

Санкт-Петербургский государственный университет

ЗОРИНА Анастасия Геннадьевна

Выпускная квалификационная работа

Изменчивость вегетационных индексов типичных растительных сообществ Карельского перешейка по данным дистанционного зондирования Земли

Уровень образования: *Магистратура*

Направление *05.04.06 «Экология и природопользование»*

Основная образовательная программа *ВМ.5797 «Геоэкология: мониторинг, природопользование и экологическая безопасность»*

Научный руководитель:
доцент кафедры геоэкологии,
кандидат географических наук,
Третьяков Виктор Юрьевич

Рецензент:
заведующий кафедры
прикладной и системной
экологии, доцент,
РГГМУ
кандидат географических наук,
Алексеев Денис Константинович

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географическое описание	5
1.1. Геологическое строение и рельеф.....	5
1.2. Климат	6
1.3. Природные воды.....	8
1.4. Почвы.....	9
1.5. Растительность.....	11
Глава 2. Дистанционное зондирование Земли для анализа растительности	12
2.1. Вегетационный индекс	12
2.2. Sentinel-2	14
2.3. Основные задачи, решаемые с помощью данных дистанционного зондирования	16
2.4. Методы обработки и анализа снимков	18
2.5. Операции со спектральными каналами	19
Глава 3. Материалы и методика работы.....	21
6.1. Векторизация карты растительных сообществ северо-западного Приладожья.....	23
6.2. Получение снимков Sentinel-2.....	26
6.3. Определение вегетационного индекса NDVI	29
6.4. Статистическая обработка данных	34
Глава 4. Результаты	38
Заключение.....	46
Список использованной литературы	47
ПРИЛОЖЕНИЕ	52

Введение

В настоящее время методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются одним из важнейших инструментов исследования природных и природно-техногенных процессов и явлений. Наиболее существенное значение они приобретают при комплексном изучении обширных и малонаселенных территорий, поскольку зачастую данные ДЗЗ для них являются единственным источником независимой, объективной и актуальной информации (Лупян, 2013; Бычков, 2013).

Космические снимки и геоинформационные технологии позволяют одновременно повысить точность и сократить сроки получения достоверной информации.

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. (Лиджиева, 2012)

Наиболее популярный и часто используемый индекс – Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – нормализованный разностный индекс растительности. Индекс может принимать значения от -1 до +1. На значения индекса влияет видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция, угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью (Черепанов, 2011).

Вегетационные индексы характеризуют вегетационный период растительности в соответствии с устоявшимся климатом, влажностью, рельефом по высоте, ветром, температурой, теневой частью, солнечным светом и др. (Суворова, 2015).

Интерес представляют и другие варианты вегетационных индексов, которые в перспективе можно применить к району исследования, сравнить полученные результаты. Тем не менее следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей исследуемого свойства, и их значения зависят от характеристик сенсора (ширина спектральных каналов, разрешения), условий съемки, освещенности, состояния атмосферы. Они дают только относительные оценки свойств растительного покрова, которые могут быть интерпретированы и с привлечением полных данных пересчитаны в абсолютные (Донгак, 2022).

Изменения в растительном покрове, происходящие вследствие воздействия нарушающих факторов, могут приводить к смене спектрально-отражательных свойств территорий, на которых располагаются лесные экосистемы (Барталев, 2005; Kennedy, 2010). В связи с этим анализ изменений отражательных признаков, измеренных по спутниковым данным, представляет интерес с точки зрения обнаружения ареалов нарушенности лесных массивов (Hermosilla, 2015). Выявленные при помощи вегетационного индекса (NDVI)

количественные критерии нарушенности растительных сообществ в результате антропогенного воздействия дают возможность принимать наиболее верные в долгосрочной перспективе решения, направленные на повышение продуктивности естественных сообществ и противодействие вредным воздействиям (Лиджиева, 2012).

Как показали исследования (Елсаков, 2011; Жирин, 2014; Senf, 2017; Терехин, 2017), анализ разновременных спутниковых изображений может быть достаточно успешно применен для выявления изменений в лесах, включая выявление нарушенных лесных участков. Основное ограничение использования спутниковых данных при этом связано с возможностью выявлять только нарушения, затрагивающие верхние ярусы. Обусловлено это тем, что нарушения нижних ярусов, а также лесной подстилки не проявляются на большинстве типов данных дистанционного зондирования, за исключением лидарных. Тем не менее выявление нарушений в верхних ярусах и древостое является одной из первоочередных задач мониторинга лесных земель (Исаев, 2003).

Тема данной работы соответствует следующей области исследований специальности геоэкология в соответствии с ВАК 25.00.36: 1. Науки о Земле: 1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля.

Актуальность данной работы состоит в оценке возможности применения индексов, в частности, вегетационного индекса NDVI для экологического состояния растительного покрова.

Целью данной работы является определение внутригодовой и межгодовой динамики вегетационных индексов растительных сообществ Карельского перешейка и значимости различий между разными растительными сообществами.

Для достижения заданной цели, поставлены и решены следующие *задачи*:

- анализ предметной области;
- описать методику вычисления вегетационного индекса NDVI и выполнить расчеты для индексов по данным ДЗЗ;
- выполнить статистический анализ значимости различий значений индекса NDVI для одних и тех же растительных сообществ в течение вегетационного периода;
- выполнить статистический анализ значимости различий значений индекса NDVI для шести классов растительности для смежных годов.

Объекты исследования – растительные сообщества Карельского перешейка.

Предмет исследования – изменчивость вегетационных индексов NDVI.

Глава 1. Физико-географическое описание

1.1. Геологическое строение и рельеф

Ладожским озером, имеет богатую историю геологического развития, включая разные этапы формирования рельефа, пород и ископаемых.

Расположение на стыке тектонических плит Русской и Балтийской привело к образованию разломов и складок, определяющих структуру региона.

Перешеек находится между гранитами и гнейсами, образовавшимися из магмы и метаморфизма за миллионы лет. Здесь есть много месторождений полезных ископаемых, таких как железные руды, медь, никель и другие металлы, образовавшихся из сложных процессов магматизма и метаморфизма. (Геология СССР, 1960)

Рельеф разнообразен, с высотами в основном до 50 м, грядами, озами, камами, дюнами и холмами.

Особенностью являются Ладожские шхеры – система островов и скал, которые образуют уникальный ландшафт.

Также на территории Карельского перешейка есть множество озер и рек. Они формируют рельеф и являются источником воды для жителей региона. Основная река – Вуокса. (Большая российская энциклопедия. Электронный ресурс)

1.2. Климат

Климат Карельского перешейка умеренный, с высокой влажностью воздуха и умеренно тёплым летом, а также довольно длительной умеренно холодной зимой. Преобладают циркуляционные факторы в холодное полугодие и радиационные в тёплое. (Семенчук, 2017)

Для описываемого района суммарная радиация (вся солнечная радиация, дошедшая до поверхности земли) равна в среднем 339-378 кДж /см в год; основное ее количество приходится на июнь-июль (58,6 кДж/см), то есть на месяцы с самым длинным днем. Эффективное излучение составляет 134-163 кДж/см в год. Для растительного покрова важен радиационный баланс, который на Карельском перешейке достигает 2132 кДж/см в год. При этом весь вегетационный период (май-сентябрь) он положителен (максимум в июне) и становится отрицательным с ноября по март из-за малой суммарной радиации в это время года и из-за высокого *альбедо снега* (величина, которая описывает способность поверхности снега отражать солнечное излучение), который отражает 70 % и более солнечной радиации. (Пигольцина, 2009).

