

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт экологии и географии  
Кафедра географии

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Г.Ю. Ямских  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

05.03.02 География

05.03.02.02 Физическая география и ландшафтоведение

**Анализ усыхания лесов в результате воздействия пожаров по данным  
дистанционного зондирования Земли**

Научный  
руководитель

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

доц., канд. техн. наук  
должность, учёная степень

С. Т. Им  
инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

К. С. Яньшина  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

И. А. Вайсброт  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ усыхания лесов в результате воздействия пожаров по данным дистанционного зондирования Земли» содержит 58 страниц, 28 иллюстраций, 1 таблицу, 32 использованных источника.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ЛЕСНЫЕ ПОЖАРЫ, ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЛЕСОВ, MODIS, КАРТА RUSSIAN LAND COVER 2010, MCD64A1, ESRI ARCGIS.

Объект исследования: леса центральной части Южной Сибири.

Цель работы: геоинформационный анализ исчезновения древостоев в центральной части Южной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли в результате воздействия пожаров.

Задачи:

1. Составить описание физико-географических особенностей исследуемой территории (центральная часть Южной Сибири).
2. Провести пространственный анализ данных об усыхании лесов в результате лесных пожаров на тестовом участке центральной части Южной Сибири.
3. Выявить особенности и привести количественные оценки усыхания лиственных, лиственничных, сосновых и темнохвойных древостоев, возникшее в результате пожаров в центральной части Южной Сибири.

Тема работы является актуальной в связи с необходимостью оценки тенденций в потере древостоев из-за прогнозируемого роста горимости лесов в 21-м веке, обусловленное потеплением климата. Научную новизну представляют полученные оценки усыхания древостоев в результате воздействия пожаров. Для практической деятельности важно знать, какая доля деревьев в ближайшие годы (месяца) утратит жизнеспособность. Результаты могут быть использованы для получения количественных оценок прогнозирования исчезновения лесов в ближайшие десятилетия из-за пожаров.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Литературный обзор .....	7
1.1 Дистанционное зондирование .....	7
1.1.1 Применение дистанционного зондирования Земли в анализе пожаров и усыхания лесов .....	13
1.2 Особенности влияния лесных пожаров .....	15
1.2.1 Возникновение и виды лесных пожаров. ....	17
1.3 Территория и объект исследования.....	21
1.3.1 Территория исследования .....	21
1.3.2 Объект исследования .....	23
2 Используемые материалы .....	25
2.1 Данные об исчезновении леса (lossyear).....	25
2.2 Данные MODIS Active Fire Product – продукт Burned Area (MCD64A1)....	27
2.3 Карта преобладающих древесных пород (2010).....	30
2.4 Программное обеспечение .....	32
3 ГИС-анализ усыхания лесов центральной части Южной Сибири.....	34
3.1 Создание и применение маски гарей .....	34
3.2 Создание масок древостоев на территории Южной Сибири .....	38
4 Анализ полученных данных исчезновения лесов на территориях гарей центральной части Южной Сибири .....	41
4.1 Усыхание пород древостоев.....	42
4.1.1 Лиственные древостои.....	43
4.1.2 Лиственничные древостои .....	44
4.1.3 Сосновые древостои .....	46
4.1.4 Темнохвойные древостои.....	47
5 Результаты анализа усыхания лесов в результате воздействия пожаров.....	51
Заключение .....	53
Список использованных источников .....	55

## ВВЕДЕНИЕ

Лесные ландшафты всегда играли важную роль и выполняли разнообразные функции в жизни как отдельного человека, так и общества в целом. Традиционно это экономическая или ресурсная роль лесопользования – источник различной лесопродукции: древесины, лекарственного сырья, грибов, ягод, дичи, база пчеловодства и в итоге, рекреационный ресурс. Лесные ресурсы являются возобновляемыми, хотя этот процесс весьма долговременный и трудоемкий [19].

Усыхание лесов – фактор угрозы сохранения биологического разнообразия и устойчивого социально-экономического развития. Усыханию и гибели подвержены десятки видов деревьев и кустарников. Основные причины – засухи и морозы, повышение или понижение уровня грунтовых вод, загрязнение окружающей среды. Леса могут быть уничтожены вследствие естественных причин, таких как ураганы, рельеф, болезни леса, изменение климата, однако основной причиной обезлесения является антропогенный фактор [19].

Лесной пожар – стихийное неуправляемое распределение огня по лесной площади. В связи с возрастающим антропогенным воздействием и глобальными климатическими изменениями, частота и интенсивность пожаров возрастают. Пожары – основной фактор, определяющий состояние и динамику лесного фонда России, особенно районов Сибири и Дальнего Востока [17].

Процесс усыхания лесов в результате пожаров является актуальной и серьезной проблемой во многих частях Земли, так как этот процесс влияет на их экологические, климатические и социально-экономические характеристики и снижение качества жизни. Обезлесение приводит к снижению биоразнообразия, запасов древесины, в том числе промышленного использования, к почвенной эрозии (разрастание оврагов, вымывание плодородного слоя), снижению водности рек, а также к усилению парникового

эффекта из-за выделения в атмосферу углерода в виде CO<sub>2</sub>, находившегося в биомассе леса [2].

По данным цифрового отчета Глобальной оценки лесных ресурсов 2020 года (The Global Forest Resources Assessment 2020), предоставленные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (Организация Объединённых Наций) (FAO – Продовольственная и сельскохозяйственная организация), леса занимают почти 1/3 суши во всем мире – 4,06 млрд га. Более половины (54%) мировых лесов находятся всего в пяти странах – России (20% – 815 млн га), Бразилии (12% – 497 млн га), Канаде (9% – 347 га), США (8% – 310 га), Китае (5% – 220 га), остальной мир – 1870 га (46%). За 30 лет с 1990 по 2020 год площадь лесов в мире сократилась примерно на 178 млн га (площадь, равная площади Ливии). Темпы чистой потери лесов снизились с 7,8 га в год в 1990-2020 годах до 5,2 млн га в 2000-2010 годах и 4,7 млн га в год в 2010-2020 годах. Темпы снижения чистой потери лесов замедлились в последнее десятилетие из-за снижения темпов расширения лесов.

Самая большая площадь потери лесов отмечается в тропической климатической зоне, например, в Южной Америке, Африке и Индонезии [23].

Россия – одна из главных лесных держав мира (по данным Рослесхоз за 2023 год – 52,3% покрыто лесом). Страна входит в тройку мировых лидеров по скорости и площади утраты первозданных (малонарушенных) лесов [11].

**Цель работы:** геоинформационный анализ исчезновения древостоев в центральной части Южной Сибири по данным дистанционного зондирования Земли в результате воздействия пожаров.

**Задачи:**

1. Составить описание физико-географических особенностей исследуемой территории (центральная часть Южной Сибири).

2. Провести пространственный анализ данных об усыхании лесов в результате лесных пожаров на тестовом участке центральной части Южной Сибири.

3. Выявить особенности и привести количественные оценки усыхания лиственных, лиственничных, сосновых и темнохвойных древостоев, возникшее в результате пожаров в центральной части Южной Сибири.

**Объект исследования:** леса центральной части Южной Сибири.

**Предмет:** древостои, погибшие в результате воздействия лесных пожаров на тестовом участке территории Южной Сибири.

**Материалы и методы исследования.** Анализ усыхания лесов в результате воздействия пожаров по данным дистанционного зондирования Земли проведена с помощью программного пакета ESRI ArcGIS 10.8 на основе продукта MCD64A1 и глобального набора данных Lossyear и Treecover. Для выявления особенностей усыхания лиственных, лиственничных, сосновых и темнохвойных древостоев использована карта преобладающих древесных порода России Land Cover 2010.

**Актуальность работы.** В России тенденция роста потерь лесов в результате пожаров сохраняется. Начиная с 1970-х годов в Сибири наблюдается потепление климата, что привело к росту частоты пожаров, уничтожающих леса. Научную новизну представляют результаты анализа усыхания поврежденных пожарами древостоев. Для практической деятельности очень важно знать непосредственно после пожара, какая доля деревьев в ближайшие годы (месяца) утратит жизнеспособность.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейшего анализа динамики состояния лесов после пожаров или для анализа усыхания лесов, включая другие факторы.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Дистанционное зондирование

Представление о дистанционном зондировании Земли возникло, когда Гаспар-Феликс Турнахон (псевдоним Надар) сфотографировал Париж с воздушного шара в 1858 году. Большая часть таких снимков не была полезна для картографирования или для использования в науке.

Первая мировая война (1914-1918 гг.) была мощным толчком в развитии военной картографии и использовании на театре военных действий аэрофотосъемки для разведки и наблюдения.

Во второй половине 20-го века происходило развитие искусственных спутников, что позволило дистанционному зондированию продвинуться в глобальном масштабе. Различные инструменты на борту спутников наблюдения Земли и метеорологических спутников, таких как Landsat, Nimbus и более поздние миссии, такие как RADARSAT и UARS, обеспечили глобальные измерения различных данных для гражданских, исследовательских и военных целей. Космические зонды на других планетах также предоставили возможность проводить исследования дистанционного зондирования, радиолокатор с синтезированной апертурой на борту космического аппарата Магеллана сделал подробные топографические карты Венеры, а приборы на борту SOHO позволили провести исследования на Солнце и солнечном ветре.

