостатки: зависит от наличия данных до и после пожара, чувствителен к изменениям в погодных условиях и состоянию атмосферы.

Преимущества анализа изменений в нормализованном индексе растительности включают возможность долгосрочного мониторинга состояния растительности, выявление областей деградации или восстановления растительного покрова, а также оценку воздействия климатических изменений и человеческой деятельности на экосистемы [19].

2.1.6 Использование алгоритмов автоматического обнаружения пожаров (AFD – Automated Fire Detection)

Метод заключается в обнаружении пожаров на основе анализа спутниковых данных или данных с беспилотных летательных аппаратов с использованием специальных алгоритмов и программного обеспечения. Он позволяет автоматически обнаруживать пожары, даже если они находятся в отдаленных или труднодоступных районах, и быстро реагировать на них для предотвращения распространения пожаров и минимизации ущерба [20].

Автоматические алгоритмы обнаружения пожаров основаны на анализе характеристик спектральных изображений, получаемых от

специализированных сенсоров, таких как инфракрасные датчики или камеры. При помощи различных пороговых значений и математических моделей эти алгоритмы выделяют области с высокой тепловой активностью, что может свидетельствовать о возможном наличии пожара [21].

- Принцип работы: использование специализированных алгоритмов для автоматического обнаружения пожаров по данным, полученным от спутниковых сенсоров.

- Инструменты: разнообразные алгоритмы, включая, например, алгоритм MOD14 для данных MODIS.

- Применение: алгоритмы анализируют спектральные данные для выявления аномалий, связанных с пожарами, и автоматизируют процесс их обнаружения.

- Преимущества: снижение зависимости от ручной обработки данных, повышение скорости и точности обнаружения.

- Недостатки: возможность ложных срабатываний, необходимость адаптации и настройки алгоритмов для различных регионов и условий.

Преимущества использования алгоритмов автоматического обнаружения пожаров включают быстроту реакции на пожары, возможность обнаружения пожаров в реальном времени, а также способность работы в условиях низкой видимости или плохой погоды, когда визуальное обнаружение пожаров затруднено [21].

2.2 Виды природных пожаров

Природные пожары представляют собой серьезную угрозу, проявляющуюся в неконтролируемом горении лесных угодий, включая горные и степные районы. Эти бедствия могут нанести значительный ущерб экономике, окружающей среде и животному миру, а также угрожать

жизням людей. Они могут быстро распространяться на обширные территории при наличии определенных факторов, таких как сильный ветер и засушливая растительность.

Важно отметить, что различные виды природных пожаров имеют свои характерные особенности, которые важно учитывать при разработке стратегий и тактик тушения. Типичные виды включают низовые, верховые и почвенные пожары [6].

Низовые пожары составляют основную долю от общего числа случаев (95-97%) и возникают на поверхности земли. Верховые пожары (1-5%) вспыхивают в кроне деревьев, а почвенные пожары (примерно 1%) затрагивают слой почвы и подстилки [23].

2.2.1 Низовые пожары

Низовые природные пожары представляют собой процесс горения нижних слоев растительности в лесном биоценозе, охватывая подстилку, опавшие листья, мох и траву. В основном они затрагивают кустарники, молодые деревья и травяной покров (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Низовой пожар [R.S.Roy, R.S. Dwivedi, D. Vijayan “Remote Sensing Applications”, NRSC, 2010]

Они обычно возникают в периоды длительной засухи, когда как поверхностные, так и нижние слои растительности, из-за недостатка влаги,

становятся сухими и легко поддаются воспламенению. Эти пожары могут распространяться относительно медленно, со скоростью 0.02-0.1 м/с, и оставаться активными на одном месте в течение продолжительного времени.

При низовых пожарах, неуклонно распространяющихся, подстилка может полностью выгореть до минерального слоя толщиной до 15 сантиметров, характеризующегося влажностью от 7 до 20 процентов. Это может привести к частичному или полному сгоранию корневой системы деревьев и повреждению их стволов, что способствует возникновению более интенсивных пожаров в будущем.

С другой стороны, беглые низовые пожары чаще возникают в весенний период, когда верхние слои горючих материалов уже высохли, а нижние слои еще остаются влажными. Они распространяются со скоростью 0.05-0.083 м/с и не задерживаются на одном месте надолго. Скорость распространения беглых низовых пожаров против ветра в 6 - 10 раз меньше, чем по направлению ветра. Из-за относительно небольшого количества горючих материалов такие пожары обычно наносят наименьший вред лесной экосистеме [24].

2.2.2 Верховые пожары

Верховые природные пожары отличаются от низовых тем, что огонь распространяется в верхние слои лесного покрова, тем самым затрагивая и прикорневую зону деревьев и растительности, и кроны деревьев. Такие пожары чаще всего возникают также в периоды засушливой погоды и сильных ветров (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Верховой пожар [R.S.Roy, R.S. Dwivedi, D. Vijayan “Remote Sensing Applications”, NRSC, 2010]

Устойчивый верховой пожар, возникающий после интенсивных ветров и лесах с низкорослыми деревьями, представляет следующую стадию развития после низового пожара. В ходе такого пожара огонь распространяется по верхним частям деревьев, следуя за кромкой низового пожара, и сопровождается интенсивным тепловыделением. Скорость передвижения огненного фронта на верхушках деревьев составляет от 0,08 до 0,25 м/с. Эти пожары также известны как повальные и обладают высокой разрушительной силой, приводя к полному уничтожению лесных массивов.

При верховом беглом пожаре, возникающем при сильном ветре, огонь быстро распространяется по верхним частям деревьев, опережая фронт низового пожара. Под действием ветра горящие материалы переносятся в разные направления, что создает новые очаги низовых пожаров. Эти очаги часто обнаруживаются на больших расстояниях от основного источника возгорания. Скорость распространения огня на вершинах деревьев составляет 4,2-6,9 м/с, однако средняя скорость верхового беглого пожара всегда ниже из-за задержки передвижения фронта пожара до тех пор, пока низовой огонь не достигнет уже сгоревших

верхушек. Механизм распространения верхового пожара обусловлен характеристиками огня и окружающей среды. Тепло от горящих крон, поднимаясь по воздуху, лишь частично достигает соседних крон, что может быть недостаточным для их подогрева и возгорания. Главный источник нагрева крон — это тепло от низовых пожаров, которое, перемещаясь под воздействием ветра, подогревает кроны впереди. После этого возникает вспышка, и огонь быстро охватывает уже подогретые кроны. Верховые пожары выделяются высоким уровнем тепловой энергии, вызывая подъем горящих продуктов и прогретого воздуха. Эти потоки формируют конвективные столбы, которые могут иметь диаметр до нескольких сотен метров и двигаться в направлении фронта пожара. Пламя внутри столба может подниматься до высоты 100-120 метров. Конвективные столбы усиливают поток воздуха в области пожара, способствуя более интенсивному горению и образованию новых очагов возгорания [24].

2.2.3 Почвенные пожары

Почвенные пожары возникают во время проникновения огня или искры в нижние слои почвы, включая подстилку и торфяной слой (рис.2.4).



Рисунок 2.4 – Почвенный пожар [R.S.Roy, R.S. Dwivedi, D. Vijayan “Remote Sensing Applications”, NRSC, 2010]

Существует два основных вида таких пожаров: подстильно-гумусные и торфяные.

Первые характеризуются горением всей толщины подстилки и гумусного слоя, в то время как вторые охватывают торфянистый горизонт почвы или торфяные залежи под слоем лесной почвы.

Пожары в торфяниках, которые относятся к категории ландшафтных пожаров, могут возникать по разным причинам, включая самовозгорание, лесные пожары или человеческую активность на сухих участках торфяников. Скорость распространения огня по торфу невелика, обычно не превышает нескольких метров в сутки. Тем не менее, такие пожары могут продолжаться долгое время, иногда даже месяцы или годы.

Вторая половина лета является наиболее благоприятным временем для возникновения торфяных пожаров, когда верхний слой торфа высыхает до относительной влажности от 25 до 100%. При таких условиях торф становится подверженным возгоранию, а горение может распространяться на более глубокие слои. Глубина горения зависит от уровня грунтовых вод.

Воздействие атмосферных осадков оказывает влияние на интенсивность горения лишь на начальном этапе пожара или при небольшой мощности торфяного слоя. Когда огонь достигает внутренних слоев торфа, его распространение становится ограниченным влажностью органических материалов. Тушение таких пожаров представляет собой сложную задачу из-за высокой водоудерживающей способности торфа, требующей больших объемов воды для его увлажнения [24].

2.3 Описательные характеристики последствий природного пожара

Термины «интенсивность пожара», «степень тяжести пожара» и «тяжесть ожога» отражают разные аспекты пожара и его последствий. Они представляют собой описания, которые относятся к состояниям до, во

время и после возникновения пожара, используемые в работе специалистов по пожарной безопасности и реабилитационных команд для анализа влияния лесных пожаров на окружающую среду.

В рамках исследований поведения при пожаре и его последствий часто упоминаются термины "первичные и вторичные эффекты пожара", хотя они напрямую не связаны с оценкой интенсивности пожара, его серьезности и степени ущерба [25].

- Первичные эффекты включают в себя непосредственное воздействие пожар на окружающую среду. Эти эффекты, такие как гибель людей и животных, выбросы вредных веществ и дыма, прямым образом происходят во время пожара и являются результатом его активной фазы.

- Вторичные эффекты пожара возникают в результате косвенного воздействия самого пожара и его последствий. К ним относятся изменения климатических условий, эрозия почвы и изменение растительного покрова, которые могут проявляться в течение длительного времени после пожара. Эти эффекты связаны с последствиями, которые остаются после тушения пожара и требуют долгосрочного анализа и мониторинга.

Характеристики активного пожара включают в себя "непосредственные" переменные, которые могут быть измерены только во время горения (будь то пламя или тление), в то время как последствия после пожара включают краткосрочные и долгосрочные последствия, которые влияют на окружающую среду после распространения пожара.

2.3.1 Интенсивность пожара

Интенсивность пожара – это описание поведения пожара, количественно определяемое температурой и выделяемым теплом фронта горения. Интенсивность пожара измеряется двумя факторами: скоростью распространения, рассчитываемой по количеству сжигаемых метров в секунду, и потоком энергии - количеством киловатт, вырабатываемых

пожаром на каждый сожженный метр. Физические параметры, используемые для количественной оценки интенсивности пожара включают температуру, продолжительность горения и выделение пирогенных газов. Интенсивность пожара и скорость его распространения частично зависят от таких факторов, как тип растительности (леса, кустарники, травянистые растения), содержание влаги в растительности, погода (скорость ветра, стабильность атмосферы и влажность) и топография. Интенсивность пожара может быть измерена путем измерения кинетической температуры (с помощью термопар), с помощью систем теплового дистанционного зондирования или путем анализа длины пламени и скорости распространения. Интенсивность пожара обычно указывается в килоджоулях в секунду на метр [5].

2.3.2 Степень тяжести пожара

Степень тяжести пожара включает в себя характеристики активного пожара и непосредственные последствия для окружающей среды после пожара. Несмотря на то, что интенсивность пожара часто влияет на его серьезность, эти явления не всегда коррелируют. Степень тяжести пожара отличается от интенсивности пожара тем, что в нем основное внимание уделяется тому, сколько мусора, бревен и других плотных органических веществ сгорает на поверхности почвы. На поведение при пожаре могут одновременно влиять несколько факторов, приводящих к высокой вертикальной и горизонтальной пространственной неоднородности последствий пожара и последующей экологической реакции. Продолжительность пожара, которая определяет количество тепла, передаваемого почве, и количество уничтоженной наземной растительности, часто оказывает большее влияние на интенсивность пожара, чем интенсивность возгорания. В свою очередь, природа топлива, доступного для сжигания, и продолжительность пожара определяют энергию, вырабатываемую в результате пожара, и являются факторами,

способствующими возникновению многих экосистемных последствий. Например, интенсивный, быстро распространяющийся пожар передает почве меньше тепла (т.е. большая часть энергии рассеивается по горизонтали и вертикали посредством излучения или конвекции), чем низкоинтенсивный, медленно распространяющийся (или тлеющий) пожар, и, следовательно, подземные процессы в значительной степени остаются нетронутыми. Интенсивный пожар первого типа может на самом деле принести пользу экосистеме за счет увеличения количества доступных питательных веществ, и поэтому его правильно было бы охарактеризовать как пожар малой степени тяжести. Напротив, медленно распространяющийся пожар низкой интенсивности огонь воздействует на наземные и подземные растительные компоненты, уничтожая большую часть растительности, и, следовательно, может оказать более непосредственное воздействие на здоровье экосистемы, и поэтому его правильнее было бы охарактеризовать как сильный пожар [5].

2.3.3 Тяжесть ожогов

Тяжесть ожогов включает в себя как краткосрочные, так и долгосрочные последствия для окружающей среды на местном и региональном уровнях. Тяжесть ожогов определяется степенью, в которой экосистема изменилась в результате пожара. Растительность влияет на интенсивность горения, поскольку производство биомассы часто превышает ее разложение, и некоторые растения специально адаптированы к особенностям пожаров, которые обычно возникают в этих системах (рис.2.5).



Рисунок 2.5 – Сверху вниз: участки с низкой, средней и высокой степенью тяжести ожогов (степень тяжести ожогов была классифицирована на основе последовательной визуальной оценки последствий пожара на земле и в древесном пологе) [Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319-345. doi:10.1071/WF05097].

Некоторые аспекты тяжести ожога могут быть оценены количественно, но степень тяжести ожога - эффективность не может быть выражена в виде единого количественного показателя, который относится ко всем воздействиям на ресурсы. Относительная степень тяжести ожогов часто выражается в том, как выглядят растительность и почва после пожара. Хотя физические проявления тяжести ожога постоянно меняются, с практической точки зрения тяжесть ожога часто определяется в широком смысле и подразделяется на отдельные классы варьируемая от низкого (менее выраженного) до высокого (более выраженного). Тяжесть ожогов обычно оценивается после пожара путем измерения характеристик почвы (глубина обугливания, потеря органических веществ, изменение состава и цвета). Тяжесть ожогов служит базовой составляющей, с которой могут быть объединены другие данные. Тяжелые ожоги имеют долгосрочные экологические последствия, поскольку они изменяют подземные процессы

(гидрологические, биогеохимические, микробиологические), которые необходимы для здоровья и устойчивости наземных систем. Долгосрочные экологические изменения потенциально могут быть вызваны сильными пожарами, которые уничтожают надземную растительность, даже если воздействие на подземные процессы минимально. Погодные условия после пожара также могут влиять на степень опасности, в частности, если рассматривать изменение растительности с течением времени в зависимости от степени опасности. Дистанционно измеряемые показатели интенсивность ожогов может отражать межгодовые фенологические изменения растительности, а также взаимодействие долгосрочных климатических условий, таких как засуха. Дата получения изображения, связанная со временем сбора полевых данных и временем, прошедшим с момента пожара, может быть более важной, чем тип изображения или индекс, используемый для сравнения показателей серьезности. Тяжесть ожога — это не прямая мера, а оценка, которая меняется в зависимости от контекста. Вероятно, степень тяжести может варьироваться в зависимости от рассматриваемой проблемы или ресурса (например, гибель растительности, эрозия почвы, питание почвы). Картографирование степени тяжести ожогов используется при планировании и мониторинге проектов после пожара исследователями, изучающими взаимосвязи между характеристиками до, во время и после пожара и реакцией на них, а также, в некоторых случаях, в качестве доказательства в юридических дебатах [5].

2.4 Синоптические условия, благоприятствующие возникновению природных пожаров

Синоптическая обстановка играет ключевую роль в возникновении и распространение природных пожаров. Метеопараметры, такие как температура, влажность, скорость и направление ветра, непосредственно влияют на вероятность возникновения пожара, его интенсивность и

скорость распространения. Рассмотрим основные факторы, их влияние и выводы, которые можно сделать на основе анализа синоптической обстановки.

Антициклоны часто связаны с устойчивыми, сухими и жаркими условиями, которые благоприятствуют возникновению пожаров. Блокирующие антициклоны и стационарные области высокого давления могут создавать продолжительные периоды жаркой и сухой погоды, увеличивая риск природных пожаров.

Высокие температуры способствуют высыханию растительности, увеличивая её воспламеняемость. В условиях продолжительных периодов жары, почва и растительность теряют влагу, что создает благоприятные условия для возникновения пожаров. В условиях длительных аномально высоких температур вероятность возникновения природных пожаров значительно возрастает.

Низкая влажность воздуха и почвы способствует быстрому высыханию растительного покрова. Влажность является критическим фактором в поддержании огнестойкости растительности. Низкая относительная влажность воздуха способствует увеличению риска возникновения пожаров. Мониторинг влажности воздуха и растительного покрова является важным элементом раннего предупреждения пожаров.

Дефицит осадков приводит к засухам, которые создают условия для накопления сухой растительности, готовой к воспламенению. Периоды засухи, особенно в сочетании с высокими температурами, значительно увеличивают риск природных пожаров. Оценка метеорологических данных по осадкам позволяет прогнозировать и предупреждать такие ситуации. Ветер играет решающую роль в распространении пожаров. Сильный ветер не только ускоряет распространение огня, но и способствует его интенсивности. Он может переносить искры на большие расстояния, создавая новые очаги возникновения пожаров (так называемое

«коронное горение» в верхушках деревьев). Сильные ветры значительно увеличивают скорость и площадь распространения пожаров.

Грозы, в особенности сухие, могут стать как причиной, так и фактором, влияющим на распространение пожаров. Молнии являются одной из основных причин возникновения лесных пожаров, особенно в удаленных районах. Сильные грозы могут также сопровождаться порывистыми ветрами, способствующими распространению огня.

Анализ синоптической обстановки позволяет выделить ключевые метеорологические факторы, способствующие возникновению и распространению природных пожаров. Высокие температуры, низкая влажность, дефицит осадков, сильные ветры и конвективные системы играют решающую роль в формировании пожароопасной обстановки. Прогнозирование и отслеживание этих факторов позволяют заблаговременно оценивать риски, принимать превентивные меры и эффективно реагировать на возникающие пожары.

