

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Институт космических и информационных технологий  
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А.А. Гостева

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Использование снимков Landsat в анализе динамики восстановления лесов,  
поврежденных сибирским шелкопрядом

09.04.02 Информационные системы и технологии  
09.04.02.06 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге  
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	_____	<u>доц., канд. биол. наук</u>	Е.В. Федотова
	подпись, дата	должность, ученая степень	
Выпускник	_____		Н.А. Пучкова
	подпись, дата		
Рецензент	_____	<u>ст.науч.сотр.,</u>	А.С. Шушпанов
	подпись, дата	<u>канд.биол.наук.</u>	
		должность, ученая степень	
Нормоконтролер	_____		Е.В. Федотова
	подпись, дата		

Красноярск 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Исследуемая территория.....	6
2 Обзор методов использования данных дистанционного зондирования для изучения территорий с поврежденными лесами .....	9
3 Исходные данные .....	13
3.1 Исторические бумажные карты .....	14
3.2 Цифровая модель рельефа SRTM .....	16
3.3 Цифровые карты растительности исследуемой территории .....	18
3.4 Характеристики приборов Landsat 2 MSS и Landsat 8, 9 OLI .....	18
3.5 Используемое программное обеспечение.....	22
3.6 Платформа Google Earth Engine .....	23
4 Предварительная обработка данных .....	26
4.1 Скачивание данных из архива Геологической службы США USGS .....	26
4.2 Нахождение экспозиции и крутизны склонов.....	26
4.3 Классификация космических снимков Landsat 2 MSS 1975 и 1978 годов.	28
5 Результаты анализа пространственных связей данных 1931, 1978, 2021 года и рельефа.....	31
5.1 Положение сухих кедровников в 1931 году .....	31
5.2 Изменения распространения темнохвойных лесов.....	34
5.3 Динамика лесного покрова по результатам классификации снимков Landsat 2 MSS, Landsat 8-9 OLI .....	36
5.3.1 Классификация снимка Landsat 2 MSS 1975 года.....	36

5.3.2 Классификация снимков 2010, 2015 и 2021-22 годов и оценка динамики растительного покрова .....	38
5.4 Выделение усохших древостоев с помощью временных рядов водного индекса по данным MODIS .....	45
Заключение .....	50
Список использованных источников .....	52
Приложение А Скрипт вычисления среднемесячных значений NDWI из ежедневных данных MODIS MOD09GA_NDWI.....	55
Приложение Б Спектральные расстояния между обучающими выборками .....	57

## ВВЕДЕНИЕ

Сибирский шелкопряд является одним из наиболее опасных вредителей тайги. В периоды вспышек массового размножения в течение нескольких лет он распространяется на сотнях тысяч гектаров лесов и повреждает деревья, объедая иголки, что влечет чаще всего гибель деревьев. Вредитель постоянно присутствует в пихтовых и кедровых лесах Сибири, которые восстанавливаются после повреждения очень медленно и не всегда до первоначального состояния.

Анализируемая в работе территория была местом вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в конце XIX века. Это долина р. Большая Белая в Восточном Саяне, 52° с.ш., 102° в.д. Согласно [1] начало больших повреждений кедровой тайги в этом районе относится к 1885 г. Общая площадь поврежденных лесов исчисляется в несколько сот тысяч гектаров. Кедровники в исследуемом районе занимают сплошную полосу, тянущуюся на несколько десятков километров по направлению к гольцам, имеют сплошной характер на высотах от 700 до 1 700 м над уровнем моря. В 1931 году была проведена Ангарская лесная экспедиция, в ходе которой выявлено, что леса из кедра стоят усохшие. Территория поврежденных лесов представляла собой засохшие кедровые насаждения, необлесившиеся гари, покрытые в долинах рек мелкой березой. Сосновые леса занимают южные и юго-западные склоны.

Так как в южной тайге в настоящее время наблюдается усыхание темнохвойных лесов в результате как непосредственного влияния изменения климата (увеличение температуры, уменьшение влажности атмосферы и почвы), так и действия насекомых-вредителей, в том числе инвазивных, одной из задач исследования является выявление поврежденных древостоев на территории интереса.

Цель работы – выявить состояние лесов на исследуемой территории в настоящее время и выявить участки усыхающих лесов по материалам дистанционного зондирования.

Задачи:

- по космическим снимкам провести анализ растительного покрова территории с 1970–х годов по настоящее время;
- оценить площадь лесов разного породного состава;
- используя цифровую модель рельефа (ЦМР), определить характеристики рельефа лесных территорий;
- по временным рядам индекса NDWI вывести различия здоровых и поврежденных темнохвойных древостоев.

## 1 Исследуемая территория

Восстановление лесного покрова после поражения сибирским шелкопрядом изучается очень подробно со всех сторон. Так, Н.Ф. Реймерс [2] проводил наблюдения в шелкопрядниках на территории Иркутской области и Бурятии и пришел к выводу об успешном возобновлении кедра в случае отсутствия повторных пожаров. По наблюдениям в Томской области, В.А. Дудин (1958) пришел к выводу о том, что восстановление леса на шелкопрядниках идет через смену пород. Таким образом, процесс восстановления имеет региональные особенности, и многообразие факторов, влияющих на восстановление кедра приводит к различным результатам.

Процесс восстановления лесного покрова называется сукцессией. Сукцессия (преемственность, наследование) — это постепенная, необратимая, направленная смена одних биоценозов (исторически сложившаяся совокупность животных, растений, грибов и микроорганизмов, населяющих относительно однородное жизненное пространство, и связанных между собой окружающей их средой) другими на одной и той же территории под влиянием природных факторов или воздействия человека [3]. Значительный интерес представляет анализ современного состояния растительного покрова на территориях, где вспышка численности сибирского шелкопряда проходила в разное время достаточно давно, что позволяет оценить ход восстановительной сукцессии.

В данной дипломной работе исследовался лесной покров на территории Восточного Саяна в бассейне реки Большой Белой (52° с.ш., 102° в.д.), показанной на рисунке 1.

Анализируемая в работе территория – горная часть долины реки Большой Белой в Восточном Саяне, 52° с.ш., 102° в.д. (рисунок 1).

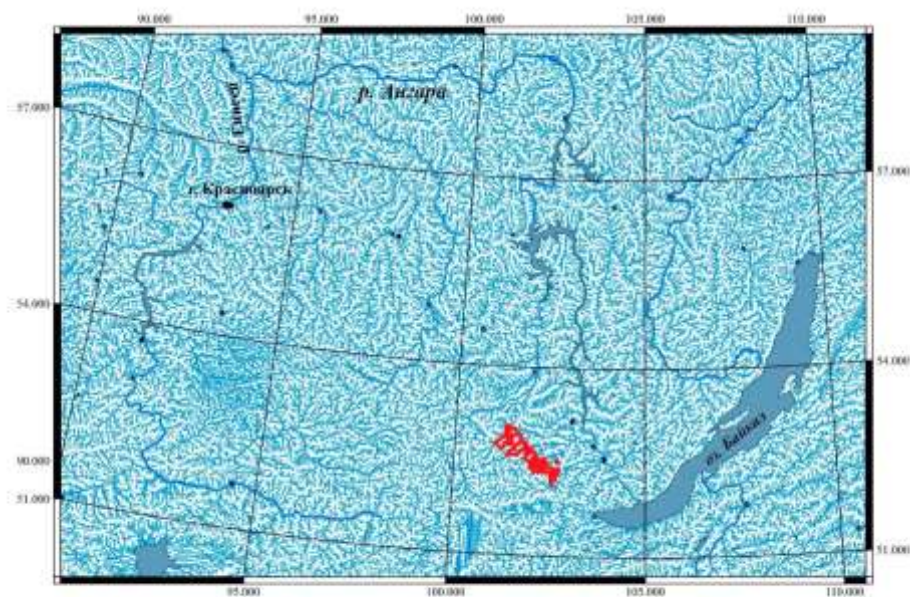


Рисунок 1 – Положение исследуемой территории на карте юга Сибири

На рисунке 2 показана территория усохших кедровников, суммарная площадь составляет 223900 га.

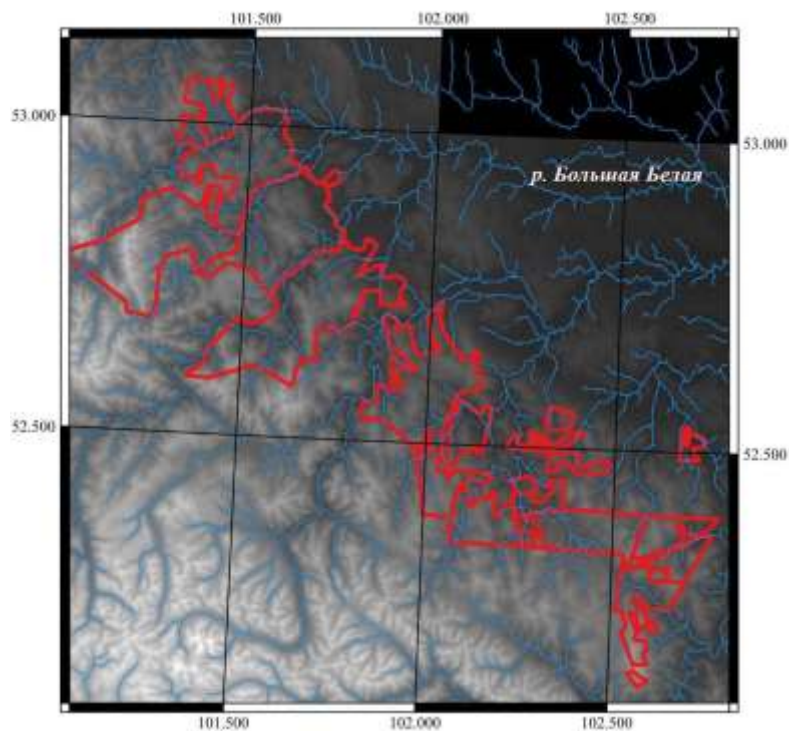


Рисунок 2 – Территория усохших кедровников

По характеру рельефа данную территорию можно разбить на три участка: северная часть – равнинная, южнее населенного пункта Инги она имеет холмистый рельеф, который затем к югу принимает горный характер с отметками от 1000 м до 2000 м н.у.м [1].

В исследуемом районе также протекает много рек, такие как Большая Белая, Малая Белая, Ерма, Урик, Онто. Большую часть территории занимает река Большая Белая. Такие реки, как Ерма, Урик и Большая Белая в верховьях находятся в узких долинах с отвесными берегами, имеют большой перепад высот и очень быстрое течение с многочисленными перекатами. Только в низовьях они текут спокойно и могут использоваться для сплава леса [1].

Этот район характеризуется очень незначительным количеством осадков, от 273 до 303 мм в год; средняя годовая температура в зависимости от высоты над уровнем моря изменяется от 2.1° до 2.4°, и только в равнинном районе (Усолье) она выражается цифрой 1,4°. Количество дней вегетационного периода со средними температурами выше 5° колеблется от 137 до 147, увеличиваясь в Усолье, где оно выражается цифрой 151 дней [1].

Главными лесообразующими древесными породами исследованного района является сосна и кедр.

В 1930-х годах кедровые леса занимали весьма обширную площадь около 89000 га и находились на высоте от 700-800 до 1700 м над у.м. Лес тянется широкой полосой от Ермы до М. Белой по северным склонам Саянских гор и имеет типы мшистые кедровники, кедровники с подлеском из рододендрона, кедровник с подлеском из круглолистной березы, кедровик субальпийский [1]. Сосна произрастает в нижней зоне от 650 до 800-1000 м над уровнем моря на карбонатных суглинках. Редко она встречается на слабоподзоленных щебенчатых суглинках, подстилаемых кристаллическими горными породами. Она занимает площадь около 120000 га [1].



Остальные породы деревьев, произрастающие на данной территории – это сибирская лиственница, пихта сибирская, ель, береза, тополь, черемуха, рябина и бузина [1].

## **2 Обзор методов использования данных дистанционного зондирования для изучения территорий с поврежденными лесами**

Для обзора методов анализа снимков, используемых для изучения лесов, поврежденных сибирским шелкопрядом, была рассмотрена статья [4].

Цель работы состояла в том, чтобы по материалам съемки MODIS выделить леса Нижнего Приангарья, поврежденные в 1994-1996 и 1998-2004 гг. сибирским шелкопрядом, а также, используя цифровую модель рельефа, определить особенности расположения таких лесов по элементам рельефа (высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склонов).

Для выделения погибших и оставшихся неповрежденными темнохвойных насаждений использовался композит MODIS из четырех каналов - вегетационный индекс нормированной разности NDVI, красного, ближнего и среднего инфракрасного. Обработка проводилась по следующей методике. Обучающие выборки для погибших древостоев определялись по карте. Классификация проводилась методом параллелепипеда с интервалом  $2\sigma$  относительно среднего значения обучающей выборки. После проведения классификации были удалены ошибочно классифицируемые как погибшие насаждения территории, так как за пределами поврежденного района и внутри него имеются области, которые спектрально плохо разделяются с погибшими от шелкопряда насаждениями. К таким областям относятся гари и вырубki, а также болота, поля и другие населенные территории с низким значением NDVI.

На втором этапе классификация проводилась с использованием цифровой модели рельефа местности (ЦМР). Размер пикселя анализируемого изображения MODIS был приведен к размеру пикселя рельефа и составил 50 м. В

классификации использовалось семь слоев: четыре вышеперечисленных спектральных слоя и три слоя рельефа: высота местности над уровнем моря, экспозиция и угол уклона. Классификация проходила по аналогичной схеме.

Поскольку разные категории элементов рельефа (т.е. территории с определенными азимутами, крутизной и высотой) на территории представлены неравномерно, применялась процедура нормирования данных по площади. Нормировка проводилась с использованием следующего коэффициента:

$$k_a = \frac{S_a^f}{S_a} , \quad (1)$$

где  $S_a^f$  – площадь повреждений с определенным значением рельефа;

$S_a$  – площадь с данными значением параметром рельефа на всей территории.

Результатом работы стала тематическая карта, показывающая состояние темнохвойных лесов в 2002 году и график, который показывает зависимость площади ареала темнохвойных лесов от высоты над уровнем.