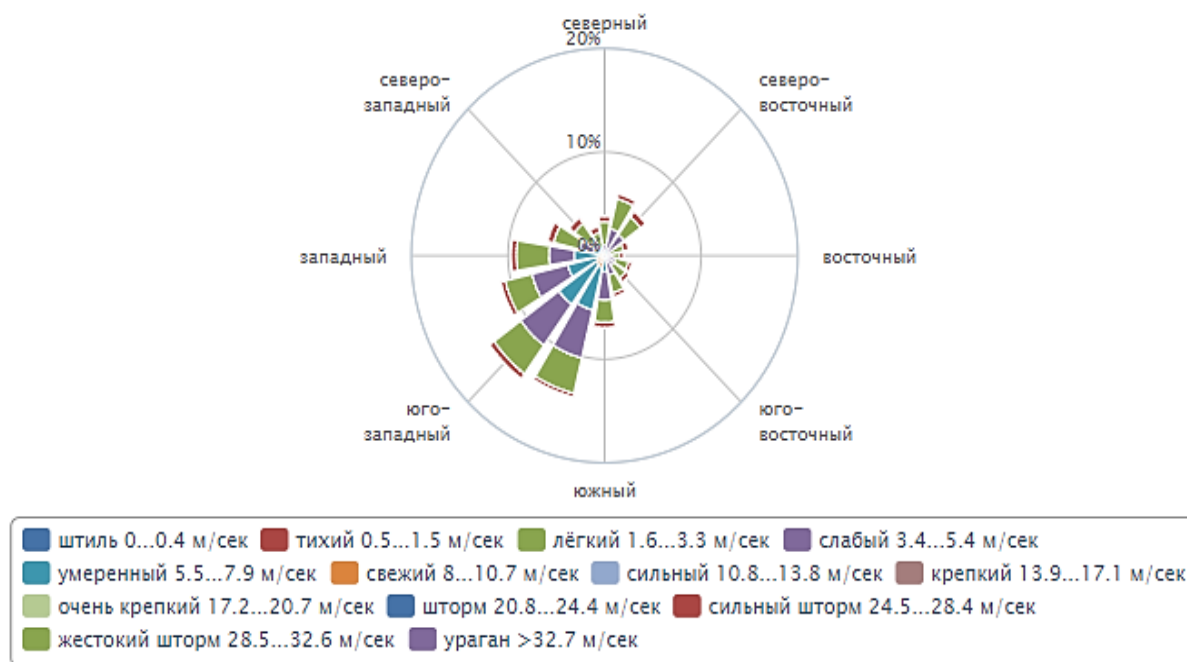


Рис. 1. Роза ветров в п. Кузнечное (Meteocast. Электронный ресурс)

В течение года по среднемноголетним наблюдениям преобладают южные, юго-восточные и юго-западные ветры, их направление неустойчивое (рис. 1). Весной и летом чаще всего увеличивается повторяемость северо-восточных ветров, а осенью и зимой -

южных и западных. Резкие смены направления ветра наблюдаются и в течение одних суток. (Большая российская энциклопедия. Электронный ресурс.)

Температура воздуха. Среднегодовая температура на Карельском перешейке +2,6°C. Самые холодные месяцы - январь и февраль. Теплый период, когда среднесуточная температура выше нуля, начинается в начале апреля и продолжается до конца октября-начала ноября, его продолжительность составляет примерно 205-220 дней. Заморозки начинаются в сентябре-октябре, а затем в мае. Снежный покров обычно устанавливается в конце ноября-начале декабря (толщина 40-50 сантиметров), а продолжительность периода со снежным покровом составляет 120-140 дней. Таяние снега происходит в конце марта-начале апреля, и этот процесс длится примерно 10-15 дней.

Осадки и испарение. Территория Карельского перешейка относится к зоне избыточного увлажнения, что связано с малым количеством получаемого тепла и активной циклонической деятельностью в течение всего года. Большее количество осадков выпадает на возвышенностях и меньше - на побережье Ладожского озера. Годовое количество осадков составляет от 570 до 800 миллиметров, более 70% из которых выпадает в теплое время года. За холодный период осадков выпадает от 150 до 200 миллиметров. За теплый период выпадает от 400 до 500 миллиметров осадков. Количество дней с осадками составляет около 200 в год.

Среднегодовой уровень испарения на территории Карельского перешейка колеблется от 295 до 375 миллиметров. Годовое количество осадков больше испарения на 200-300 миллиметров, что благоприятно влияет на питание поверхностных и подземных вод. Максимальные значения приходятся на летние месяцы, а в зимние - испарения практически нет. (Семенчук А.В., 2017)

1.3. Природные воды

Все водотоки на рассматриваемой территории принадлежат бассейну Балтийского моря и имеют сток в Ладожское озеро или в Финский залив (Лиджиева, 2012).

Финский залив - длиной 420 км и площадью около 29,5 тыс. км². Южный берег – низкий, песчаный, лишь на ограниченных участках встречаются обрывы. На севере же берег сложен кристаллическими породами, изрезан скалами и заливами. Соленость Финского залива всего 6‰. (Семенчук А.В., 2017)

Ладожское озеро - самое большое в Европе, образовавшееся в доледниковой тектонической впадине. Его площадь с островами составляет 18,3 тыс. км², а глубина достигает до 233 м на севере. Берега озера разные: северные - крутые, изрезанные; южные - низкие, болотистые. Кроме Ладожского, на территории много других озер со средней глубиной 3-6 м. (Лиджиева, 2012; Черепанов, 2011)

Речная сеть насыщена, реки часто являются протоками между озерами. Они образуют единую систему с озёрами. В южной части Карельского перешейка Лемболовская возвышенность разделяет воды, стекающие в залив и озеро. Питание рек и озер происходит, в основном, за счёт весеннего снеготаяния (более 50 %), обуславливающего максимальные расходы и уровни, дождей (20-30 %) и подземных вод (15-20 %). (Лиджиева, 2012; Черепанов, 2011)

Болота занимают половину территории в Приладожской и Приневской низменностях, в основном это верховые болота с торфяным слоем. Их роль в гидрогеологии огромна - в периоды паводков болота освобождают воду, пополняя поверхностные и подземные запасы. (Семенчук, 2017; Схема комплексного использования и ..., 2015)

1.4. Почвы

Почвенный покров района отличается разнообразием, обусловленным географическим положением на границе подзон (средней и южной тайги), влиянием влажного полуморского климата, спецификой геологического строения и рельефа местности. Большое значение имело и культурное преобразование территории.

Подзолистые почвы занимают большую часть рассматриваемой территории. Они характеризуются низким плодородием ввиду низкого содержания гумуса, кислой реакцией и значительной промывкой почвы. Основной причиной их формирования является воздействие хвойных лесов, которые преобладают в регионе. (Касаткина, 2018)

В условиях избыточного увлажнения формируются болотные почвы. В этих условиях процессы минерализации растительных остатков заторможены, что способствует накоплению торфа. Болотные почвы отличаются высоким содержанием органических веществ и кислой реакцией. (Нарыкова, 2022)

В качестве почвообразующих пород представлены:

- элювий гранитов на вершинах сельг,
- элюво-делювий и делювий на склонах,
- безвалунные суглинки и озерные глины в межсельговых понижениях и на озерных террасах.

Межсельговые понижения в большей степени заняты озёрными отложениями - глинами.

К основным типам почв относят:

1. Примитивно-аккумулятивные почвы формируются на вершинах сельг и приурочены к выходам коренных пород. Среди них выделяются торфянисто-аккумулятивные, перегнойно-аккумулятивные и торфянисто-перегнойно-аккумулятивные.

2. Подбуры характерны для верхних частей склонов сельг, формируются на элюво-делювии гранитов и моренных отложениях. Выделяют типичные и оподзоленные подбуры. Этот тип почв распространен под сосняками. Органоминеральный горизонт невелик и составляет около 4 см.

3. Буроземы характерны для средних и нижних частей склонов сельг и отличаются увеличением органоминерального горизонта до 10 см. Цвет почвы колеблется от красно-коричневого до коричневого.

4. Дерново-глеевые почвы (поверхностно-аллювиально-оглеенные) характерны для озерных террас и межсельговых понижений. Они отличаются высокой гумифицированностью, при этом гумус преимущественно грубый.

5. Торфяные почвы распространены в пониженных элементах рельефа, на глинах.
(Группа Экоанализ. Электронный ресурс)

1.5. Растительность

Ленинградская область располагается в лесной зоне, в подзоне южной тайги, где она соприкасается с подзоной смешанных лесов.

На рассматриваемой территории встречаются представители всех характерных для области исторически возникших комплексов растений. Отличительной особенностью растительности является сочетание своеобразных мохово-лишайниковых пустошей и сосняков лишайниковых на выходах гранитов с дубравными элементами на склонах селг.

Количество видов высшей водной растительности невелико. Они представлены: камышом (*Scirpus sp.*), тростником (*Phragmites sp.*), хвощом (*Equisetum sp.*), рогозом (*Typha sp.*), рдестом (*Potamogeton sp.*), осоками (*Carex sp.*), кубышкой жёлтой (*Nuphar lutea sp.*) и кубышкой малой (*Nuphar pumila (Timm.) DC.*)

В лесах и болотах наблюдается брусника (*Vaccinium vitis-idaea L.*), черника (*Vaccinium myrtillus L.*), голубика (*Vaccinium uliginosum L.*), морошка (*Rubus chamaemorus L.*), клюква (*Oxycoccus sp.*), земляника (*Fragaria sp.*), смородина (*Ribes sp.*) и малина (*Rubus idaeus L.*).

В изучаемом районе преобладают хвойные насаждения (59%) (Немчинов, 2019). Они состоят из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) и ели обыкновенной (*Picea abies L.*), но встречаются и участки широколиственных пород, к которым относится липа (*Tilia sp.*), вяз (*Ulmus sp.*) и клен (*Acer sp.*). В подболоченных низинах и вдоль русел рек встречается ольха (*Alnus sp.*).