2.5 Обнаружение природных пожаров в Российской Федерации

Разнообразие климатических условий и местных особенностей влияет на структуру и состав лесов в различных регионах. В России, которая занимает различные климатические зоны, погодные условия играют ключевую роль в возникновении лесных пожаров. Например, на территории Сибири и Дальнего Востока, преобладают разнообразные лесные массивы - хвойные и лиственные породы деревьев, а также заповедники и заказники, сохраняющиеся на государственном уровне, где лето может быть жарким и сухим ввиду резко-континентального климата, что приводит к длительным периодам засухи, и, следовательно, повышению возникновения пожароопасных условий. Тем не менее, в этих регионах также часто происходят грозы, в том числе и сухие, что также может стимулировать образование очагов возгорания.

Наблюдение за природными пожарами в России осуществляются с использованием различных технологий и методов, подробнее можно рассмотреть это на рисунке 2.6.

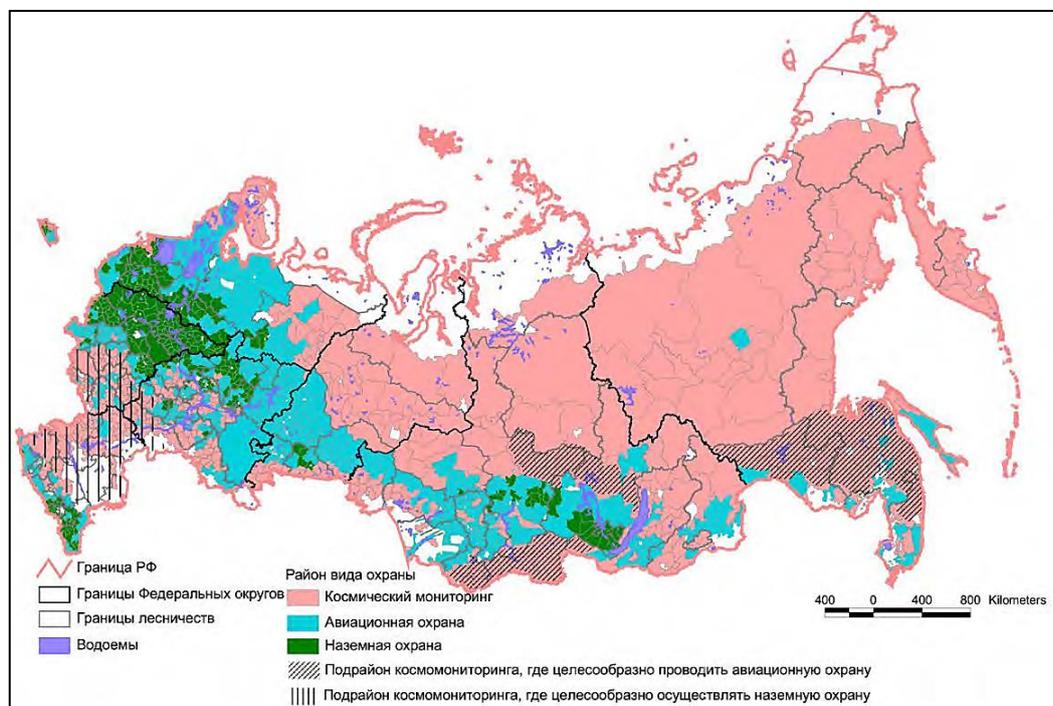


Рисунок 2.6 – Регионы России по способам обнаружения пожаров [Elena Kukavskaya et al., 2012]

В последние годы широкое распространение получили спутниковые системы наблюдения, позволяющие обнаруживать и отслеживать пожары на больших территориях. Это существенно улучшает возможности раннего обнаружения и борьбы с пожарами. За последние года в Российской Федерации наблюдается активное развитие и внедрение систем автоматизированного мониторинга и предупреждения о возможных природных пожарах. Эти системы включают использование беспилотников, камер на земле и автоматических датчиков, что обеспечивает эффективное обнаружение и оперативную реакцию на потенциальные пожары. Сотрудничество между различными организациями и ведомствами, такими как МЧС, лесное хозяйство, метеорологические службы и научные учреждения, играет важную роль в

предотвращении и тушении лесных пожаров. Это способствует оптимальному использованию ресурсов и быстрому реагированию на чрезвычайные ситуации.

Также в последние десятилетия отмечается увеличение количества запущенных спутников для мониторинга Земли, включая метеорологические, оснащенные специальными приборами, способными реагировать на повышенные температуры, характерные для пожаров. Эти спутники передают данные непосредственно на приемные станции в режиме реального времени во время своего полета. Полученные данные используются метеорологическими службами для создания краткосрочных прогнозов. Методы, используемые в метеорологии, во многом схожи с теми, которые требуются для обнаружения лесных пожаров. Таким образом, эти спутниковые данные, интегрирующиеся с существующей инфраструктурой, включая метеорологические центры, могут эффективно применяться для обнаружения лесных пожаров и оперативного оповещения.

3. ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методы обнаружения пожаров на основе спутниковых снимков включают различные технологии и алгоритмы, использующие данные в видимом, инфракрасном и других диапазонах электромагнитного спектра. Среди них выделяются методы, основанные на анализе яркостной температуры, индексов растительности (например, NDVI), термической мощности пожара (FRP), а также метод тематической обработки изображений. Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, что определяет их применимость в различных условиях и ситуациях.

В данной главе проводится подробный анализ выбранных методов обнаружения природных пожаров с использованием спутниковых данных. В рамках данного исследования были рассмотрены более 100 спутниковых снимков лесных пожаров на территории Якутии, которая является одной из наиболее уязвимых к природным пожарам областей России. Из этого массива данных были отобраны четыре эталонных случая, наиболее полно отражающих различные аспекты и масштабы пожаров в регионе. Эти данные послужили основой для детального изучения и сравнительного анализа методов NDVI, FRP и тематической обработки изображений.

3.1 Предварительный анализ спутниковых данных

Откалиброванными данными первого уровня обработки считаются данные отражения - Level 1B Calibrated Radiance. Поскольку эти данные не прошли этап интенсивной атмосферной коррекции и не разделены на стандартные фрагменты, их временное разрешение не было снижено, что позволяет проводить их визуальный анализ.

Ресурсом, предоставляющим эти данные, является система LAADS Web (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System) – система архивирования и распространения данных первого уровня обработки и

данных об атмосфере. Для анализа использовались откалиброванные данные первого уровня обработки прибора MODIS спутника Terra. Поскольку данные необходимы для визуализации, было выбрано дневное время съемки и пространственное разрешение 1 км, позволяющее использовать ИК каналы наряду с каналами видимого диапазона. По данному запросу было получено порядка 250 изображений. Все полученные снимки были визуализированы с целью предварительного анализа, позволяющего определить наличие пожаров. Из выборки были исключены изображения, на которых облачный покров препятствовал обзору подстилающей поверхности, территория Якутии не попала в зону съемки или очаги пожаров не были выявлены.

3.2 Тематическая обработка спутниковых изображений, расчет и анализ индексов NDVI и FRP

После предварительной географической коррекции была проведена тематическая обработка изображений территории Сибири (Якутии) за выбранные даты 2021, 2022 и 2023 годов (рис. 3.7, 3.8). Для выявления очагов пожаров и их основных признаков, таких как дымовые шлейфы и выгоревшие области, использовались различные методы анализа.

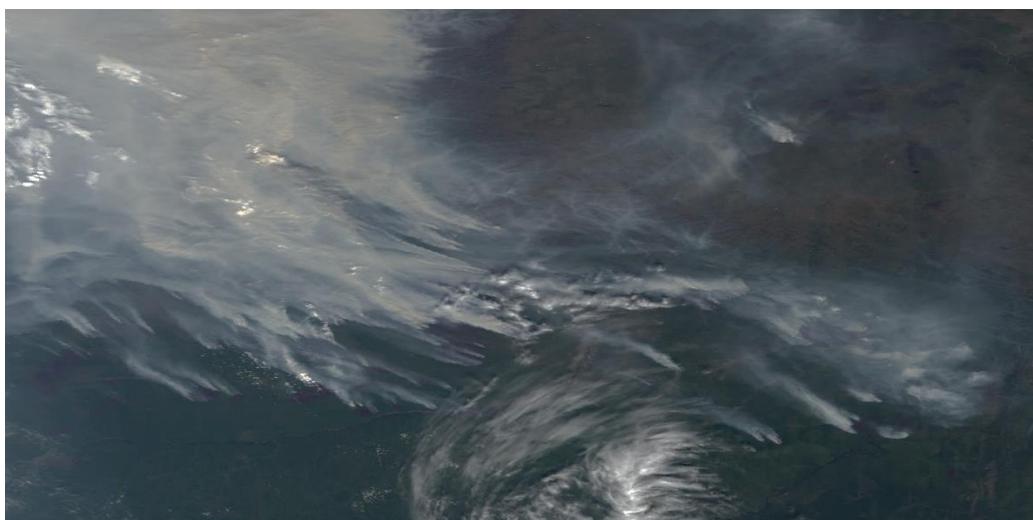


Рисунок 3.7 – Пример спутникового изображения природного пожара на территории Якутии (09.08.2021 02:40 (UTC))

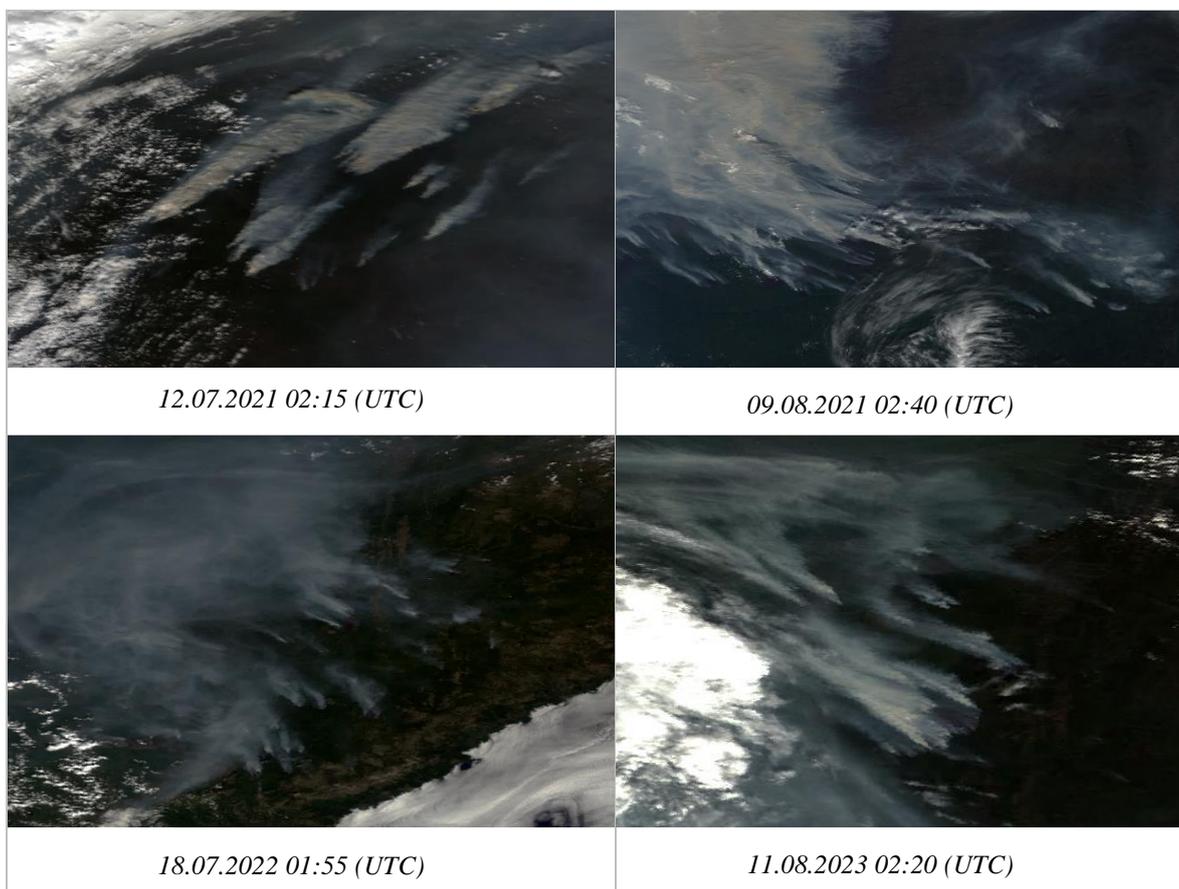


Рисунок 3.8 – Фрагменты спутниковых изображений природных пожаров в видимом диапазоне

Для выявления зон возгорания используется метод дифференцированного изображения, в котором данные с каналов 3.9 мкм и 11 мкм в тепловом инфракрасном диапазоне используются вместе. Поскольку ответ в канале 3.9 мкм подпиксельного уровня более чувствителен к повышенным температурам по сравнению с каналом 11 мкм, такое изображение позволяет обнаруживать участки, которые уже подверглись воздействию огня, но которые еще не видны на изображениях в канале 11 мкм (рис. 3.9, 3.10).

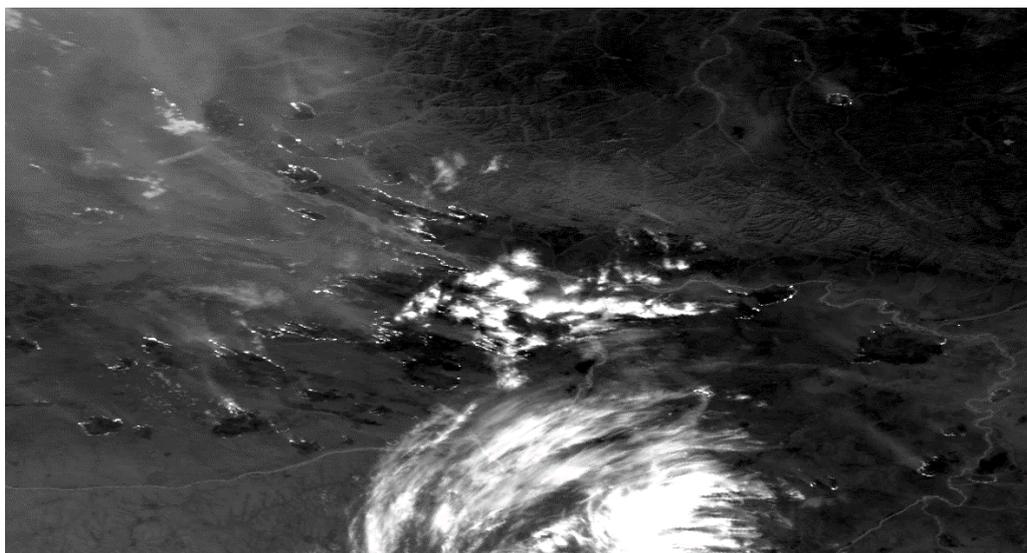
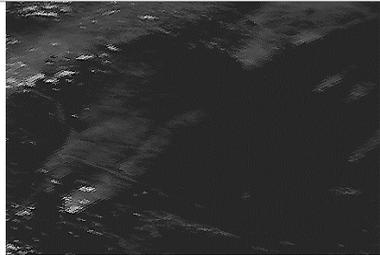
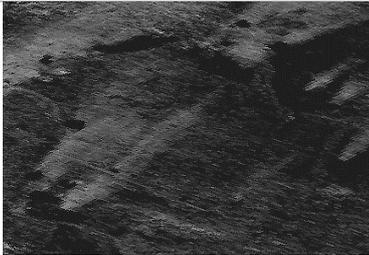
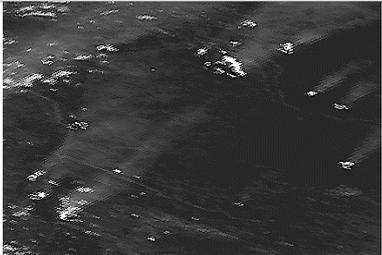
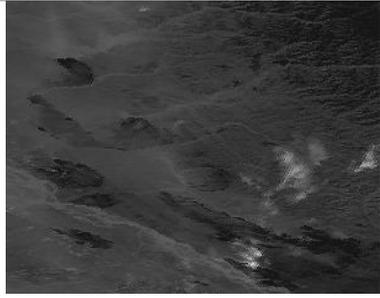
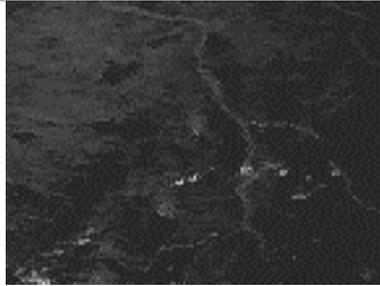
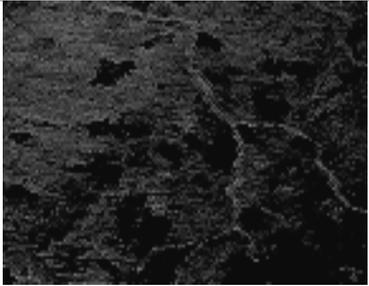


Рисунок 3.9 – Пример дифференцированного изображения природного пожара на территории Якутии (09.08.2021 02:40 (UTC))

11 мкм	3.9 мкм	11-3.9
		
12.07.2021 02:15 (UTC)		
		
09.08.2021 02:40 (UTC)		
		
18.07.2022 01:55 (UTC)		

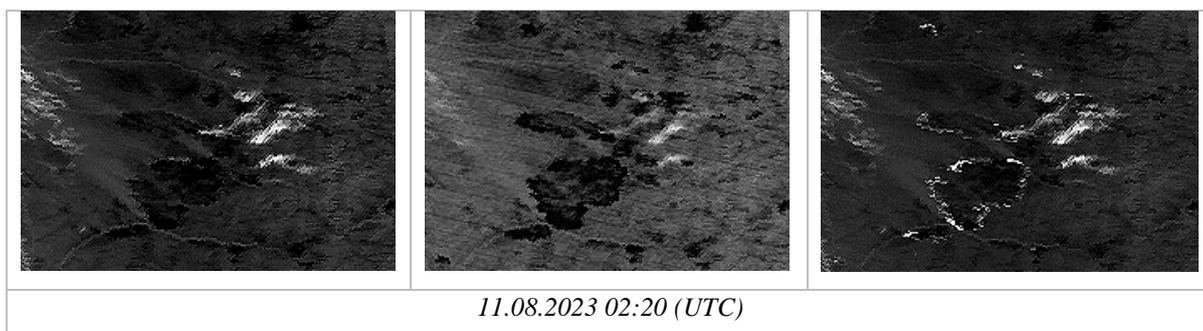


Рисунок 3.10 – Фрагменты спутниковых изображений природных пожаров в инфракрасном диапазоне – слева направо: 11мкм, 3.9мкм, разностное изображение 11-3.9

После этого для анализа изображения на предмет наличия очагов пожаров были созданы RGB-изображения в псевдоцветах (рис. 3.11, рис. 3.12, рис. 3.14), применив следующую комбинацию каналов:

- 31 канал (11.0 мкм) + 23 канал (4.1 мкм) + 21 канал (3.9 мкм);
- 21 канал (3.9 мкм) + 2 канал (0.8 мкм) + 6 канал (1.6 мкм);

А также RGB изображения в «псевдоцветах» (рис.3.12, рис. 3.13) для выявления дымовых шлейфов:

- 6 канал (1.6 мкм) + 2 канал (0.8 мкм) + 1 канал (0.6 мкм).