В статье [5] представлены результаты анализа состояния и динамики поврежденной растительности по космическим снимкам высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Исследование проведено на примере участка темнохвойных лесов Нижнего Приангарья (Красноярский край), где в 1994–1995 гг. образовался крупный очаг вспышки сибирского шелкопряда. В результате дистанционной оценки состояния темнохвойных лесов получены тренды индексов SWVI (или NDMI) и NDVI, характеризующие многолетние изменения растительного покрова за период 2000–2018 гг. Наиболее информативным показателем является индекс SWVI: для погибших и сильно поврежденных древостоев (дефолиация крон более 75%) отмечается резкое снижение средних значений и увеличение коэффициентов вариации индекса. По данным разностных изображений индексов ( $\Delta$ SWVI) с пороговым критерием  $1\sigma$  (стандартное отклонение) рассчитана площадь погибших

древостоев. В 2000 г. площадь лесов, погибших под воздействием сибирского шелкопряда, составила около 19.2 тыс. га. После двух крупных пожаров в 2004 и 2011 гг. и в результате совокупности ряда деструктивных факторов площадь погибших лесов увеличилась к 2017–2018 гг. до 20.4 тыс. га. Анализ лесовозобновления в границах очага повреждения (погибшие насаждения) проведен при помощи классификации снимков Landsat (20.06.2017, 23.06.2018) алгоритмом Random Forest с использованием при выборе эталонов для обучения детальных разносезонных снимков с пространственным разрешением 1 м Ресурс-П (Геотон-Л1 – 22.07.2015 и 12.03.2018). Достоверность классификации высокая (показатель каппа более 0.9). По результатам классификации рассчитаны площади лиственных и хвойных древостоев, лиственного и смешанного с преобладанием хвойного возобновления, травяно-кустарниковой растительности, открытой почвы. Через 23 года после повреждения древостоев вредителем активный процесс естественного возобновления преимущественно хвойным подростом происходит на 17% площади очага повреждения, лиственным подростом зарастает около 10% площади. Размер бывшего очага шелкопряда влияет на процесс зарастания: чем больше площадь, тем выше доля безлесных, покрытых травяно-кустарниковой растительностью участков (для крупного очага она составляет более половины площади – 66%, для мелких очагов – менее половины площади – около 45%). Возобновление наблюдается на участках, не затронутых крупными пожарами, с присутствием куртин древостоя и валежа. Частые пожары на территории бывшего шелкопряда затрудняют процесс лесовозобновления, поэтому большая часть растительности находится на начальной стадии сукцессионного цикла.

Одним из регионов России, где сохранились большие массивы бореальных лесов, является остров Сахалин. В результате исследования определен характер изменения состояния северной части подзоны бореальных елово-пихтовых лесов Сахалина под влиянием современных климатических изменений на основе данных наблюдений на метеостанциях и космических съемок [6]. Приводятся

результаты исследования многолетней динамики лесов по данным космических съемок и регулярных наблюдений на метеостанциях «Погиби», «Ноглики», «Александровск Сахалинский», «Тымовское». Оценка современного состояния лесных сообществ территории выполнена по многозональным космическим снимкам территории среднего разрешения, полученных со спутников Landsat. Установлено, что интенсивное развитие растительности и прирост фитомассы обусловлены условиями тепло- и влагообеспеченности территории, которые находят свое выражение в величине гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК). Анализ климатических условий лесных растительных сообществ дал возможность понять тенденции и направленность их изменения, прогнозировать отдельные негативные природные явления (пожары, усыхание и др.).

Другой пример исследования территорий регионального уровня в [7]. Сокращение посевной площади, изменение лесного законодательства, приватизирование лесных территорий, расширение рынков сбыта древесины и другие социо-экономические причины, связанные с распадом социалистического лагеря и СССР в конце 80-х – начале 90-х гг. XX в., вызвали разнонаправленные изменения лесного покрова стран Восточной Европы. Нами был разработан алгоритм автоматической обработки снимков, полученных разными съемочными системами (ТМ и ЕТМ+), и создания временных серий изображений, который позволяет картографировать общую лесопокрытую площадь, ее потери и прирост. Материалы и методы. Для анализа использовались снимки Landsat с 1984 по 2012 г., полученные из глобального архива и выбранные только в пределах вегетационного сезона. Модель для нормализации значения спектральной яркости основывалась на разнице между спектральной яркостью данных Landsat и многолетних средних значений спектральной яркости по данным MODIS. Полученные данные использовались для создания попиксельных временных серий наблюдений, которые были трансформированы в наборы «метрик», использованные в дальнейшем для картографирования

динамики лесного покрова. Результаты. Общая площадь лесопокрытой территории увеличилась с 1985 до 2012 г. на 4,7 % во всех восточноевропейских странах, за исключением Эстонии и Латвии. В ряде наиболее населенных административных регионов России (например, в Московской и Ленинградской областях) преобладает сокращение лесного покрова. В среднем, ежегодная площадь нарушений лесного покрова с 2007 по 2012 г. на 22 % выше, чем в советское время. Процент лесных пожаров увеличился с 1,5 % от общей площади изменений лесов в 1980-х гг. до 11,3 % в период 2007–2012 гг. В 2011 г. доля пожаров достигала 29 % от общей площади изменений лесов, что отражает экстремальный пожарный сезон Европейской части России 2010 г. Основной целью исследования было создание пространственно-временного набора данных, отражающего динамику лесного покрова Восточноевропейских стран в течение почти тридцати лет (1985–2012). Лесной покров в нашем анализе определялся набором биофизических признаков (сомкнутость крон деревьев и высота насаждения), что не всегда соответствует критериям кадастра земель. Полученные результаты иллюстрируют изменения лесного покрова в разных странах и регионах после распада социалистического лагеря и перехода от плановой экономики к рыночному хозяйству. Показанное сравнение с данными ФАО демонстрирует возможности использования данных космической съемки для картографирования изменений лесного покрова и оценки объема заготовки древесины.

### **3 Исходные данные**

Исходные данные для анализа состояния лесов исследуемой территории Иркутской области включают:

- карту повреждений кедровников, составленную в 1931 г. Ангарской лесной экспедицией;
- карту лесного покрова СССР из Атласа лесов СССР 1978 г.;

- цифровую карту растительного покрова РФ, разработанную и обновляемую в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН);
- снимки среднего пространственного разрешения Landsat 1970–х годов и актуальные;
- цифровую модель рельефа (ЦМР).

Для определения породного состава и состояния лесного покрова исследуемой территории в настоящее время и его динамики были скачаны снимки Landsat 2, 5, 8, 9 OLI:

- Landsat 8, 9 OLI 135/024 25.05.2022 г.; 134/024 26.05.2022 г.; 134/024 13.07.2022 г.;
- Landsat 5 TM 136/23 16.06.2010 г.;
- Landsat 8 OLI 136/023 30.06.2015 г.

Кроме снимков Landsat, использовались данные спектрорадиометра, формирующего изображение, среднего пространственного разрешения Terra MODIS. Преимуществом этих данных является их временное разрешение – данные поступают ежедневно. Недостаток данных в их низком пространственном разрешении – 500 м и 1000 м в продуктах, которые получаются в результате обработки результатов измерения в спектральных каналах.

### **3.1 Исторические бумажные карты**

Важным исходными данными являлась карта растительности, опубликованная в [1]. На данной карте (рисунок 2) изображены участки усохших кедровых лесов, выявленные в ходе Ангарской экспедиции, погибших в результате вспышки численности сибирского шелкопряда, по историческим сведениям, в 1885 году.

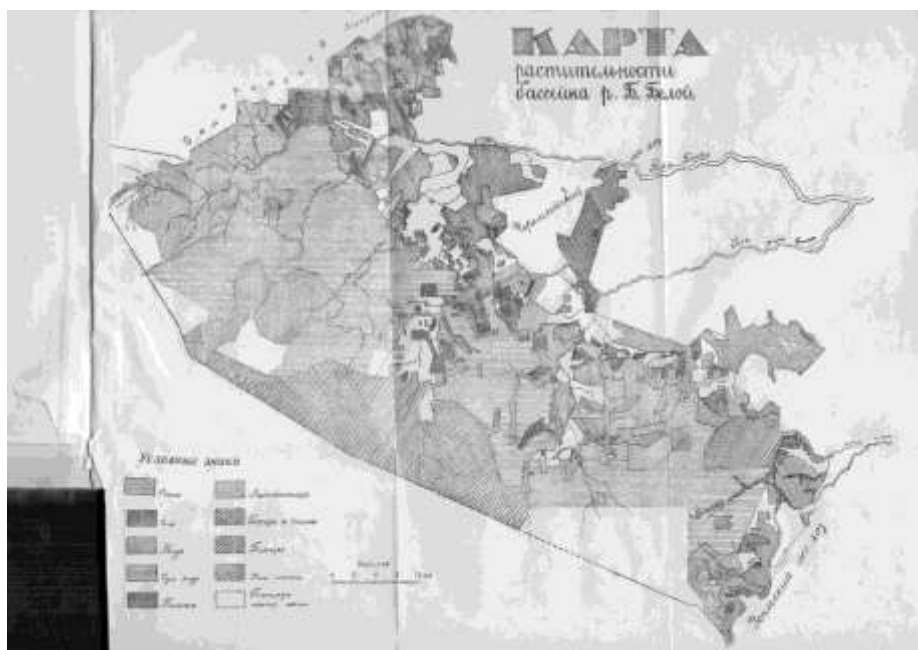


Рисунок 2 – Карта лесной растительности бассейна р. Б. Белой 1931 г.

Карта была отсканирована и привязана к снимку Landsat 8 с помощью модуля «Привязка растра» программы QGIS.

Были отсканированы две карты из Атласа лесов СССР [8]: Иркутской области и Забайкалья. На картах представлены преобладающие породы деревьев в лесах, а также вырубки и гари. Масштаб карты очень мелкий – 1 : 3000000. Эта карта использована далее для определения состава лесов на территории усохших в 1931 году кедровников. Привязка выполнена так же в модуле «Привязка растра» QGIS, ошибка RMS составила в среднем 4 пикселя.

В данной работе использовалась полиномиальная трансформация. Полиномиальная трансформация использует построение полинома на основе опорных точек и алгоритм подбора коэффициентов методом наименьших квадратов (LSF). Оценка ошибки — невязки – рассчитывается как разница между реальным и вычисленным положением «точки» (residual). Она вычисляется по формуле евклидова расстояния как квадратный корень суммы квадратов разностей координат:

$$res = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad , \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $y_1$  – координаты опорной точки;

$x_2$  и  $y_2$  – координаты точки, вычисленные по полиномиальным формулам.

Общая ошибка (RMS) вычисляется как сумма ошибок всех точек. Это значение описывает степень согласования трансформации между всеми опорными точками (связями). Если ошибка слишком велика, для ее уменьшения можно удалить или добавить опорные точки [8].

В результате привязанная карта становится основой для выделения на снимках исследуемой территории в целом и лесов разного состава – березовых и кедровых, а также нелесных территорий, в том числе сельскохозяйственных угодий.

Отметим, что территория погибших в результате вспышки сибирского шелкопряда 1885 года кедровников лежит в верхнем высотном поясе северных склонов.

Была также использована карта лесов Иркутской области из Атласа лесов СССР 1978 г. [9]. Эта карта использовалась при классификации снимков 1975 и 1978 годов.

### **3.2 Цифровая модель рельефа SRTM**

Цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) создана на основе данных микроволновой съемки для территории между 60 градусами северной и южной широты. Миссия состояла из специальной радиолокационной системы, которая в феврале 2000 года осуществляла съёмку с борта шаттла «Индевор» во время 11-дневной миссии STS-99. Полученная благодаря съёмке информация предназначена для использования в научных и гражданских приложениях. Качество ЦМР постоянно улучшается.



Пространственное разрешение рельефа для изучаемой территории составляет 1 секунда дуги [10].

С сайта earth explorer скачаны три файла цифровой модели рельефа SRTM версии 3: n53\_e102\_1arc\_v3, n52\_e102\_1arc\_v3, n52\_e101\_1arc\_v3. В ГИС QGIS из них была собрана мозаика, из которой затем маской вырезан рельеф исследуемой территории.

Были получены три характеристики рельефа для территорий поврежденных и вновь появившихся лесов: высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склонов.

Экспозиция и крутизна склонов вычисляются благодаря значениям высоты над уровнем моря. Эту характеристику хранят данные ЦМР SRTM. Вычисление выполнено с помощью инструментов обработки растров в QGIS. Он имеет такие инструменты, как «Экспозиция» и «Крутизна», которые подсчитывают экспозицию и крутизну склонов соответственно.

Параметры крутизны и экспозиции характеризуют градиент поверхности, т.е. интенсивность изменения её значений в пространстве, которая может быть выражена производной первого порядка. Как производная первого порядка, градиент характеризуется величиной (крутизной) и направлением (экспозицией).

Экспозиция склона — одна из морфометрических характеристик рельефа, характеризующая пространственную ориентацию элементарного склона. Экспозиция на местности определяется путём ориентации склона относительно сторон света. При использовании цифровых моделей рельефа экспозиция равна азимуту проекции нормали склона на горизонтальную плоскость и выражается либо в градусах, либо в 4, 8, 16 или 32 румбах. Экспозиция плоского склона (с нулевой крутизной) не определяется. Экспозиция склонов имеет значения от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Каждые  $45^\circ$  градусов склон имеет свою определенную ориентацию: северный, северо-восточный, восточный, юго-восточный, южный, юго-западный, западный, северо-западный. Крутизна склона вычисляется в градусах.

### **3.3 Цифровые карты растительности исследуемой территории**

Для оценки состояния растительности на изучаемой территории после 2000 года использовалась цифровая карта наземных экосистем Северной Евразии из информационной системы Terra Norte. Terra Norte – информационная система мониторинга бореальных экосистем. Карта получена в 2000 году и отображает 25 классов типов земного покрова, такие как леса, тундры, кустарники и т.д. Информационная система TerraNorte создана для обеспечения систематизированного хранения, обновления и удаленного доступа пользователей к данным спутникового мониторинга наземных экосистем бореального пояса [11].

Географические базы данных и информационные продукты, включенные в систему, разрабатываются в рамках научных проектов ИКИ РАН в сотрудничестве с рядом отечественных и зарубежных организаций.

### **3.4 Характеристики приборов Landsat 2 MSS и Landsat 8, 9 OLI**

В работе используются данные спектрорадиометра Landsat Collection 2 Level 2 (Коллекция 2, Уровень 2) отражательной способности поверхности и ее температуры.

Научные продукты Landsat уровня 2 генерируются из входных данных Collection 2 уровня 1 для данных с зенитным углом Солнца меньше 76 градусов и включают необходимые вспомогательные входные данные для создания продукта [12].

Результаты измерения отражения поверхности спектрорадиометром Landsat 8/9 Operational Land Imager (OLI) генерируются с использованием алгоритма Land Surface Reflectance Code (LaSRC) (версия 1.5.0). Данные об отражении поверхности спектрорадиометрами Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) и Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) генерируются с использованием

алгоритма Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS) (версия 3.4.0).

Коэффициент отражения поверхности измеряет долю поступающего солнечного излучения, которая отражается от поверхности Земли и регистрируются датчиками Landsat. Алгоритмы отражения поверхности LEDAPS и LaSRC корректируют изменяющиеся во времени, пространстве и спектре эффекты рассеяния и поглощения атмосферных газов, аэрозолей и водяного пара, что необходимо для надежной характеристики земной поверхности [12]. Снимки обработки уровня 2 не нуждаются в атмосферной коррекции.

Космические снимки можно скачивать с сайтов, обеспечивающих доступ к платформам с архивами данных дистанционного зондирования в США (USGS, NASA) и в Европе (Европейское космическое агентство).