В лесах, расположенных у озера, под склонами террас и в межсельговых понижениях встречаются ельники кисличные. В травяном ярусе здесь обитают виды широколиственных лесов: чина весенняя (*Lathyrus vernus L.*), печёночница благородная (*Hepatica nobilis Mill.*), медуница неясная (*Pulmonaria obscura Dum.*).

Глава 2. Дистанционное зондирование Земли для анализа растительности

2.1. Вегетационный индекс

Вегетационные индексы подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из различий кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Принимая во внимание спектрально-отражательную способность лесных насаждений, для оценки их состояния в научно-исследовательской работе были выбраны наиболее информативные спектральные зоны - красная и ближняя инфракрасная зона.

На красную зону спектра (0,62 – 0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75 – 1,3 мкм) – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Так, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Когда растения находятся в состоянии стресса, содержание хлорофилла в растительности снижается, и отражательная способность увеличивается в красной области спектра. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от других природных объектов. (Акковецкий, 1983; Тематическое дешифрирование и... . Электронный ресурс.)

Наиболее популярным индексом для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, является Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Нормализованный относительный индекс растительности — простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Преимущество использования этого индекса заключается в наличии измерений коэффициента спектральной яркости (отношения монохроматических яркостей объекта и идеально отражающей поверхности, измеряемых при одинаковых условиях освещения и наблюдения) в каждом из каналов в числителе и знаменателе, что позволяет значительно снизить влияние атмосферы и геометрии наблюдений и проводить более корректное сравнение измерений, сделанных в разное время (Барталев, 2016).

Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения в пределах от 0,2 до 0,9, и чем больше зелёной фитомассы растений в момент измерения, тем ближе значение NDVI к единице. Для растительности отражение в красной зоне спектра всегда меньше, чем в ближней инфракрасной, за счет поглощения солнечной радиации хлорофиллом, поэтому значения NDVI для растительности не могут быть меньше 0.

Ввиду относительности данного параметра нельзя оценить абсолютное значение биомассы зеленых листьев, но можно достоверно оценить продуктивность развития

растительности. (Myneni, 1995). На значения индекса влияет видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью.

Формула расчета индекса NDVI для спутниковых снимков следующая (формула 1):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, NDVI часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фитогидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты. (Черепанов, 2011)

2.2. Sentinel-2

Группировка из двух оптических спутников Sentinel-2 регулярно предоставляет космические снимки на всю Землю, обеспечивая непрерывность получения данных. Они созданы Европейским космическим агентством в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности Copernicus.

Sentinel-2 оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором Multi Spectral Instrument (MSI) для съемок с разрешением от 10 до 60 м. Съёмки выполняются в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих 13 спектральных каналов (ДЗЗ и наблюдение за растениями. Электронный ресурс). Это гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в том числе и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние атмосферы на качество съемки.

Снимки, первоначально получаемые со спутников, записаны в виде так называемых "сырых значений" яркости DN (Digital Number). Данные в таком формате нельзя адекватно сопоставить с данными других съемок. При прохождении через атмосферу электромагнитные волны поглощаются и рассеиваются. Поэтому для улучшения спутниковых снимков производят радиометрическую коррекцию влияния атмосферы.

Снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-2A уже имеют радиометрическую коррекцию и атмосферную коррекцию. То есть в них представлены значения отражательной способности (reflectance) в верхней части атмосферы (отношения интенсивности исходящего от Земли излучения в данном диапазоне спектра к интенсивности приходящего от Солнца излучения в этой же области спектра).

Изображения Sentinel-2 скачиваются в файлах формата «tiff», которые содержат информацию о системе координат снимка (американская система Universal Transverse Mercator, сокращённо UTM, для Санкт-Петербурга и Ленинградской области зоны 35 и 36) и месте расположения территории снимка на поверхности Земли. Поэтому при их добавлении в качестве растрового слоя электронной карты отсутствует необходимость выполнения процедуры географической привязки изображения.

Каждый файл снимков Sentinel-2 содержит одну матрицу (растр) отражательной способности в определённом диапазоне спектра. Для расчетов значений индекса NDVI необходимы данные диапазонов B04 (красный) и B08 (ближний инфракрасный). Длина волны излучения центра диапазона B04 – 665 нанометров (нм), диапазона B08 – 842 нм.

Sentinel-2 выполняет широкий спектр задач, связанных с сушей и прибрежными водами Земли. Так спутниковые снимки могут использоваться для мониторинга изменения

растительного покрова. Пространственное разрешение ячеек растров этих диапазонов составляет 10 м, так ячейки изображений представляют собой квадраты со сторонами 10 на 10 метров.

2. 3. Основные задачи, решаемые с помощью данных дистанционного зондирования

В зарубежной литературе существует ряд обзоров, отражающих использование данных дистанционного зондирования для решения различных задач в области инвентаризации, мониторинга и охраны растительных сообществ (Kuenzer, 2014; Petrou, 2015). В отношении изучения растительного покрова выделяют следующие группы задач, в решении которых может существенно помочь использование космических снимков:

1. Инвентаризация растительного покрова, то есть получение первичной информации о его составе и структуре. Это может быть как собственно картографирование в узком смысле (создание карт), так и получение информации о распространении единиц растительного покрова разного масштаба – от формаций до отдельных видов.

2. Количественная оценка, то есть получение метрик, численно отражающих требуемый параметр, на основе спектральных индексов (Kuenzer, 2014). С помощью космических снимков можно оценить большое число параметров: биологическое разнообразие, биомассу, сомкнутость крон, фотосинтетическую активность, индекс листовой поверхности и содержание некоторых элементов.

3. Моделирование и прогнозирование распределения отдельных элементов растительного покрова, изменения границ сообществ и т. д. В этих процессах данные дистанционного зондирования могут выступать как количественные или качественные входные данные или как основа для экстраполяции результатов моделирования.

4. Оценка и картографирование параметров среды (например, влажности почв; водоемов или болот – как мест обитания определенных видов или типов растительности), антропогенного влияния (дороги, вырубки и другие нарушения, влияющие на распределение элементов растительного покрова), угроз.

5. Оценка пространственного распределения характеристик растительного покрова (связности/фрагментированности территории, климаксовых/производных сообществ), выявление коридоров, пригодных для местообитаний редких видов, и т. п. (Petrou, 2015).

6. Мониторинг и оценка изменений характеристик, выявленных методами в пунктах 1–5. Это особенно удобно делать с использованием космических снимков, так как каждый космический снимок регистрирует состояние местности на определенный, четко известный момент. За счет этого можно оценивать как нарушения растительного покрова (например, выявлять вырубки), так и сезонную изменчивость сообществ, фенологические константы, выявлять сукцессии или изменение условий местообитания во времени.

7. Совместный ГИС-анализ данных дистанционного зондирования и других данных (например, параметров рельефа, гидрографической сети и т. п.) открывает возможности

статистического анализа закономерностей распределения растительного покрова, т. к. на основе космических снимков (в отличие от точечных полевых данных) можно получить пространственно непрерывные данные о встречаемости, например, растительного сообщества.

Нельзя также не упомянуть об удобстве использования ДЗЗ как базового слоя при планировании полевых исследований или для визуализации результатов исследований. С другой стороны, методы ДЗЗ имеют ряд ограничений в применении. Так, в работе Homolova et al. (2013) приведены конкретные примеры задач, которые нельзя решить с помощью некоторых типов космических снимков (например, классификация жизненных форм или определение высоты растений требуют методов активного сканирования) (Homolova, 2013).

В целом в применении к изучению растительного покрова ДЗЗ и ГИС являются лишь одним из методов (зачастую мощным, но тем не менее дополнительным). Во многих ситуациях строго необходимы полевые исследования, и именно они несут первичную информацию, а данные дистанционного зондирования выступают как основа для экстраполяции полевых данных и анализа пространственного распределения характеристик растительных сообществ.

2.4. Методы обработки и анализа снимков

Обработка данных дистанционного зондирования включает в себя большое количество разных методов, но суть их сводится к получению на основе космического снимка карты, отражающей информацию об определенных, важных для исследователя объектах и явлениях. Этот процесс называется дешифрированием снимка.

Если в работе используют исходные данные дистанционного зондирования, дешифрированию снимка обычно предшествует первичная обработка. Она может включать в себя геометрическую и атмосферную коррекцию, а также другие операции в тех случаях, когда это необходимо (атмосферная коррекция – при работе в чувствительных к атмосферным искажениям спектральных диапазонах и т. д.).

Собственно дешифрирование может быть как визуальным с выделением контуров объектов по снимку вручную, так и автоматизированным. Визуальное дешифрирование требует длительной монотонной работы, но минимальной предварительной и последующей обработки; автоматизированное дешифрирование требует более высокой квалификации и незаменимо для больших территорий с однообразными выделяемыми объектами, а также в случае нечеткой границы объектов; ему сопутствует длительная предварительная подготовка и постобработка результатов.