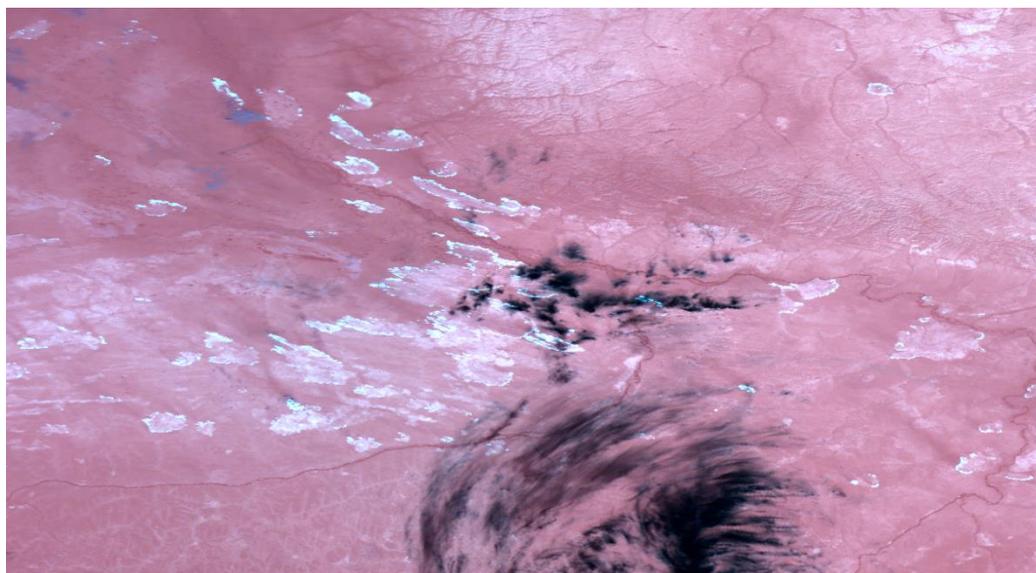


Рисунок 3.11 – Пример цветосинтезированного изображения для выявления очагов природного пожара на территории Якутии (09.08.2021 02:40 (UTC))

Процесс горения сопровождается мощным излучением в инфракрасной (ИК) области спектра. Белый цвет очагов пожаров на

изображениях обусловлен наложением всех трех цветов, что свидетельствует о видимости пожаров во всех ИК диапазонах. Наиболее интенсивные и крупные пожары, имеющие максимальный отклик в 21 канале, отображаются на изображении голубоватым оттенком. В дальней ИК области спектра, например, в 31 канале, источники горения почти не отличаются от фоновых значений, придавая изображению общий красноватый тон.

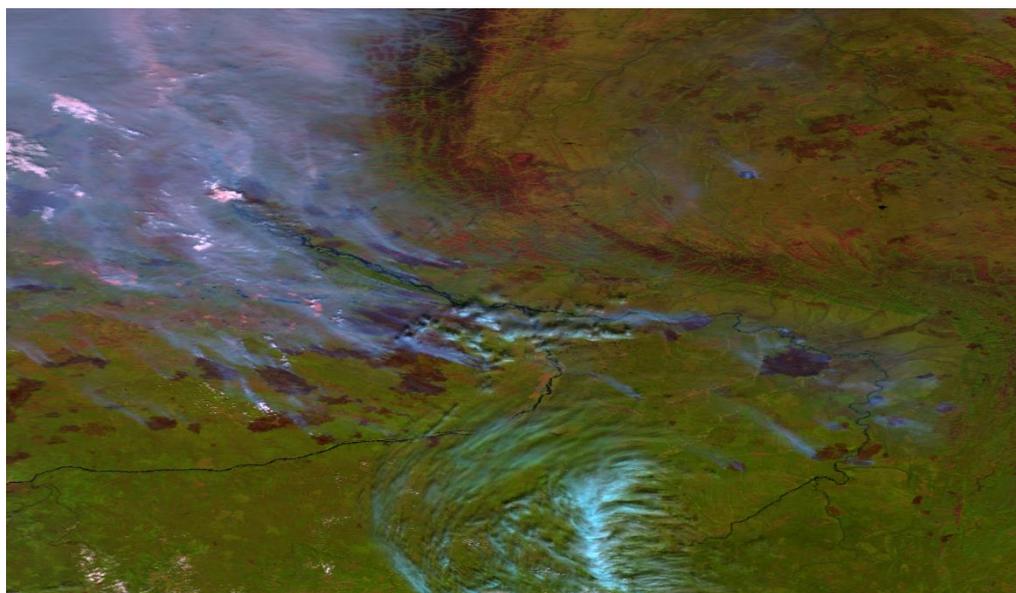


Рисунок 3.12 – Пример цветосинтезированного изображения для выявления дымовых шлейфов природного пожара на территории Якутии (09.08.2021 02:40 (UTC))

Кристаллы льда эффективно отражают солнечное излучение в диапазонах длин волн 0.6 мкм и 0.8 мкм, но проявляют слабый сигнал в канале 1.6 мкм, что придает вершинам облаков, содержащим кристаллы льда, характерный бирюзовый оттенок. В то время как облака водяной фазы, состоящие из крупных капель воды, хорошо отражают свет во всех трех каналах, что придает им на изображениях белый цвет.

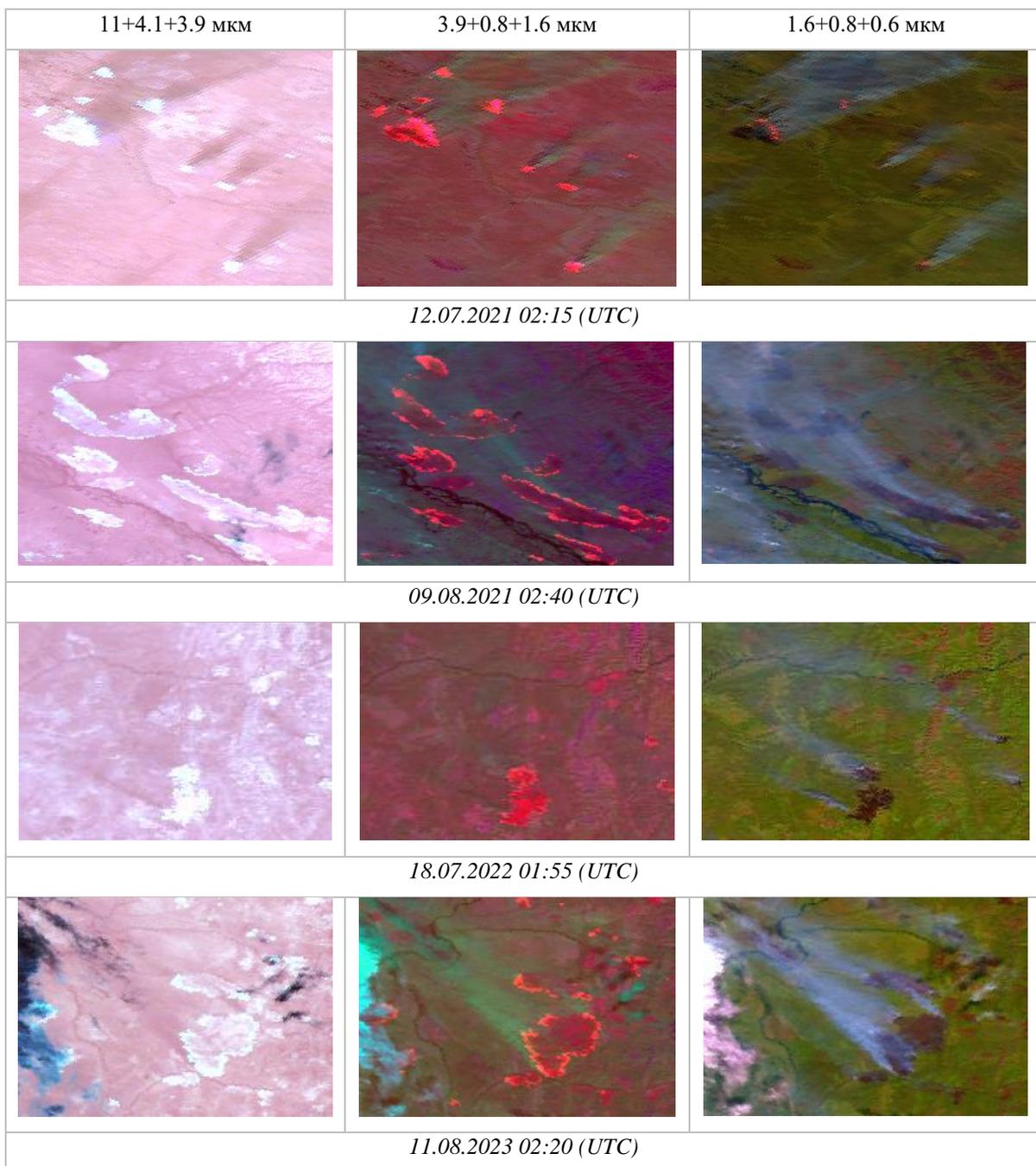


Рисунок 3.13 – Фрагменты спутниковых изображений природных пожаров в псевдоцветах.

Дымовые шлейфы, состоящие из мелких частиц жидкости, обладают повышенной отражательной способностью в канале 1.6 мкм по сравнению с другими каналами, что придает им сиреневый оттенок и позволяет легко отличить их от облаков. Дымовые шлейфы распространяются по ветру, смешиваясь с другими потоками дыма, и их источниками – мощными пожарами.

Растительность, содержащая хлорофилл, лучше всего отражает электромагнитные волны длиной 0.8 мкм, что придает зелёный цвет участкам с растительностью. Пустоши, напротив, отражают солнечную радиацию хуже на длинах волн 0.6 и 0.8 мкм, но имеют лучшую отражательную способность в канале 1.6 мкм, отображаясь розовым цветом. Открытые участки земли также теплее и демонстрируют больший отклик в тепловой ИК области спектра.

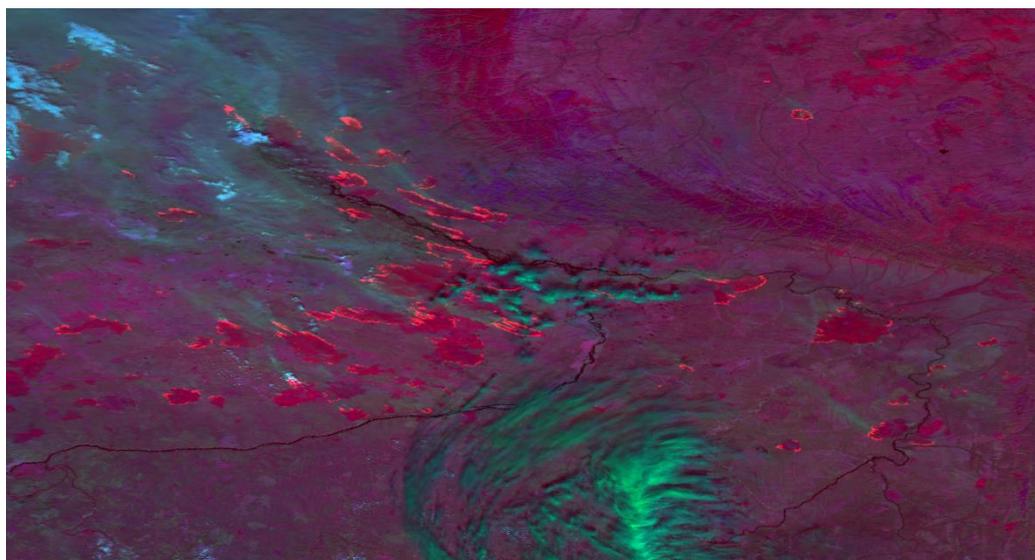


Рисунок 3.14 – Пример цветосинтезированного изображения для выявления очагов природного пожара на территории Якутии (09.08.2021 02:40 (UTC))

Зоны горения, имеющие очень высокие температуры, излучают интенсивный сигнал в канале 3.9 мкм, что отображается на изображении красным цветом, облегчая их обнаружение. Облака водной фазы хорошо отражают свет в обоих каналах видимого спектра, но имеют более интенсивный сигнал в канале 1.6 мкм, что придает им бирюзовый оттенок. Холодные вершины облаков, состоящие из кристаллов льда, имеют слабый сигнал в этом канале и отображаются ярко-салатовым цветом на изображении.

Также полученные изображения в канале 3.9 мкм и 11 мкм были переведены в формат яркостных температур для дальнейших вычислений

индекса FRP (рис.3.15, 3.16, 3.17, 3.18) по формуле 4, с использованием закона Планка (3):

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (3)$$

где: $B_{\lambda}(\lambda, T)$ – энергетическая яркость ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$), λ – длина волны (мкм), T – температура абсолютно черного тела (К), h – постоянная Планка ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), k – постоянная Стефана-Больцмана ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)}, \quad (4)$$

где: T – радиационная температура (К), L – спектральная яркость ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$); $Вт$, K_1 – первый калибровочный коэффициент, K_2 – второй калибровочный коэффициент.

Яркостные температуры используются для обнаружения активных очагов пожаров. Высокие значения яркостных температур указывают на наличие горящих областей. Измерение яркостных температур помогает оценить интенсивность горения, что важно для планирования мер по тушению и предотвращению распространения огня.

Благодаря форматированию данных были получены температуры окружающей поверхности и очагов пожаров.

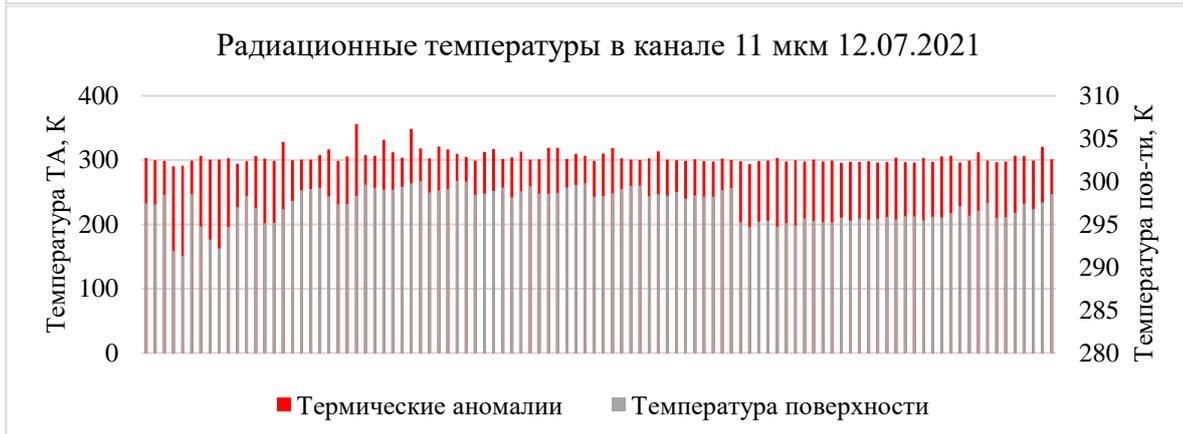
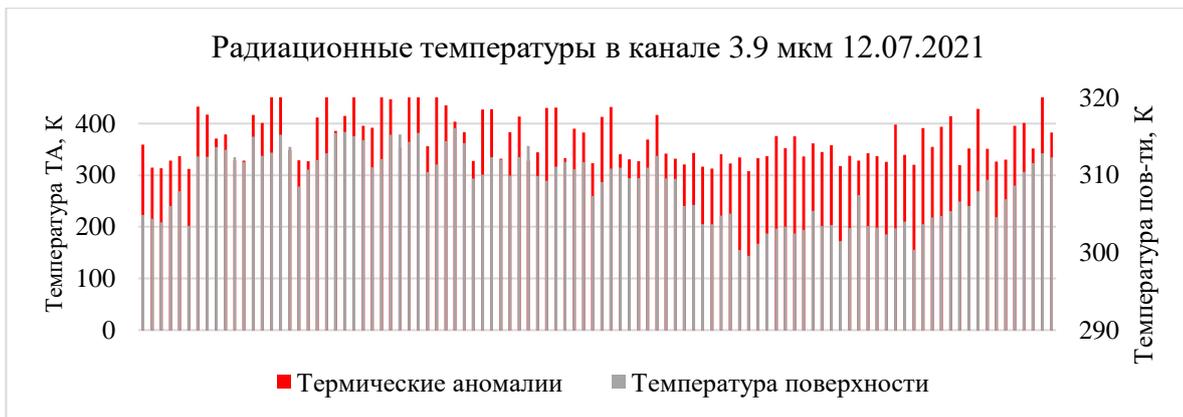


Рисунок 3.15 – Значения радиационных температур в канале 3.9 и 11 мкм 12.07.2021 02:15 (UTC)