С 1960-х и 1970-х годов разработки включают в себя обработку изображений спутниковых снимков. Несколько исследовательских групп в Силиконовой долине разработали методы преобразования Фурье, что привело к первому заметному улучшению данных изображений. В 1999 году был запущен первый коммерческий спутник (IKONOS), собирающий изображения с очень высоким разрешением [27].

Термин дистанционное зондирование стал распространенным после 1962 года и обычно обозначает сбор информации о поверхности Земли с

использованием электромагнитных волн с платформы (прибор регистрации), расположенной на некотором расстоянии от объекта исследования. Дистанционное зондирование позволяет захватывать, визуализировать и анализировать объекты и особенности на поверхности Земли.

После пяти десятилетий развития, человечество может использовать различные типы инфракрасных и микроволновых датчиков для получения больших наборов данных с высокой точностью и высоким разрешением для атмосферы, океана и суши. Частота сбора данных варьируется от одного раза в месяц до одного раза в минуту, пространственное разрешение – от километрового до сантиметрового масштаба, а электромагнитный спектр охватывает диапазоны волн от видимого света до микроволновых волн. Технический прогресс в области датчиков дистанционного зондирования позволяет получать данные в глобальном масштабе, значительно расширяя понимание человечеством собственной среды обитания с пространственной и временной точек зрения, и предоставляет все большее количество ресурсов данных для цифровой Земли [28].

Для того чтобы датчик мог собирать и регистрировать энергию, отраженную или излученную от цели или поверхности, он должен располагаться на устойчивой платформе, удаленной от наблюдаемой цели или поверхности. Платформы для дистанционных датчиков могут располагаться на земле, самолете или воздушном шаре (или какой-либо другой платформе в атмосфере Земли), на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) или спутнике за пределами атмосферы Земли. Наземные датчики часто используются для записи подробной информации о поверхности, которая сравнивается с информацией, собранной с авиационных или спутниковых датчиков. В некоторых случаях это может быть использовано для лучшей характеристики цели, которая отображается другими датчиками, что позволяет лучше понять информацию на изображениях (рис. 1.1) [29].



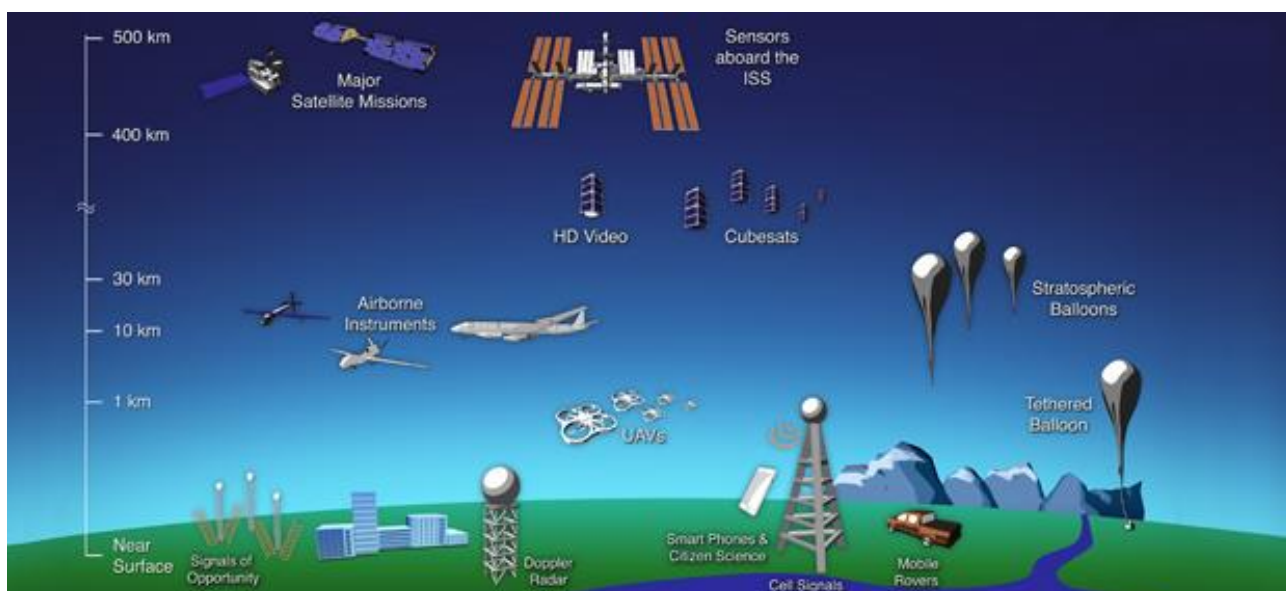


Рисунок 1.1 – Основные технологии дистанционного зондирования Земли и их типичные высоты (<https://gisgeography.com/>)

Каждый тип датчиков имеет свои преимущества и недостатки. При получении снимка учитываются факторы, такие как ограничения полета, разрешение изображения и охват. Например, спутники собирают данные в глобальном масштабе. Но дроны лучше подходят для полетов на небольших площадях. Наконец, самолеты и вертолеты занимают промежуточную позицию.

Для наблюдения Земли также необходимо учитывать разрешение изображения. Дистанционное зондирование делит разрешение изображений на три типа:

1. Пространственное разрешение – детализация изображения в пикселях. Высокое пространственное разрешение означает большую детализацию и меньший размер пикселя. А более низкое пространственное разрешение означает меньшую детализацию и больший размер пикселя.

2. Спектральное разрешение – это степень детализации спектра в полосе. Высокое спектральное разрешение означает, что его полосы более узкие. В то время как низкое спектральное разрешение имеет более широкие полосы, покрывающие большую часть спектра.

3. Временное разрешение – время, необходимое спутнику для прохождения полной орбиты. Беспилотные летательные аппараты, самолеты и вертолеты обладают полной гибкостью, но спутники вращаются вокруг Земли по заданным траекториям.

Спутники глобальной системы определения местоположения находятся на средней околоземной орбите (МЕО). Поскольку они следуют по непрерывной орбитальной траектории, время повторных посещений является постоянным. Это означает, что GPS-приемник почти всегда может передавать данные с 3 и более спутников для обеспечения высокой точности [1].

*Датчики дистанционного зондирования.*

Существуют два вида датчиков.

Активные датчики – тип датчика, который освещает свою цель, после чего датчики измеряют отраженный свет. Принцип работы похож на вспышку фотоаппарата, когда происходит фиксация отраженного света (рис. 1.2).

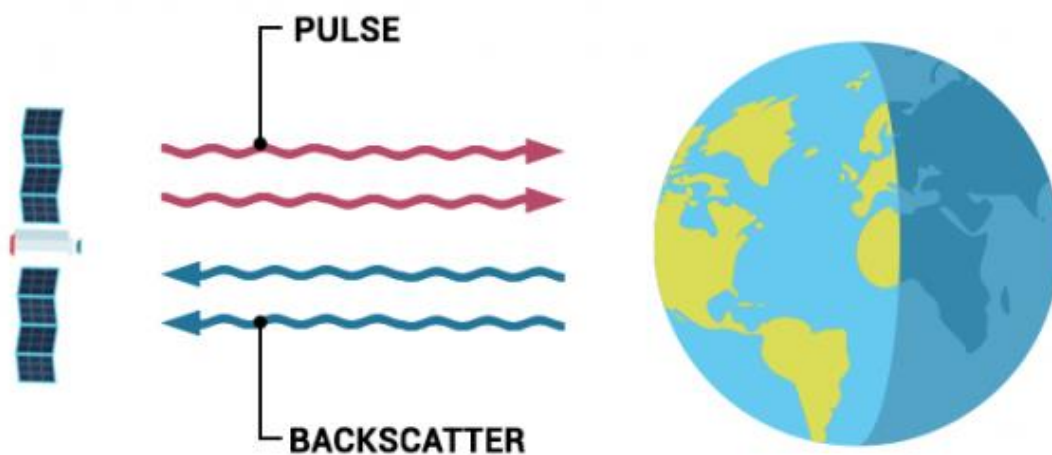


Рисунок 1.2 – Принцип работы активного датчика (<https://gisgeography.com/>)

Пассивные датчики – датчики, измеряющие отраженный свет, излучаемый солнцем. Когда солнечный свет отражается от поверхности Земли, пассивные датчики улавливают этот свет. Например, Landsat и Sentinel

являются пассивными датчиками. Они получают изображения, воспринимая отраженный солнечный свет в электромагнитном спектре [24] (рис. 1.3).