Снимки MODIS с платформ TERRA и AQUA, а также снимки Landsat доступны на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov/>. На рисунке 3 представлен первый рабочий экран платформы, на этапе выбора необходимых данных.

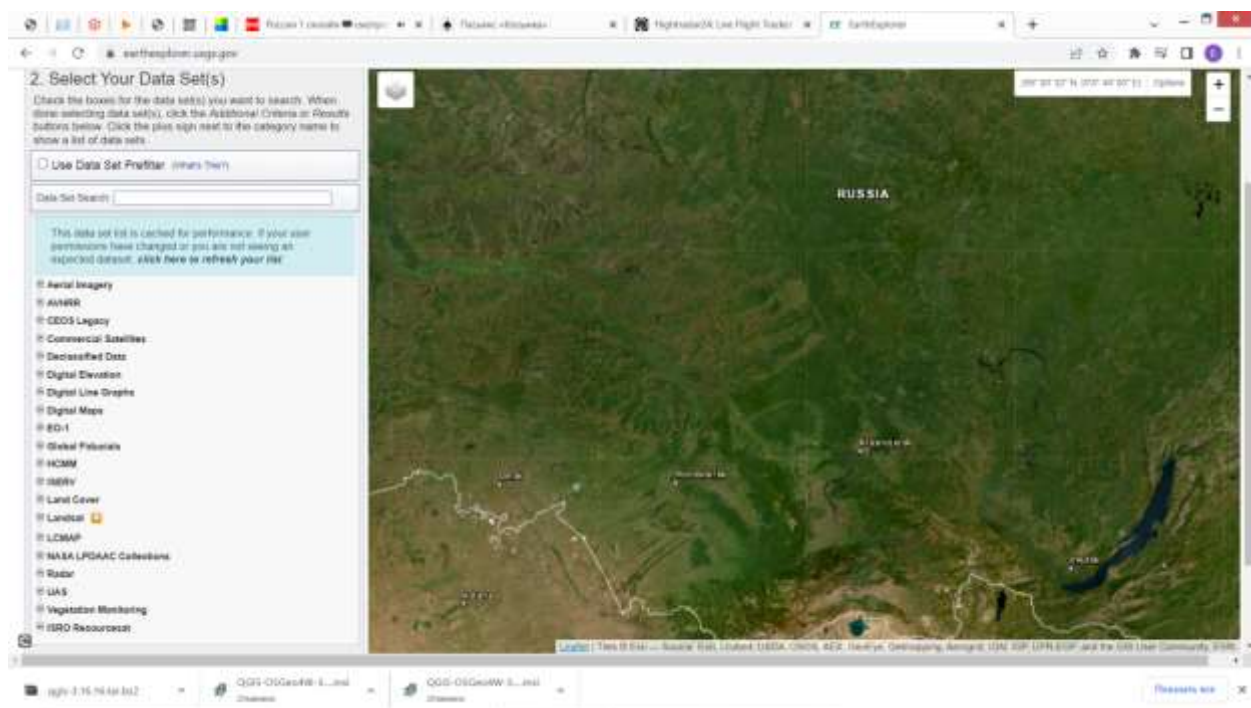


Рисунок 3 – Рабочее окно сайта earthexplorer

Данные с каждого прибора можно выбирать по датам, проценту облачности. Территория интереса указывается с помощью точек.

В качестве исходных данных для проведения исследования использовались космические снимки аппаратов Landsat 2 (сенсор MSS), Landsat 8 и 9 (сенсор OLI). Характеристики приборов на платформе Landsat 2, 8 и 9 приведены в таблице 1.

Спектрорадиометр MSS является первым прибором серии Landsat, который вышел на орбиту и стал использоваться в гражданских целях для анализа в первую очередь сельскохозяйственных угодий. В нем всего четыре спектральных канала в видимой и ближней ИК области спектра.

Landsat 8 имеет более совершенный сенсор OLI – Operational Land Imager, с большим количеством каналов, чем у Landsat 5 и с улучшенным пространственным разрешением. Был выведен на орбиту 11 февраля 2013 года.

Таблица 1. – Характеристики приборов серии Landsat.

Номера каналов	Спектральный диапазон (мкм)	Пространственное разрешение (м)
Landsat MSS		
1	0.5 - 0.6	80
2	0.6 - 0.7	80
3	0.7 - 0.8	80
4	0.8 - 1.1	80
Landsat TM		
1	0.45 - 0.515	30
2	0.525 - 0.605	30
3	0.63 - 0.69	30
4	0.75 - 0.90	30
5	1.55 - 1.75	30
6	10.4 - 12.5	120
7	2.09 - 2.35	30

Landsat8 OLI		
Band 1 - Coastal aerosol	0.43-0.45	30
Band 2 - Blue	0.45-0.51	30
Band 3 - Green	0.53-0.59	30
Band 4 - Red	0.64-0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85-0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57-1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11-2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50-0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36-1.38	30

Для классификации снимков Landsat 2 MSS 1978 года использовались 4, 5 и 7 каналы, поскольку в канале 6 присутствуют помехи в виде регулярных полос. Для классификации снимков Landsat 8 использовались каналы 2 – 7, видимый и ближний и средний инфракрасные каналы.

В таблице 2 приведены основные характеристики спектрорадиометра MODIS.

Таблица 2 – Основные характеристики спектрорадиометра MODIS

(<https://www.dvrcpod.ru/Modis.php?lan=rus>)

Дата запуска: 4 мая 2002 года						
Каналы:	1-2	3-7	8-19	20-25	26	27-36
Спектральные диапазоны (мкм):	0.62-0.88	0.46-2.16	0.41-0.97	3.66-4.55	1.36-1.39	6.54-14.39
Пространственное разрешение в надири:	250 м	500 м	1000 м			
Ширина полосы обзора:	2300 км					
Радиометрическое разрешение:	12 бит на пиксел					
Временное разрешение:	дважды в день					

Для анализа состояния растительности использовался водный индекс нормированной разности (Normalized Difference Water Index, NDWI), который рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR2}) / (\text{NIR} + \text{SWIR2}), \quad (3)$$

где NIR – отражение в ближнем ИК канале,

SWIR2 – отражение в коротковолновом среднем ИК канале.

Этот индекс чувствителен к изменению содержания влаги в растительности [13]. В других источниках этот индекс называется NDII – коротковолновой инфракрасный нормализованный индекс [14]. Для вычисления этого индекса по измерениям спектрорадиометра MODIS используются данные ближнего инфракрасного (851–879 нм) и коротковолнового инфракрасного (1566–1651 нм) каналов. Индекс использовался изначально для оценки жизненного состояния растительности (Townsend et al., 2012). Пороговое значение NDII использовалось для разделения живой и погибшей растительности: около 95% значений NDII для погибших лесов лежало в интервале 0.003 – 0.151 [5].

Временные ряды NDWI были получены из продукта MOD09\_NDWI [15]. Продукт MOD09GA версии 6 предоставляет оценку спектральной отражательной способности поверхности, полученную спектрорадиометром, Terra MODIS. Данные первых семи каналов предоставляются с атмосферной коррекцией. Наряду с 500-метровыми слоями отражения поверхности в видимой, ближней и средней инфракрасной частях спектра, в продукте предоставляется набор из десяти слоев с пространственным разрешением 1 км. Слои отражения из MOD09GA используются в качестве исходных данных для многих продуктов MODIS с параметрами о свойствах суши [15]. Данные получены с помощью платформы Google Earth Engine (GEE) [16].

### **3.5 Используемое программное обеспечение**

QGIS – дружественная к пользователю ГИС с открытым кодом, распространяющаяся под GNU General Public License. QGIS является проектом

Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Она работает на операционных системах Linux, Unix, Mac OSX, Windows и Android, поддерживает множество векторных, растровых форматов, баз данных и обладает широкими возможностями

([https://docs.qgis.org/3.22/ru/docs/user\\_manual/preamble/preamble.html](https://docs.qgis.org/3.22/ru/docs/user_manual/preamble/preamble.html)). QGIS предлагает постоянно растущий набор возможностей, реализованных в ядре и модулях, что позволяет визуализировать, управлять, редактировать и анализировать данные, готовить печатные карты.

QGIS постоянно развивается специалистами по пространственной обработке данных всего мира, расширяя список модулей, которые реализуют новые возможности создания, импорта, анализа векторных и растровых данных. Она имеет набор средств создания картографического материала, подготовки графических данных. В QGIS реализован интерфейс взаимодействия с модулями ГИС GDAL, SAGA, GRASS, в которых реализован большой набор модулей обработки векторных и растровых данных.

В работе используется плагин Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), развиваемый Лука Кондего. Плагин позволяет осуществлять большой набор операций с космическими снимками, начиная с их импорта, проведения разного вида классификаций и постклассификационной обработки [17].

### **3.6 Платформа Google Earth Engine**

Облачная платформа Google Earth Engine [16] – это платформа для геопространственного анализа данных глобального масштаба, которая использует огромные вычислительные возможности Google для решения социальных проблем, включая вырубку лесов, засуху, стихийные бедствия, болезни, продовольственную безопасность, управление водными ресурсами, мониторинг климата, защита окружающей среды. Она уникальна как интегрированная платформа, предназначенная для расширения возможностей не

только специалистов, занимающихся дистанционным зондированием, но и гораздо более широкой аудитории, которой не хватает технических возможностей, необходимых для использования традиционных суперкомпьютеров или крупномасштабных ресурсов облачных вычислений [16]. Earth Engine – вычислительная среда, геопространственный прикладной программный интерфейс (JavaScript, Python, REST) и интерактивный прикладной сервер, работающие с открытым каталогом данных (несколько петабайтов данных).

Каталог данных Earth Engine содержит большое хранилище общедоступных наборов геопространственных данных, включая данные с различных спутниковых и аэрофотосъемочных систем в оптическом и микроволновом диапазоне длин волн, переменные окружающей среды, прогнозы погоды и климата и ретроспективные прогнозы, растительный покров, топографические и социально-экономические данные. Данные предварительно преобразуются в готовый к использованию формат, обеспечивающий эффективный доступ и управление ими.

Пользователи могут получать доступ и анализировать данные из общедоступного каталога, а также свои личные данные, используя библиотеку операторов, предоставляемую API Earth Engine (API – Application Programming Interface, программный интерфейс приложения). Эти операторы реализованы в большой системе параллельной обработки, которая автоматически разделяет и распределяет вычисления, обеспечивая возможности анализа с высокой пропускной способностью. Пользователи получают доступ к API через библиотеку тонких клиентов или через интерактивную веб-среду разработки, построенную на основе этой клиентской библиотеки [16].

Наиболее простой интерфейс работы в GEE для непрофессиональных программистов реализован через интерфейс Code Editor. Редактор кода Earth Engine в [code.earthengine.google.com](http://code.earthengine.google.com) – это интегрированная среда разработки (Integrated Development Environment, IDE) для JavaScript API поисковой системы.



Для этого требуется войти в систему с учетной записью Google, которая была включена для доступа к Earth Engine. Функции редактора кода предназначены для того, чтобы сделать разработку сложных геопространственных рабочих процессов быстрой и легкой. Редактор кода содержит следующие элементы (рисунок 4) (<https://earthengine.google.com/platform/>):

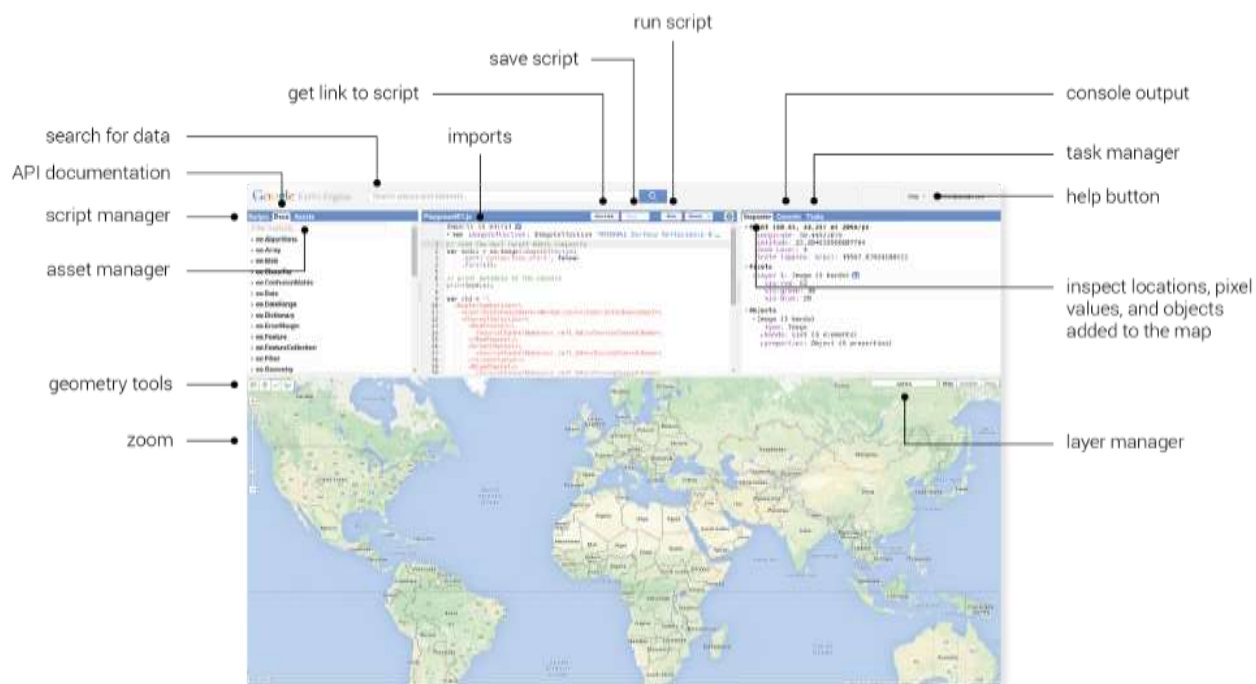


Рисунок 4 – Рабочее окно редактора кода Code Editor GEE

Клиентские библиотеки предоставляют функции-оболочки на языке JavaScript для API Earth Engine. Эти библиотеки используются для создания пользовательских приложений и локальной разработки кода Earth Engine с использованием интерпретатора JavaScript. Примерами программного кода на языке JavaScript сопровождаются все функции обработки данных и все базы данных каталога. Код сопровождается комментариями и легко адаптируется под задачу пользователя.

## **4 Предварительная обработка данных**

### **4.1 Скачивание данных из архива Геологической службы США USGS**

Снимки были скачаны с сайта Earth Explorer USGS (United States Geological Survey). Данный сайт предоставляет широкий выбор снимков различных приборов, таких как AVHRR, LANDSAT, MODIS.

Снимки Landsat имеют формат GeoTIFF. Были скачаны снимки:

- LM21460231978141AAA02 (21.05.1978);
- LM21460231975 (30.07.1975);
- LC8136023\_20210918(18.09.2021);
- LC9135023\_20220720 (20.07.2022);
- LC8136023\_20230212 (12.02.2023).

Снимки 2021 и 2022 г. не полностью содержат область исследования, поэтому использовались обе сцены.