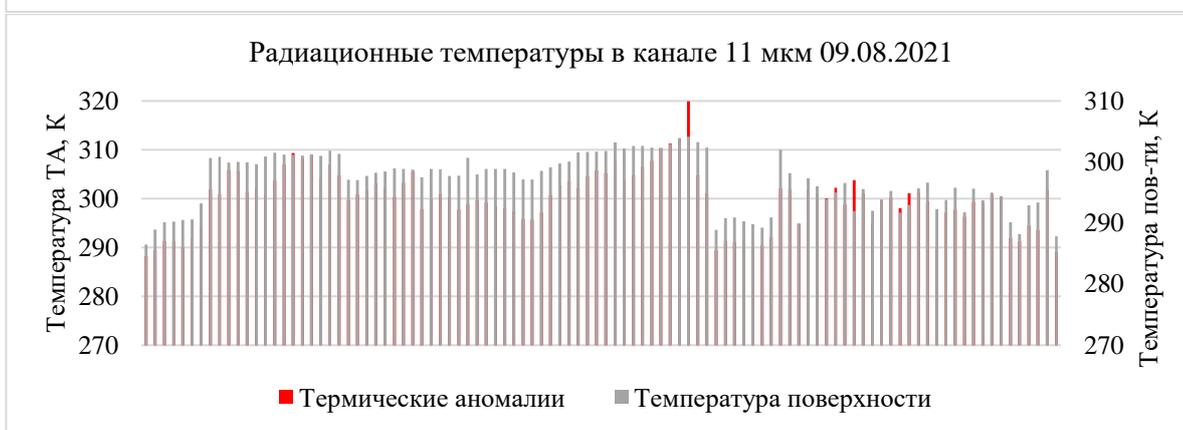
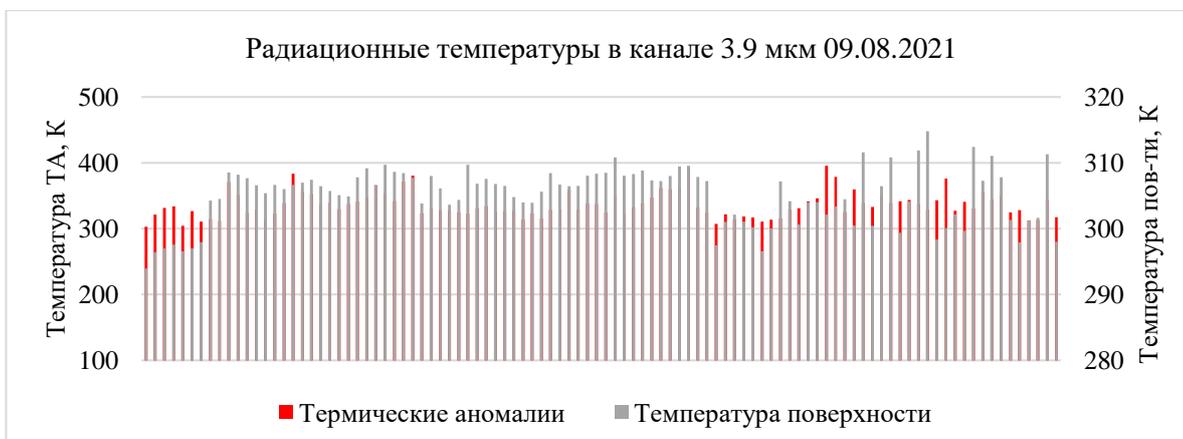


Рисунок 3.16 – Значения радиационных температур в канале 3.9 и 11 мкм 09.08.2021 02:40 (UTC)

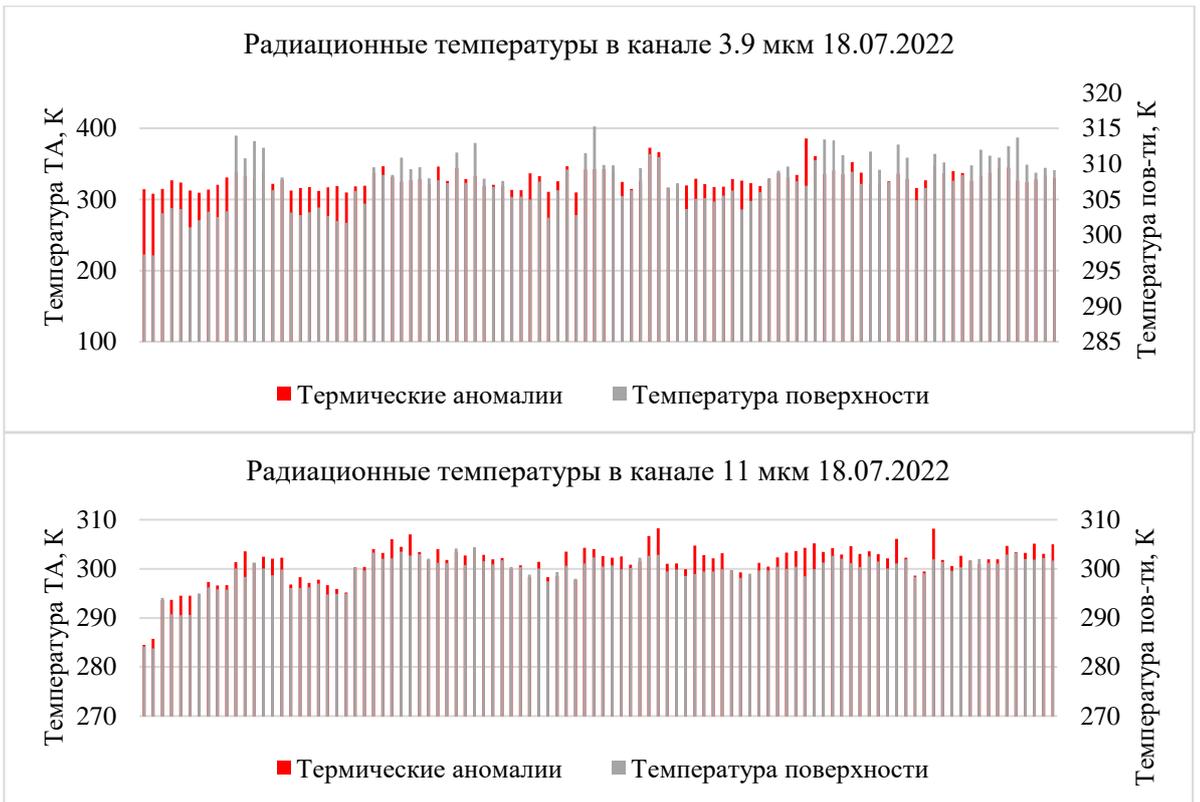


Рисунок 3.17 – Значения радиационных температур в канале 3.9 и 11 мкм 18.07.2022 01:55 (UTC)

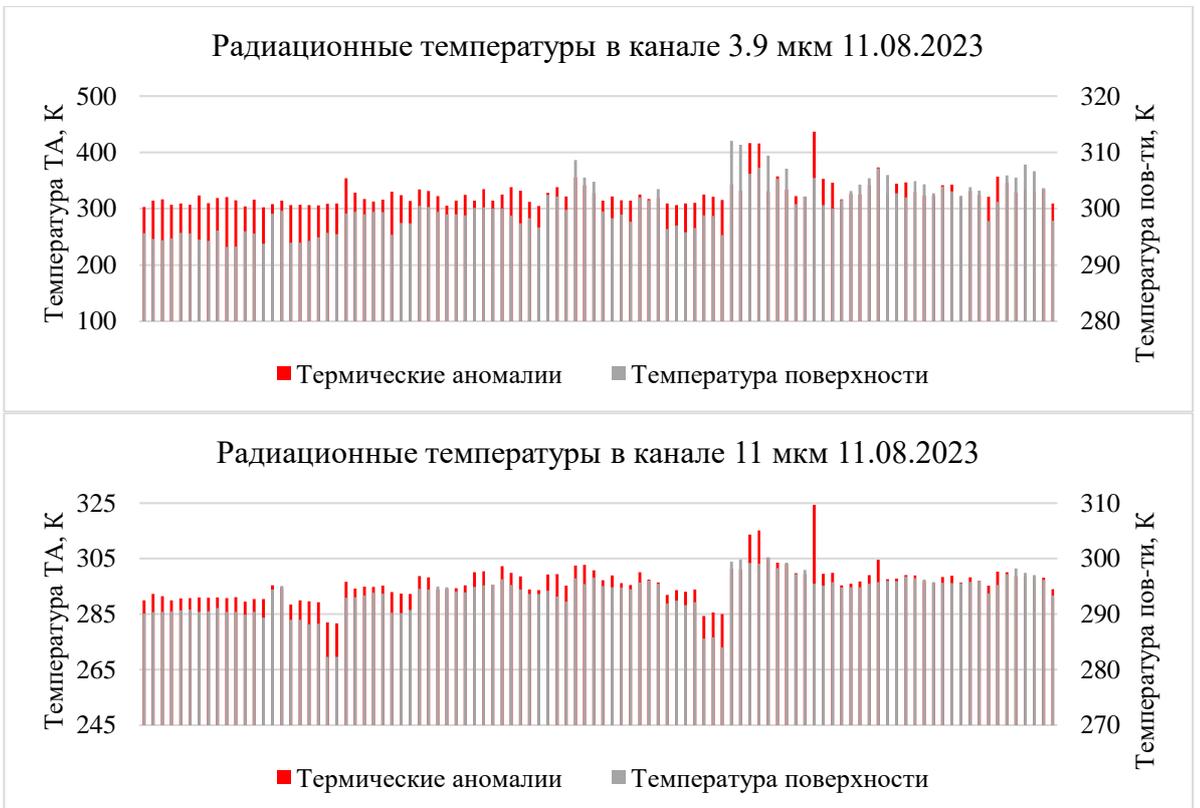


Рисунок 3.18 – Значения радиационных температур в канале 3.9 и 11 мкм 11.08.2023 02:20 (UTC)

Далее был проведен расчет индекса тепловой мощности пожара по формуле 5:

$$FRP = \frac{A_{pix} \cdot \sigma}{a} \cdot (L_{21} - \overline{L_{21}}), \quad (5)$$

где: A_{pix} – площадь пикселя MODIS (которая варьируется как площадь угла сканирования (1x1 км)); σ – постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}^2/\text{К}^4$); L_{21} – энергетическая яркость термически активного пикселя в канале 21 радиометра MODIS; $\overline{L_{21}}$ – энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне; a – эмпирическая постоянная.

На основе полученных данных при помощи продукта MOD14 и программного пакета ArcGIS была сформирована маска активных пожаров (рис. 3.19, 2.21).

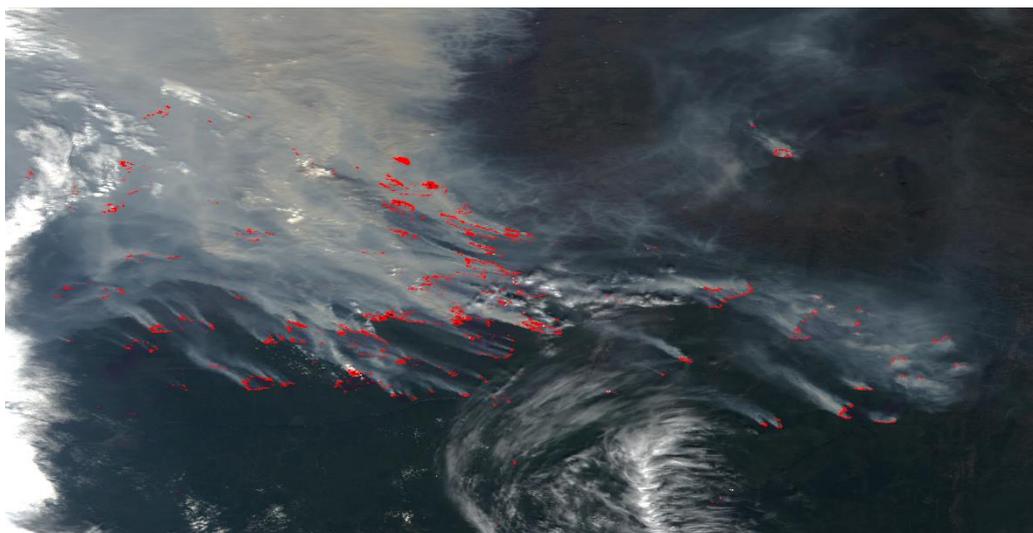


Рисунок 3.19 – Пример комбинированного изображения спутникового снимка и маски пожаров за 09.08.2021 02:40 (UTC)

На основе полученных температур поверхности и интересующих нас пикселей пожара, была построена гистограмма термической мощности пожаров на выбранной территории за 12.07.2021, 09.08.2021, 18.07.2022 и 11.08.2023 для анализа и оценки активных горячих точек, также при помощи индекса NDVI были сформированы изображения для визуализации выгоревших областей (рис. 3.20, 3.21).

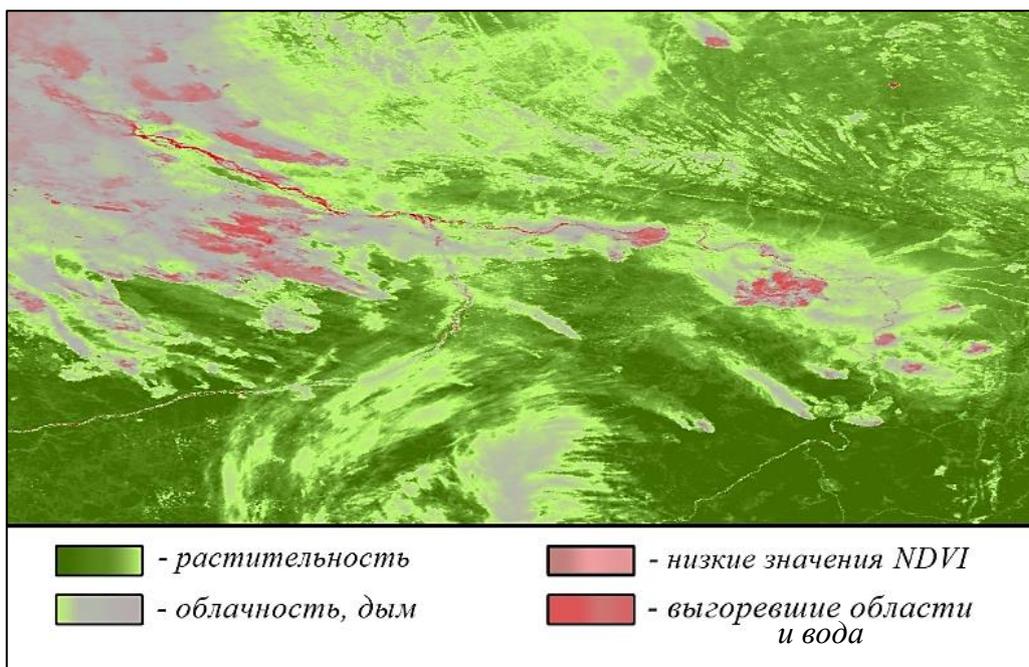
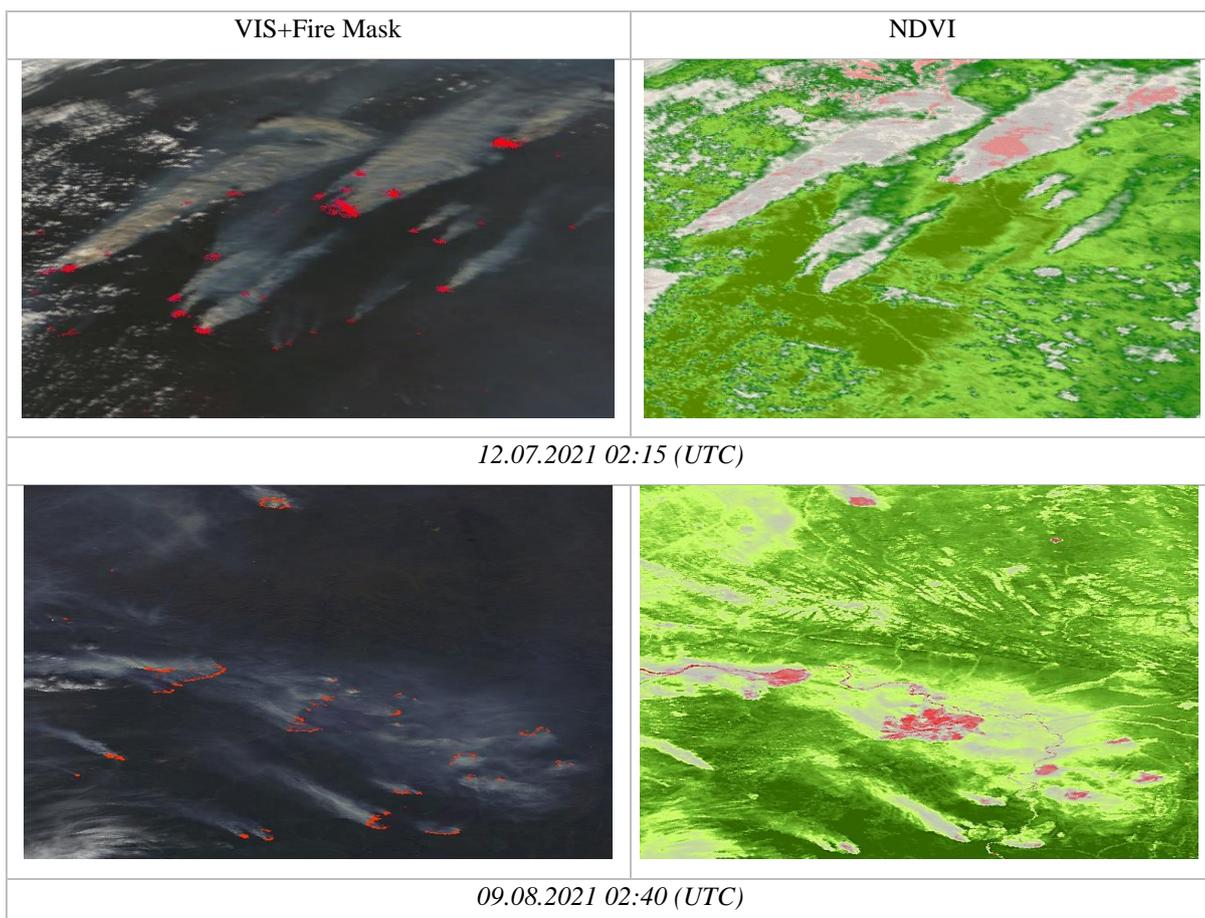


Рисунок 3.20 – Пример цветоинтезированного изображения фрагмента спутникового снимка с учетом NDVI за 09.08.2021 02:40 (UTC)