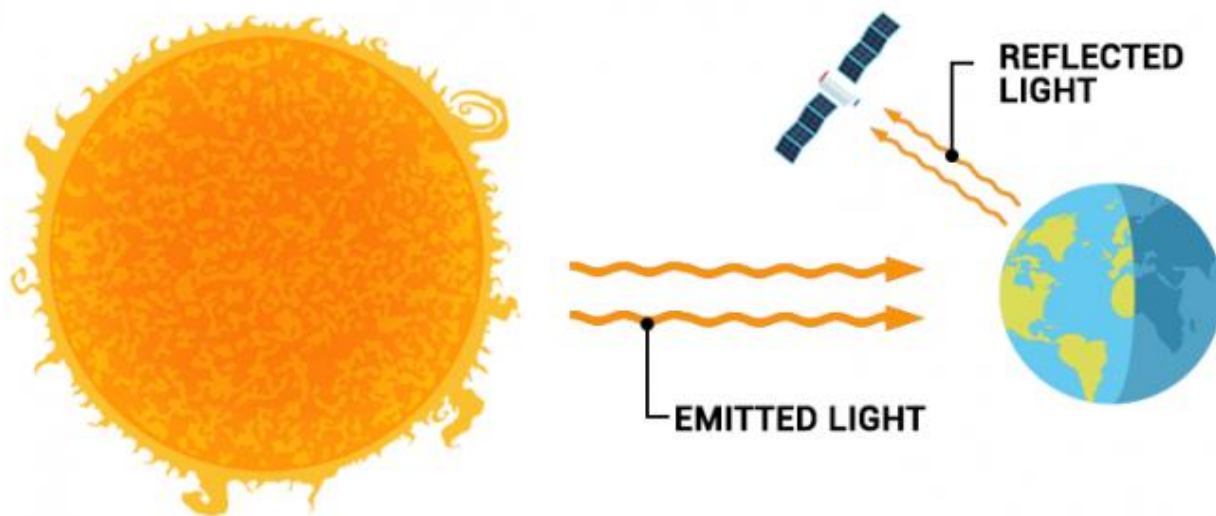


Рисунок 1.3 – Принцип работы пассивных датчиков (<https://gisgeography.com/>)

Пассивное дистанционное зондирование измеряет отраженную энергию, излучаемую Солнцем. В то время как активное дистанционное зондирование освещает свою цель и измеряет ее обратное рассеяние.

#### *Электромагнитный спектр.*

Электромагнитный спектр варьируется от коротких волн (например, рентгеновских лучей) до длинных волн (например, радиоволн). Человек видит только видимый диапазон (красный, зеленый и синий). Но другие типы датчиков могут видеть дальше человеческого зрения. В конечном счете, именно поэтому дистанционное зондирование является таким мощным (рис. 1.4).

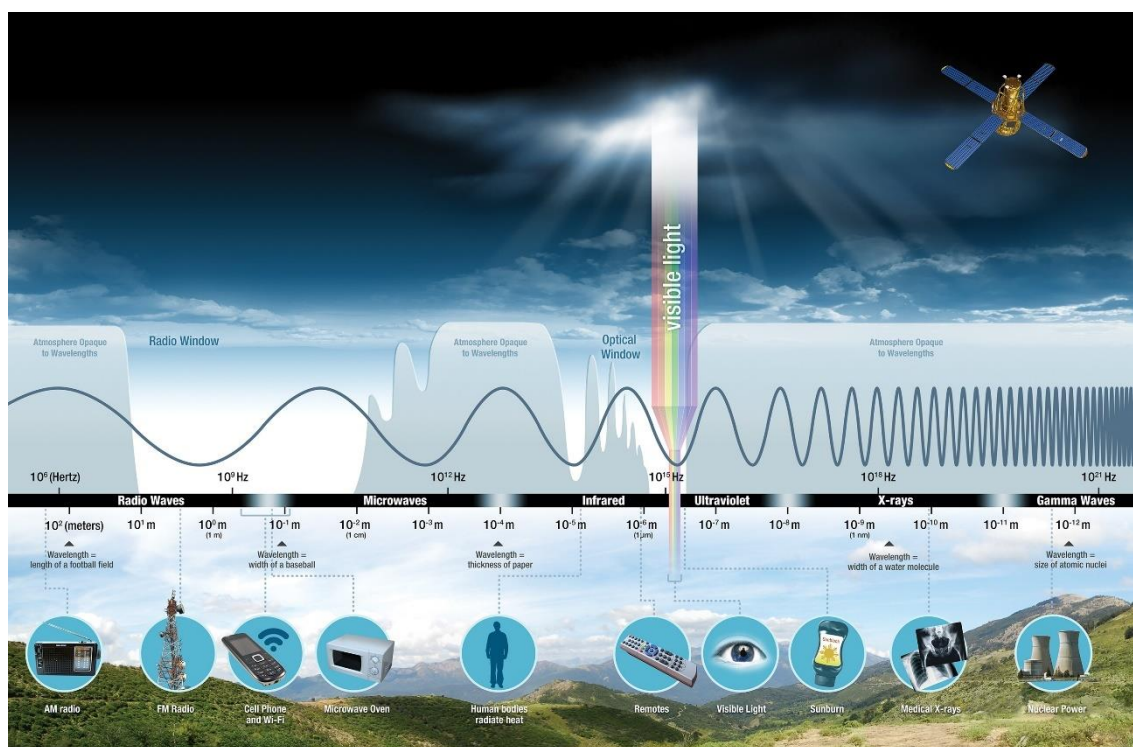


Рисунок 1.4 – Диаграмма электромагнитного спектра (NASA Science)

Датчики проектируются так, чтобы захватить данные за пределами видимого спектра (390-700 нм). Например, ближняя инфракрасная область (NIR) находится в диапазоне 700-1400 нм. Растительность отражает больше зеленого света, потому что так это видят глаза. Но оно еще более чувствительно к ближнему инфракрасному излучению. Почему используются индексы, такие как NDVI, для классификации растительности [32].

#### *Спектральные полосы.*

Спектральные полосы – это группы длин волн. Например, ультрафиолетовый, видимый, ближний инфракрасный, тепловой инфракрасный и микроволновый диапазоны являются спектральными диапазонами. Классифицируются спектральные области на основе ее частоты или длины волны. Существует два типа изображений для пассивных датчиков: мультиспектральные и гиперспектральные снимки. Основное различие – количество полос и то, насколько узки полосы. Гиперспектральные

изображения состоят из сотен узких полос, мультиспектральные – из 3-10 более широких полос.

### **1.1.1 Применение дистанционного зондирования Земли в анализе пожаров и усыхания лесов**

Одним из самых простых способов изучения лесных пожаров является дистанционное зондирование и методы ГИС. Все больше спутников в настоящее время изучают поведение Земли и одновременно предоставляют изображения. Лесные пожары играют важную роль в деградации лесных массивов, и их чрезвычайно трудно контролировать. Это влияет на такие важнейшие факторы, как климат, круговорот воды, среда обитания тысяч форм жизни и вся экологическая экосистема. Лес – это большая территория, покрытая деревьями различной высоты и плотности, кустарниками, травами, растительностью, сельскохозяйственными растениями и другими видами. Таким образом, можно извлекать информацию о лесах, такую как лесные пожары, причины пожара, типы лесных пожаров, площади, покрытые лесом, оценка лесных пожаров, тип произошедшего лесного пожара, оценка площадей, сожженных лесным пожаром, и так далее. Именно здесь дистанционное зондирование используется для обнаружения лесных пожаров.

*Методы дистанционного зондирования.*

Можно идентифицировать активный пожар по спутниковым снимкам прямыми визуальными методами. Инфракрасные диапазоны очень полезны для определения доступа к сгоревшим участкам и составления карты [22].

Каждый объект на земле имеет уникальное значение коэффициента отражения. Находят лесные пожары, используя значение этого коэффициента. Оценка лесных пожаров и выгоревших площадей производится с использованием индекса площади выгорания (BAI), нормализованного коэффициента выгорания (NBR), индекса выгорания в среднем инфракрасном диапазоне (MIRBI) и т.д. Существуют также методы сегментации для оценки

карты и определения площади пожара с помощью программного обеспечения ENVI или ArcGIS.

В настоящее время методы оценки пройденных огнем площадей можно разделить на две основные группы:

– Методы, основанные на анализе результатов детектирования активного горения.

– Методы, основанные на анализе последствий пожаров и картографировании гарей.

Первая группа методов основывается на использовании в основном данных низкого пространственного разрешения (500-1000 м), однако получаемых достаточно часто (обычно около 10 раз в сутки).

Вторая группа методов обычно основана на использовании данных видимого и инфракрасного диапазонов спутниковых приборов, которые чаще всего имеют более высокую пространственную детальность по сравнению со спектральными диапазонами, используемыми при детектировании активного горения [6, 12].

Задача обнаружения очагов лесных пожаров в настоящее время относится к числу достаточно разработанных. При этом обычно используются снимки инфракрасного диапазона (ИК-диапазона), получаемые с космических аппаратов TERRA и AQUA. Такие снимки имеют пространственное разрешение порядка одного километра. Несмотря на низкое пространственное разрешение, при использовании ИК-снимков удается обнаруживать интенсивные очаги пожаров площадью до 0,5 га и менее.

Основным источником оперативных данных о температурных аномалиях достаточно высокого пространственного разрешения является прибор MODIS, установленный на аппараты Aqua и Terra. Прибор обеспечивает съемку земной поверхности в 36 спектральных каналах с разрешением от 250 до 1000 метров на пиксель. Для детектирования активного горения используются каналы с пространственным разрешением 1000 метров. Практически каждая точка на

территории России наблюдается аппаратами Aqua и Terra не менее четырех раз в сутки.

Ежегодно на территории России регистрируют более 30 тыс. лесных пожаров, от которых исчезло растительности на 2-3 млн га. При этом выбросы в атмосферу аэрозолей соизмеримы с вулканической деятельностью, а масса ежегодно сгорающей органики настолько велика, что, если в ближайшее время не будет выработана стратегия и тактика управления подобным стихийным бедствием, она может достичь 1 млрд т. Вопросами, связанными с лесными пожарами, теперь занимаются в рамках международной кооперации, в которой большую роль играет Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (Красноярск).