Прежде чем непосредственно начать классификацию, необходимо было вырезать из снимка фрагмент, соответствующий исследуемой территории. Для этого использовалась привязанная карта. Операция осуществлялась в QGIS с использованием операции вырезания по маске.

### **4.2 Нахождение экспозиции и крутизны склонов**

Для проведения анализа распределения растительности по территориям с различными параметрами рельефа использовалась ЦМР в формате SRTM. Расчет происходил в ПО QGIS, используя инструменты «Экспозиция» и «Крутизна».

Экспозиция склона — одна из морфометрических характеристик рельефа, характеризующая пространственную ориентацию элементарного склона. Экспозиция на местности определяется путём ориентации склона относительно

сторон света. Экспозиция склонов имеет значения от 0 градусов до 360 градусов, отсчитываемых от направления на север.



Рисунок 5 – Экспозиция склонов на территории интереса

Крутизна склона – угол наклона в точке пересечения между горизонтальной плоскостью касательной к земной поверхности. Иными словами, величина уклона равна тангенсу угла между поверхностью склона и горизонталью. Например, подъёму 12 м на 100 м перемещения по горизонтали соответствует уклон, равный 0,12 (12%). Данная характеристика рельефа фиксирует интенсивность перепада высот (градиент) между двумя заданными точками. Гистограмма крутизны склонов исследуемой территории представлена на рисунке 4.



Рисунок 6 – Гистограмма крутизны склонов территории интереса

Половина склонов имеет крутизну от пяти до 15 градусов. Около 30% склонов – с крутизной 16 – 25 градусов. Таким образом, территория имеет выраженные градиенты перепада высот.

В дальнейшем эти данные были использованы для анализа положения погибших кедровых лесов и темнохвойных лесов в настоящее время.

#### **4.3 Классификация космических снимков Landsat 2 MSS 1975 и 1978 годов**

Для анализа территории в период между 1931 г. и настоящим временем были скачены снимки Landsat MSS 1975 и 1978 годов.

Для классификации этих снимков были созданы обучающие выборки (ROI). Для этого использовались карты лесов из Атласа лесов СССР. На карте лесов на изучаемой территории выделены леса с преобладанием березы и с преобладанием кедра. Березовые леса расположены высоко в горах. Они, очевидно, являются одной из фаз восстановления кедровых лесов через смену пород – лиственные леса. Спектральные отражательные кривые кедровых и березовых лесов отличаются более высокими значениями отражения в ближнем

инфракрасном диапазоне – 6 и 7 каналах прибора MSS. Графики приведены на рисунке 7.

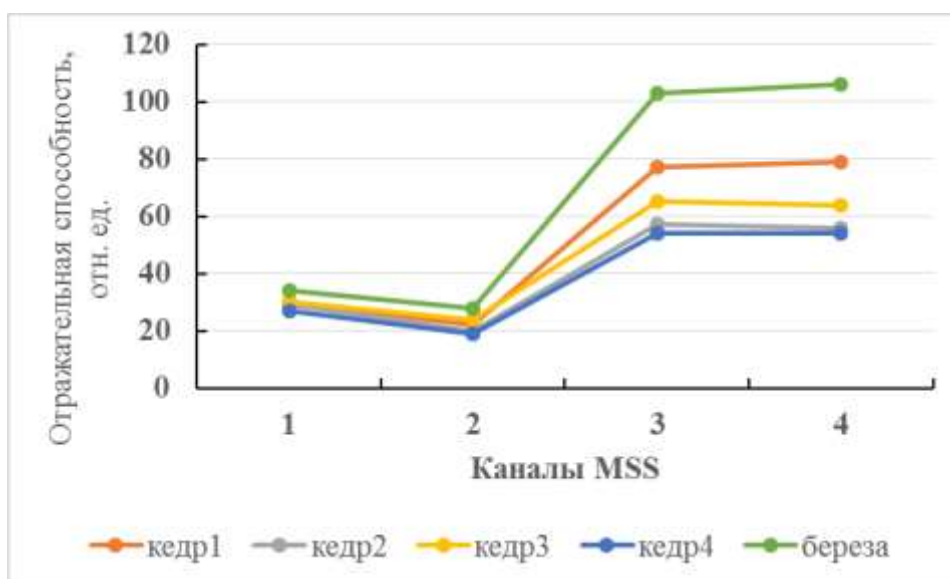


Рисунок 7 – Спектральные отражательные кривые кедровых и березовых лесов, снимок MSS 1975 года

Результат классификации данных 1978 года представлен на рисунке 8.

### Бассейн реки Б.Белой

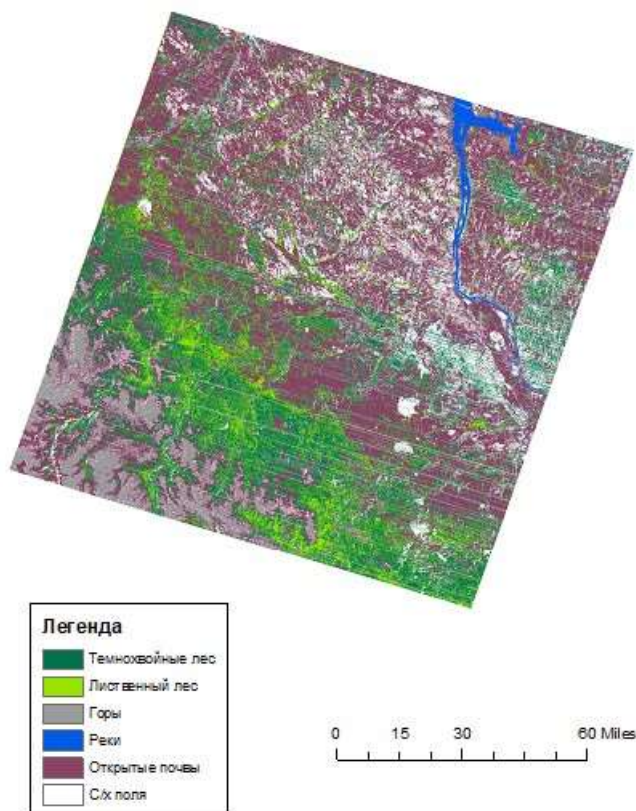


Рисунок 8 – Классификация снимка 1978 года

На этой классификации отображены такие классы, как темнохвойный лес, лиственный лес, реки, с/х поля, открытые почвы, горные вершины.

В данном снимке были сделаны ROI для таких объектов как: облака, тени облаков, реки, поля, почвы, темнохвойный лес и лиственный лес. Все объекты, кроме лесов, выражены на снимке в комбинации каналов 7,6,5. Для них было достаточно просто построить обучающие выборки. В этой комбинации каналов растительность отражается красным оттенком цвета. Также пришлось обратиться к спектральным профилям. Спектральный профиль - это график, показывающий спектральную отражательную способность объекта. Нами были просмотрены различные участки лесного покрова, и те фрагменты, где спектральные профили заметно отличались, относились к разным классам.

Далее необходимо было провести оценку точности классификации. В области обработки изображений термин точность означает меру согласованности стандартной информации в некоторой пространственной точке с информацией в соответствующей точке классифицированного снимка. Обычно проверка точности классификации основана на сравнении двух карт – той, которая получена в результате анализа данных ДЗ, и второй, контрольной карты [18].

Простейшим методом определения точности классификации является сравнение тех участков двух карт, которые относятся к выделенным классам объектов. Результатом является отчет, в котором указывается общая точность классификации для всей карты или точность классификации отдельных ее участков [18]. В работе на этом этапе оценка точности классификации не проводилась, так как результаты использовались для экспертной оценки динамики лесов.

## **5 Результаты анализа пространственных связей данных 1931, 1978, 2021 года и рельефа**

### **5.1 Положение сухих кедровников в 1931 году**

Для оценки связи между типами покрова и рельефом использовались методы пространственного анализа. Строилась маска класса темнохвойных лесов на ЦМР по карте 1931 года и классификации снимка 1978 года.

Результат вычисления характеристик рельефа участков усохших кедровников представлен на рисунках 7, 8 и 9.

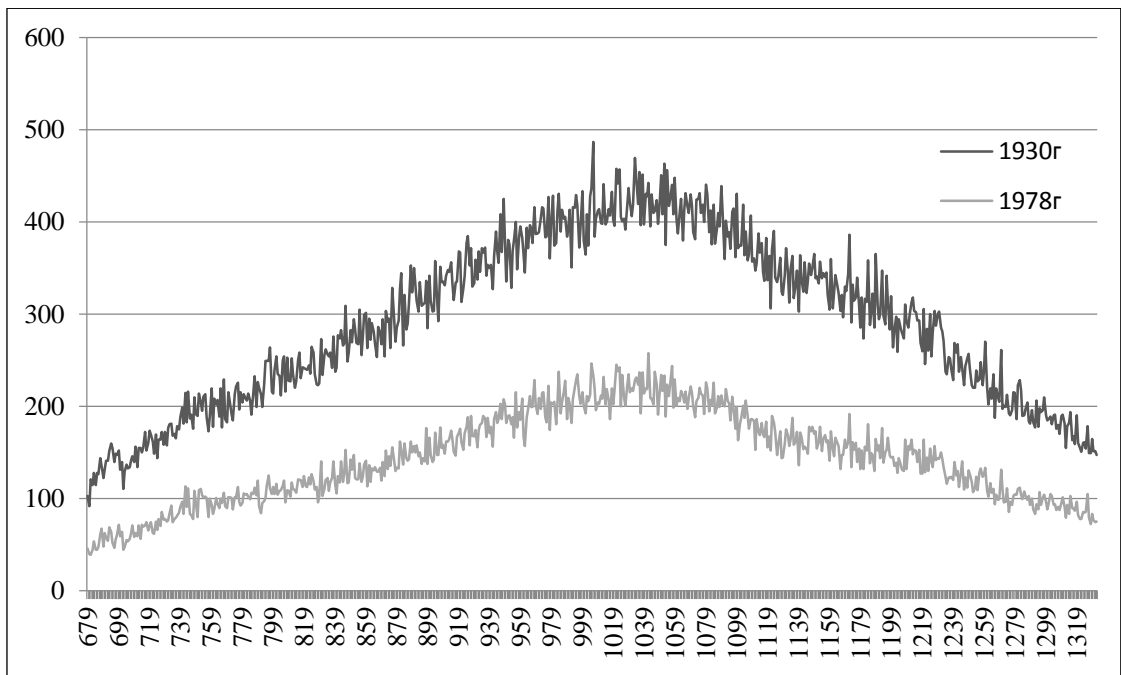


Рисунок 9 – Высота над уровнем моря погибших к 1931 году кедровых лесов и темнохвойных лесов 1978 года

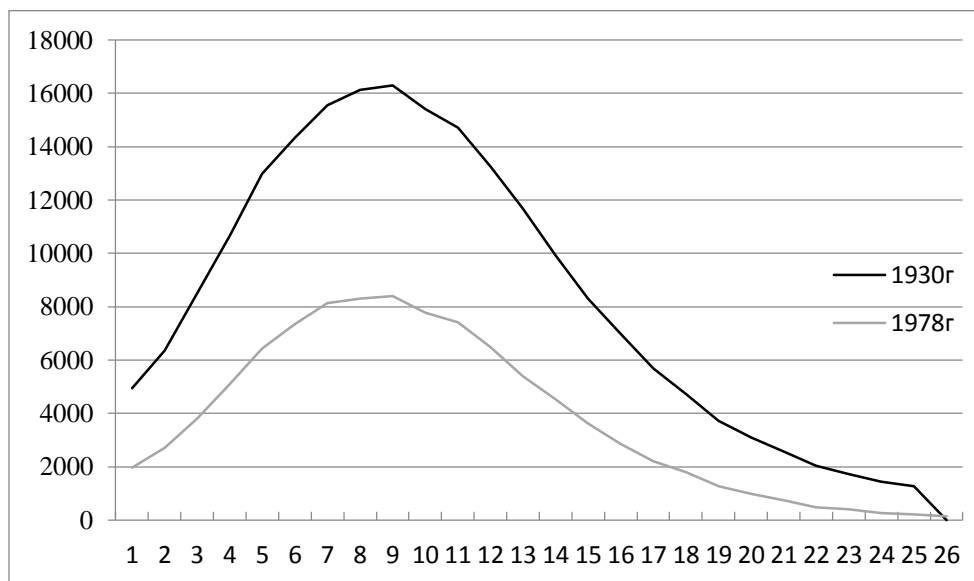


Рисунок 10 – Крутизна склонов погибших к 1931 году кедровых лесов и темнохвойных лесов 1978 года



На этих графиках изображена распространение площади (га) территории погибших кедровых лесов к 1931 году по высоте над уровнем моря и крутизне склонов, а также появившихся темнохвойных лесов к 1978 году. Как видно из графиков, темнохвойный лес не полностью еще восстановился на данной территории. По состоянию на 1978 год он занимает 48% территории. Остальную часть занимает лиственный, а именно березовый лес. Леса произрастали на высоте от 679 до 1342 метров над уровнем моря.

Крутизна склонов небольшая. Больше всего лесов произрастает на склонах крутизной 8 градусов.

Ниже представлен график, который показывает распределение площади (га) по экспозиции склонов.

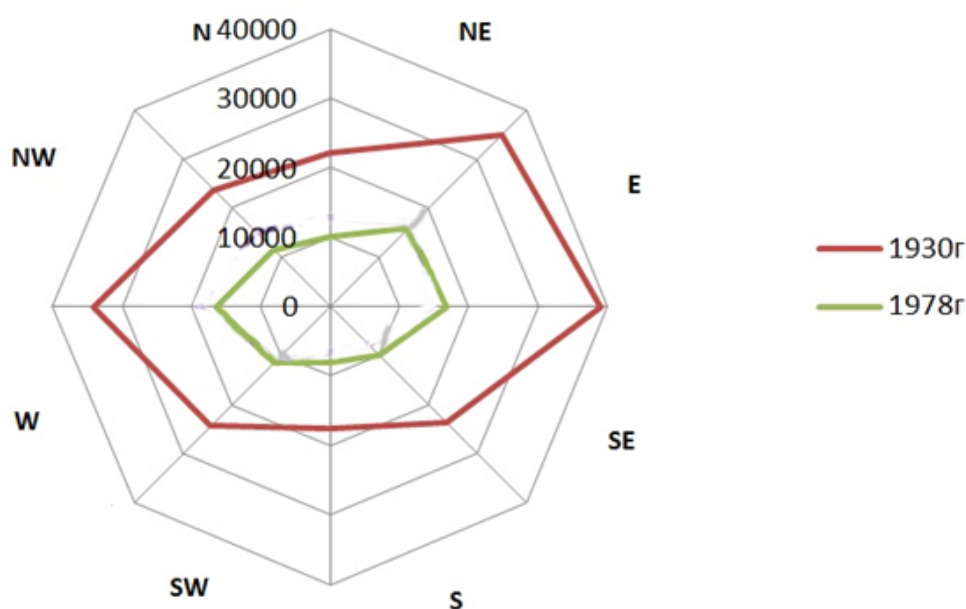


Рисунок 11 – Экспозиция склонов погибших к 1931 году кедровых лесов и темнохвойных лесов 1978 года

Территория кедровых лесов выражается предпочтительностью западных и восточных склонов, что может быть связано с характером распределения склонов на территории.