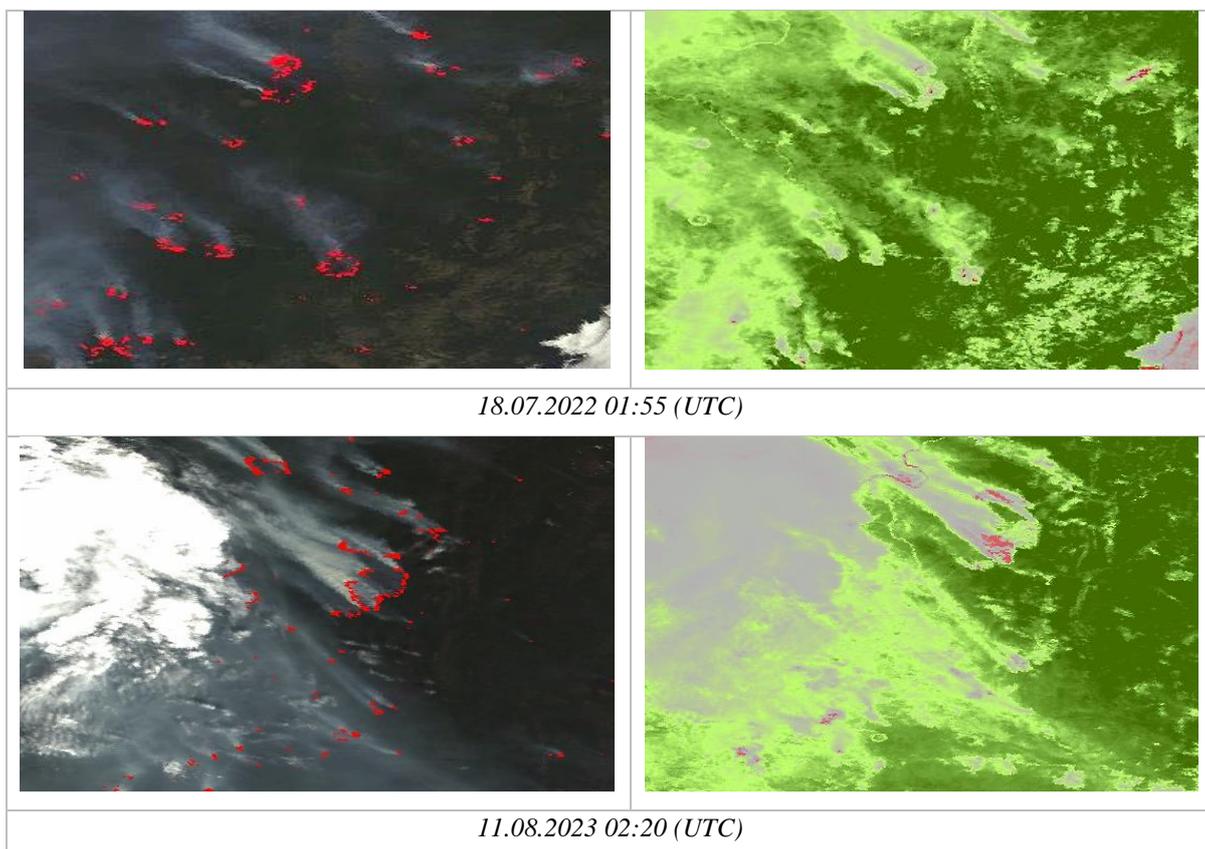


Рисунок 3.21 – Фрагменты спутниковых изображений природных пожаров с применением FRP и NDVI.

Исходя из полученных данных, следует сделать вывод, что 09.08.2021 (рис. 3.22) и 18.07.2022 (рис. 3.23) преимущественное количество «горящих» пикселей находится в диапазоне от 0 до 100 МВт/км², а значит большая территория Якутии была покрыта маломощными пожарами.

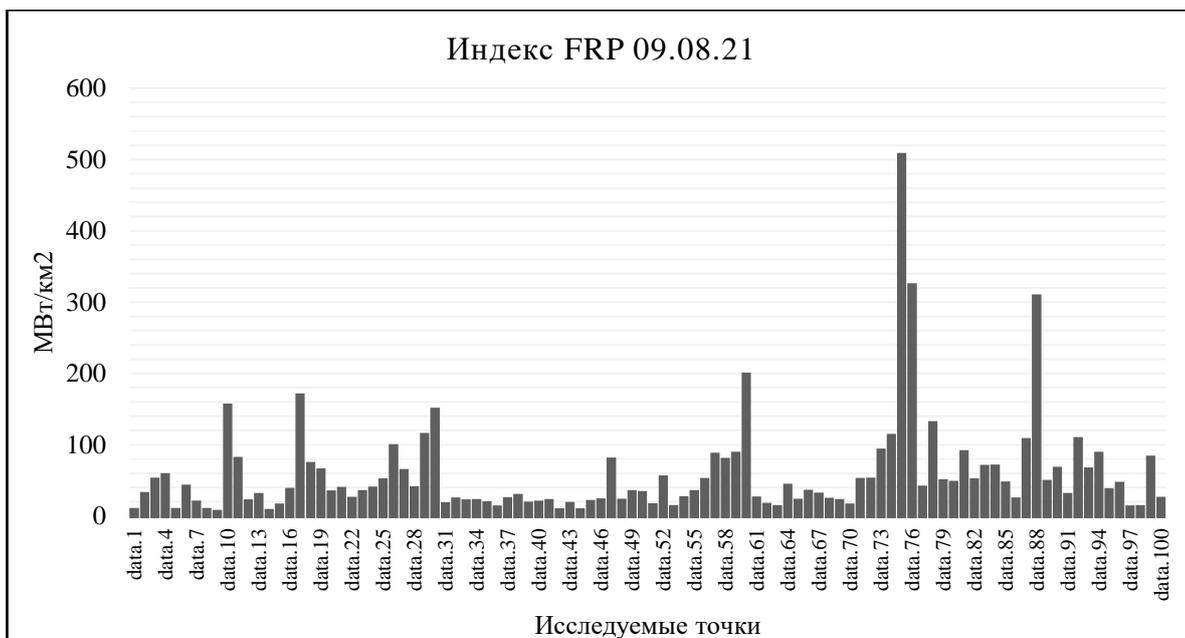


Рисунок 3.22 – Термическая мощность пожаров на территории Якутии 09.08.2021

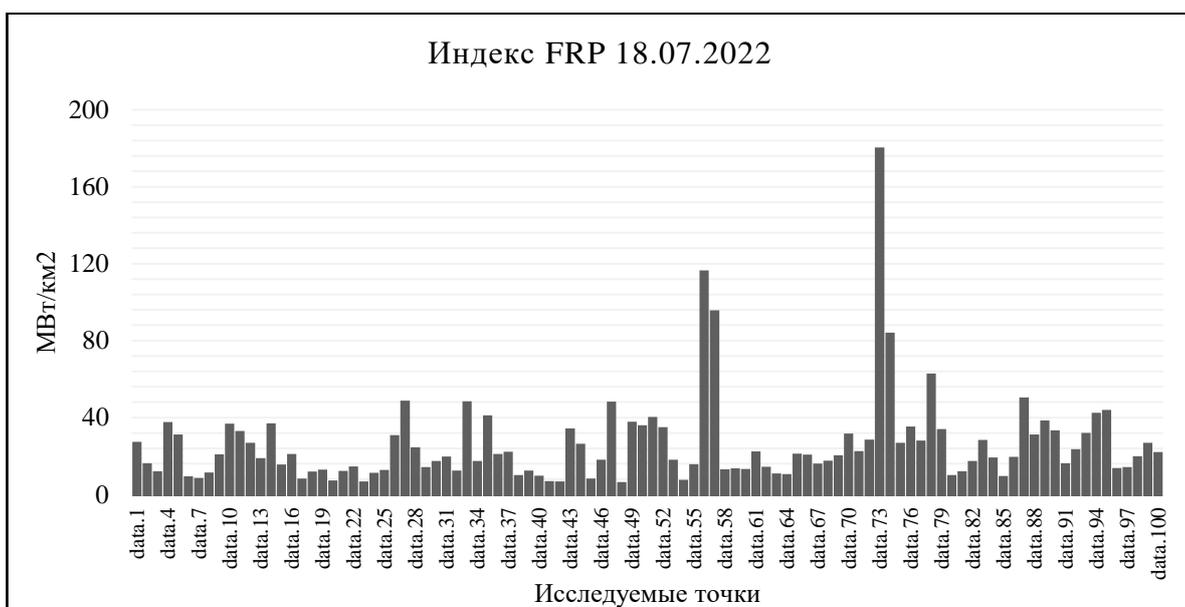


Рисунок 3.23 – Термическая мощность пожаров на территории Якутии 18.07.2022

Также можно заметить области, которые относятся к умеренно интенсивным природным пожарам среднего размера с интенсивностью от 100 до 500 МВт/км², имеющие значительное воздействие на окружающую среду, экосистемы и жизнедеятельность человека. Общая площадь пожаров 09.08.2021 составила 3 503 494 Га (35 034.94 км²) а 18.07.2022 - 42 263 Га (422.63 км²).

По данным гистограммы за 11.08.2023 (рис. 3.24) видно, что значительная часть термических аномалий площадью 149 575 Га (1 495.75 км²) относится к областям с низкой тепловой активностью (0 - 100 МВт/км²) и только 3 точки из рассматриваемых превышают эти значения: 493.2, 488.2 и 684.0 МВт/км², а значит на исследуемой территории присутствуют очаги средней и высокой мощности теплового излучения, которые могут распространиться на большие площади и повлечь за собой серьезные последствия для природы и жизни человека.

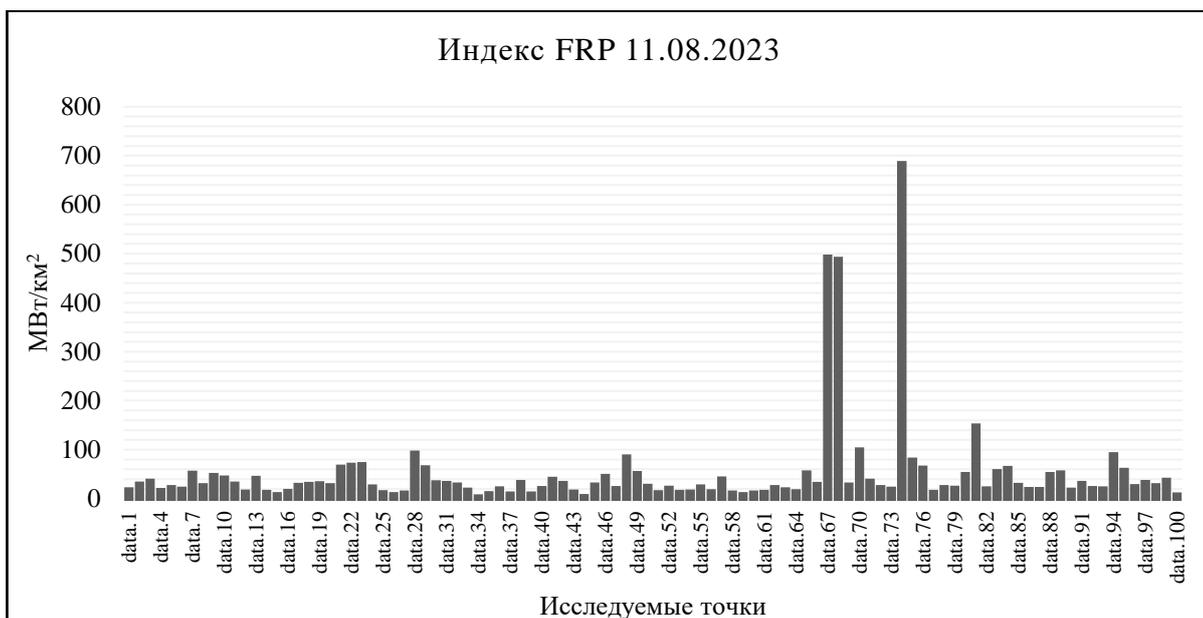


Рисунок 3.24 – Термическая мощность пожаров на территории Якутии 11.08.2023

Экстремально интенсивные пожары по своей термической мощности были зафиксированы 12.07.2021 (рис. 3.25), общая площадь которых составила 1 127 228 Га (11 272.28 км²), часть которых была зарегистрирована на землях особо охраняемых территорий Государственного природного заповедника «Олекминский» и Национального парка «Ленские столбы» на площади около 28 620 Га (286.2 км²).

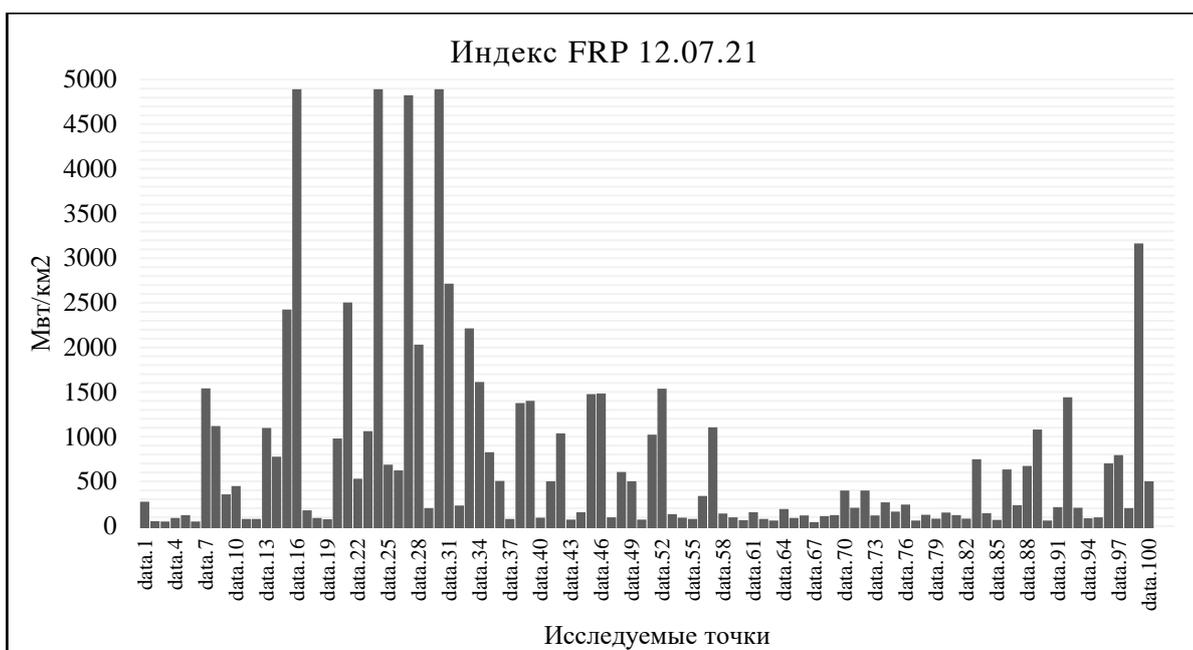


Рисунок 3.25 – Термическая мощность пожаров на территории Якутии 12.07.2021

Среднее значение индекса составило 701.0 МВт/км², а максимальные мощности достигали значения в 4 864.1 МВт/км². Пожары с такими показателями могут вызывать значительные разрушения, угрожающие не только животным и растительности, но и здоровью и жизни людей.

Несмотря на высокие показатели FRP, зафиксированные температуры варьируются от 40 до 300 градусов Цельсия, это обусловлено тем, что значительная часть площади лесов в Якутии (33%) приходится на смешанные леса с преобладанием лиственных пород, вследствие этого температуры в пожарах не столь высоки из-за большого содержания влаги в листве деревьев и отсутствия смолистых веществ.

3.3 Анализ синоптических условий

Цель данной главы состоит в анализе синоптических условий, которые создали благоприятную среду для возникновения природных пожаров за выбранные даты: 12 июля и 09 августа 2021, 18 июля 2022,

11 августа 2023. В ходе анализа мы сосредоточимся на определении общих метеорологических паттернов, характеризующих условия, при которых природные пожары чаще возникают и распространяются. Особое внимание будет уделено влиянию антициклонов и других синоптических явлений на вероятность возникновения и распространения очагов возгорания.

По данным ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» и ФГБУ «Дальневосточное УГМС» в начале мая 2021 года погода на территории Якутии была обусловлена обширным антициклоном, по причине которого снежный покров начал быстро таять, что привело к дефициту влаги в слоях почвы, а в середине месяца, ввиду прохождения холодного фронта и, следовательно, возникновению контрастов температур, было зафиксировано интенсивное развитие мощной кучево-дождевой облачности. В условиях недостаточной влажности и наличии гроз на территории сформировалась пожароопасная обстановка. Так в конце мая и начале июня установилась сухая и жаркая погода. Далее тенденция продолжала сохраняться, и к концу июня погоду на территории определял блокирующий антициклон, повлекший за собой серию мощных природных пожаров (рис. 3.26, 3.27).