## **1.2 Особенности влияния лесных пожаров**

На Земле вместе с формированием климата, близкого к современному, с появлением светлохвойных лесов во время отступления ледников и в конце четвертичного периода (в начале голоцена) лесные пожары стали распространенным явлением. По мере роста населения и освоения лесных территорий, с развитием промышленности и транспорта на земном шаре увеличилось число источников огня. В районах с континентальным климатом и хвойными лесами создались условия, особо благоприятные для возникновения большого числа лесных пожаров [4].

Лесной пожар – это неконтролируемый растительный пожар, который стихийно распространяется на лесной территории. Пожары оказывают влияние на формирование и развитие природных ландшафтов, а также на их изменение. В результате пожара изменяются видовой и численный состав флоры и фауны, характер почвообразования, структура древостоев. Негативным проявлением изменения считается уничтожение биогеоценоза и рост уязвимости леса к различным болезням, а положительным – уничтожение уже имеющихся очагов заболеваний (10% и более поврежденных деревьев) и вредителей. Также считается, что лесные пожары могут высвобождать ценные питательные

вещества, которые скрыты в лесной подстилке. А семена, опавшие с выживших после пожара древостоев, лучше приживаются при высокой температуре выжженного надпочвенного покрова. Например, березняки, поврежденные пожаром, дают обильные побеги из пня, а осина дает побеги подвоя.

В современных лесах такие породы древостоев, как сосняки, лиственницы и лиственничные, занимают значительные площади. Если бы не пожары, эти виды были бы заменены темнохвойными. Считается, что в процессе эволюции светолюбивые виды приобрели высокую устойчивость к пожарам. Сосновые и лиственные древостои выработали структурные характеристики, такие как толстая кора в нижних частях стволов, глубокая корневая система и высокая, прямая корона. Слой опавшей с лиственницы хвои, благодаря своему особому химическому составу и строению, практически не горит, поэтому огонь обходит молодые лиственничные леса [10].

Одна из важных особенностей лесных пожаров – смена древостоя. Например, хвойные породы (кедр, ель, пихта) сменяются на лиственные (береза, осина), а среди хвойных происходит смена елового леса на сосновый. Если лесные пожары полностью прекратятся в бореальной зоне, то, вероятнее всего, произойдет доминирование темнохвойных древостоев. Считается, что высококачественные леса вырастают на месте пожарниц [7].

Также, лесные пожары различной интенсивности и тяжести являются профилактической мерой против более серьезных пожаров. Поскольку такие пожары уничтожают часть сухого почвенного покрова, подстилки, мертвую древесину и молодой рост, серьезные пожары, полностью уничтожающие лес, невозможны даже в самую сухую погоду.

Таким образом, лесные пожары, которые вызваны естественными причинами, являются необходимым условием выживания уже существующих биогеоценозов или способствуют обновлению и омоложению экосистемы. Несмотря на постоянные лесные пожары, биомасса лесов растет.



### 1.2.1 Возникновение и виды лесных пожаров.

Существует «триада загорания леса», которая включает в себя три составляющие: наличие лесных горючих материалов (ЛГМ), их «зрелость» – условия возгорания (готовность к воспламенению, скорость распространения огня, зависит от метеорологических условий) и источник огня. При отсутствии одного из компонентов пожар невозможен (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Триада возгорания леса (по автору)

Причины возникновения делят на два основных типа:

- естественные (природные: молнии);
- искусственные (антропогенные: пал травы, костры, взрывы, осколки светоотражающих предметов, например, линз).

На сегодняшний день наибольшая доля у первичных очагов лесных пожаров, возникших в результате действий человека, например, во время хозяйственной или рекреационной деятельности, но природа способствует созданию условий для возникновения пожаров и распространения [13].

Основные факторы пожарной опасности лесов – метеорологические условия (повышенная температура, засуха или выпадение осадков в небольшом

количестве, низкая влажность, ветры, грозовая деятельность) и растительный состав ландшафтов леса (его тип, например, лиственный).

Из-за того, что грозы часто сопровождаются дождями, не всегда молния, попадая в лес, вызывает пожар. Существуют «сухие» грозы, которые вызывают пожары прямо во время грозы или после ее окончания. Такие грозы происходят из-за минимального количества осадков, когда температура воздуха высокая, а относительная влажность низкая. После попадания молнии в подстилку образуется тлеющий очаг, развитие в пожар происходит после высыхания подстилки. Так как высыхание может длиться больше недели, то тлеющие очаги развиваются в пожары спустя несколько дней. Из-за этого большая часть пожаров, вызванных грозовой деятельностью, при учете относится к антропогенным или причина возникновения остается неизвестной. Считается, что от молний в среднем происходят в среднем до 10% пожаров, но, однако, доля таких пожаров превышает 20% [13].

Выделяются три вида лесных пожаров:

- низовые;
- верховые;
- торфяные.

В большинстве случаев (до 95-97%) лесные пожары – низовые. Они распространяются по лесной подстилке, опаду и нижнему ярусу растительности. Основные лесные горючие материалы – подрост, напочвенный покров, подлесок, валежник) (рис. 1.6).

Пожары подразделяются также по скорости распространения пожара и характеру горения на беглые и устойчивые пожары. Беглые (скорость более 0,5 м/мин) характерны для ранней весны, когда «зрелости» достигают верхние слои опада и подстилки, а также отмершей травы. Во время этих пожаров деревья обычно не повреждаются, однако в хвойных молодняках пожары могут перейти в верховые.



Рисунок 1.6 – Низовой пожар (Свердловская область)  
(<https://moluch.ru/>)

Устойчивые низовые пожары (менее 0,5 м/мин) характерны для лета и ранней осени. Во время такого пожара погибают напочвенный покров и подрост, могут повреждаться корни древостоев и нижние части стволов. На торфяных почвах пожары могут переходить в торфяные пожары, а в молодняках и многоярусных насаждениях – в верховые [14].

Верховой пожар – пожар, охватывающий весь полог леса. Возникает из низового, считается дальнейшей стадией развития низового, а низовой огонь – составная часть верхового пожара. Причины перехода низового пожара в верховой: сомкнутость древесного полога, наличие густого хвойного подроста и подлеска, а также другие факторы: сильные ветры, большая крутизна склонов (если распространение началось в гору). Возникает также в летний период и ранней осенью при сильных ветрах (рис.1.7) [14].



Рисунок 1.7 – Верховой пожар (Красноярский край)  
(<https://moluch.ru/>)

Верховой пожар делится, как и низовой, на беглый и устойчивый (повальный). При устойчивом кроны древостоев сгорают по мере продвижения кромки низового пожара, а самостоятельного продвижения не происходит. При беглом – скорость распространения горения по пологу может опережать продвижения кромки низового. У такого пожара наблюдается скачкообразное движение, распространение огня по пологу очень быстрое – скорость 75 м/мин и более. Верховым пожарам наиболее подвержены хвойные молодняки, заросли кедрового стланика и дуба кустарниковой формы (весной при наличии сухих прошлогодних листьев) [8, 18].

Самым опасным видом пожаров считается торфяной (подземный), когда горит торфяной слой, обгорают корни древостоев, находящиеся там. В момент пожара присутствует характерный запах горящего торфа (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Торфяной (подземный) пожар (Свердловская область)  
(<https://www.e1.ru/>)

Скорость распространения торфяного пожара обычно небольшая и стабильная (несколько метров в день). Но он опасен, так как выгорание торфа происходит под землей, что довольно сложно увидеть с поверхности, даже спутниками. Пожар может быть только устойчивым. Возникает и распространяется из-за «заглубления» огня низового пожара в подстилку и торфяной слой почвы.

### **1.3 Территория и объект исследования**

#### **1.3.1 Территория исследования**

Территория исследования расположена в Северном и Восточном полушариях, на материке Евразия, в азиатской части света. Территориальные границы исследования ограничены с севера  $60^{\circ}$  с. ш., с востока  $90^{\circ}$  в. д. (рис. 1.9).