## 5.2 Изменения распространения темнохвойных лесов

В QGIS на цифровую карту TerraNorte был наложен векторный слой погибших кедровых лесов. В результате анализа совместного расположения объектов двух данных слоев видно, что на территории погибших кедровых лесов произрастают лиственные (Deciduous Broadleaf Forest), вечнозеленые хвойные леса с примесью деревьев листопадных пород (Needle-leaf/Broadleaf Forest) и смешанные леса (Mixed Forest).

В 1970–х годах на данной территории бывших кедровников согласно классификации снимков и карты лесов часть территории (35%) занята березовыми лесами. Был рассмотрен участок снимка февраля 2023 года, чтобы оценить породный состав лесов (рисунок 12).

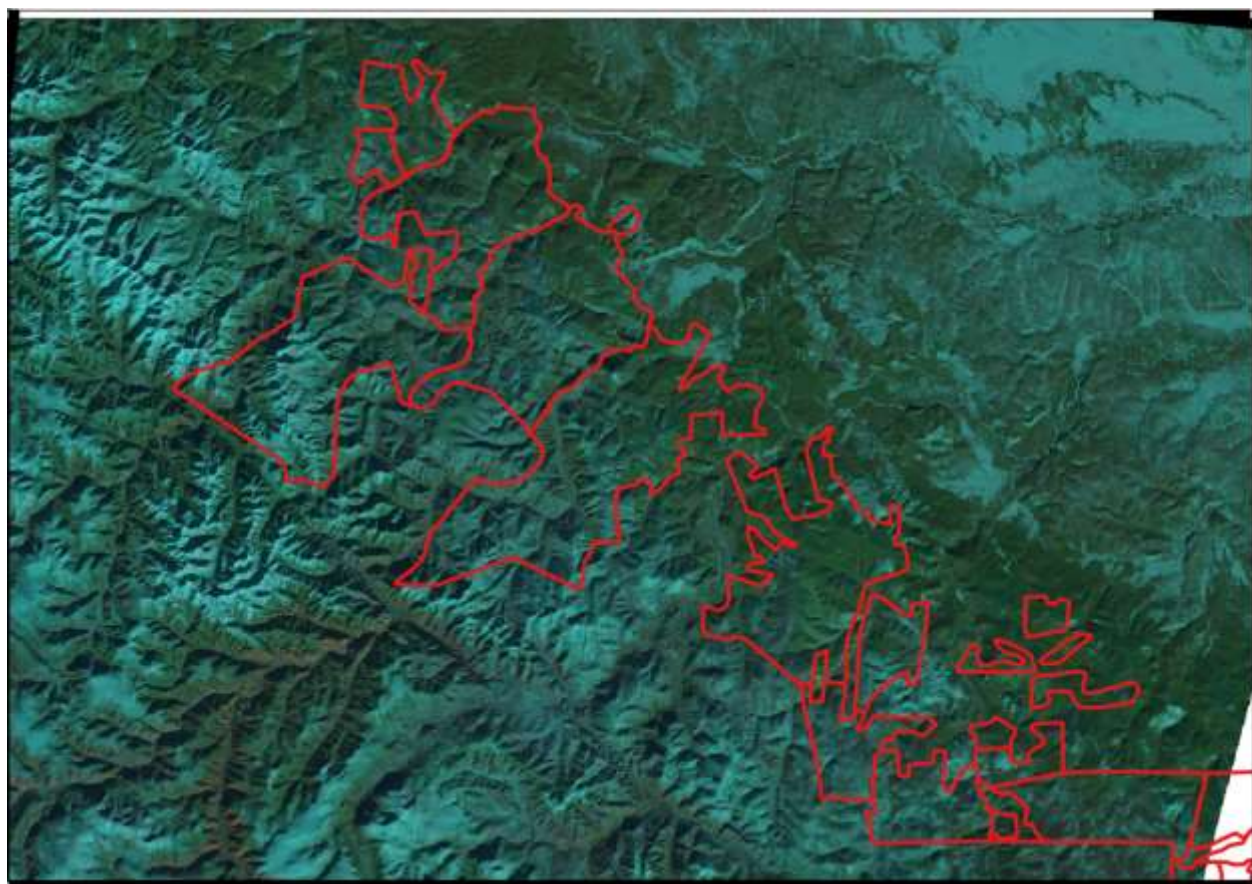


Рисунок 12 – Зимний снимок 2023 года

Визуальный анализ зимнего снимка показывает, что открытых заснеженных участков на территории практически нет. Это позволяет сделать вывод, что темнохвойные леса на территории преобладают.

Визуальный анализ летнего снимка Landsat LC9135023\_20220720 (20.07.2022) дает возможность экспертно выделить на территории участки кедровников, которые могут быть усыхающими уже по другим причинам (не от сибирского шелкопряда). Это предположение подтверждается спектральными характеристиками обучающих выборок (ROI) здоровых кедровников, лиственных лесов и поврежденных кедровников на рисунке 13.

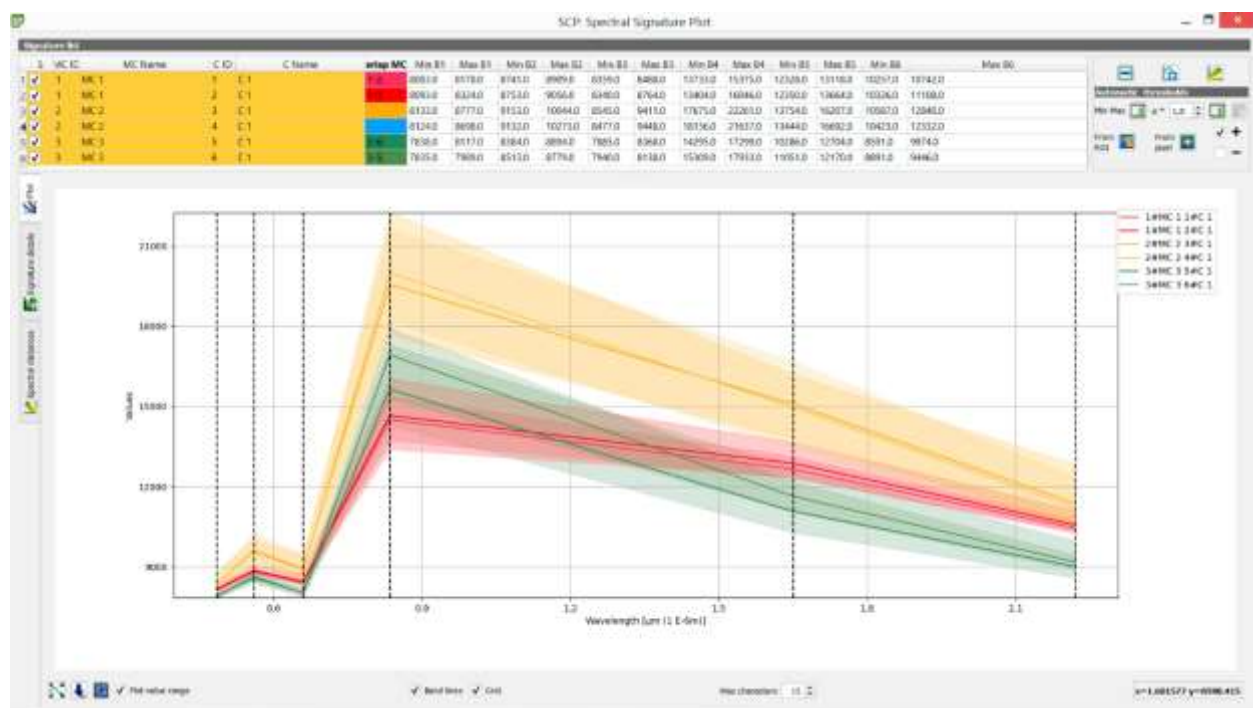


Рисунок 13 – Спектральные портреты здоровых кедровников (зеленые линии), поврежденных кедровников (красные линии) и лиственных лесов (желтые линии)

Вывод о повреждении кедровых лесов можно сделать по значениям в среднем ИК диапазоне. Значения поврежденных насаждений выше, чем у здоровых, что говорит о меньшем количестве влаги в хвое и ветвях деревьев. Для точного определения состояния требуются дальнейшие работы.

### **5.3 Динамика лесного покрова по результатам классификации снимков Landsat 2 MSS, Landsat 8-9 OLI**

Визуальный анализ снимков Landsat 2 MSS, Landsat OLI 8, 9 2021 – 2023 годов позволяет сделать выводы о том, что лесной покров после повреждения сибирским шелкопрядом восстановился, в пределах исследуемой территории произрастает большая доля темнохвойных лесов.

В настоящее время часть лесов повреждена, о чем можно сделать вывод по спектральным портретам участков лесного покрова. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

#### **5.3.1 Классификация снимка Landsat 2 MSS 1975 года**

Снимок Landsat 2 MSS 1975 года (характеристики сканера Landsat MSS представлены в таблице 3) по времени соответствует карте лесов из Атласа лесов СССР 1972 года [9], которая может служить опорными данными для интерпретации результатов обработки снимков.

Из снимка Landsat 2 MSS 1975 года от 30 июля был вырезан фрагмент маской карты усохших кедровников по состоянию на 1931 год. Была проведена кластеризация этого фрагмента снимка на 20 кластеров методом K-средних в QGIS. Спектры кластеров приведены на рисунке 14.

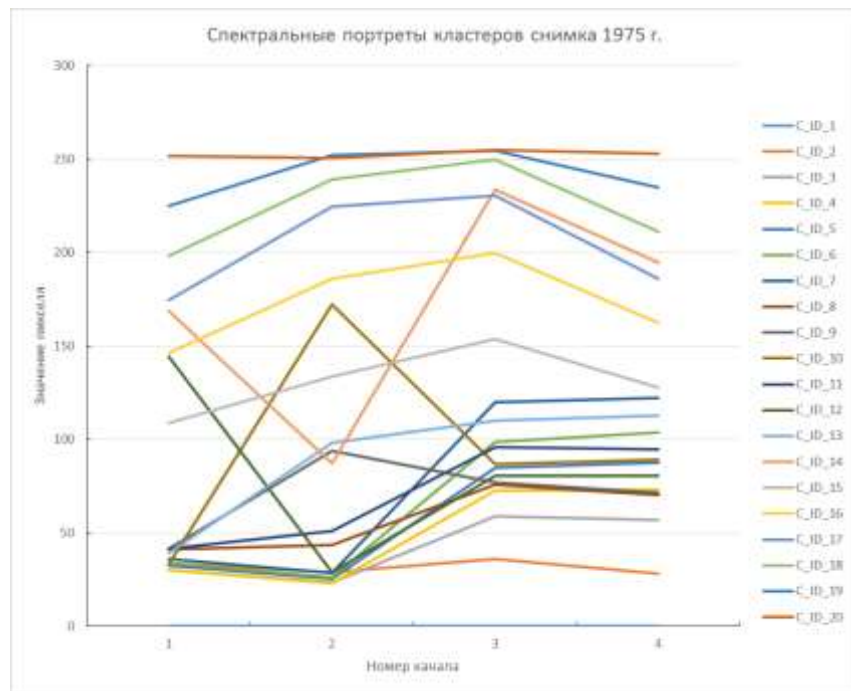


Рисунок 14 – Спектральные профили кластеров фрагмента снимка 1975 года

Из рисунка 14 видно, что растительности соответствуют лишь семь кластеров со второго по восьмой. Их графики приведены отдельно на рисунке 15. Другие кластеры соответствуют другим типам поверхности: воды, каменистых поверхностей, минерализованных почв (в очень малой доле).

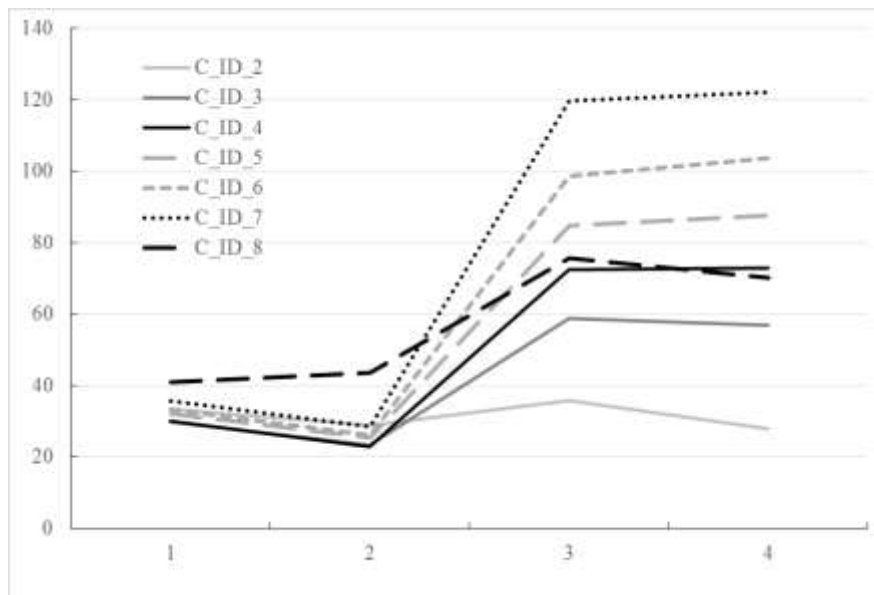


Рисунок 15 – Спектральные портреты кластеров растительного покрова, 1975 г.

От кластера номер 2 к кластеру номер 7 происходит смена преобладающего типа растительности: от травяных сообществ к лиственным лесам, затем смешанным лесам и затем темнохвойным лесам (кедровым) в порядке убывания максимума отраженного излучения в третьем канале сканера MSS, согласно таблице 3 это ближний инфракрасный диапазон. Эта интерпретация выполнена также с опорой на карту лесов СССР 1973 года, на которой отмечены кедровые, березовые леса, вырубки и не занятые лесом участки на данной территории.

Процентное распределение площади кластеров приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Распределение растительного покрова по участку поврежденных лесов

Кластер	3	4	5	6	7	8
Растительность	Темнохвойный лес	Смешанный лес	Лиственный лес	Лиственный лес	Лиственный лес и травы	Растительность на скалах
Процент площади	20.44	35.1	25.1	9.0	1.18	5.03
Площадь, га	38591	66248	47398	17107	2232	9497

Итого на площади около 180 тыс. га (часть территории выходит за пределы сцены Landsat) 55% занимают темнохвойные и смешанные с участием темнохвойных леса. Около 34% представлено лиственными лесами, около 6% растительного покрова – травянистыми сообществами как в высокогорьях, так и на склонах Восточного Саяна.