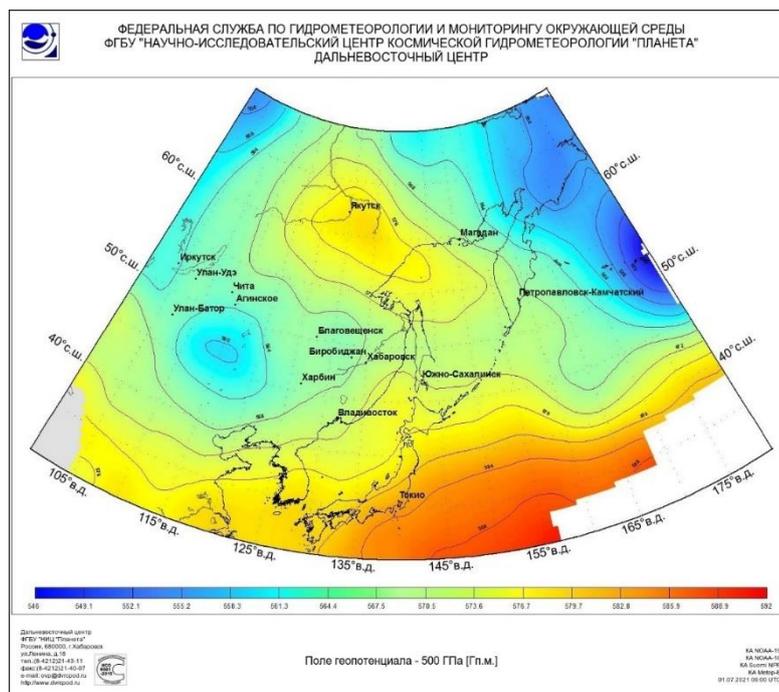


Рисунок 3.26 – Поле геопотенциала - 500 Гпа за 01.07.2021 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

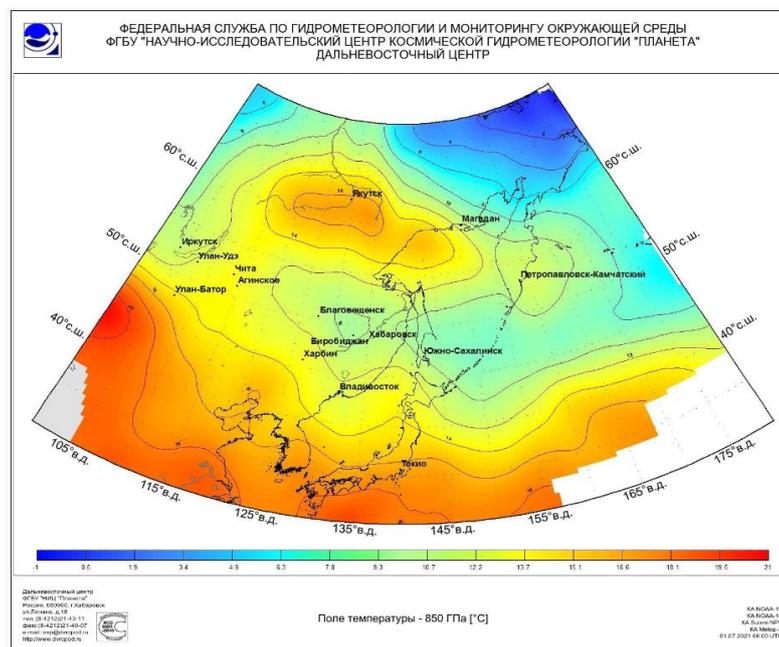


Рисунок 3.27 – Поле температуры - 850 Гпа за 01.07.2021 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

Как итог, в условиях продолжительного светового дня и аномальной жары, дефицита осадков и большого количества сухих гроз,

наблюдавшихся на территории Якутии, площадь природных пожаров стремительно стала расти. Из-за большого числа активных очагов в атмосферу над Якутией поступало большое количество продуктов горения, таких как СО, вследствие чего сформировалась область высокой концентрации угарных газов, соответствующая зоне активных лесных пожаров на территории.

Далее, в конце июля - начале августа на территории Якутии установился циклон, в котором была зафиксирована не только грозовая активность с небольшим количеством осадков, но и ветер скоростью до 25 м/с, что привело к активизации уже ранее устраненных и практически затушенных очагов. Вследствие этого был отмечен интенсивный перенос продуктов горения и интенсивного дымления на большие территории (рис. 3.28).

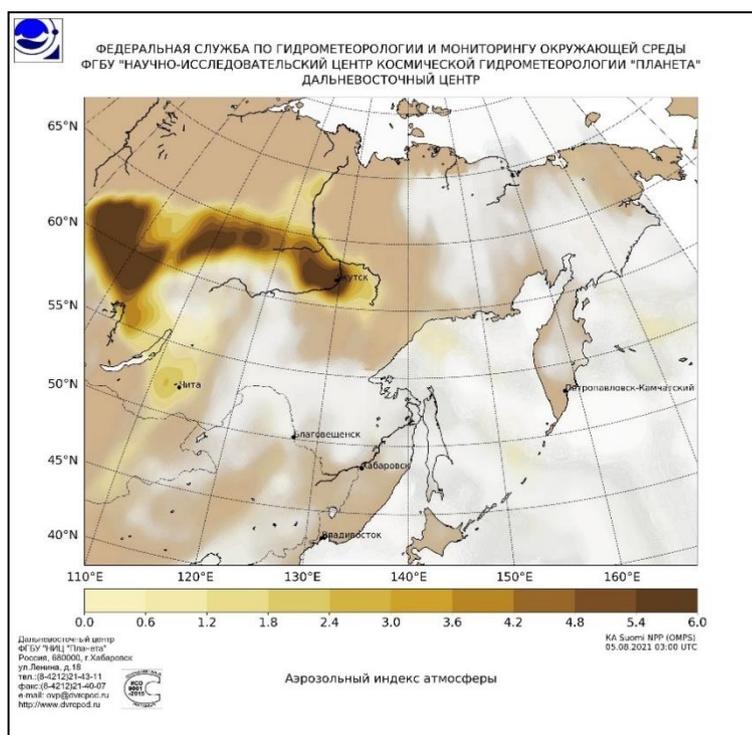


Рисунок 3.28 – Аэрозольный индекс атмосферы за 05.08.2021 03:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

Начало летнего сезона 2022 имело схожую тенденцию с предыдущим годом: погоду в первой декаде мая определяли атмосферные фронты активных циклонов, а в середине и конце месяца - антициклон. Весь июнь сопровождался аномально сухой и жаркой погодой, фиксировалось увеличение количества природных пожаров, во всех декадах месяца отмечалось наличие внутримассовых гроз. Последние дни июня отмечались контрастностью условий погоды ввиду высотного циклона - вторжение холодного воздуха на разогретую территорию Якутии характеризовалось наличием порывистых ветров, что ухудшило и без того сложную пожарную обстановку.

В первые дни июля воздух снова начал прогреваться, ввиду этого на территории был установлен чрезвычайный класс пожарной опасности (рис. 3.29, 3.30, 3.31).

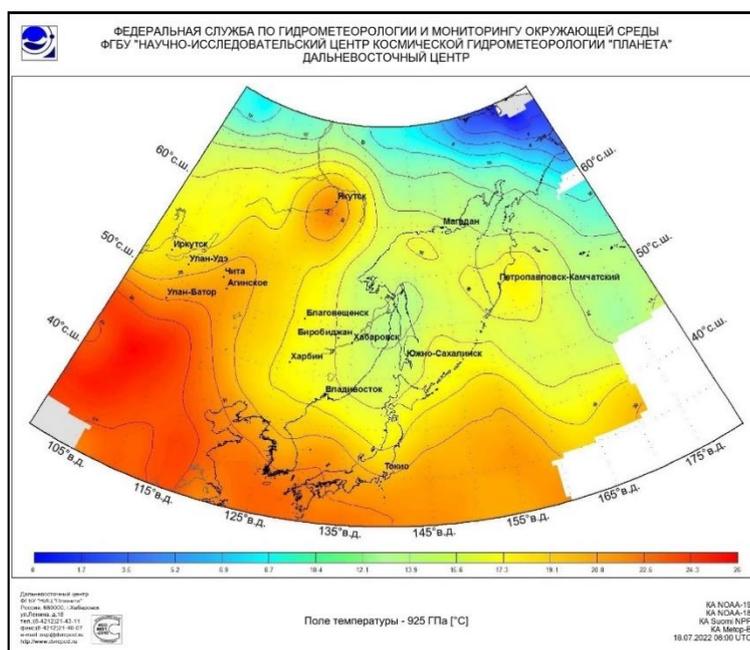


Рисунок 3.29 – Поле геопотенциала - 925 Гпа за 18.07.2022 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

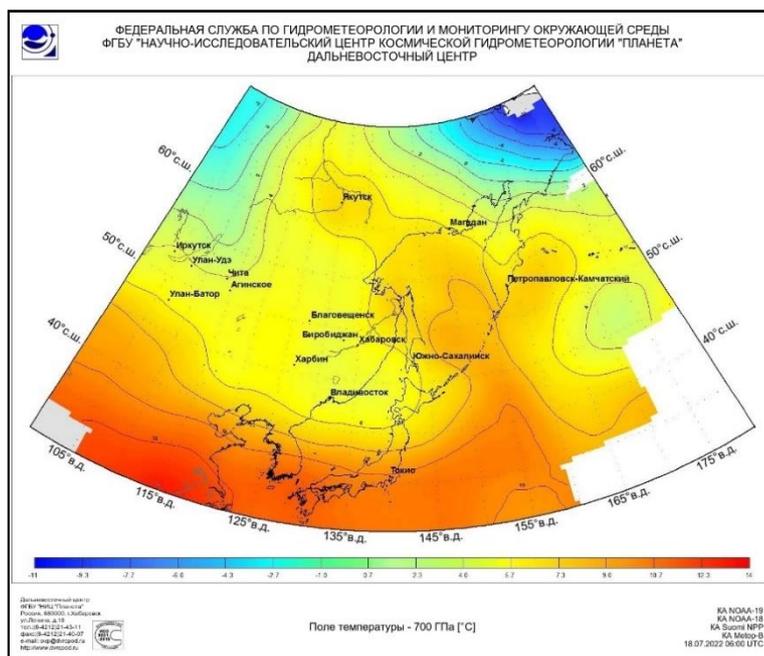


Рисунок 3.30 – Поле температуры - 700 Гпа за 18.07.2022 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

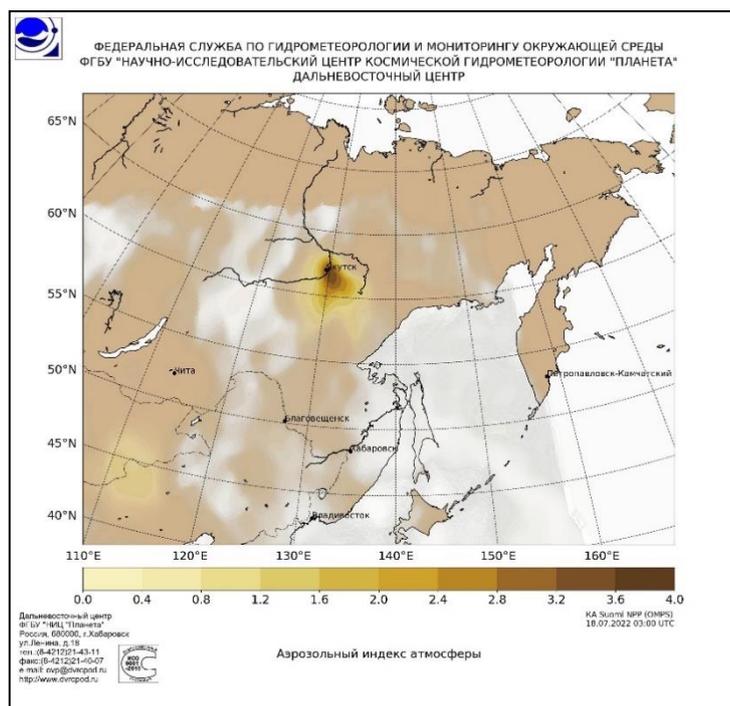


Рисунок 3.31 – Аэрозольный индекс атмосферы за 18.07.2021 03:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

Сухая и жаркая погода продолжала преобладать в течение всего месяца. В начале августа погодные условия, обусловленные циклонической деятельностью, также не способствовали стабилизации пожарной обстановки.

Летний сезон 2023 года начался с холодного периода, сопровождавшегося активной циклонической деятельностью, в мае месяце, и уже к началу июня воздух над территорией Якутии начал прогреваться. Теплая погода с дефицитом осадков способствовала формированию пожароопасной обстановки. Во второй декаде июня жаркая и сухая погода была обусловлена установившимся блокирующим теплым и малоподвижным антициклоном (рис. 3.32, 3.33). Пик тепла пришелся на первые дни июля, ввиду высоких температур и накопленного дефицита осадков на территории был отмечен чрезвычайный класс пожарной опасности, погодные условия продолжали сохраняться вплоть до конца месяца.

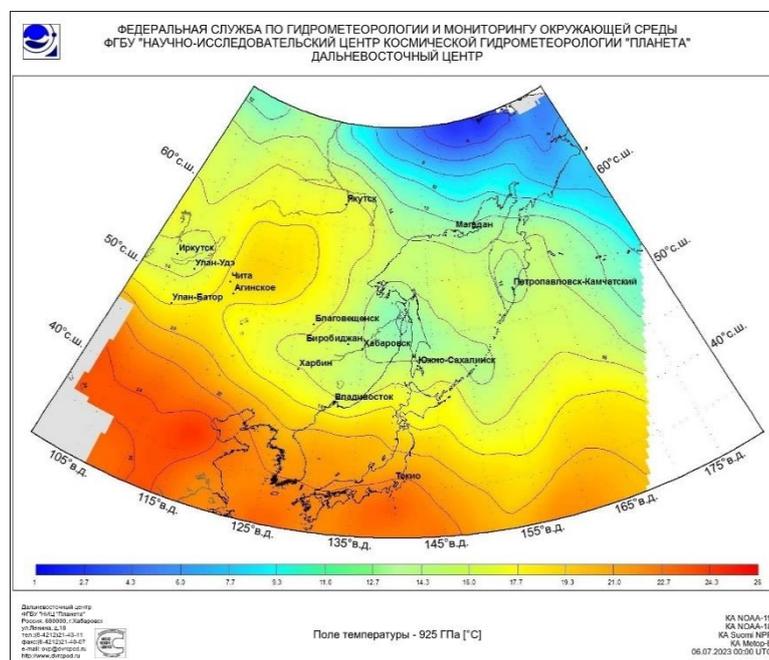


Рисунок 3.32 – Поле температуры - 925 Гпа за 06.07.2023 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

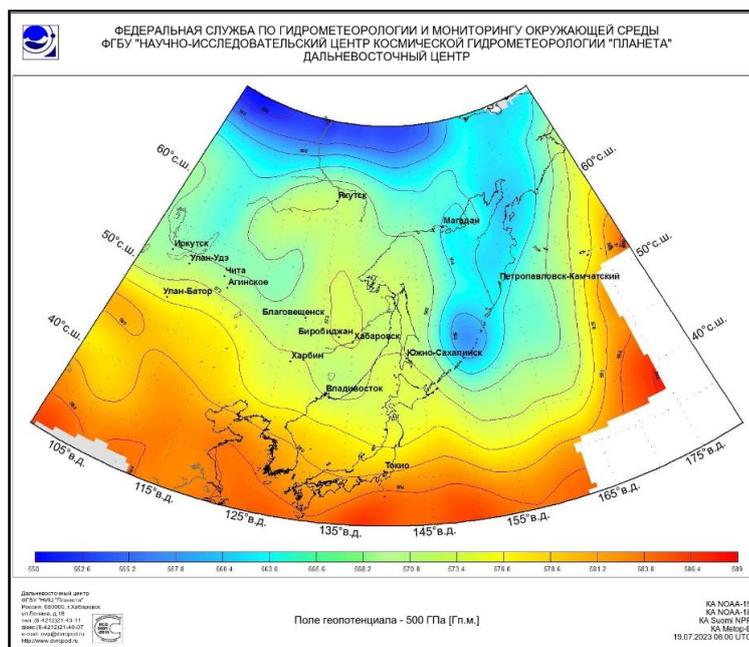


Рисунок 3.33 – Поле геопотенциала - 500 Гпа за 19.07.2023 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

В последней декаде июля с выходом циклонов с юга на территории преобладала неустойчивая погода с ливнями и грозами. Далее в начале августа условия определял уже гребень антициклона, что привело к прекращению дождей и установлению теплой и сухой пожароопасной погоды (рис. 3.34).

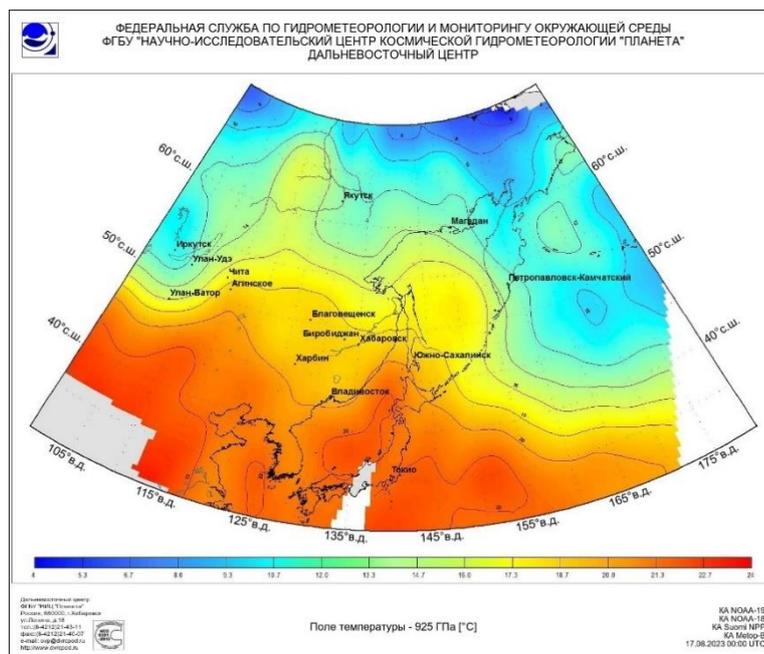


Рисунок 3.34 – Поле температуры - 925 Гпа за 17.08.2023 06:00 (UTC) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ФГБУ НИЦ «Планета» Дальневосточный центр [электронный ресурс: <http://planet.iitp.ru/>]

В завершение можно сформировать следующие выводы:

- Наш анализ показал, что антициклоны создают наиболее благоприятные условия для возникновения и распространения природных пожаров. Высокие атмосферное давление и температура воздуха, характерные для антициклонов, приводит к ясной и сухой погоде, которая способствует высушиванию растительности и увеличению риска возгорания
- Сильные ветры, образующиеся на фоне контраста температур, способствуют быстрому распространению огня и могут переносить горящие материалы на большие расстояния, создавая новые очаги возгорания.
- Также в условиях сухой погоды молнии, которые возникают как во фронтальных, так и в внутримассовых грозах, могут легко стать источником возгорания, особенно в изолированных и труднодоступных районах.

- Важно отметить, что ни один из рассмотренных факторов не действует изолированно. Наиболее благоприятные условия для пожаров создаются сочетанием нескольких факторов, таких как высокие температуры, низкая влажность, сильные ветра и мощная конвективная облачность.