Автоматизированные методы дешифрирования снимков основаны на проведении математических операций с растрами (могут быть использованы как разные каналы одного снимка для расчета индексов, как, например, индекс NDVI, так и каналы снимков разного времени – для выявления изменений) и классификации снимков. Во всех случаях для распознавания объектов необходимо обладать определенными знаниями об их представлении на снимке и закономерностях распределения. Преимуществом при анализе дистанционных данных будет подкрепление результатами наземных исследований. В этом случае полевые данные необходимо наложить на снимок и использовать их как опорные. Также может помочь использование топографической карты, материалов лесоустройства и других картографических продуктов (Комарова, 2016).

2.5. Операции со спектральными каналами

Вычисление спектральных индексов позволяет подчеркнуть разницу в отражении излучения в определенных частях спектра различными объектами (Лурье, 2010). Большинство индексов, используемых для изучения растительных сообществ, основаны на отличии спектрального профиля здоровой растительности от профиля угнетенной, а также любых других объектов, в том числе воды и почв (активно вегетирующие сообщества поглощают больше излучения в красной зоне спектра и отражают больше в ближней инфракрасной части по сравнению с остальными объектами) (Лурье, 2010). Чаще других используется индекс NDVI (Курбанов, 2013); как правило, он применяется для создания глобальных продуктов на основе снимков низкого и среднего разрешения (Beck, 2007). Вместе с тем индекс NDVI является довольно грубым, особенно при высокой и низкой сомкнутости растительного покрова; в последнем случае он может быть заменен на индекс SAVI, учитывающий влияние почв (Шовенгердт, 2010).

Преобразования спектральных каналов применяют, чтобы извлечь из значений яркости численные данные, дающие наиболее подходящую для изучения конкретного объекта информацию, другими словами – подчеркнуть необходимую и удалить лишнюю информацию. Преобразование методом главных компонент позволяет выделить среди значений отражения в разных спектральных каналах наиболее значимые, уменьшить число анализируемых каналов практически без потери информации. В первой компоненте при этом максимально подчеркнут спектральный контраст, а вторая отражает границы смены контраста. Это может улучшить результаты как визуального дешифрирования, так и простых методов автоматизированной классификации, т. к. синтез трех главных компонент содержит больше информации, чем любые три исходных спектральных канала (Лурье, 2010; Шовенгердт, 2010).

Преобразование снимков методом Tasseled Cap («колпачок с кисточкой») также очень популярно среди исследователей растительности. Оно позволяет разложить значения спектральных каналов на три составляющих: яркости (подразумевается преимущественно яркость почв), «зелёности» и влажности (почв и атмосферы), каждая из которых имеет принципиальное значение для дешифрирования (Курбанов, 2013).

Принципиальное отличие преобразований методом главных компонент и Tasseled Cap – в том, что первое зависит от исходного набора данных и универсально для всех объектов, а второе разработано специально для изучения почв и растительности и не зависит от разброса яркостей в исходных каналах (Шовенгердт, 2010).

Для быстрой оценки площадей изменений (особенно для лесопокрытых площадей), прошедших за определенный период на одной и той же территории, используют математические операции с каналами одного диапазона разновременных снимков (как правило, вычитают значения ближнего или коротковолнового инфракрасного канала более раннего снимка из значений того же канала более позднего снимка; также можно использовать деление) (Чандра, 2008). В результирующем слое выделяются три группы пикселей: со значениями, близкими к нулю (соответствуют пикселям исходного снимка, яркость которых не изменилась, – изменений нет), положительными (яркость пикселей увеличилась, что соответствует вырубкам) либо отрицательными (яркость пикселей уменьшилась, что соответствует зарастанию территории). При математических операциях следует учитывать радиометрическое разрешение входных данных (Комарова, 2016).

Глава 3. Материалы и методика работы

Объектами исследования в данной работе являются растительные сообщества Карельского перешейка: ельники, елово-сосновые, сосняки, сосняки скальные, лиственные леса и травянистая растительность. Для исследования изменчивости вегетационных индексов NDVI были обработаны снимки с 2018 по 2022 год в вегетационный период май-сентябрь в количестве 50 штук (табл. 1). Данные снимки впоследствии были преобразованы в снимки NDVI – 25 штук, из которых были выделены участки, соответствующие рассматриваемым растительным сообществам. Таким образом, для статистического анализа были подготовлены 150 таблиц (6 таблиц для одного снимка) со значениями вегетационных индексов NDVI. Всего было произведено 750 парных сравнений между значениями индексов.

Таблица 1. Характеристика файлов спутниковых снимков

Информация снимках:	2018					2019					2020					2021					2022				
	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09
Месяц	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09	05	06	07	08	09
День	12	28	19	10	19	09	03	26	07	01	23	22	17	19	26	13	18	05	06	10	21	07	13	14	10
Облачность, %	0	2,5	0	0	0,6	0,1	0	1,1	1,4	0,8	0	1	0	0,2	0	5	0	0	4,5	4,6	0	0,8	16,8	0	11
Спектральные каналы	4 и 8					4 и 8					4 и 8					4 и 8									

6.1. Векторизация карты растительных сообществ северо-западного Приладожья

Для выполнения исследования была использована карта с растительностью северо-западного Приладожья, разработанная специалистами Санкт-Петербургского государственного университета: А.Н. Афонин и др. (Афонин и др., 2018). Северо-западное Приладожье характеризуется значительным разнообразием растительных сообществ, что позволит выявить различия индексов NDVI для шести растительных сообществ на выделенной площади.

Векторизация карты была произведена в геоинформационной системе QGIS Desktop – программное обеспечение для создания, редактирования и визуализации геопространственной информации со свободным доступом.

Векторизацию начали с создания нового проекта (QGIS Project), в который добавили растровый слой карты северо-западного Приладожья (рис. 2).

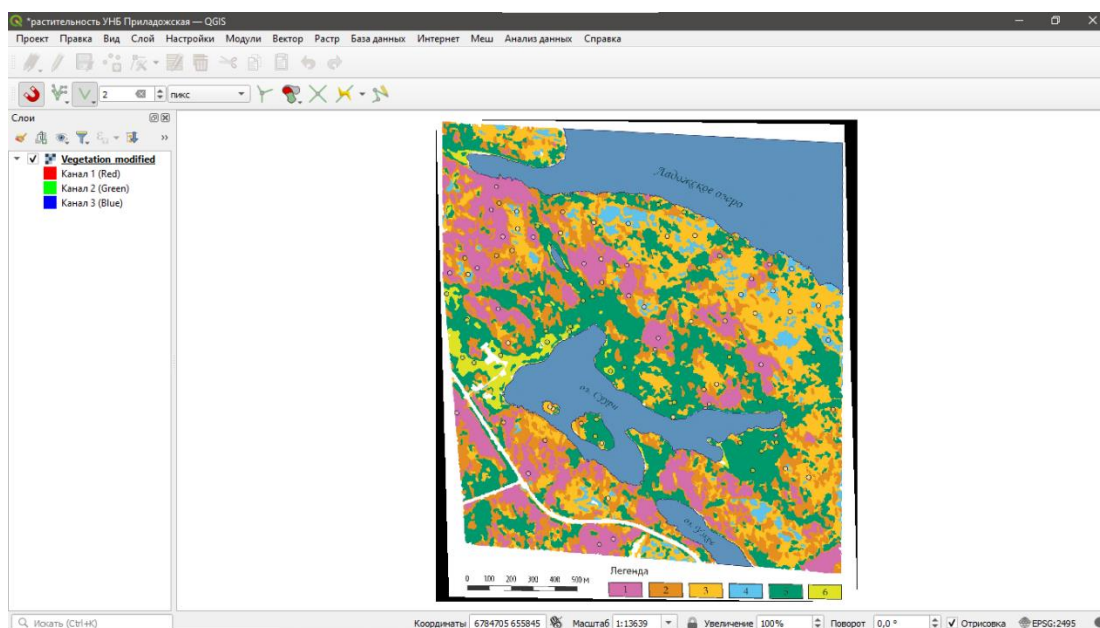


Рисунок 2. Интерфейс QGIS

Создали векторный слой: слой → создать слой → создать shape-файл. В новом диалоговом окне инструмента необходимо выбрать путь сохранения слоя, ввести его название, выбрать тип геометрии: полигон и тип нового поля: целое число (рис. 3). Система координат: EPSG (European Petroleum Survey Group) код 2495 – Pulkovo 1942/ Gauss-Kruger SM 27E. Она была создана на основе эллипсоида Ф.Н. Красовского. Центр этого

эллипсоида сдвинут по отношению к центру масс Земли примерно на 100 метров для максимального соответствия поверхности Земли на европейской территории СССР.