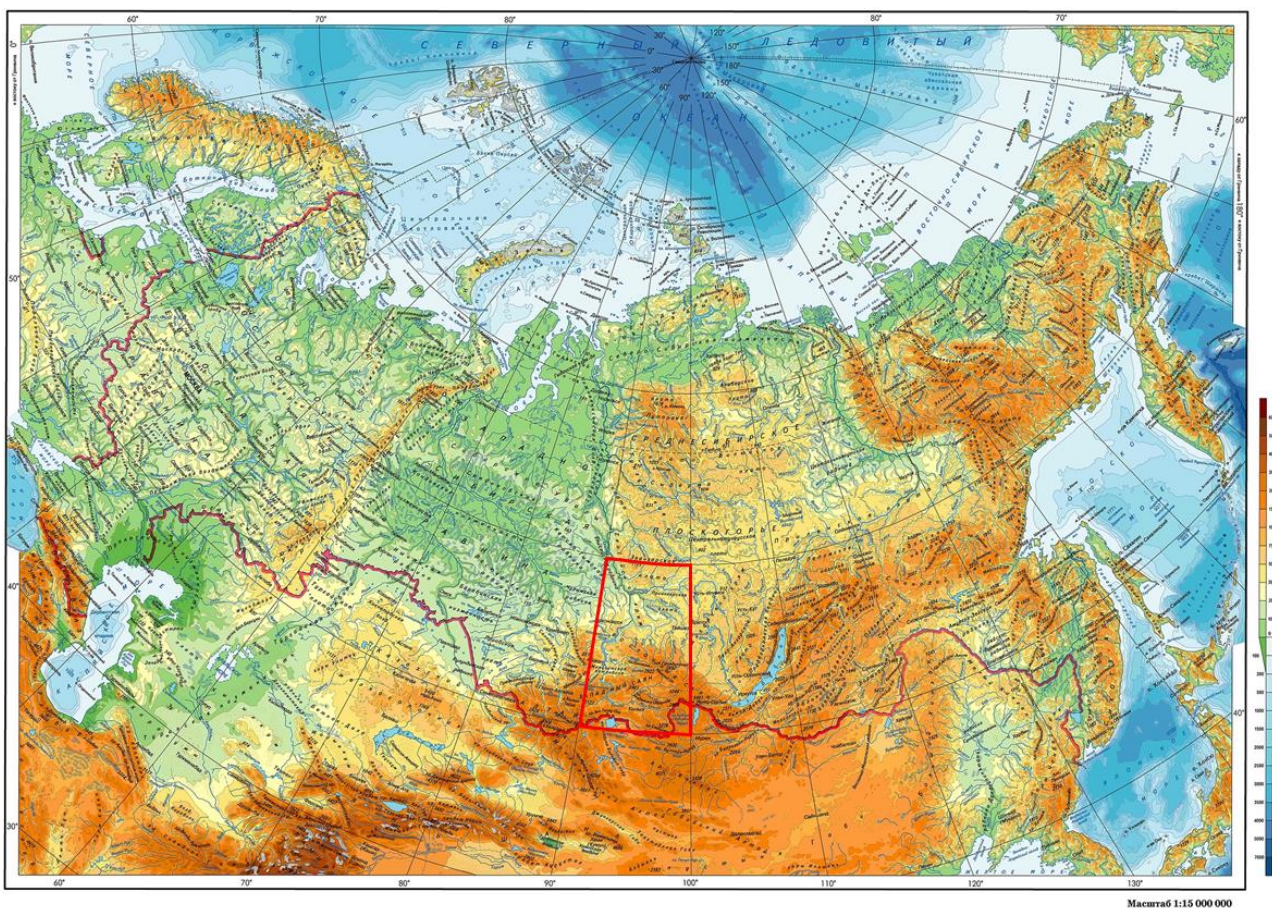


Рисунок 1.9 – Физическая карта России (красным цветом – тестовый участок исследования) (Национальный Атлас России, Том №1)

Основная территория тестового участка – центральная часть Южной Сибири, а именно, юг Красноярского края и затронутые участки восточной части Республики Хакасия, северной части Республики Тывы и западной части Иркутской области.

В физико-географическом отношении в район включена часть Южно-Сибирской горной зоны, которая в целом охватывает большую часть Западного Саяна и северо-западную часть Восточного Саяна. Общая площадь лесов составляет 5,6% от общей площади лесов Красноярского края (158,7 млн га, 72,1% территории).

### 1.3.2 Объект исследования

Леса России имеют планетарное значение и играют значимую роль в глобальных процессах регулирования состояния окружающей среды и предотвращения негативных изменений климата. Леса – крупнейшие в мире поглотители углекислого газа (CO<sub>2</sub>). На их долю приходится до одной третьей чистого депонирования углерода лесов планеты [5].

Площадь покрытой лесной растительностью земель России – 1 187, 6 млн га, а Сибири – примерно 420 млн га. Площадь лесного покрытия исследуемой зоны – 48,97 млн га (рис. 1.10).

На территории страны леса распределены неравномерно. Основная часть лесов расположена в бореальном поясе (холодный, умеренно-холодный и умеренный климат) и составляет около 60% всех бореальных лесов мира и 95% площади всех сомкнутых лесов России [15].

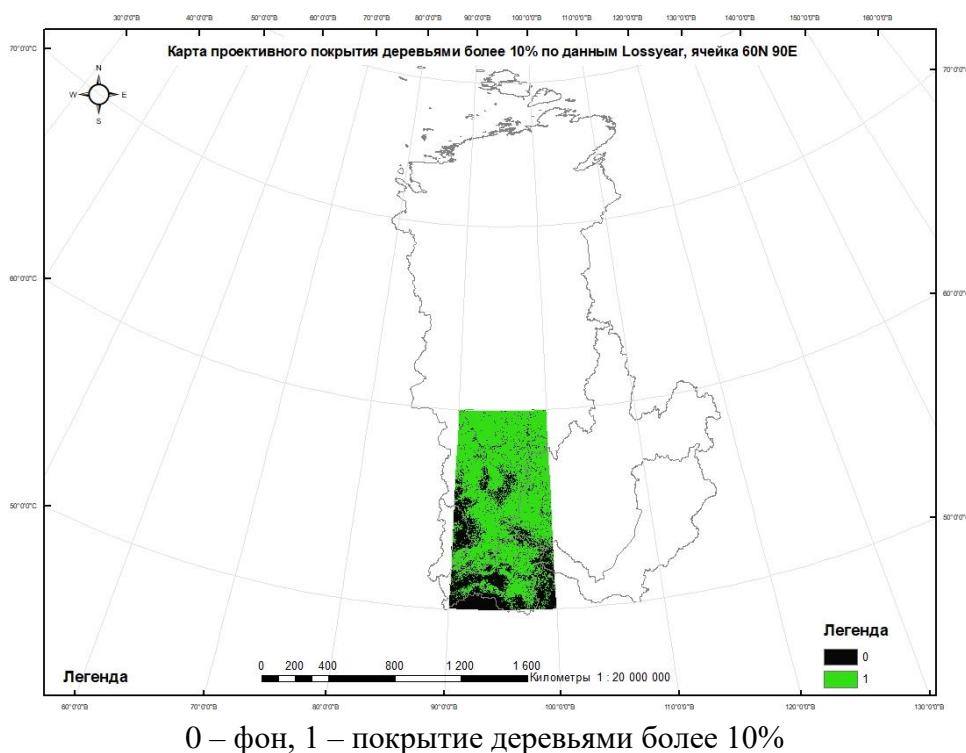


Рисунок 1.10 – Карта проективного покрытия деревьями более 10%, ячейка 60N 90E, (по автору, на основе TreeCover по состоянию на 2000 г.)

На формирование растительного покрова существенное влияние оказывали особенности континентального климата, наличие длительной сезонной и многолетней мерзлоты, сильно расчлененный рельеф и большое разнообразие литологического состава горных пород.

На исследуемой территории преобладают такие древостои, как: лиственные, лиственничные (береза, осина), сосновые, темнохвойные (кедр, ель, пихта).



## **2 Используемые материалы**

В исследовании использовались пространственно-временные данные о лесном покрове, полученные на основе данных дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat и MODIS. Разбитие итогового раstra лесных гарей на основе данных по гарям MCD64A1 и по данным карты Global Forest Change по древесным породам производилось на основе карты преобладающих древесных породы (2010), которая является продуктом Land Cover.

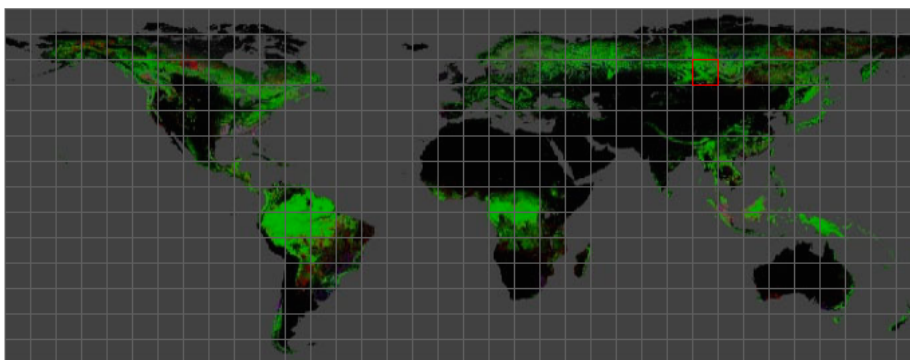
### **2.1 Данные об исчезновении леса (lossyear)**

Компания Google совместно с Лабораторией глобального анализа и обнаружения земель (GLAD) Университета Мэриленда в партнерстве со Всемирным лесным дозором (GFW) (веб-приложение) и Геологической службой США запустила глобальную карту вырубки лесов, используя глобальные данные Landsat с пространственным разрешением 30 метров, чтобы охарактеризовать площади лесов, их утрату и прирост с 2000 по 2021 годы. Глобальные данные Landsat являются относительным показателем пространственно-временных тенденций в глобальной динамике потерь лесов [31].

Глобальный набор данных разделен на сетке размером 10x10 градусов, состоящие из семи файлов. Деревья определяются как растительность высотой более 5 м и выражаются в процентах на ячейку выходной сетки. Все файлы содержат 8-разрядные значения без знака и имеют пространственное разрешение 1 угловая секунда на пиксель, или приблизительно 30 метров на пиксель на экваторе. Только Lossyear и Last обновляются ежегодно. Виды данных на сайте представлены на рисунке 2.1.

## Download Instructions

To download individual 10x10 degree granules, click on a region on the map below and then click on the URLs underneath it.