Таким образом, понимание синоптических условий, способствующих возникновению природных пожаров, является важным шагом в направлении повышения эффективности мер по их предотвращению и борьбе с ними. Эти знания могут существенно улучшить систему раннего предупреждения минимизировать ущерб от пожаров для экосистем и населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование, посвященное спутниковому обнаружению природных пожаров, представляет собой комплексный анализ развития и применения современных технологий дистанционного зондирования Земли. В ходе работы были рассмотрены основные этапы развития спутникового мониторинга лесных пожаров, начиная с пионерских исследований и заканчивая современными методами и инструментами.

Анализ эволюции технологий спутникового наблюдения показал значительный прогресс, начиная от первых экспериментов с использованием простых радиометров до современных мультиспектральных и гиперспектральных сенсоров.

Современные методы спутникового обнаружения лесных пожаров показали высокую эффективность в раннем выявлении пожаров. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных, а также алгоритмов автоматической обработки позволяет оперативно выявлять очаги возгорания и оценивать их интенсивность.

Изучены методы тепловой инфракрасной детекции, а также использование видимого и ближнего инфракрасного излучения для идентификации пожаров. Проведен детальный анализ спутниковых снимков лесных пожаров на территории Якутии за выбранный период. В результате анализа изображений были отобраны и изучены 4 случая.

Использование откалиброванных данных первого уровня обработки прибора MODIS позволило получить высокоточную визуализацию пожароопасных областей и провести оценку параметров пожаров с помощью индексов NDVI и FRP.

Для достижения максимальной точности и оперативности обнаружения лесных пожаров необходимо интегрировать данные с различных спутниковых платформ, комплексно использовать разнообразные спектральные индексы и алгоритмы. Такой подход позволяет минимизировать ошибки и повысить надежность результатов.

Таким образом, исследование подтвердило значимость спутниковых методов для обнаружения и мониторинга природных пожаров и подчеркнуло необходимость дальнейшего развития технологий для улучшения их точности и оперативности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

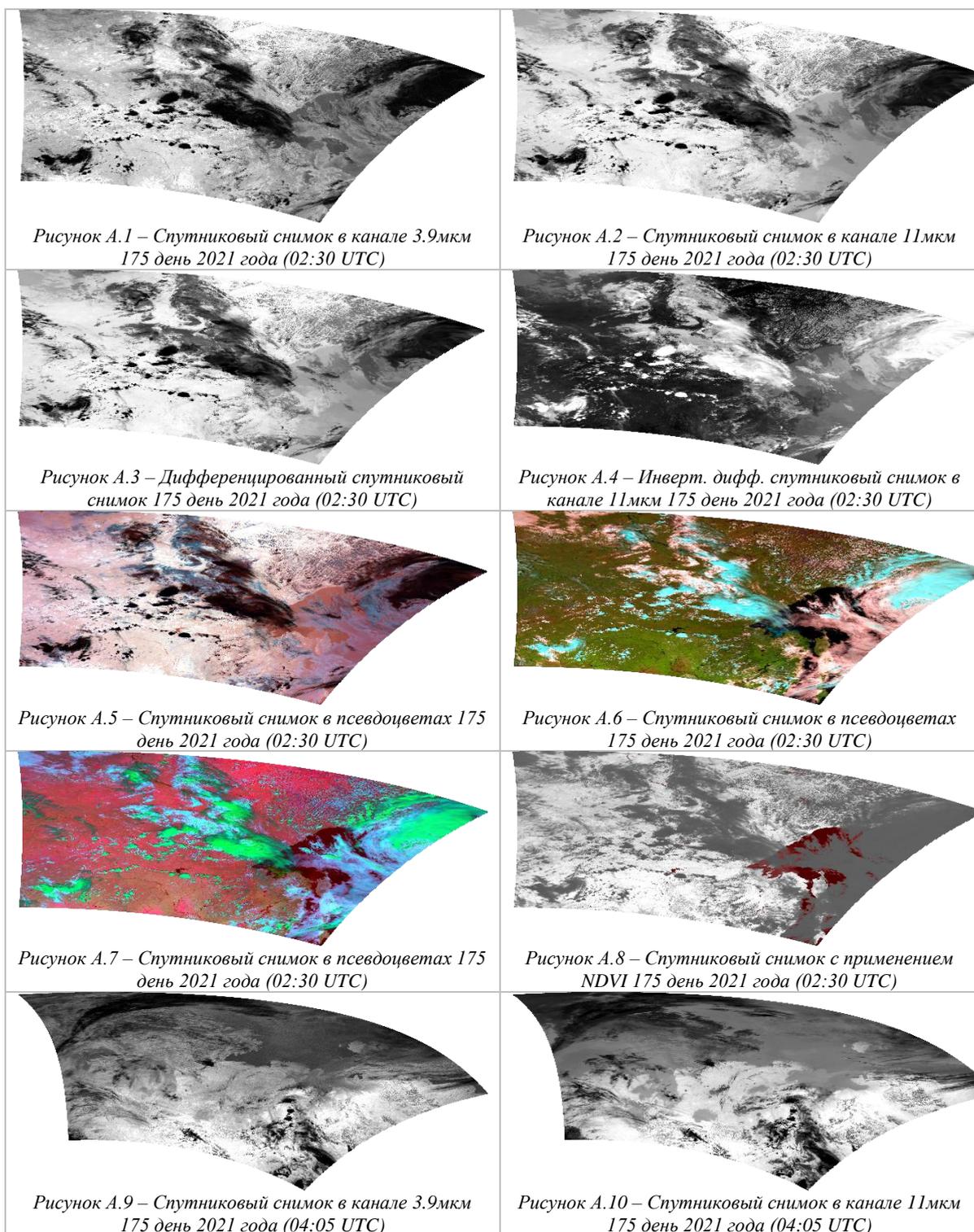
1. Carr J.R. Satellite and Aircraft Observations of Forest Fires // *Journal of Applied Meteorology*. 1973, vol. 12, № 1, p. 98-108;
2. Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D., Descloitres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. The MODIS Fire Products // *Remote Sensing of Environment*. 2002, vol. 83, № 1-2, p. 244-262;
3. Giglio L., Descloitres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2003, vol. 87, № 2-3, p. 273-282;
4. Schroeder F., Rathmann N., Lehmann S., Forsell N., Mermoz S., Vithanage J. Development and Evaluation of a Global Wildfire Forecasting System // *International Journal of Wildland Fire*. 2014, vol. 23, № 5, p. 655-666;
5. Lentile L.B., Holden Z.A., Smith A.M.S., Falkowski M.J., Hudak A.T., Morgan P., Lewis S.A., Gessler P.E., Benson N.C. Remote Sensing Techniques to Assess Active Fire Characteristics and Post-Fire Effects // *International Journal of Wildland Fire*. 2006, vol. 15, № 3, p. 319-345, doi:10.1071/WF05097;
6. Milz M. Study on Forest Fire Detection with Satellite Data. Avdelning Rymdteknik, Institutionen för System-och rymdteknik (SRT), Luleå tekniska universitet. Kiruna, Report, 2013, p. 1-29;
7. Stewart R.E., Gedzelman S.D. Geostationary Satellites for Environmental Monitoring: A Review // *Reviews of Geophysics*. 1984, vol. 22, № 2, p. 305-330;
8. Adler R.F., Huffman G.J., Bolvin D.T., Curtis S. Geostationary Satellite Applications for Water Resources Management // *Water Resources Research*. 2000, vol. 36, № 2, p. 287-301;

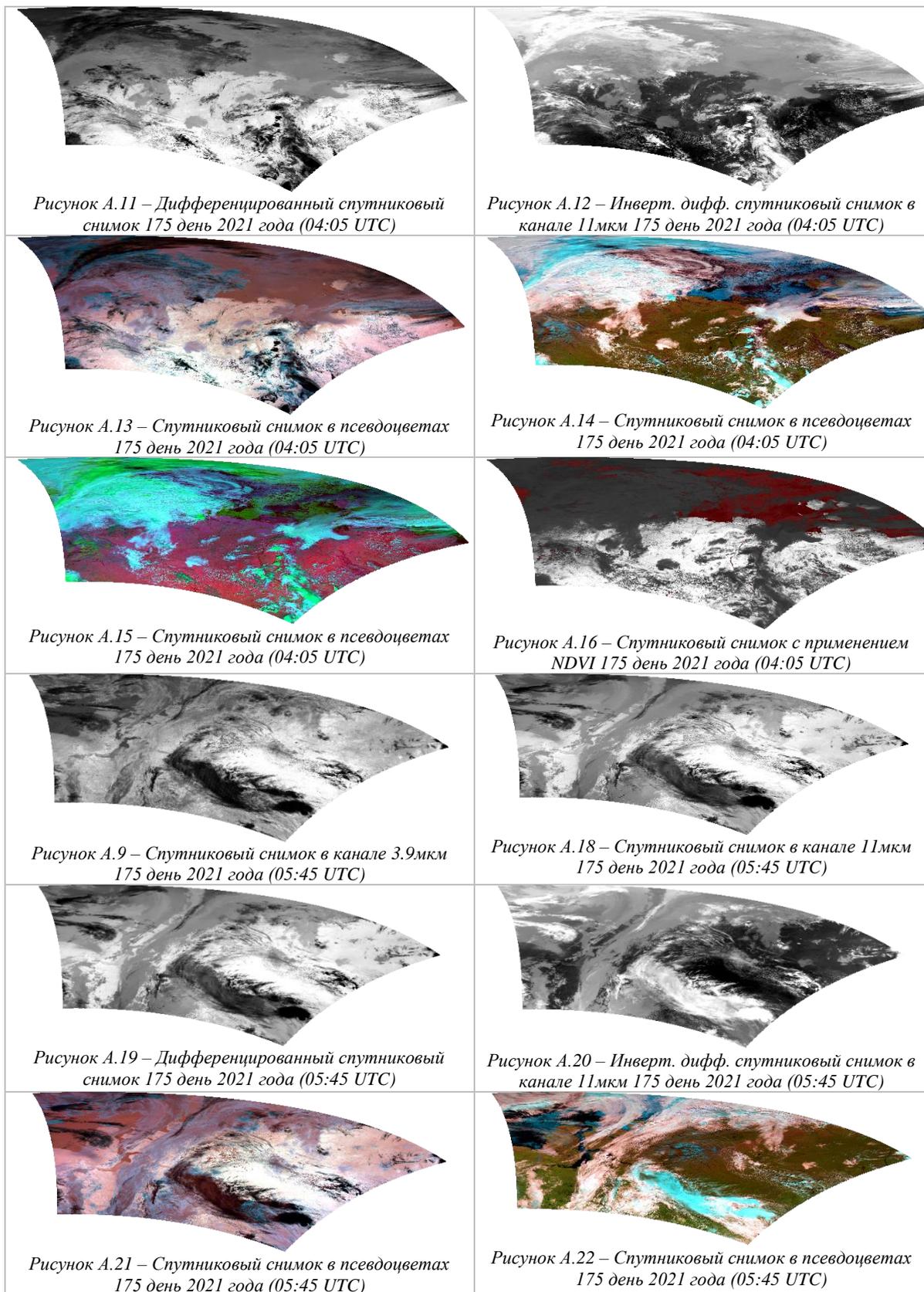
9. Green R.O., Cook B.D., Pavri C.M., Cheung N.S. Wildfire Detection Using Infrared Imaging Satellites // *Journal of Geophysical Research*. 1993, vol. 98, № D2, p. 2095-2106;
10. Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L. Remote Sensing of Wildfires: A Review // *International Journal of Wildland Fire*. 2012, vol. 21, № 3, p. 1-25;
11. Hyer E.J., Giglio L., Justice C.O. Satellite Monitoring of Fires in Africa: Fire Radiative Power Assessment for Fire Management and Emission Inventories // *Remote Sensing of Environment*. 2010, vol. 114, № 5, p. 1106-1118;
12. Smith G.M., Adams J.B. Visible and Near Infrared Reflectance Characteristics of Dry Plant Materials // *International Journal of Remote Sensing*. 1987, vol. 8, № 3, p. 325-341;
13. Reiser C.A., Call S.R.G., Angell D.K. *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*. Kluwer Academic Publishers, 2003. 290 p.;
14. Slater P.N., Schneider S.H. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation // *Remote Sensing Reviews*. 1992, vol. 7, № 2, p. 1-16;
15. Randerson J.T., van der Werf G.R., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S. Global Fire Emissions and the Contribution of Deforestation, Savanna, Forest, Agricultural, and Peat Fires (1997–2009) // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012, vol. 12, № 4, p. 653-679;
16. Zhang Y., Wu M., Giglio L.D., Boschetti L. Assessment of Fire Radiative Power Retrieval Using VIIRS Day/Night Band Data // *Remote Sensing of Environment*. 2016, vol. 190, p. 180-192;
17. Jones H.G., Vaughan R.A., Mason P.J. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press, 1998. 324 p.;

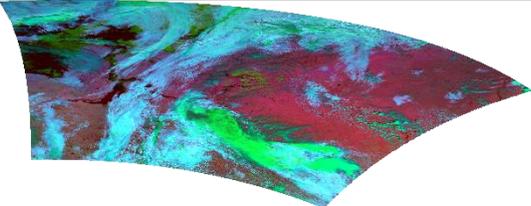
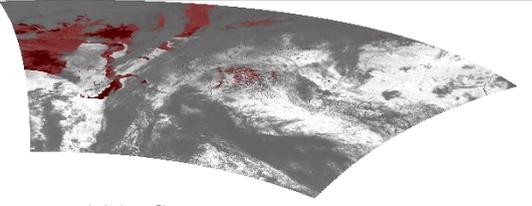
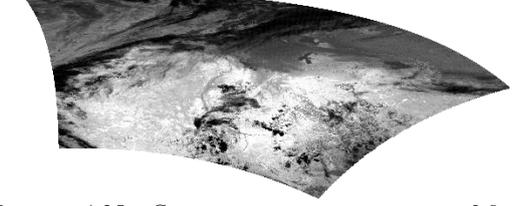
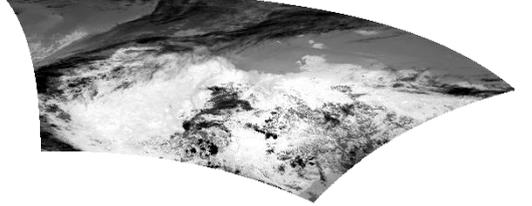
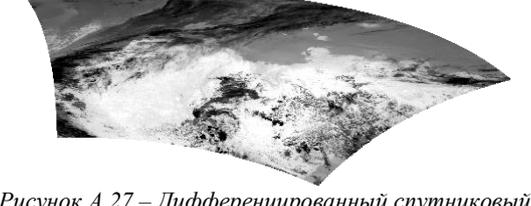
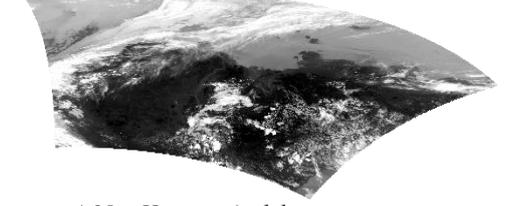
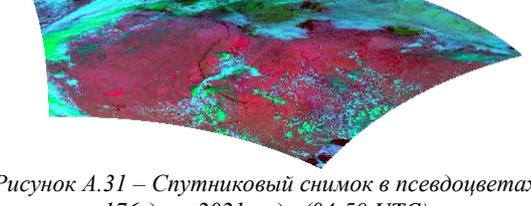
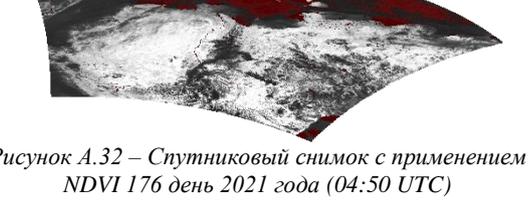
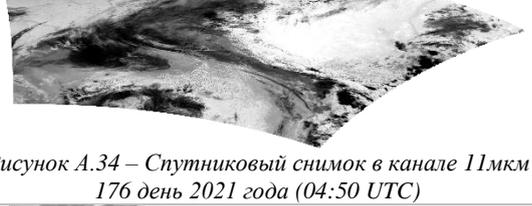
18. Roman M.O., Wolfe R.E., Morisette J.T. Global Land Cover Mapping from MODIS: Algorithms and Early Results // Remote Sensing of Environment. 2018, vol. 220, p. 1-18;
19. Roberts A.J., Roy D.P. NDVI-Based Change Detection Using Landsat Data over the Semiarid Nebraska Sand Hills, USA // GIScience & Remote Sensing. 2018, vol. 55, № 3, p. 370-389;
20. Chuvieco G., Huesca A.G., Martin M.D., Pettinati M. Automatic Fire Detection Using Remote Sensing Imagery: A Review // Remote Sensing of Environment. 2010, vol. 114, № 8, p. 1969-1981;
21. Chuvieco G. Fire Detection and Monitoring by Remote Sensing // Remote Sensing of Environment. 2003, vol. 80, № 1, p. 1-2;
22. Pereira J.M.C., Park S.U. Review of Satellite Remote Sensing Applications for Automatic Detection of Wildfires and Related Hazards // International Journal of Wildland Fire. 2016, vol. 25, № 9, p. 1-16;
23. Курбатский Н.П. Классификация лесных пожаров // Вопросы лесоведения. Красноярск, 1970. Вып. 2, с. 45-52;
24. Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России [Электронный ресурс] // Вестник ОНЗ РАН. 2010, № 2, Электронный журнал;
25. Rashkovetsky D., Mauracher F., Langer M., Schmitt M. Wildfire Detection from Multi-sensor Satellite Imagery Using Deep Semantic Segmentation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022, vol. 60, p. 1-15.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты обработки спутниковых изображений.