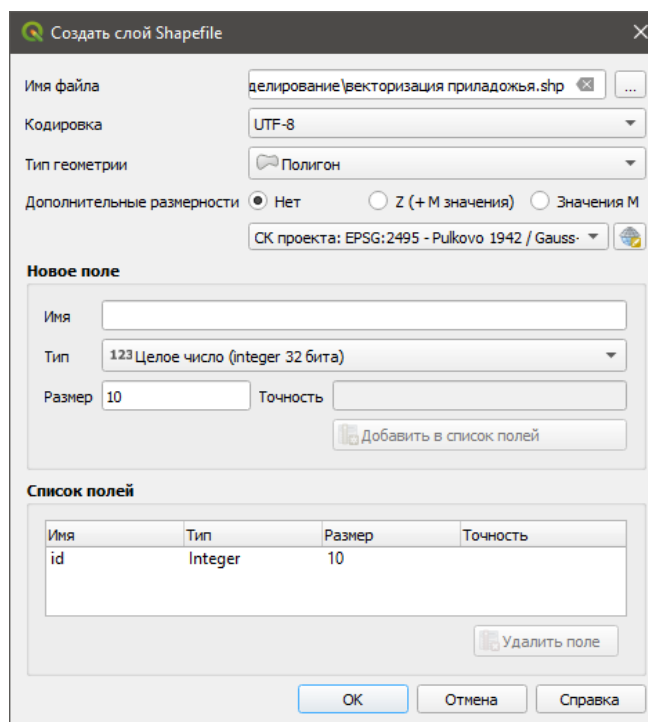
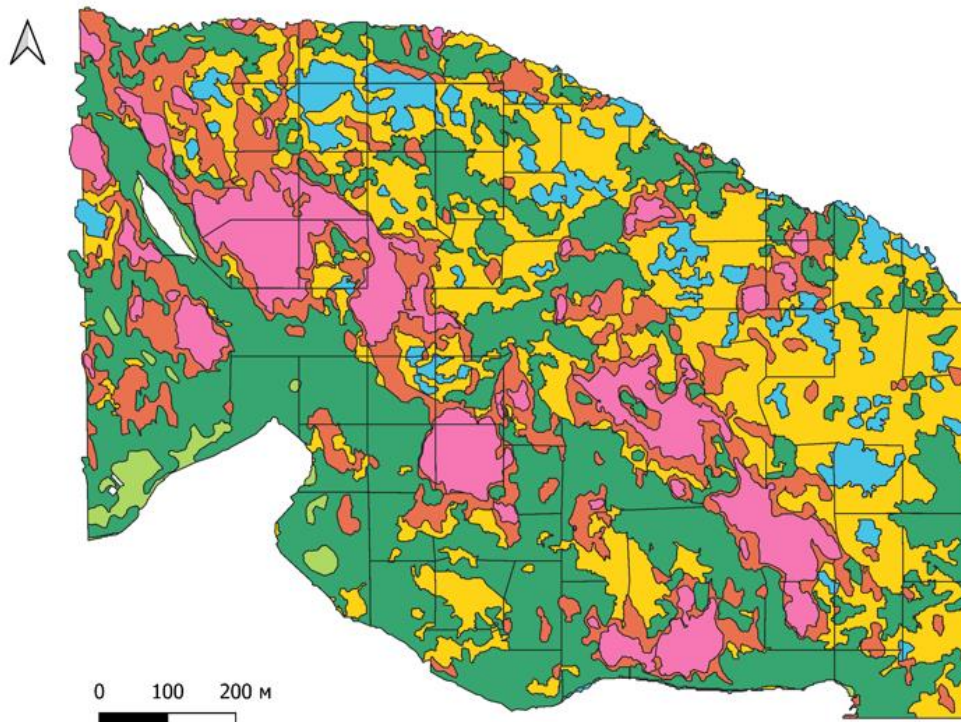


Рисунок 3. Создание векторного слоя

Для продолжения работы нажимали на кнопку «Редактировать» и использовали кнопки «Добавить объект» (для создания векторного объекта), «Редактирование узлов» (для редактирования местоположения узлов). Таким образом отцифровывали классы растительности в соответствии в легендой используемой карты (рис. 4). Оцифровки карты для удобства была проведена в границах полигональной сетки квадратов, поэтому на рисунке 4 можно заметить границы слоев шейп-файлов, которые были объединены в ходе работы в единый слой.

По окончании векторизации необходимо было сохранить слой: слой → сохранить как В диалоговом окне выбирали формат, путь сохранения файла и систему координат (рис. 5).



Легенда. Карта растительности северо-западного Приладожья. Классы:

- 1-ельники
- 2-елово-сосновые
- 3-сосняки
- 4-сосняки скальные
- 5-лиственные леса
- 6-травянистая растительность

Рисунок 4. Результат оцифровки карты

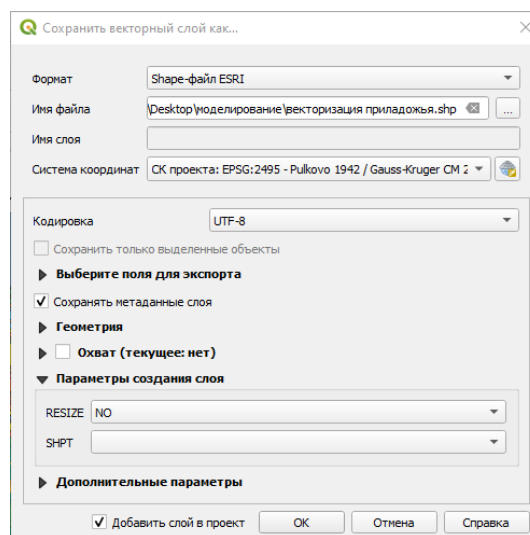


Рисунок 5. Сохранение векторного слоя

6.2. Получение снимков Sentinel-2

Спутниковые снимки были получены с официального сайта сервиса Sentinel Hub (визуализатор мультиспектральных данных от Sinergise), который работает через EO Browser (Sentinel Hub EO Browser. Электронный ресурс). Для этого прошли регистрацию на указанном сайте (рис. 6).

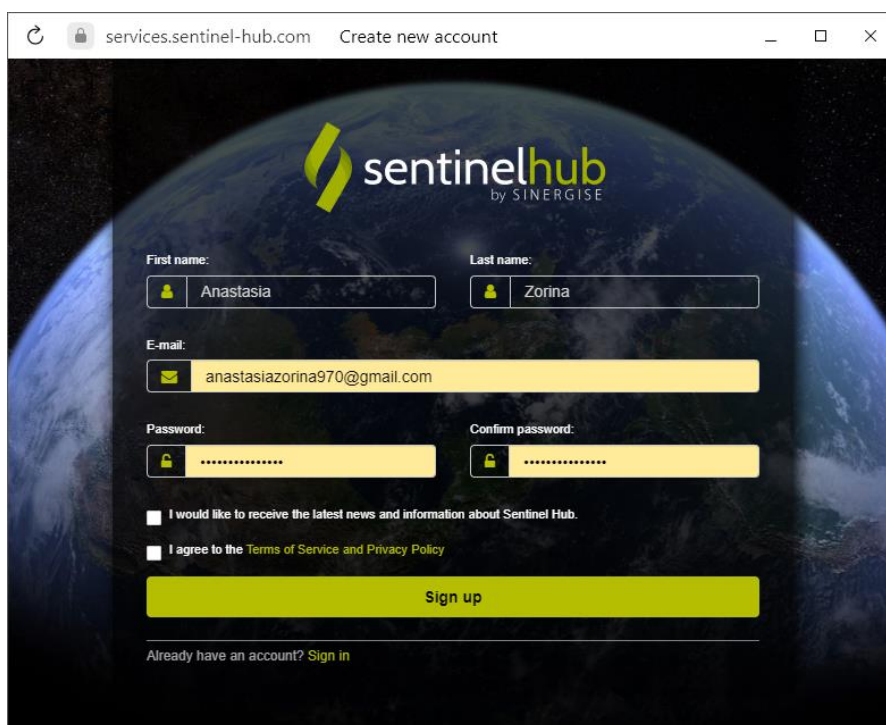


Рисунок 6. Регистрация в Sentinel Hub

Задали критерии поиска данных: тип спутника – Sentinel-2 с исправлением по атмосфере, максимальная облачность 20%, временной диапазон – 2020-04-01 – 2022-10-31. Также была возможность отфильтровать данные по месяцам (рис. 7). Далее визуализировали снимки выбранной территории и загружали изображение на компьютер (рис. 8). Перед загрузкой выбирали аналитический тип снимка, формат изображения (TIFF-8), разрешение (пользовательское в 10 м/пикс), систему координат (Web Mercator, EPSG:3857), необработанные слои (B04 и B08) (рис. 9).