### **5.3.2 Классификация снимков 2010, 2015 и 2021-22 годов и оценка динамики растительного покрова**

Визуальный анализ снимков Landsat исследуемой территории 2010, 2015 и 2021-2022 годов позволил выявить, что максимальная площадь лесного покрова

с преобладанием темнохвойных лесов была в 2010 году, затем наблюдается эффект повреждения лесов.

Снимок Landsat5 TM 2010 года был по аналогии со снимком Landsat2 MSS кластеризован методом К-средних на 20 кластеров. Были определены типы поверхности, выделены кластеры, соответствующие растительному покрову (рисунок 16).

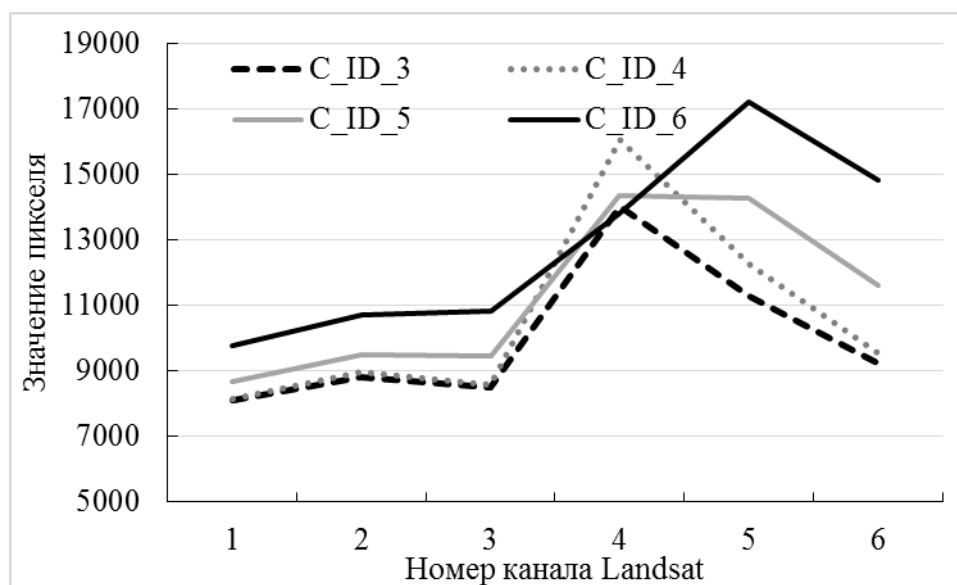


Рисунок 16 – Спектральные портреты кластеров растительности, 2010 г.

В таблице 4 приведены площади классов растительного покрова по снимку 2010 года.

Таблица 4 – Площади разных типов растительного покрова на исследуемой территории

Номер кластера	Количество пикселей	Площадь, га	Доля площади	Интерпретация кластера
3	1053676	94830.84	45.24	Темнохвойные леса
4	827976	74517.84	35.55	Лиственные и смешанные леса
5	353270	31794.3	15.17	Травяные сообщества
6	88244	7941.96	3.79	Скалы

Изменение площади темнохвойных, смешанных и лиственных лесов незначительно по сравнению с 1975 годом, произошло перераспределение смешанных древостоев между темнохвойными и лиственными в пользу лиственных. Часть кластера «Травяные сообщества» соответствует территории, на которой в 1975 году находился здоровый темнохвойный лес, а в 2010 году – поврежденный лесной покров, который отличается более высокими значениями отражения в коротковолновом ИК канале (канал номер 5). Более высокие отражательные свойства в среднем ИК диапазоне соответствуют растительности, которая испытывает недостаток влаги в кроне.

На снимке 2015 года таких участков растительности (темнохвойных или смешанных с преимуществом темнохвойных пород лесов), которые испытывают недостаток влаги, становится гораздо больше (рисунок 17).

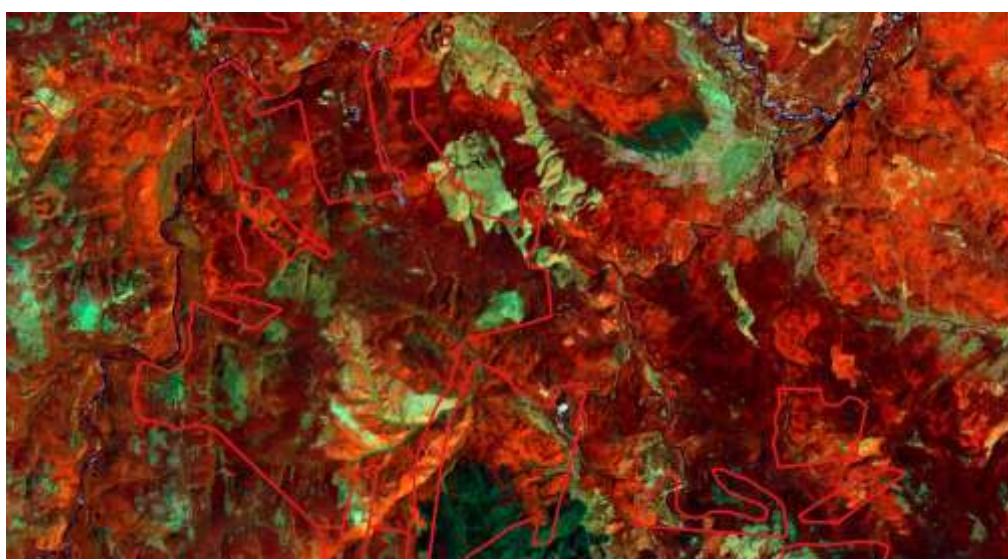
Фрагменты снимков приведены в режиме RGB. Для снимка 1975 года Landsat MSS визуализация каналов 4-3-2, прибор не имел среднего ИК канала. Снимки Landsat 2010 и 2015 годов представлены в композиции каналов 4-5-3 ближний ИК–средний ИК – видимый красный диапазоны. В такой комбинации каналов на снимках 2010 и 2015 годов темно-красными цветами передаются темнохвойные леса. Более светлые красные тона – это лиственные леса, участки гарей с травяным покрытием.

Оттенками зеленого цвета передаются участки поврежденного леса, как в результате гарей (более светлые зеленые оттенки), так и темно-зеленые участки лесов с недостатком влаги в кронах. На фрагменте снимка 2015 года в левой части наблюдается значительный рост площади поврежденных лесов. Повреждение выражается увеличением отражения в коротковолновом среднем инфракрасном канале, что соответствует недостатку влаги в кронах деревьев.

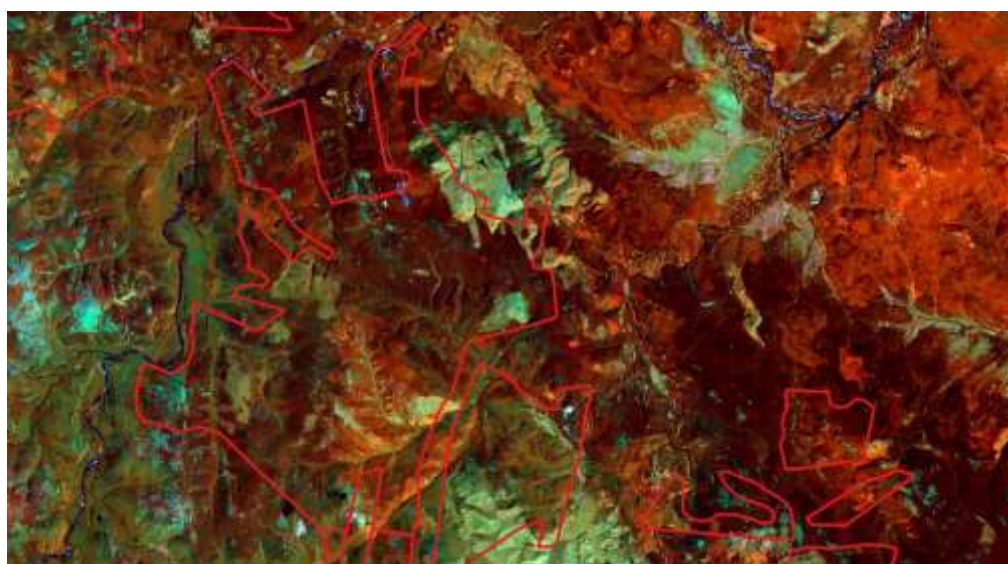




1975 г.



2010 г.



2015 г.

Рисунок 17 – Фрагменты снимков Landsat, иллюстрирующие появление (2010 г.) и увеличение площади поврежденных лесов (2015 г.)

Для выделения поврежденных лесов автоматической процедурой проведена кластеризация фрагмента снимка 2015 года на 20 кластеров методом К-средних. В результате выделилось 13 ненулевых кластеров, из которых кластеры 4 – 9 содержат 99,9% пикселей. Результат приведен на рисунке 18.

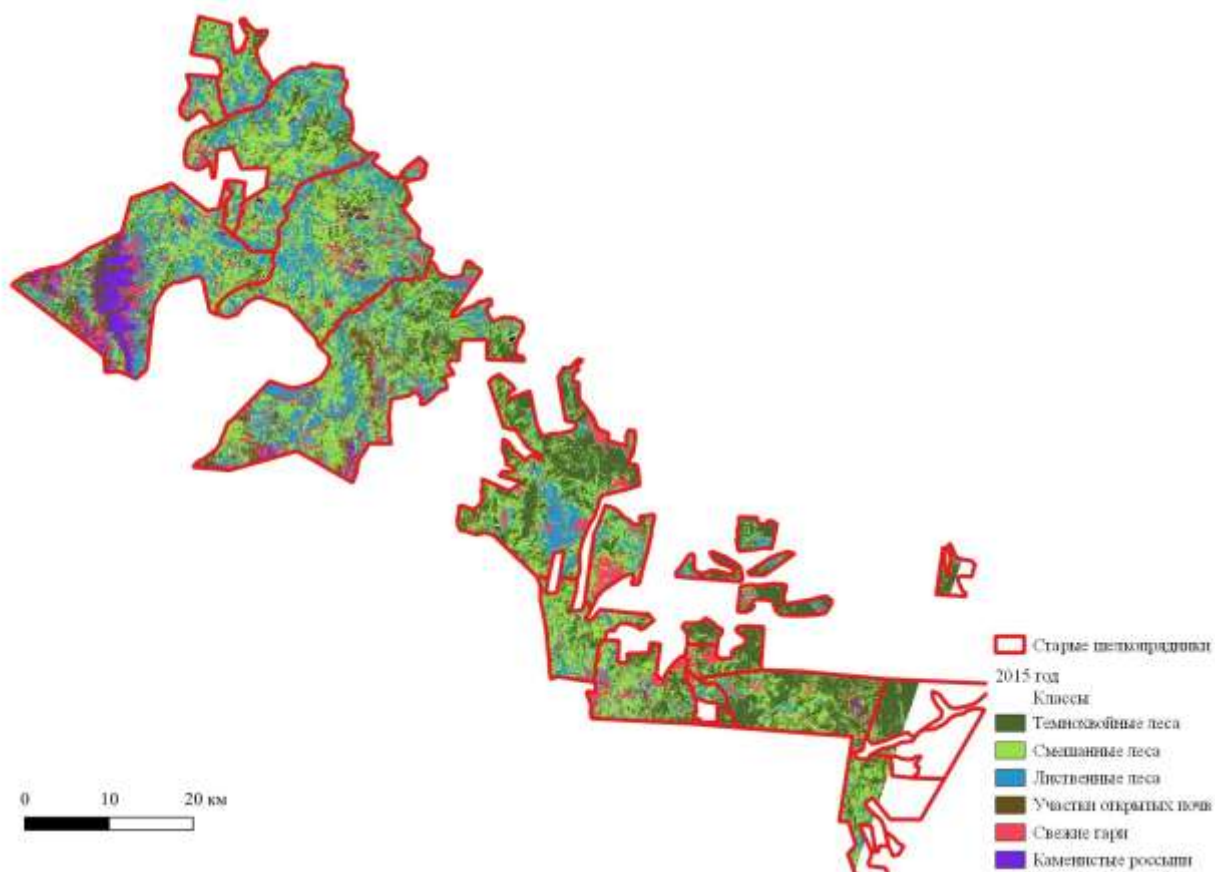


Рисунок 18 – Растительность на территории старых шелкопрядников, 2015 г.

Среди 20 кластеров не выделяется отдельным кластером территория, где в 2015 году появились по спектральным признакам поврежденные темнохвойные леса по сравнению с 2010 годом. На рисунке 19 приведены спектральные кривые основных классов растительности. Ряд 5 с повышенным отражением в среднем ИК канале соответствует свежим повреждениям растительного покрова, в основном гарей. Повреждения лесного покрова в отдельный кластер не выделяются.

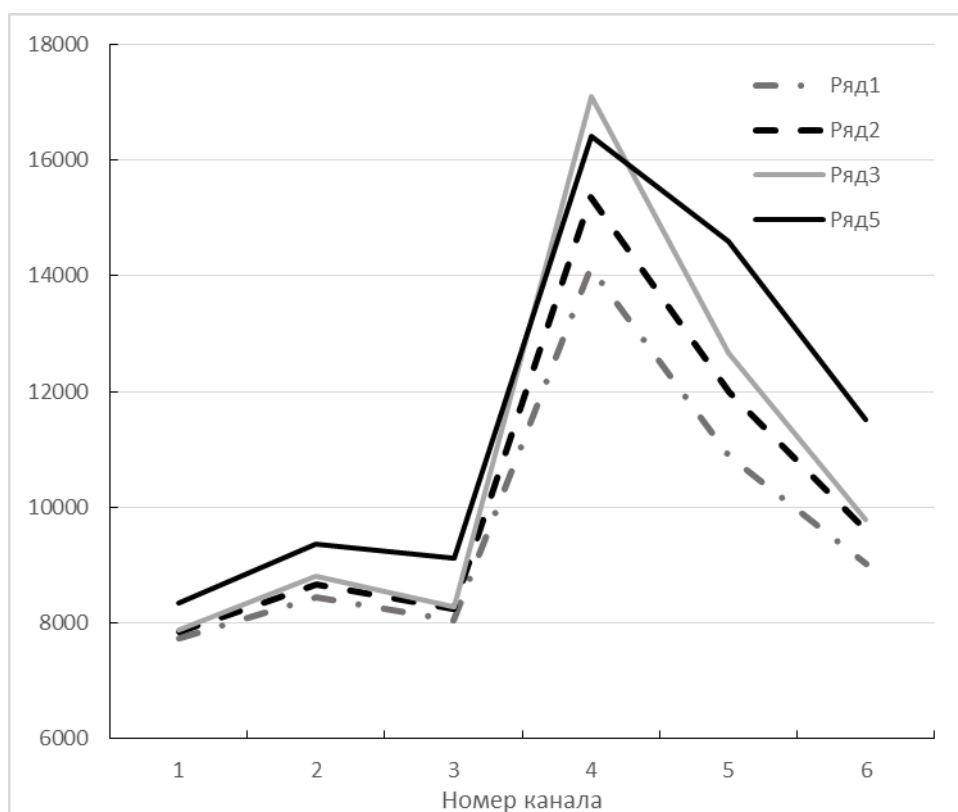


Рисунок 19 – Спектральные кривые основных классов поверхности по снимку 2015 года

Если более подробно исследовать статистические характеристики спектральных параметров здоровых и поврежденных темнохвойных лесов и их разделимость, получаем различия в среднем ИК канале. На рисунке 20 приведены спектральные кривые обучающих выборок

- здоровых темнохвойных лесов;
- поврежденных лесов, которые появились после 2010 года;
- поврежденных лесов, которые появились в 2010 году и ранее.