Granule with top-left corner at 60N, 90E:

[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_treecover2000\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_treecover2000_60N_090E.tif)  
[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_gain\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_gain_60N_090E.tif)  
[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_lossyear\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_lossyear_60N_090E.tif)  
[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_datamask\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_datamask_60N_090E.tif)  
[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_first\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_first_60N_090E.tif)  
[https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen\\_GFC-2021-v1.9\\_last\\_60N\\_090E.tif](https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/Hansen_GFC-2021-v1.9_last_60N_090E.tif)

Ссылки (подчеркнутые) на растры данных для ячейки 60N 90E  
(красный квадрат на карте-схеме)

Рисунок 2.1 – Данные об исчезновении лесов на сайте Мэриленд  
(<http://earthenginepartners.appspot.com/>)

На интерактивной карте присутствуют вкрапления красного цвета. Они показывают зоны усыхания (обезлесения) – леса, которые исчезли за 2001-2021 годы. На территории России такие зоны распространены в Сибири и на Дальнем Востоке. Основная причина этого – лесные пожары и вырубki, вследствие чего идут потери огромного количества древостоя.

Потеря леса в период 2001-2021 гг., определяемая как нарушение замещения древостоя или переход от лесного к нелесному состоянию, кодируется либо 0 (без потерь), либо как значение в диапазоне 1-21, представляющее потери, обнаруженные в основном в 2001-2021 годах, соответственно.

В работе брались ссылки на растры данных для выбранной ячейки, например, `Hansen_GFC-2021-v1.9_lossyear_60N_090E.tif` и `Hansen_GFC-2021-v1.9_treecover2000_60N_090E.tif`.

## 2.2 Данные MODIS Active Fire Product – продукт Burned Area (MCD64A1)

Пожар – это сложный биофизический процесс с многочисленными прямыми и косвенными воздействиями на атмосферу, биосферу и гидросферу. Более того, в настоящее время широко признано, что в некоторых пожароопасных средах нарушение пожарной безопасности необходимо для поддержания экосистемы в состоянии равновесия [25].

Существует два основных источника данных о пожарной активности, характеризующиеся своими специфическими подходами: активные очаги горения (active fires, hotspots) и сгоревшие площади (burned areas). Подход к детектированию очагов обладает рядом ограничений и не может быть использован для оценки пространственного охвата пройденных огнём территорий в том числе и из-за того, что в момент активного горения спутник часто отсутствует в точке необходимой для детектирования или она скрыта от него облачностью. Таким образом, возникает потребность в площадных данных о сгоревших территориях.

До недавнего времени подобная информация отсутствовала в глобальном масштабе. В последнее десятилетие ситуация стала меняться: было выполнено множество работ по разработке алгоритмов обнаружения сгоревших площадей и их картированию на базе данных дистанционного зондирования низкого (около 1000 м) и среднего (250-500 м) пространственных разрешений (ERS ATSR, NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION и MODIS). Из всех вышеназванных сенсоров – MODIS больше других подходит для задач мониторинга сгоревших площадей, поскольку он обладает отличными показателями временного разрешения [9].

Основными спутниками для выявления лесных пожаров являются спутники TERRA (на орбите с 1999 г.) и AQUA (на орбите с 2002 г.) с установленным на их борту спектрометром MODIS (Moderate Resolution

Imaging Spectroradiometer). Основные характеристики спектрорадиометра MODIS представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики спектрорадиометра MODIS (по автору, на основе MODIS)

Основное использование (объекты)	№ каналов	Спектральный диапазон (мкм)	Пространственное разрешение (м)	Полоса обзора (км)
Границы суши / облаков	1–2	0,62-0,88	250	2300
Свойства суши / облаков	3–7	0,46-2,16	500	2300
Цвет океана, фитопланктон, биогеохимия	8–16	0,41-0,88	1000	2300
Водяной пар в атмосфере	17–19	0,89-0,97	1000	2300
Температура поверхности / облаков	20–23	3,66-4,08	1000	2300
Температура воздуха	24–25	4,43-4,55	1000	2300
Перистые облака, водяной пар	26–28	1,36-1,39	1000	2300
Свойства облаков	29	8,40-8,70	1000	2300
Озон	30	9,58-9,88	1000	2300
Температура поверхности / облаков	31–32	10,78-12,27	1000	2300
Высота верхней границы облаков	33–36	13,18-14,38	1000	2300

Благодаря широкой обзорной полосе шириной 2330 км MODIS видит каждую точку Земли каждые 1–2 дня в 36 дискретных спектральных диапазонах. Следовательно, MODIS отслеживает более широкий спектр жизненно важных показателей земли, чем любой другой датчик Terra. Полосы MODIS особенно чувствительны к пожарам; они могут отличать активные очаги от тлеющих и обеспечивают лучшую оценку количества аэрозолей и газов, которые пожары выбрасывают в атмосферу [30].

В данной работе использовался продукт Burned Area со спутника TERRA спектрорадиометра MODIS. Кодовое название продукта MCD64A1.

Комбинированный продукт Terra и Aqua MCD64A1 версии 6 с данными о площади сгоревших участков представляет собой ежемесячный продукт с глобальной сеткой в 500 метров, содержащий информацию о площади и

качестве сгоревших участков в расчете на пиксель. Метод обнаружения участков с гарью, разработанный для MCD64A1, основан на анализе временных серий ежедневных данных об отражательной способности поверхности. Алгоритм использует индекс растительности, чувствительный к выгоранию, для создания динамических пороговых значений, которые применяются к составным данным отражения земной поверхности (рис. 2.2) [21, 26].

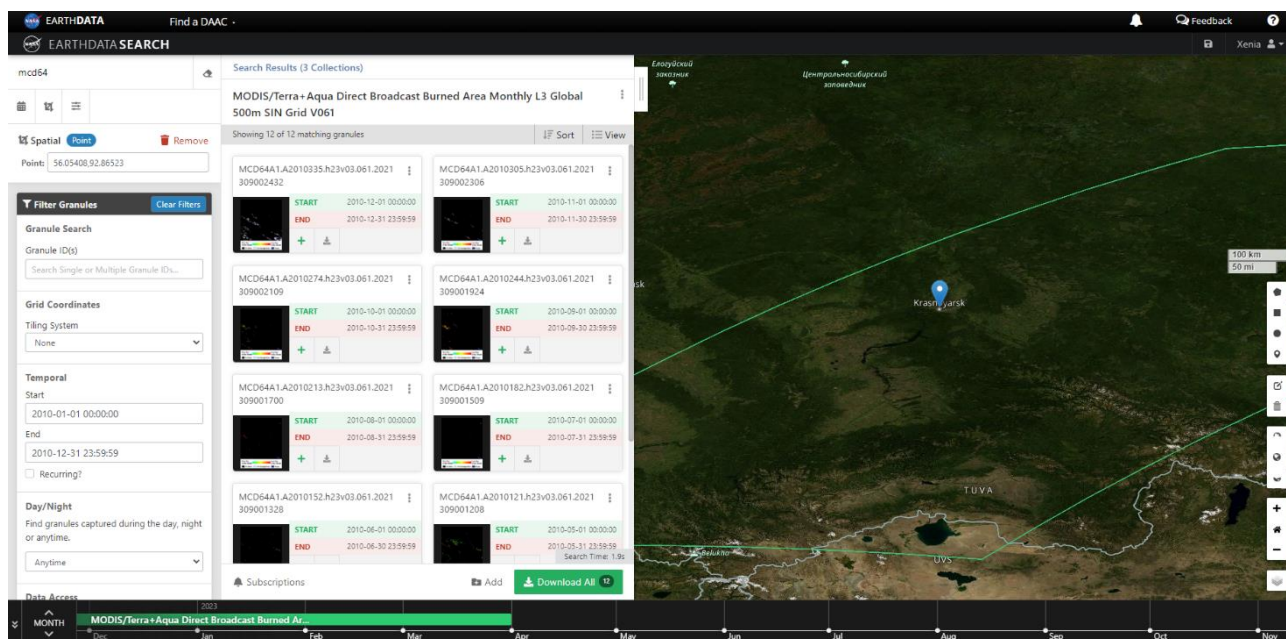


Рисунок 2.2 – Скриншот с геопортала EarthData с выбранными данными для анализа (<https://www.earthdata.nasa.gov/>)

Основные характеристики гарей: осадки угля и золы, отсутствие или изменение структуры растительности и древостоя, изменение температуры.

В каждом пикселе имеется информация:

- Наличие гарей, если значение пикселя от 1 до 366 и отсутствие гарей, если значение пикселя 0;
- Специальный код, указывающий на отсутствие решения при недостаточности, плохом качестве или размытости данных [20].

Одним из самых важных достоинств алгоритма является то, что он отображает пространственные масштабы последних пожаров, а не пожаров, которые происходили в предыдущие сезоны и годы. Данный продукт ведет

учет сильных пожаров. Плохо отображает низовые пожары, так же облачность снижает эффективность работы алгоритма Burndate. Алгоритм работает с точностью 8 дней до и после того месяца, в котором обнаружена гарь. Таким образом, период времени, в котором могла появиться гарь, составляет 56 дней.