Система координат Web Mercator – вариант меркаторской сферической проекции. Используется для визуализации данных, покрывающих весь мир. Ось проекции совпадает с географической осью Земли, проецирование происходит линиями, выходящими из центра планеты, от чего ошибка растяжения приполярных областей по горизонтали оказывается скомпенсирована пропорциональным растяжением по вертикали.

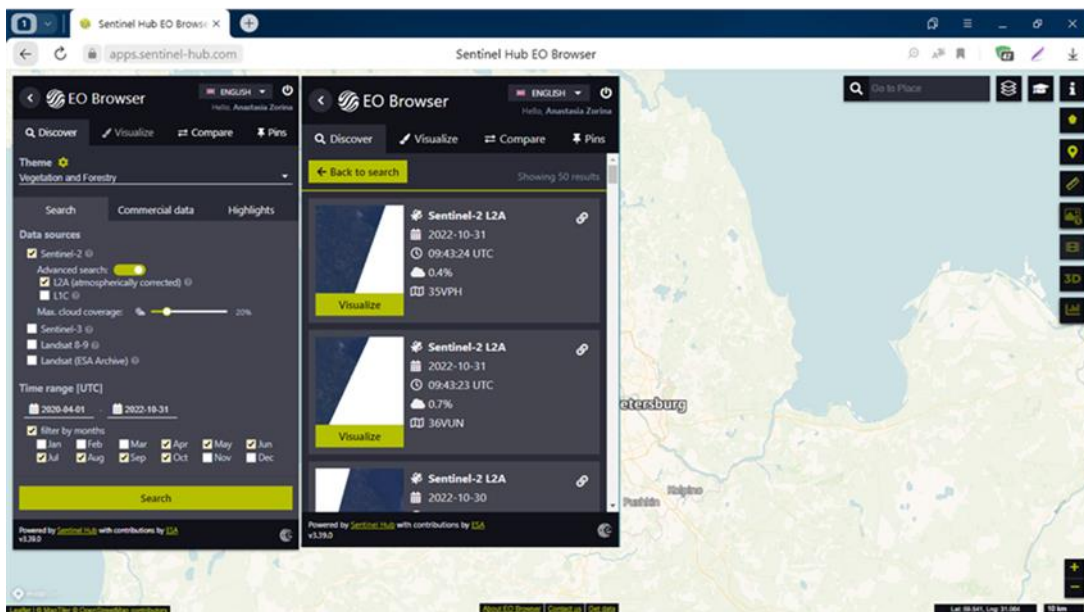


Рисунок 7. Задаем критерии поиска

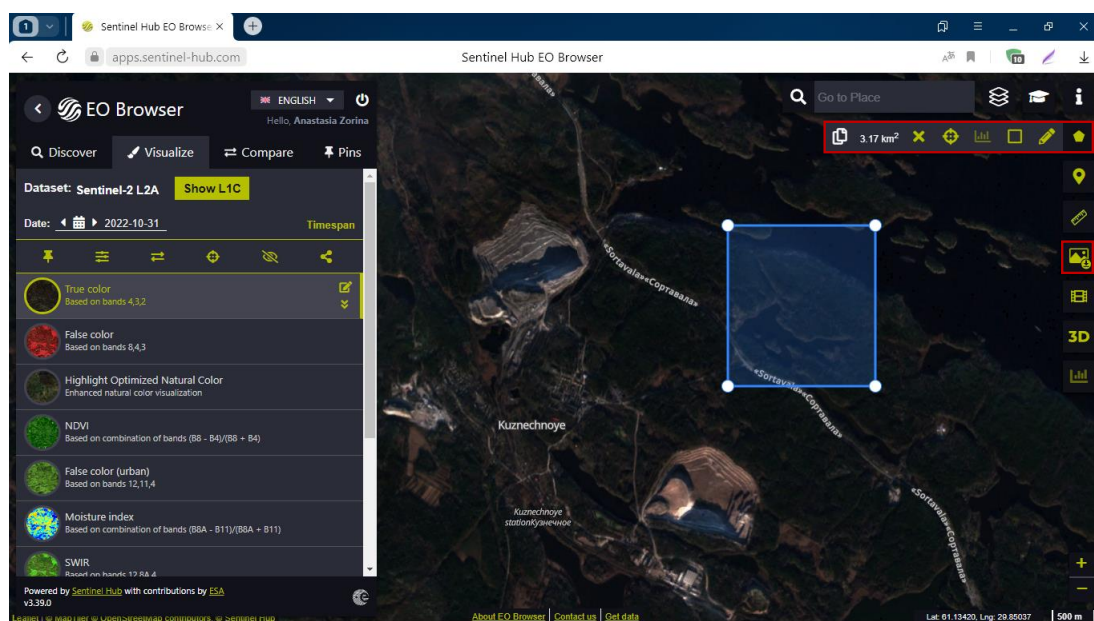


Рисунок 8. Визуализация и выбор местности

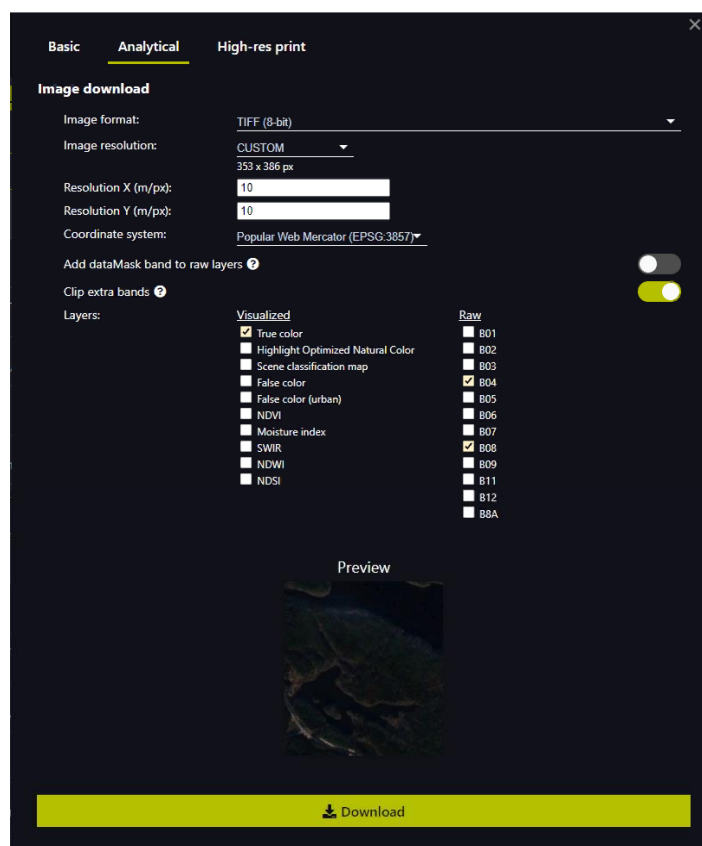


Рисунок 9. Выбираем критерии изображения для скачивания

Космические снимки определенной даты скачивались в ZIP формате (архивные файлы сжаты) с наименованием EO_Browser_images в выбранную нами папку на компьютере. Космические снимки в архивном файле названы следующим образом: дата-время-Sentinel-2-L2A_вид спектра.

Так как снимки имеют систему координат Web Mercator, последующие манипуляции со снимками будут проводиться в данной системе для того, чтобы не увеличивать искажение относительно реального местоположения снимков.

6.3. Определение вегетационного индекса NDVI

В программе QGIS Desktop 3.28.0 открываем проект (например, 10.09.2022 NDVI), содержащий шейп-файл с векторизованной растительностью северо-западного Приладожья. В проект для примера расчета индекса добавляли растровые слои от 09.10.2022 с красным (B04) и ближним инфракрасным (B08) каналом (рис. 10).