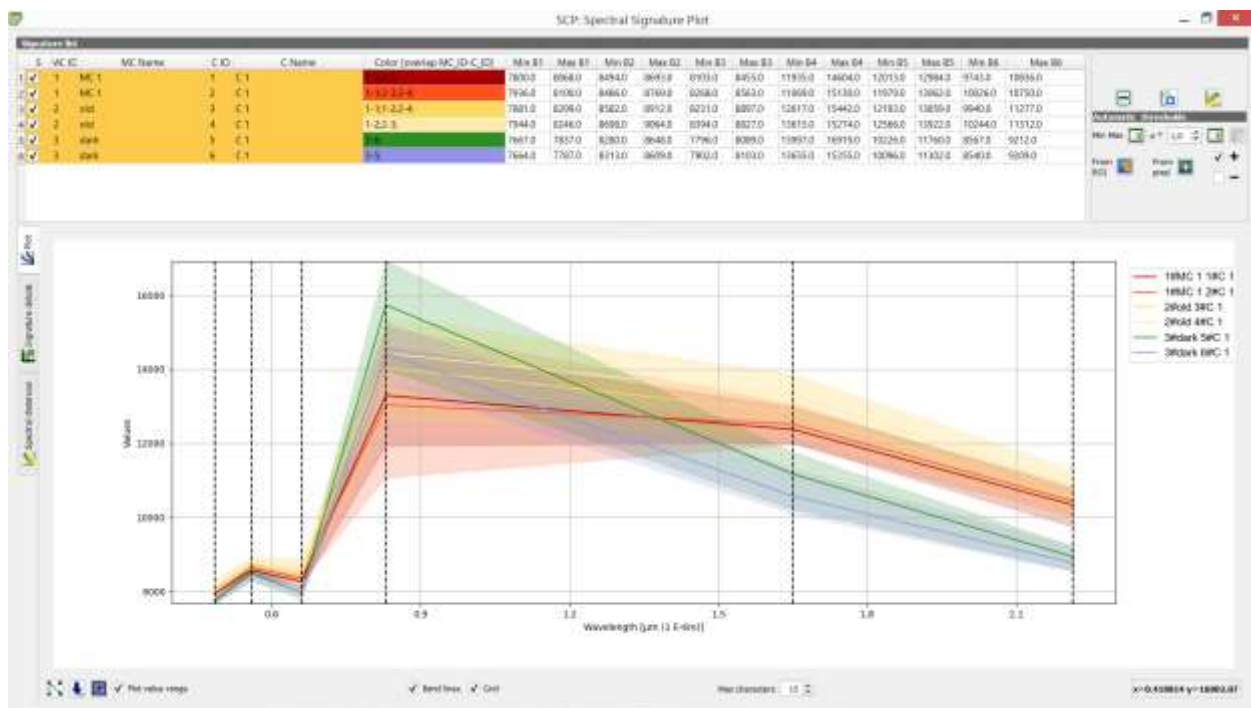


Рисунок 20 – Спектральные кривые обучающих выборок здоровых и поврежденных темнохвойных лесов на снимке 2015 года

Кластеры 3#dark соответствуют здоровым темнохвойным лесам, 2#old – поврежденным лесам, когда повреждения выделяются и на снимке 2010 года, две остальные линии – поврежденные леса, которые в 2010 году не были повреждены. Здоровые леса статистически отделимы от поврежденных в пятом и шестом канале, это средний ИК диапазон.

В Приложении Б приведены парные спектральные расстояния между обучающими выборками: евклидово расстояние, расстояние Джеффриса-Матусита, расстояние для классификации методом спектрального угла, подобие Брея-Куртиса. Только расстояние Джеффриса-Матусита соответствует по величинам делимости обучающих выборок. Это показывает необходимость применения методов классификации мощности метода максимального правдоподобия.

Поэтому для автоматизации выделения усыхающих лесов целесообразно попробовать использование других признаков, например, вегетационных индексов.

#### **5.4 Выделение усохших древостоев с помощью временных рядов водного индекса по данным MODIS**

Выделение поврежденных участков проводится по вегетационному индексу с участием коротковолнового ИК канала прибора Landsat8 OLI.

Данный показатель является относительным и определяет количество влагозапаса в растительном покрове, которое взаимодействует с поступающим солнечным излучением. Алгоритм позволяет выявить качественный признак увлажненности растительного покрова. Показатель NDWI чувствителен к изменениям влажности. Однако он менее чувствителен к атмосферным воздействиям, чем Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Индекс NDWI вычисляется по формуле:

$$NDWI = (NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR2), \quad (4)$$

где NIR – отражение в ближнем ИК канале,

SWIR2 – отражение в коротковолновом среднем ИК канале.

Полезность использования этого индекса для выявления поврежденных лесов указана в [19].

Для получения временных рядов NDWI используется продукт MOD09GA спектрорадиометра Terra среднего пространственного разрешения (MODIS) версии 6.1, который предоставляет оценку спектральной отражательной способности поверхности в каналах с 1 по 7, скорректированную с учетом атмосферных условий, таких как газы, аэрозоли и рэлеевское рассеяние. Специальный продукт с ежедневными значениями индекса NDWI представлен на платформе Google Earth Engine.

В Google Earth Engine написана программа для вывода временной серии коротковолнового индекса.

```

var dataset = ee.ImageCollection("MODIS/MOD09GA_NDWI")
    .filter(ee.Filter.date('2010-04-01', '2010-10-01'));
var ndwi = dataset.select('NDWI');
var ndwiVis = {
  min: -0.30,
  max: 1.0,
  palette: [
    'FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718', '74A901',
    '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201', '004C00', '023B01',
    '012E01', '011D01', '011301'
  ],
};
Map.setCenter(103.746, 52.529, 9);
Map.addLayer(ndwi, ndwiVis, 'NDWI');

```

Используя ee, через инструменты вывода данных с консоли, получены временные ряды индекса для здоровых и поврежденных древостоев. На рисунке 21 показано рабочее окно GEE с картой NDWI и векторным слоем поврежденных сибирским шелкопрядом лесов.

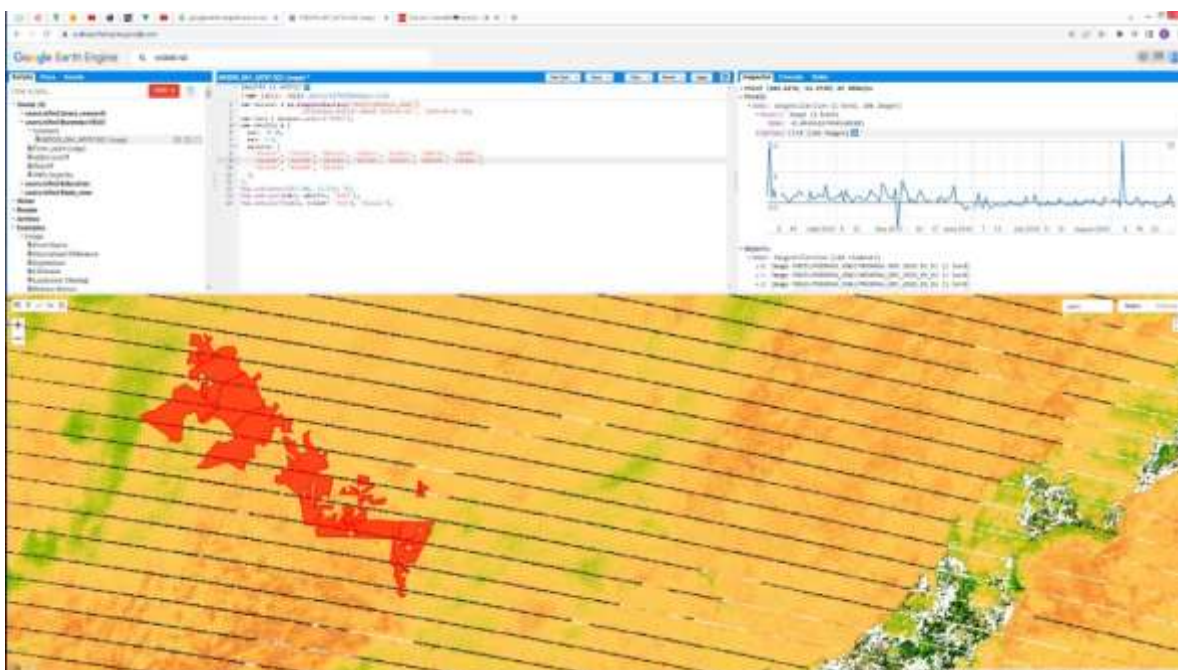


Рисунок 21 – Рабочее окно Google Earth Engine в режиме Code Editor

Исходные данные MOD09GA\_NDWI являются ежедневными. Пример динамики индекса в точке внутри исследуемой области в течение 2010–2012 годов показан на рисунке 22.

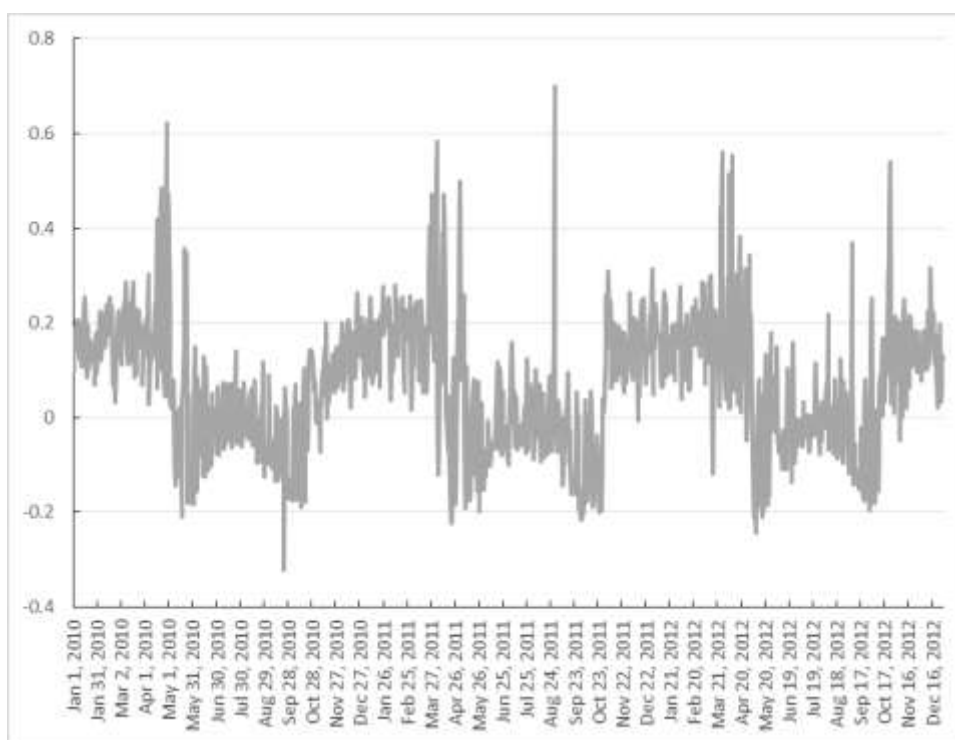


Рисунок 22 – Динамика значений NDWI в течение 2010 – 2012 годов

Из рисунка можно сделать вывод, что значения NDWI выше в зимний период и составляют примерно 0,2. В теплый период года значения индекса понижаются и принимают отрицательные значения в интервале от 0 до -0,2. С началом теплого периода индекс увеличивается, с середины лета – уменьшается.

Для проведения исследования в данной работе используются среднемесячные значения NDWI. Для этого приведенный выше код был модифицирован для расчета среднемесячных значений и вывода графика значений в указанный временной интервал с указанием года и месяца (приложение А). На рисунке 23 показан график значений NDWI только за теплый период года с мая по сентябрь в 2013, 2014 и 2015 годах.

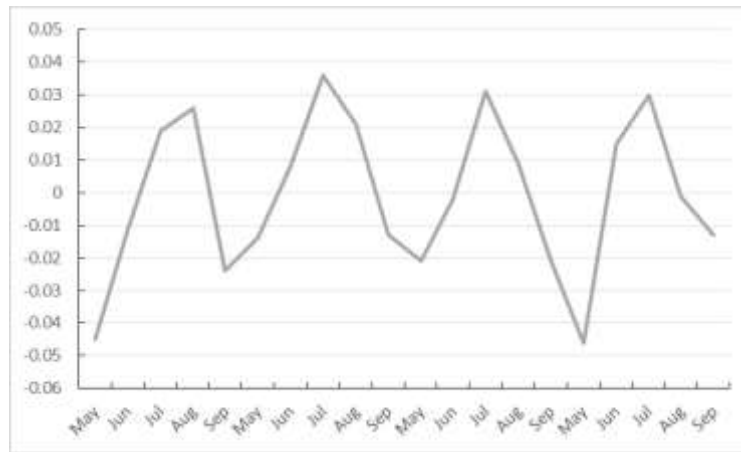
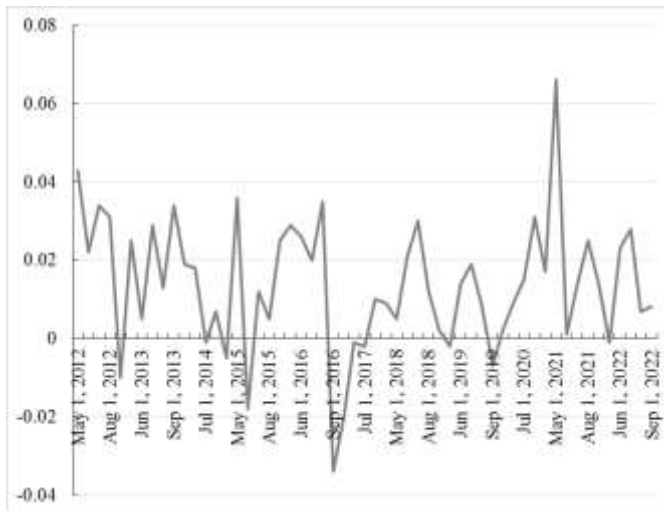


Рисунок 23 – Динамика среднемесячных значений NDWI в летний период

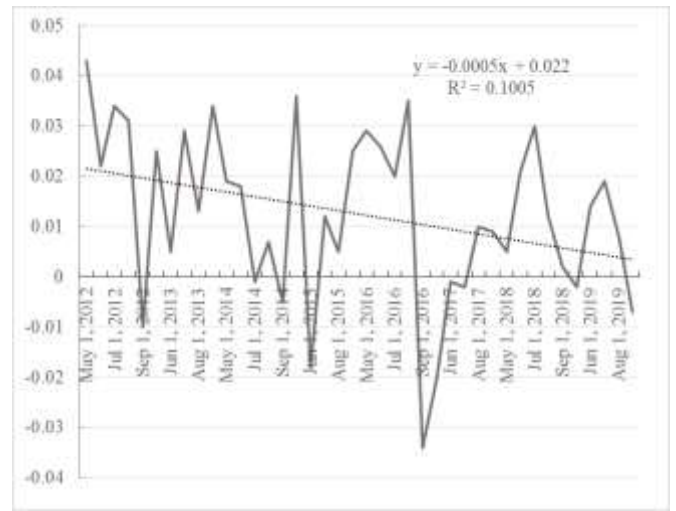
Используя снимки 2015 и 2022 годов, были построены два векторных слоя поврежденных древостоев. Используя программу, приведенную в Приложении Б, получены графики изменения NDWI за месяцы с мая по сентябрь с 2012 по 2022 годы (рисунок 24).