 <p><i>Рисунок А.23 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 175 день 2021 года (05:45 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.24 – Спутниковый снимок с применением NDVI 175 день 2021 года (05:45 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.25 – Спутниковый снимок в канале 3.9мкм 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.26 – Спутниковый снимок в канале 11мкм 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.27 – Дифференцированный спутниковый снимок 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.28 – Инверт. дифф. спутниковый снимок в канале 11мкм 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.29 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.30 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (03:10 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.31 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.32 – Спутниковый снимок с применением NDVI 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.33 – Спутниковый снимок в канале 3.9мкм 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.34 – Спутниковый снимок в канале 11мкм 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>
 <p><i>Рисунок А.35 – Дифференцированный спутниковый снимок 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>	 <p><i>Рисунок А.36 – Инверт. дифф. спутниковый снимок в канале 11мкм 176 день 2021 года (04:50 UTC)</i></p>

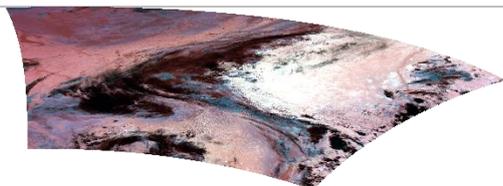


Рисунок А.37 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (04:50 UTC)

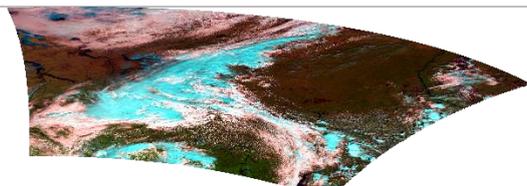


Рисунок А.38 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (04:50 UTC)

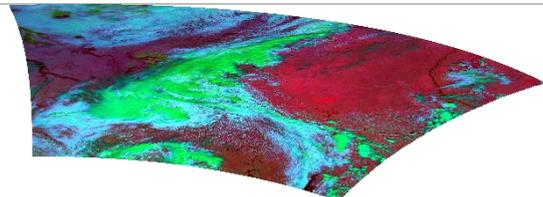


Рисунок А.39 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 176 день 2021 года (04:50 UTC)

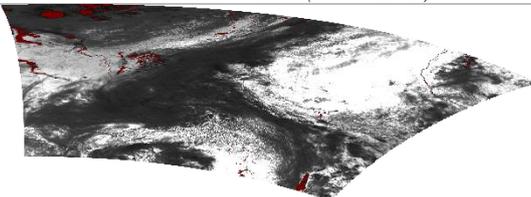


Рисунок А.40 – Спутниковый снимок с применением NDVI 176 день 2021 года (04:50 UTC)

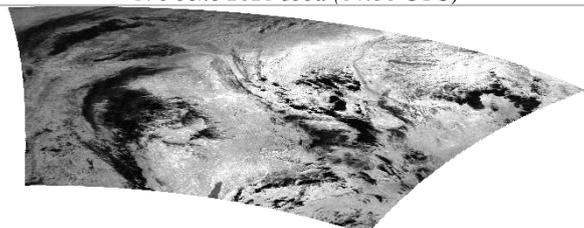


Рисунок А.41 – Спутниковый снимок в канале 3.9мкм 177 день 2021 года (03:55 UTC)

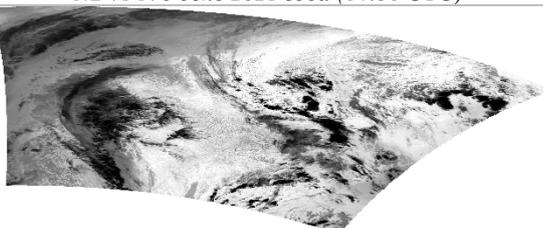


Рисунок А.42 – Спутниковый снимок в канале 11мкм 177 день 2021 года (03:55 UTC)

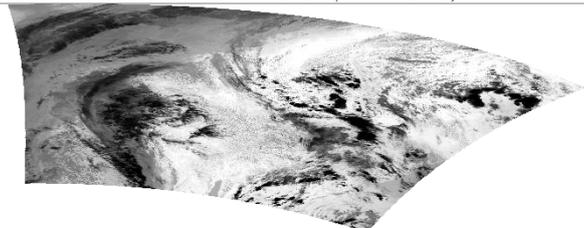


Рисунок А.43 – Дифференцированный спутниковый снимок 177 день 2021 года (03:55 UTC)

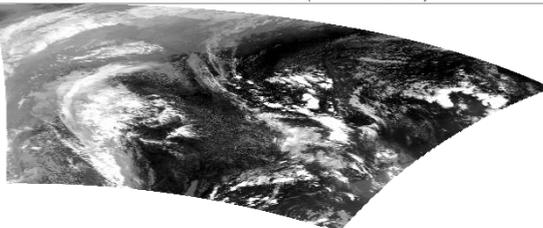


Рисунок А.44 – Инверт. дифф. спутниковый снимок в канале 11мкм 177 день 2021 года (03:55 UTC)

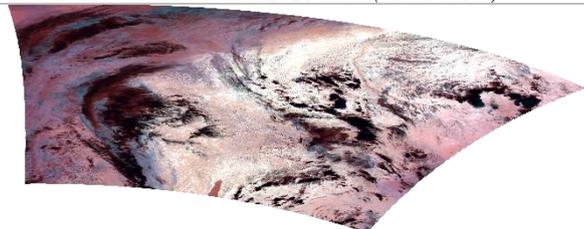


Рисунок А.45 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 177 день 2021 года (03:55 UTC)

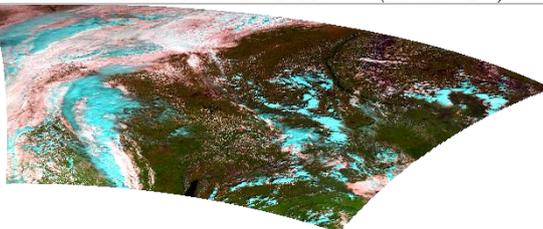


Рисунок А.46 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 177 день 2021 года (03:55 UTC)

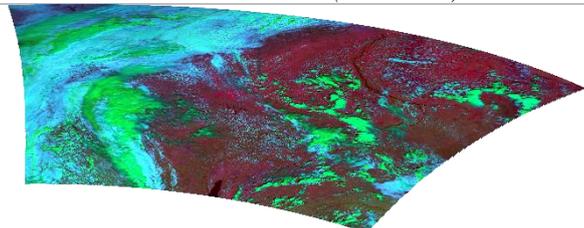


Рисунок А.47 – Спутниковый снимок в псевдоцветах 177 день 2021 года (03:55 UTC)

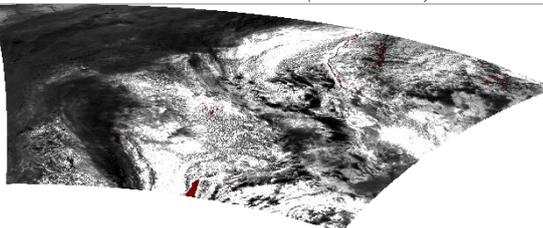


Рисунок А.48 – Спутниковый снимок с применением NDVI 177 день 2021 года (03:55 UTC)

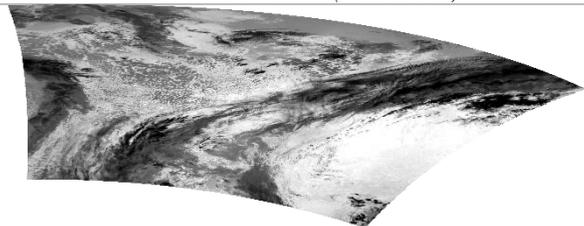


Рисунок А.49 – Спутниковый снимок в канале 3.9мкм 181 день 2021 года (03:30 UTC)

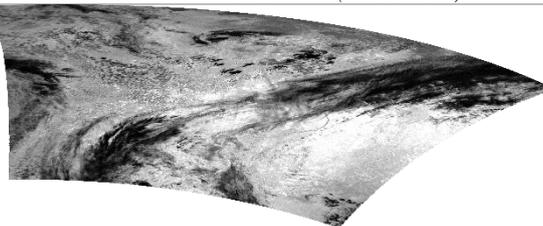
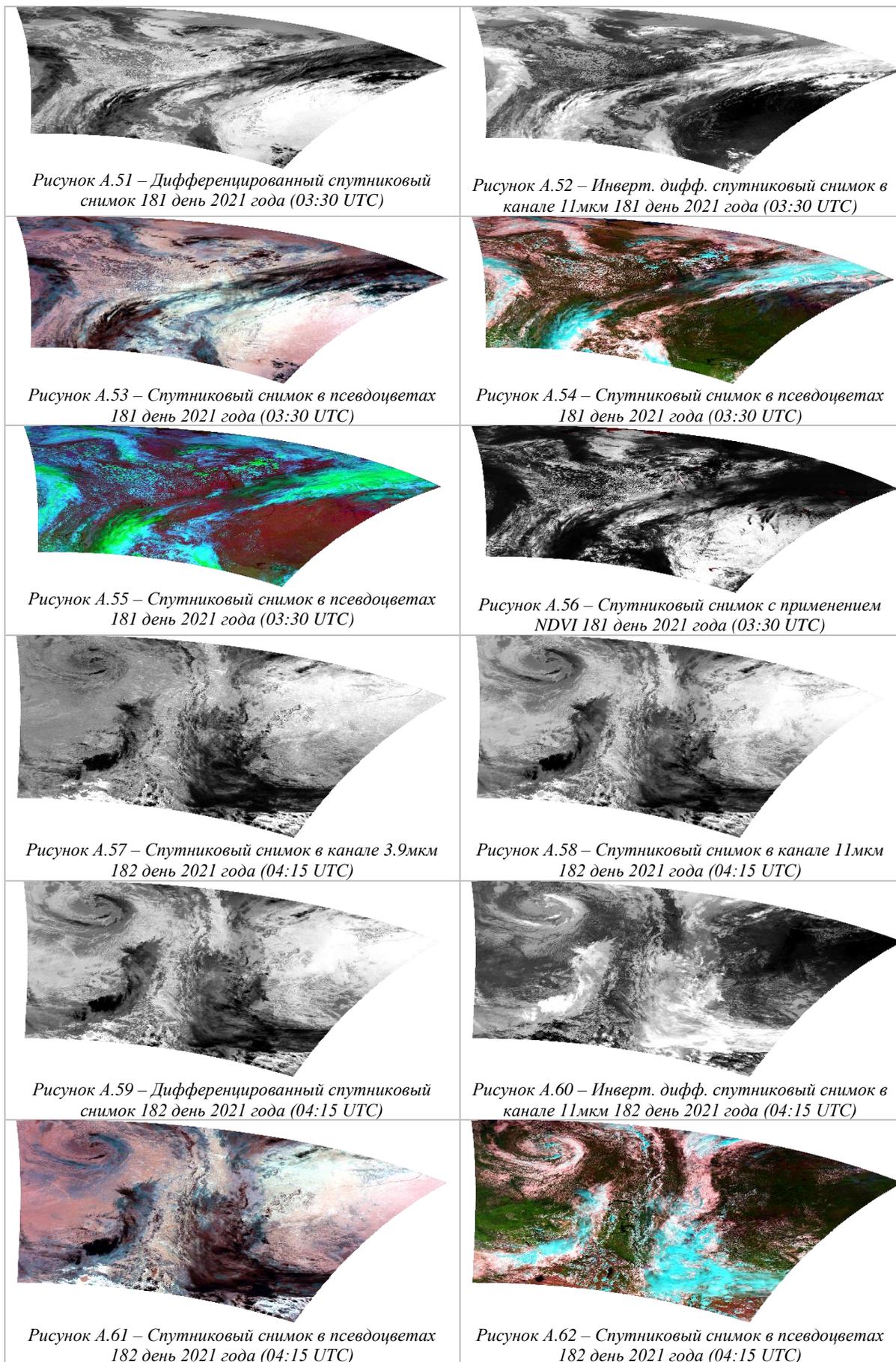


Рисунок А.50 – Спутниковый снимок в канале 11мкм 181 день 2021 года (03:30 UTC)



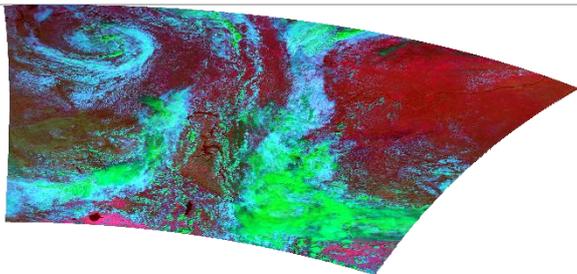


Рисунок А.63 – Спутниковый снимок в псевдоцветах
182 день 2021 года (04:15 UTC)

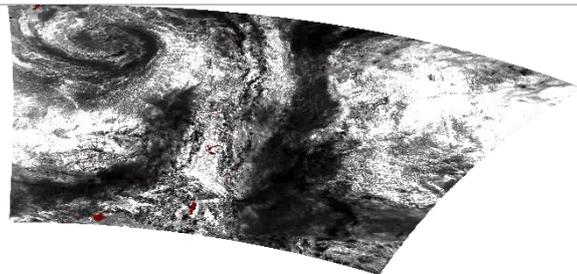


Рисунок А.64 – Спутниковый снимок с применением
NDVI 182 день 2021 года (04:15 UTC)

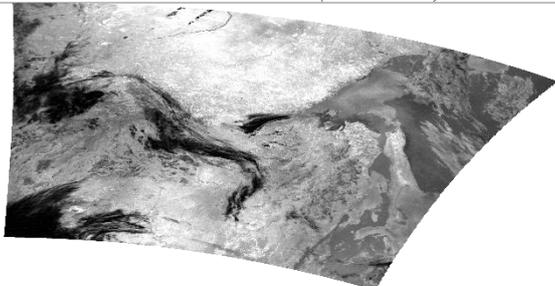


Рисунок А.65 – Спутниковый снимок в канале 3.9мкм
184 день 2021 года (02:25 UTC)

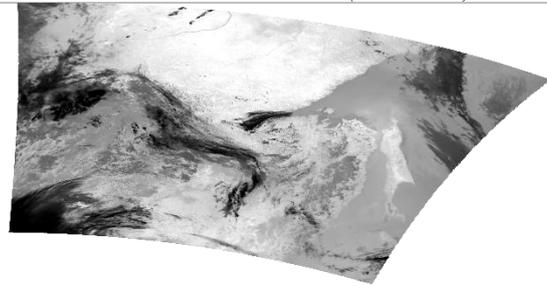


Рисунок А.66 – Спутниковый снимок в канале 11мкм
184 день 2021 года (02:25 UTC)

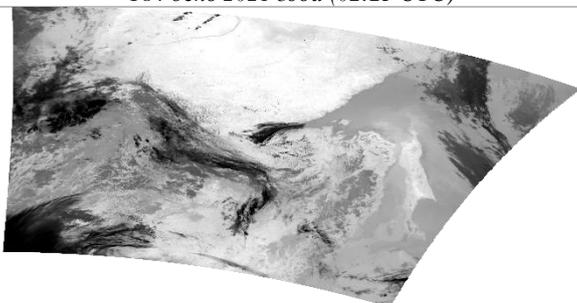


Рисунок А.67 – Дифференцированный спутниковый
снимок 184 день 2021 года (02:25 UTC)

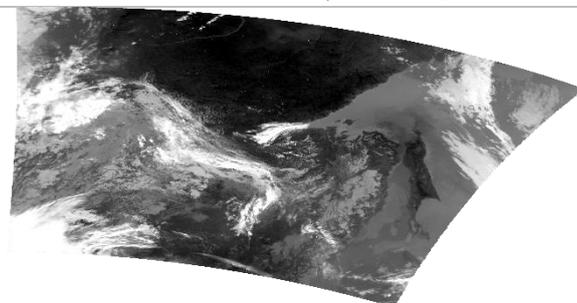


Рисунок А.68 – Инверт. дифф. спутниковый снимок в
канале 11мкм 184 день 2021 года (02:25 UTC)

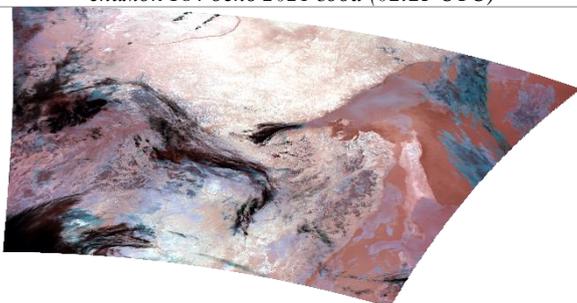


Рисунок А.69 – Спутниковый снимок в псевдоцветах
184 день 2021 года (02:25 UTC)

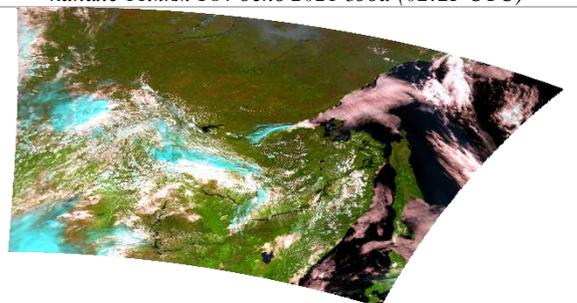


Рисунок А.70 – Спутниковый снимок в псевдоцветах
184 день 2021 года (02:25 UTC)

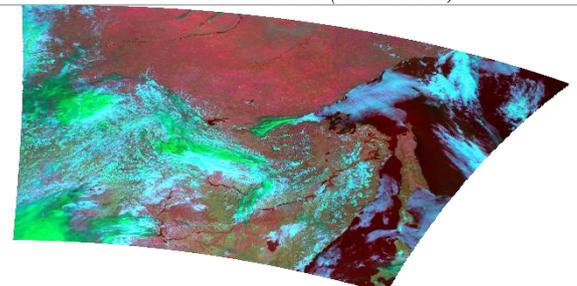


Рисунок А.71 – Спутниковый снимок в псевдоцветах
184 день 2021 года (02:25 UTC)

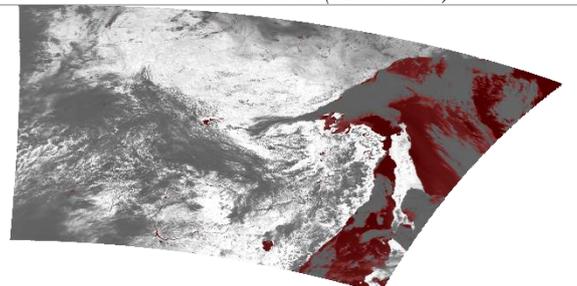


Рисунок А.72 – Спутниковый снимок с применением
NDVI 184 день 2021 года (02:25 UTC)