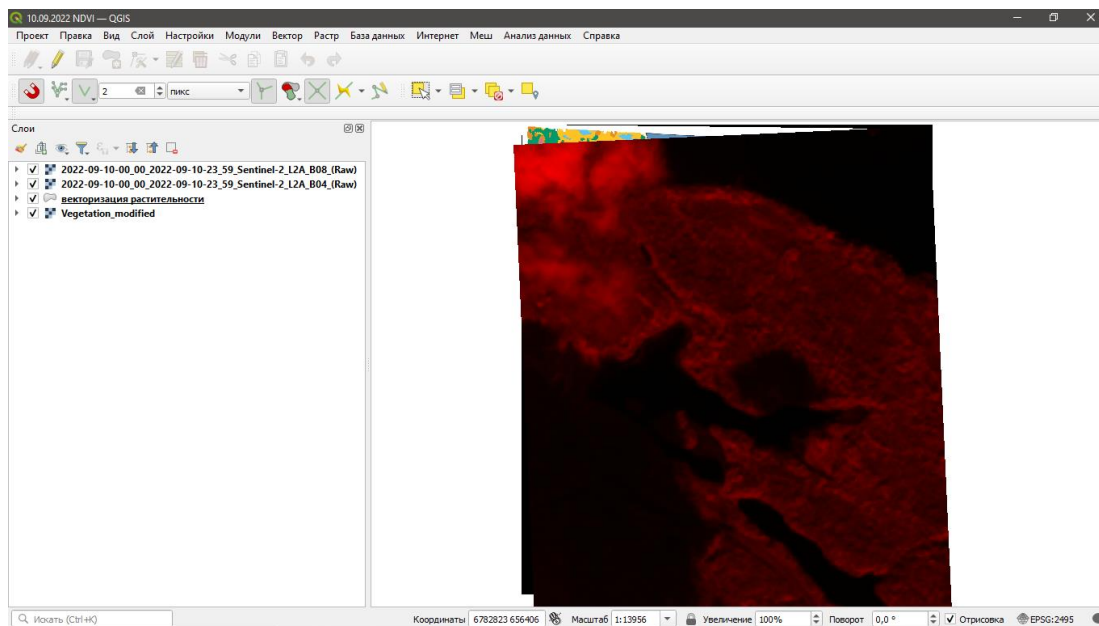


Рисунок 10. Проект (10.09.2022 NDVI) с растровыми слоями

В связи с тем, что растровые слои изначально скачены по размеру векторизованной карты, обрезать растры по границам рабочей территории нет необходимости.

Непосредственно для расчета вегетационного индекса открываем калькулятор растров (растр → калькулятор растров...) и вводим в поле «Выражение» формулу. Слой результатов называем «NDVI_20220910_23-59_00-00» (рис. 11). В результате получаем снимок NDVI (рис. 12).

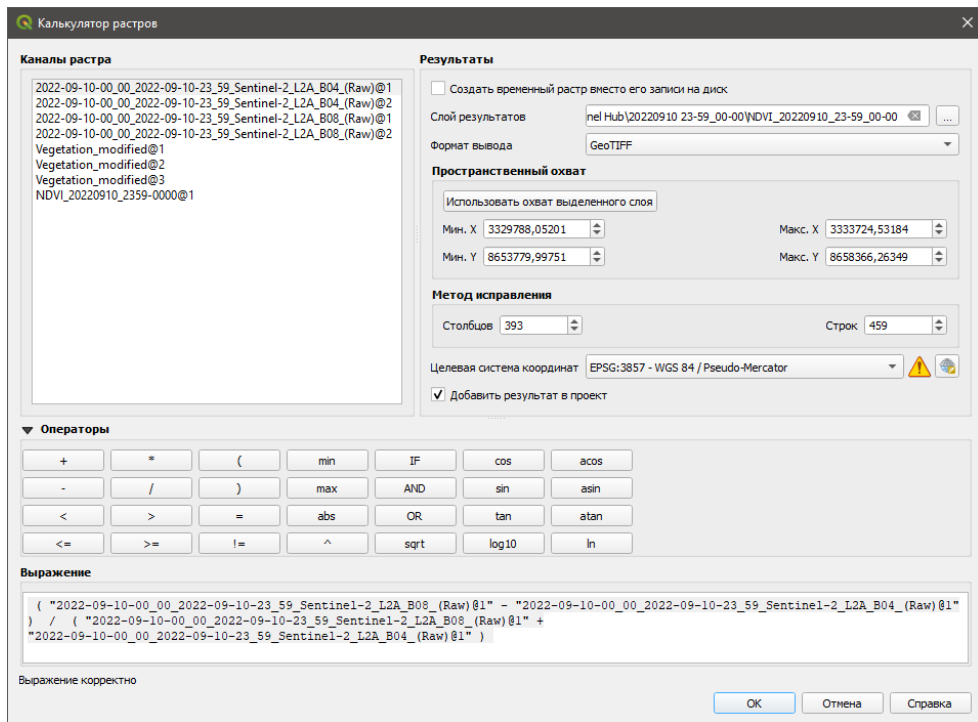


Рисунок 11. Калькулятор растров



Рисунок 12. Снимок NDVI_20220910_23-59_00-00

Затем приступали к преобразованию растра в векторный слой: анализ данных → панель инструментов → вектор-создание → пиксели в полигоны (рис. 13).

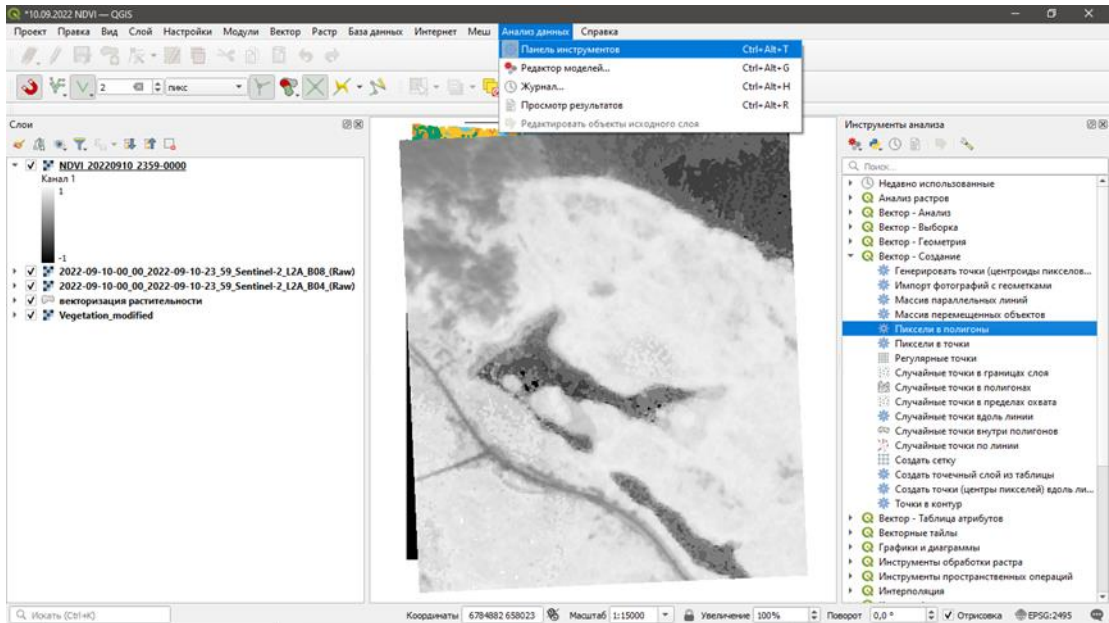


Рисунок 13. Преобразование растра

Выполнялась обрезка полученного векторного слоя по охвату векторизованной территории, чтобы дальнейшая обработка была эффективней (рис. 14).