Понижение значений NDWI в течение вегетационного периода (май – сентябрь) на выделенных участках поврежденных лесов наблюдается с 2012 года (рисунок 24). Для поврежденных лесов, которое визуализируется на снимке 2015 года, с 2020 года значения индекса повышаются. Это возможно, например, из-за влияния растительности нижних ярусов леса, которые стали определять спектральные свойства лесной растительности после повреждения (усыхания) леса. Для участка поврежденных лесов на снимке 2021 года в 2021 – 2022 годах значение индекса NDWI продолжают снижаться. Приведенные линии тренда показывают тенденцию снижения значений.

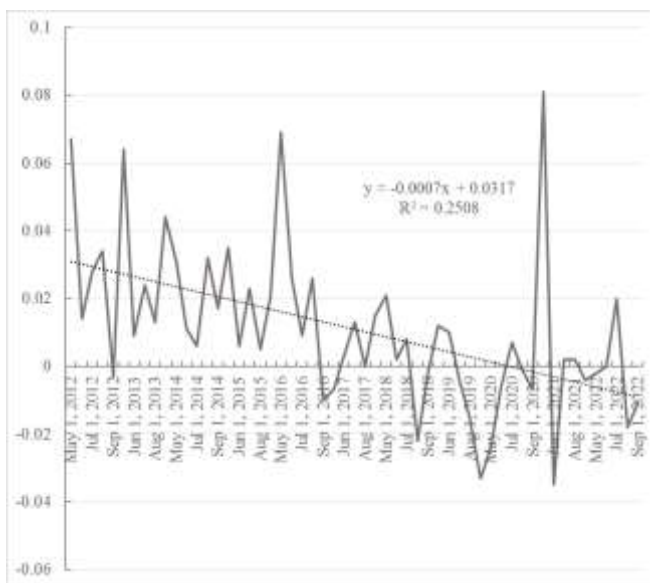




а)



б)



в)

Рисунок 24 – Изменение NDWI за месяцы с мая по сентябрь за 2012 – 2022 годы на участке поврежденных древостоев: а – повреждения на снимке 2015 г.; б – повреждения на снимке 2015 г. в период с 2012 по 2019 г.; в – повреждения на снимке 2021 г.

Таким образом, понижение значения индекса NDWI показывает участки поврежденных лесов, когда повреждение сопровождается понижением содержания влаги в кронах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения анализа динамики лесного покрова на участках кедровых лесов, погибших и усохших после вспышки массового размножения сибирского шелкопряда 1885 года собраны картографические документы – карта 1931 года на территории бассейна реки Большой Белой и карты лесов из Атласа лесов СССР 1972 года. Карты отсканированы и привязаны к снимкам Landsat. Создан векторный слой погибших кедровых лесов. Их площадь составила 223900 га.

Классификация снимка Landsat MSS мая 1978 г. и с использованием для более уверенной идентификации участков леса снимка Landsat MSS июля 1975 г. показала, что темнохвойные леса занимали 48% территории. Только 52 % занято темнохвойными лесами. Остальная территория занята березовыми и смешанными лесами. Березовые леса занимают верхние части склонов, на границах с гольцами.

Используя ЦМР SRTM для анализа связи территории погибших кедровых лесов с характеристиками рельефа, такими как высота над уровнем моря, экспозиция склонов, крутизна, определена доля площади современных темнохвойных лесов относительно площади погибших кедровых лесов, которая составляет около 50% (97110 га).

В ходе работы выполнена классификация фрагмента снимка 1975 года для уточнения площадей лесов разного породного состава (темнохвойных, лиственных, смешанных) на территории усохших кедровников.

Таким же образом проведена кластеризация фрагментов снимков 2010 и 2015 годов. Показано, что площадь лесов практически не менялась, появление участков повреждения лесов выявлено в 2010 году, на снимке 2015 года их площадь выросла, повреждения 2010 года также не исчезли.

Визуальный анализ снимков Landsat OLI 8, 9 2021 – 2023 годов позволяет сделать выводы о том, что темнохвойные леса восстановились, но в настоящий

момент часть из них повреждена, о чем можно сделать вывод по спектральным портретам участков лесного покрова.

Показано, что поврежденная часть лесного покрова имеет повышенную по сравнению с соседними участками лесов отражательную способность в среднем коротковолновом инфракрасном диапазоне спектра. Это может свидетельствовать о том, что лесной покров испытывает водный стресс и недостаток влаги в хвое. Для выявления таких участков кластеризация методом К-средних не дала результатов.

Для выделения поврежденных лесов также использовался водный индекс нормированной разности NDWI (коротковолновой ИК индекс из других источников), временные ряды которого можно получить с помощью платформы Google Earth Engine из продукта MOD09GA\_NDWI. Временные ряды индекса скачаны с помощью платформы GEE. Приведены предварительные результаты использования этих индексов для участков здоровых и поврежденных лесов: временной ряд месячных значений индекса имеет тенденцию к уменьшению.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Поварницын, В.А. Ангарская лесная экспедиция 1931 г. Ч. 2: Леса и лесовозобновление в бассейне реки Б.Белой в Восточных Саянах / В.А. Поварницын // Труды Совета по изучению производительных сил, Серия Сибирская. – Вып. 7. –Л.,1934.

2 Реймерс, Н.Ф. Уничтожение сибирского шелкопряда зверями и птицами, населяющими кедровые леса, и восстановление шелкопрядников и гарей / Н.Ф. Реймерс // Тр. по лесному хозяйству Сибири. – Вып. 4. Новосибирск, 1958. – С. 255–261.

3 Экологическая сукцессия // Grandars. – URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/sukcessiya.html> (дата обращения 28.04.2023 г.)

4 Федотова, Е.В Анализ очагов повреждения таежных лесов сибирским шелкопрядом по данным мелкомасштабной съемки / Е.В Федотова, В.И. Харук // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, №2. – С. 60-69.

5 Князева, С. В. Оценка состояния растительности в очаге массового размножения сибирского шелкопряда по спутниковым данным/ С.В. Князева, Н. В. Королева, С. П. Эйдлина, Е. Н. Соколова//Лесоведение, 2019, № 5, с. 385–398.

6 Мелкий, В.А. Влияние климата на состояние северной части елово-пихтовой подзоны темнохвойных бореальных лесов острова Сахалин/ В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, В.В. Братков// Региональные геосистемы. – 2020. – Том 44, № 4. – С. 415–431.

7 Турубанова, С. А. Анализ динамики лесного покрова Восточной Европы на основе спутниковых данных с 1985 по 2012 / С. А. Турубанова, А. М. Крылов, П. В. Потапов, А. Ю. Тюкавина // Экология экосистем. – 2016. – том 2, №1, 11 с.

8 Основы пространственной привязки набора растровых данных. ArcGIS Help 10.1. – URL:

<http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#/009t000000mn000000>

(дата обращения 15.11.2022 г.).

9 Атлас лесов СССР – Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1973 г. – 222 с.

10 Shuttle Radar Topography Mission. The mission to map the world – URL : <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения 15.11.2022 г.).

11 Уваров, И.А. Структура и функциональные возможности информационной системы TerraNorte для поддержки спутникового мониторинга бореальных экосистем / И.А. Уваров, С.А. Барталев, В.А. Егоров, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт, Т.С. Ховратович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – В.3, Т.2. – С. 375-379.

12 Landsat Mission. Landsat Collection 2 level-2 Science Products – URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products> (дата обращения 28.04.2023 г.)

13 Gao, B.G. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space/ B.G. Gao // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Volume 58, Issue 3. – P. 257-266.

14 Kharuk, V.I. Climate-driven conifer mortality in Siberia / V.I. Kharuk, S.T. Im, I.A. Petrov, M.L. Dvinskaya, A.S. Shushpanov, A.S. Golyukov // Global ecology and biogeography. – 2020. – Vol. 30, Iss. 2. – P. 543 – 556.

15 Vermote, E., Wolfe, R. MOD09GA MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.006>. Accessed 2023-05-16.5 Welcome to Google Earth Engine – URL: <https://developers.google.com/earth-engine> (дата обращения 28.04.2023 г.)

16 Gorelick, N. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore // Remote Sensing of Environment. – 2017, Vol. 202. – P. 18–27.

17 Condego, L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS // Journal of Open Source Software. – 2021. – Vol. 6(64). – P. 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

18 Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы: учебное пособие – Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.

19 Морозова, В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования / В. А. Морозова // Современные проблемы территориального развития : электрон. журн. – 2019. – № 2.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Скрипт вычисления среднемесячных значений NDWI из ежедневных данных MODIS MOD09GA\_NDWI

```
var Dailydataset = ee.ImageCollection("MODIS/MOD09GA_NDWI")
    .filter(ee.Filter.date('2010-01-01', '2019-12-31'))
    .filter(ee.Filter.calendarRange(1, 12, 'month'));

//Monthly Images
var months = ee.List.sequence(5, 9);
var years = ee.List.sequence(2012, 2015);

// monthly composite
var monthlyImages = ee.ImageCollection.fromImages(
  years.map(function (y) {
    return months.map(function(m) {
      var w = Dailydataset.select('NDWI').filter(ee.Filter.calendarRange(y, y,
'year'))
        .filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, 'month'))
        .mean()
        .set('system:time_start', ee.Date.fromYMD (y, m, 1));
      return w;
    });
  }).flatten());

Map.addLayer(monthlyImages);
print('monthlyImages');

var paramTimeSeries1 = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection: monthlyImages,
  regions: table,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  band: 'NDWI',
  scale: 200,
  xProperty: 'system:time_start',
  seriesProperty: 'ID'
```

```
});  
paramTimeSeries1.setChartType('ScatterChart');  
paramTimeSeries1.setOptions({  
  title: 'NDWI',  
  vAxis: {  
    title: 'NDWI'  
  },  
  lineWidth: 1,  
  pointSize: 4,  
  series: {  
    3050415020: {color: 'FF0000'},  
    3050424160: {color: '00FF00'},  
    2: {color: 'FF0000'},  
    3: {color: 'FF0000'}  
  }  
});  
  
print(paramTimeSeries1);
```



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Спектральные расстояния между обучающими выборками

	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 1 C_name = C 1
	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 2 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.7663141005092806
Spectral angle	0.7655553213073264
Euclidean distance	344.01507773788086
Bray-Curtis similarity [%]	99.38280008811874

	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 1 C_name = C 1
	MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 3 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.846834217013664
Spectral angle	0.9678990536096386
Euclidean distance	925.8034228371603
Bray-Curtis similarity [%]	98.57405590471801

	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 1 C_name = C 1
	MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 4 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9999540506459983
Spectral angle	1.1996664526018217
Euclidean distance	1623.6380334292496
Bray-Curtis similarity [%]	97.28610716610386

	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 1 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 5 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9999999998988112
Spectral angle	6.9509285960938785
Euclidean distance	3081.4839319405824
Bray-Curtis similarity [%]	95.37958170728567

	MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 1 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 6 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9999999999999691
Spectral angle	5.719091503814314
Euclidean distance	2669.838264039087
Bray-Curtis similarity [%]	95.68116763172878

	<b>MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 2 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 3 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	1.5288520777505428
<b>Spectral angle</b>	1.6591216763166563
<b>Euclidean distance</b>	1063.1471462586928
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	98.76863631548649

	<b>MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 2 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 4 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	1.9997699430666291
<b>Spectral angle</b>	1.7992884630114516
<b>Euclidean distance</b>	1682.4801064342485
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	97.48058868237192

	<b>MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 2 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 5 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	2.0
<b>Spectral angle</b>	7.680316436619994
<b>Euclidean distance</b>	3405.954512873446
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	94.76785455047738

	<b>MC_ID = 1 MC_name = MC 1 C_ID = 2 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 6 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	2.0
<b>Spectral angle</b>	6.3844059994578375
<b>Euclidean distance</b>	2962.6806051002604
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	95.05782733696188

	<b>MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 3 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 4 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	1.7442787787762362
<b>Spectral angle</b>	0.3794197167912547
<b>Euclidean distance</b>	732.9559594975674
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	98.71155265036917

	<b>MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 3 C_name = C 1</b>
	<b>MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 5 C_name = C 1</b>
<b>Jeffries-Matusita distance</b>	1.9999999990427324
<b>Spectral angle</b>	6.281903070529641
<b>Euclidean distance</b>	2908.300091334282
<b>Bray-Curtis similarity [%]</b>	95.23316332914136

	MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 3 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 6 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9999999548163525
Spectral angle	5.267939031482705
Euclidean distance	2943.86387983671
Bray-Curtis similarity [%]	95.52774484981485


	MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 4 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 5 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9999999999999944
Spectral angle	6.411633903889889
Euclidean distance	3239.73124401238
Bray-Curtis similarity [%]	94.60289475242448

	MC_ID = 2 MC_name = old C_ID = 4 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 6 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	2.0
Spectral angle	5.489261972230682
Euclidean distance	3517.8635010912876
Bray-Curtis similarity [%]	94.8824848419414

	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 5 C_name = C 1
	MC_ID = 3 MC_name = dark C_ID = 6 C_name = C 1
Jeffries-Matusita distance	1.9750270224654178
Spectral angle	2.0443663989024263
Euclidean distance	1439.089496895259
Bray-Curtis similarity [%]	98.17275755039864

РФ  
Министерство науки и высшего образования  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт космических и информационных технологий  
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

 А.А. Гостева  
« 26 » июня 2023 г.

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Использование снимков Landsat в анализе динамики восстановления лесов,  
поврежденных сибирским шелкопрядом

09.04.02 Информационные системы и технологии  
09.04.02.06 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге  
природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	 подпись, дата	26.06.2023. доц., канд. биол. наук должность, ученая степень	Е.В. Федотова
Выпускник	 подпись, дата	26.06.2023	Н.А. Пучкова
Рецензент	 подпись, дата	26.06.23 ст.науч.сотр., канд.биол.наук. должность, ученая степень	А.С. Шушпанов
Нормоконтролер	 подпись, дата	26.06.2023.	Е.В. Федотова

Красноярск 2023