В работе использовался MODIS/Terra+Aqua Direct Broadcast Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V061. Это последняя версия данных о гарях, создаваемая NASA на основе съемки MODIS. Каждая найденная гранула в своем названии, например, MCD64A1.A2010032.h22v03.061.2022102000753.hdf, содержит дату (10-13 символы – 2022032 – год 2010 и 032 день года) и номер гранулы (h22v03 – условно строка 22 столбец 03). Далее, эти гранулы скачиваются в текстовом файле, после чего импортируются в файл Hierarchical Data Format, HDF (формат файла, разработанный для хранения большого объема данных).

### **2.3 Карта преобладающих древесных пород (2010)**

Карта преобладающих древесных пород за 2010 год получена с сайта ВЕГА-PRO (спутниковый сервис анализа вегетации) (рис. 2.3).

ВЕГА-PRO – информационный сервис для профессиональной работы с обновляемыми в режиме близком к реальному времени архивами спутниковых данных и другой геопространственной информацией, обеспечивающий решение широкого круга задач оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов [3].

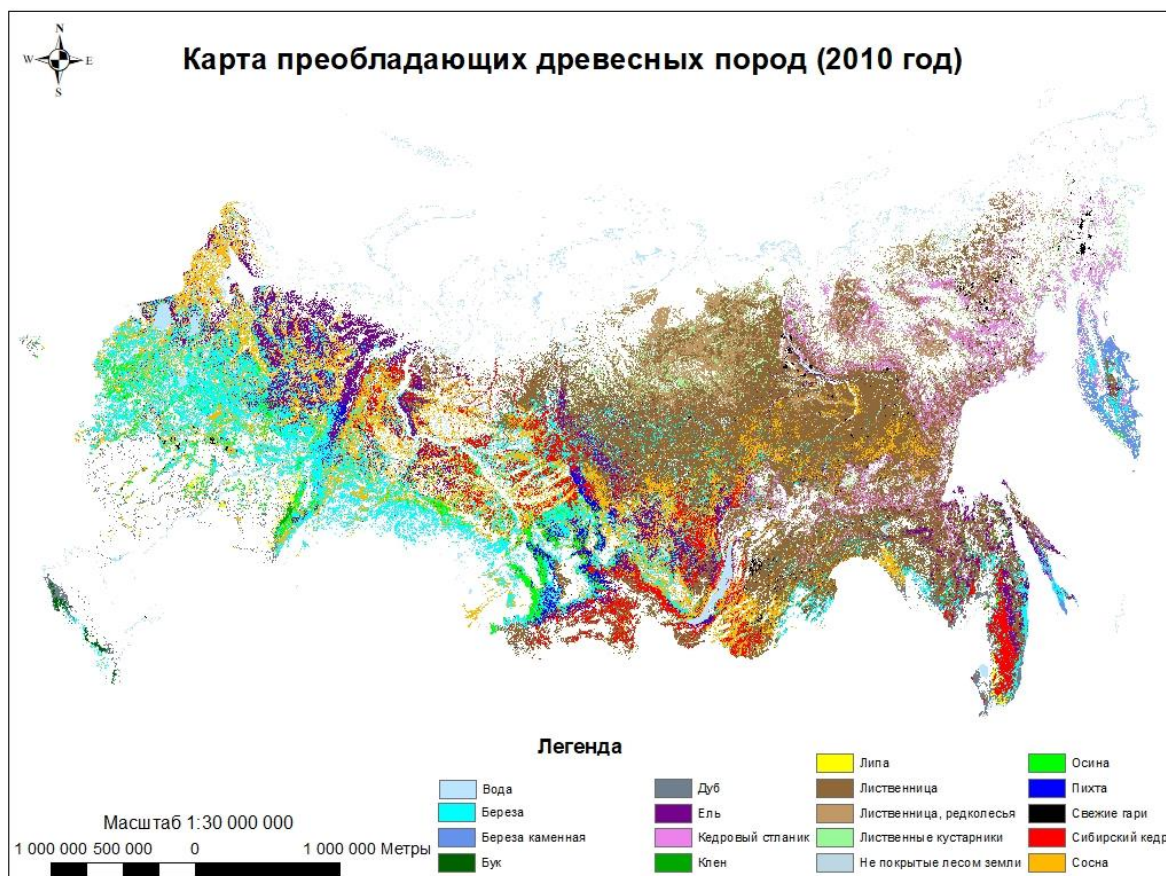


Рисунок 2.3 – Карта преобладающих древесных пород (2010 год)  
(по автору, на основе ВЕГА-PRO)

Карта преобладающих древесных пород является продуктом Land Cover для территории России на основе спутниковой классификации данных Terra-MODIS. Пространственное разрешение изделия составляет 230 м. Метод классификации основан на использовании локально-адаптивного алгоритма глобального картирования, разработанного Институтом космических исследований РАН. Карта создана на основе данных спутниковых наблюдений за 2010 год.

Локально-адаптивный метод классификации изображений LAGMA (Локально-адаптивный алгоритм глобального картографирования) был разработан для удовлетворения требований картографирования растительного покрова на больших площадях с использованием данных дистанционного зондирования. LAGMA включает в себя сетчатую контролирующую



классификацию изображений с использованием объектов классов, оцененных локально в окружающих классифицированных пикселях из пространственно распределенных справочных данных. LAGMA учитывает неотъемлемые пространственные вариации признаков классов и способна использовать дискриминационные свойства сигнатур локальных классов без какой-либо предварительной стратификации области картографирования. LAGMA был применен для классификации растительного покрова в масштабах всей страны над Российской Федерацией с использованием данных прибора растительности на борту спутника SPOT (спутник для наблюдения за Землей) и продемонстрировал преимущества с точки зрения точности распознавания [16, 19].

Легенда карты состоит из 17 тематических классов, описывающих различные классы древостоев и не растительного покрова: 15 классов древостоев (береза, береза каменная, бук, дуб, ель, кедровый стланик, кедр, липа, лиственница, редколесья, лиственные кустарники, осина, пихта, сибирский кедр, сосна) и 2 нерастительных типа (водные объекты, свежие гари).

## **2.4 Программное обеспечение**

В качестве программного обеспечения был использован ESRI ArcGIS 10.8 – основной профессиональный ГИС-пакет компании ESRI, который позволяет производить все операции от первичной обработки снимка до подготовки карты к печати. ArcGIS распространяется на коммерческой основе. В программном пакете ArcGIS 10.8 проведена обработка пространственных данных.

В ГИС-пакете есть огромный набор инструментов, доступный для выполнения пространственного анализа и управления ГИС-данными в автоматическом режиме. Также есть возможность корректировать и изменять



географические данные, а также создавать свои инструменты при помощи языка программирования Python. Системный набор представлен на рисунке 2.4.

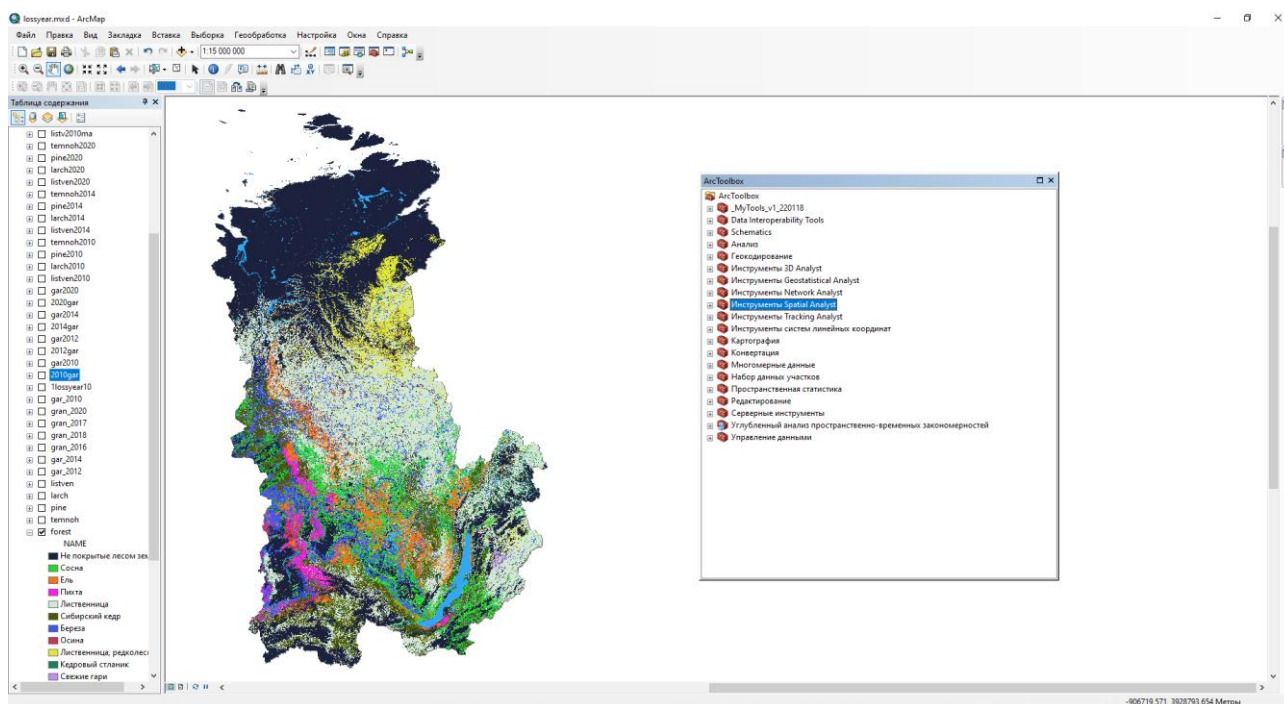


Рисунок 2.4 – Программа ArcMap и наборы инструментов для геообработки  
(по автору)

Для статистической обработки и представления результатов использованы средства пакета Microsoft Office.

## **3 ГИС-анализ усыхания лесов центральной части Южной Сибири**

**Глава 3 извлечена полностью**

## **4 Анализ полученных данных исчезновения лесов на территориях гарей центральной части Южной Сибири**

**Глава 4 извлечена полностью**

## **5 Результаты анализа усыхания лесов в результате воздействия пожаров**

**Глава 5 извлечена полностью**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа материалов дистанционного зондирования исследовано усыхание древостоев в результате пожаров в центральной части Южной Сибири в период начала 21 века.

Использование современных ГИС-инструментов позволило автоматизировать обработку большого объема информации. Разработана методика исследования, обработаны временные серии пространственных данных об исчезновении лесов (далее, об исчезновении лиственных, лиственничных, сосновых и темнохвойных древостоев) в центральной части Южной Сибири, сформирована маска гарей для выделения территорий с гарями в пределах исчезнувших лесов. Также произведен анализ данных об исчезновении лесов.

В хвойных лесах верховой пожар может привести к гибели значительной части древостоя без дальнейшего усыхания в следующие годы. В 2010 году доля погибших древостоев составила 20% от всей площади исчезнувших лесов на исследуемой территории, а в 2014 году – 55%. Такие повреждения показываются на данных Global Forest Change.

Другие пожары, например, низовые, повреждают напочвенный покров, но при этом верхний полог леса слабо повреждается и выживает, соответственно Global Forest Change не показывает исчезновение лесов. Такие пожары часто возникают в лиственных и лиственничных лесах.

Данное исследование подтвердило усыхание древостоев в результате лесных пожаров на территории центральной части Южной Сибири, показало возможность изучения данного вопроса при помощи ГИС-технологий. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего анализа исчезновения лесов в результате других факторов, например, влияние климата и рельефа местности, или, наоборот, для анализа восстановления лесов на гарях после пожаров. Также, возможно продолжение исследования в магистерской работе, например, анализ усыхания темнохвойных лесов, их поведение при

пожарах и после, вероятность восстановления; или исследование лесных пожаров на северных территориях, их влияние на изменение границ древостоев.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адамович, Т. А. Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор) / Т. А. Адамович, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор // Теоретическая и прикладная экология. – 2017. – №2. – С. 9–18.
2. Василяускас, В. Усыхание ельников в Литве и главные их причины / В. Василяускас // Проблемы усыхания еловых насаждений : материалы междунар. науч.-практ. семинара. – Минск : ООО “КолорПоинт”, 2013. – С. 11.
3. ВЕГА-PRO : сайт / Спутниковый сервис анализа вегетации. – URL: <http://pro-vega.ru/descriptions.sht> (дата обращения 13.05.2023).
4. Возникновение лесных пожаров : сборник статей / Акад. наук СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины ; [Отв. ред. канд. с.-х. наук Н. П. Курбатский]. – Москва : Наука, 1964. – 184 с.
5. Всемирный фонд дикой природы (WWF) : сайт / WWF. – URL: <https://wwf.ru/> (дата обращения: 12.04.2023).
6. Гизатуллин, А. Т. Разработка методов использования данных дистанционного зондирования Земли для предупреждения природных пожаров / А. Т. Гизатуллин // Географический вестник: Картография и геоинформатика. – 2021. – №1. – С. 149–161.
7. Гонгальский, К. Б. Лесные пожары и почвенная фауна / К.Б. Гонгальский. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 169 с.
8. ГОСТ Р 22.1.09-99 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования = Safeti in emergencies. Monitoring and forecasing of forest fire. General requirements : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 25 мая 1999 г. № 181 : введен впервые : дата введения 2000-01-01 / разработан Федеральной службой лесного хозяйства России, ВНИИлесхозом с участием Технического комитета по стандартизации ТК17 «Гражданская оборона,

предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» и Агентства по мониторингу и прогнозированию чрезвычайных ситуаций МЧС России. – Москва : ИПК Из-во стандартов, 1999. – 9 с.

9. Данные о сгоревших площадях MCD45: описание и получение : сайт / GIS-Lab. – URL: <https://gis-lab.info/qa/mcd45.html> (дата обращения: 13.05.2023).

10. Каницкая Л. В. Лесная пирология : учеб. пособие / Л. В. Каницкая. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2013 – 206 с.

11. Леса России : сайт / Федеральное агентство лесного хозяйства. – URL: <https://rosleshoz.gov.ru/> (дата обращения: 07.05.2023).

12. Лупян, Е. А. Лесные пожары на территории России в 2019 году. Аномалия или тенденция / Е. А. Лупян, И. В. Балашов, С. А. Барталев, К. С. Сенько // Материалы Семнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 15.11.19.» – ИКИ РАН – Москва, 2019. – С. 7–13.

13. Меркулов, П.И. Лесные пожары как опасные природные явления (на примере Республики Мордовия) / Меркулов П.И., Меркулова С.В., Хлевина С.Е. // Научное обозрение : электронный журнал – 2016. – № 2. – URL: <https://srjournal.ru/2016/id21> (дата обращения: 07.05.2023).

14. МЧС России. Главное управление по Красноярскому краю : сайт / МЧС России. – URL: <https://24.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 10.04.2023).

15. Основные типы леса Сибири : учебное пособие для студентов специальности 25.02.01 / В.А. Иванов, О.П. Каленская, А.Г. Лузганов, Л.В. Буряк. – Красноярск : СибГТУ, 2012. – 140 с.

16. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян. – Москва : ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

17. Ушаков, М. И. Лесной пожар и его влияние на лес / М. И. Ушаков, И. О. Николаева, А. В. Фролова, А. М. Морозов // Молодой ученый. – 2016. – № 1 (105). – С. 282-286. – URL: <https://moluch.ru/archive/105/24977/> (дата обращения: 12.05.2023).



18. Цветков, П. А. О последствиях лесных пожаров в Сибири / П. А. Цветков // Хвойные бореальной зоны. – 2013. – Т. 31, № 5–6. – С. 10–14.
19. Черпаков, В.В. Усыхание лесов: взаимоотношения организмов в патологических процессах / В.В. Черпаков // Актуальные проблемы лесного комплекса. – Брянск, 2011. – № 28. – С. 155-160.
20. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters, 2014. 5(1). P.55-64.
21. Caetano, M. S. Using spectral mixture analysis for fire severity mapping / M. S. Caetano, L. A. Mertes, J. M. Pereira // Proceedings of 2nd international conference on forest fire research. – 1994. – № 6. – P. 667-677.
22. Calle A. Forest Fires and Remote Sensing / A. Calle, J. L. Casanova // Earth Observation. – University of Valladolid, Spain, 2012. – pp. 177-202.
23. Global Forest Resource Assessment 2020 : сайт / Food and Agriculture Organization of the United Nations. – URL : <https://www.fao.org> (дата обращения: 07.05.2023).
24. Landsat Science : сайт / NASA. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-news/> (дата обращения: 13.04.2022).
25. MODIS ACTIVE FIRE AND BURNED AREA PRODUCTS : сайт / MODIS-fire. – URL: <https://modis-fire.umd.edu/index.html> (дата обращения: 10.04.2023).
26. MODIS/Terra+Aqua Direct Broadcast Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006: сайт / NASA Earth Data. – URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=mcd64%20v006&ok=mcd64%20v006> (дата обращения 13.05.2022).
27. Remote sensing : сайт / GIS Geography. – URL: <https://gisgeography.com/> (дата обращения 14.06.2023).
28. Remote Sensing Satellites for Digital Earth / W. Fu, J. Ma, P. Chen, F. Chen // Manual of Digital Earth. – 2019. – pp. 55-123.

29. Schowengerdt, Robert A. Techniques for image processing and classification in remote sensing / Robert A. Schowengerdt // Remote sensing, models, and methods for image processing. – San Diego : Academic Press, 1997. – p. 483-516.

30. Terra Spacecraft : сайт / NASA. – URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/spacecraft/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html) (дата обращения: 15.04.2023).

31. University of Maryland department of geographical sciences // Global Forest Change 2000–2021. – URL: <https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2021-v1.9/download.html> (дата обращения: 12.05.2023).


32. What is Remote Sensing : сайт / EARTHDATA. – URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing> (дата обращения: 10.06.2023).

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт экологии и географии  
Кафедра географии

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись

Г.Ю. Ямских

инициалы, фамилия

«13» июля 2023 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

05.03.02 География

05.03.02.02 Физическая география и ландшафтоведение

**Анализ усыхания лесов в результате воздействия пожаров по данным  
дистанционного зондирования Земли**

Научный  
руководитель

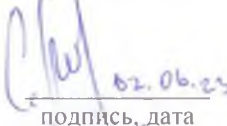


подпись, дата

доц., канд. техн. наук  
должность, учёная степень

С. Т. Им  
инициалы, фамилия

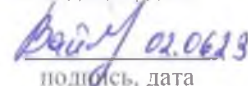
Выпускник



подпись, дата

К. С. Яньшина  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер



подпись, дата

И. А. Вайсброт  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023