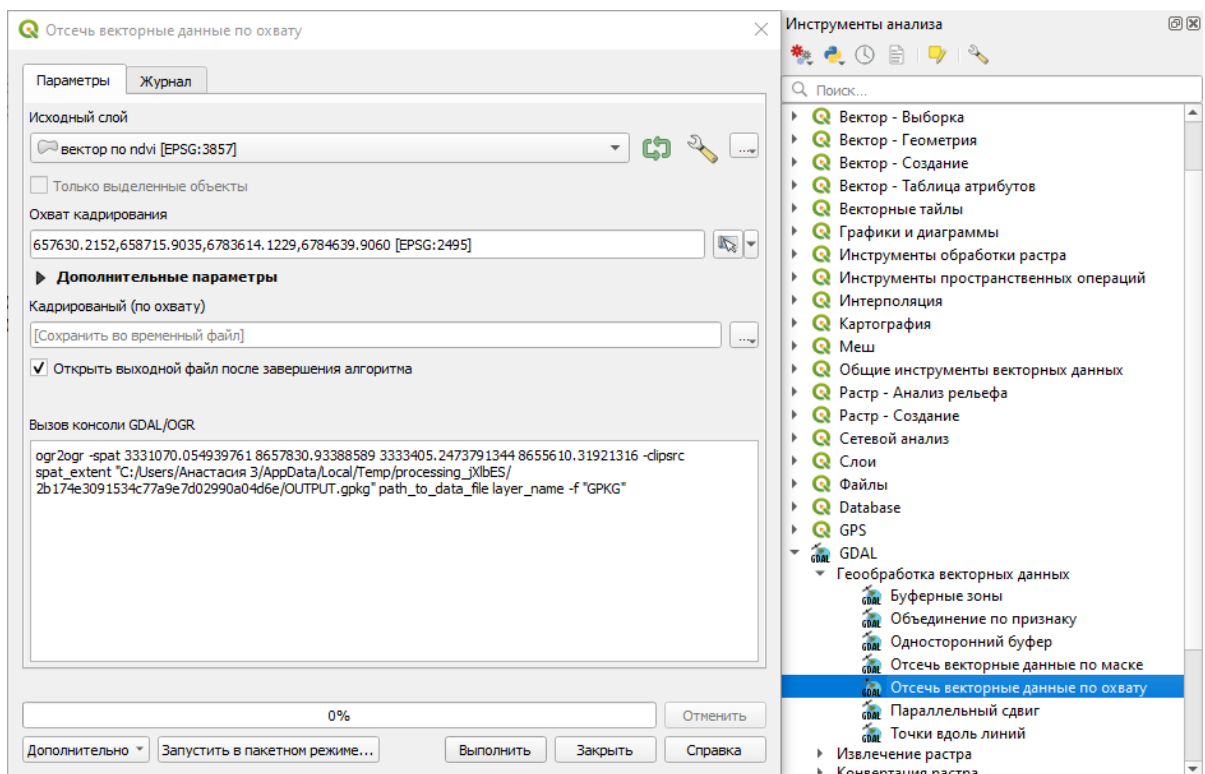


Рисунок 14. Обрезка по охвату

Далее открывали таблицу атрибутов векторизованной карты (слой векторизация растительности) и экспортировали объекты со значением $id = 1$ в отдельный шейп-файл (таблица атрибутов \rightarrow выделить объекты, удовлетворяющие условию ($id = 1$) \rightarrow экспорт выделенных объектов как ...) с названием шифра выбранного класса растительности (рис. 15). Такие же действия проводили с оставшимися пятью классами (id 2-6) (рис. 16).

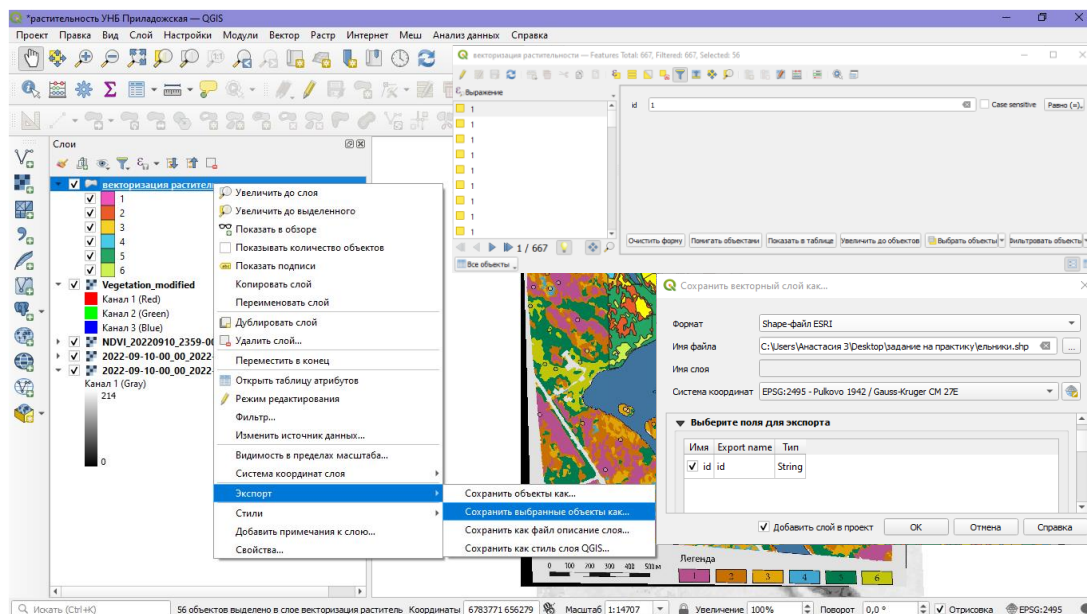


Рисунок 15. Экспортирование выбранных данных из шейп-файла

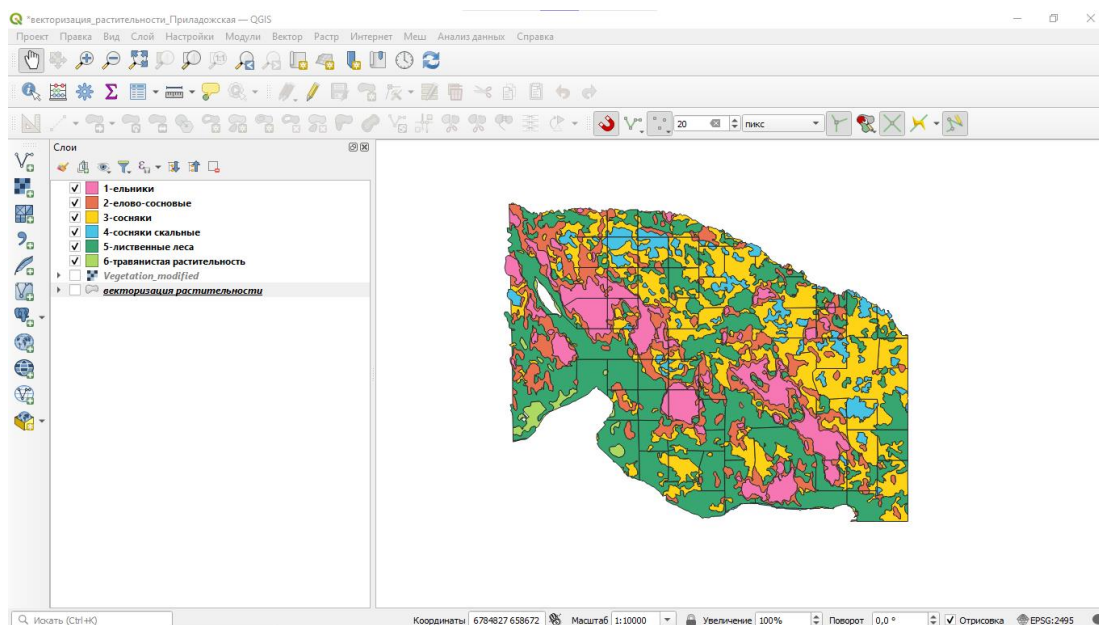


Рисунок 16. Результат экспорта данных в отдельные векторные слои

Далее извлекали значения NDVI по каждому классу растительности: анализ данных \rightarrow панель инструментов \rightarrow вектор-выборка \rightarrow извлечь по расположению (рис. 17-18). Все получившиеся файлы сохраняли.

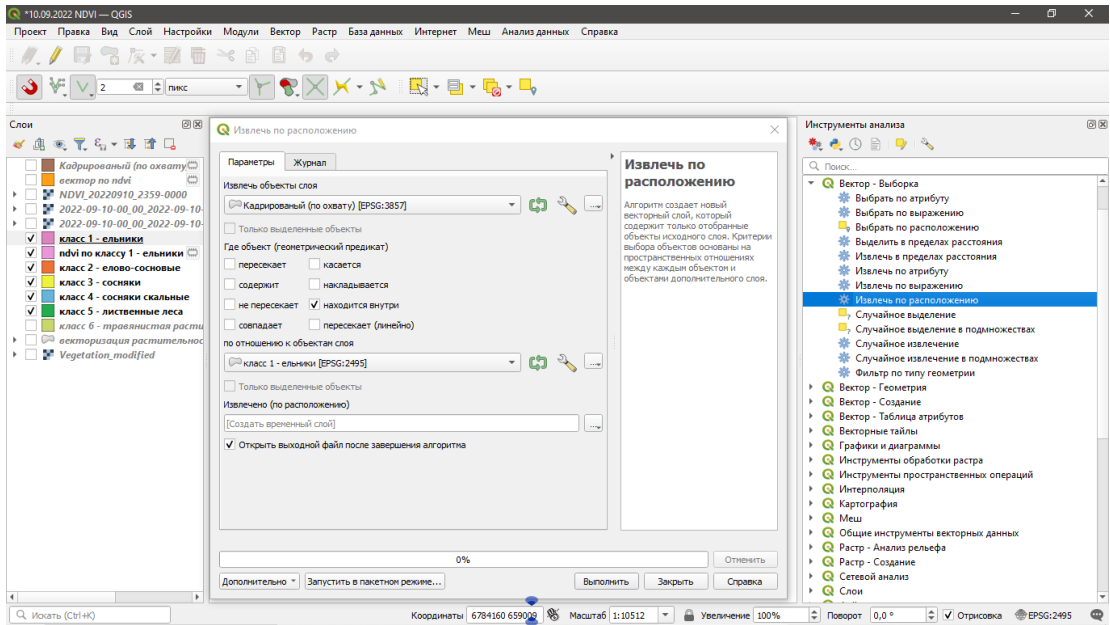


Рисунок 17. Извлечение данных NDVI, находящихся внутри объектов слоя «класс 1 - ельники»

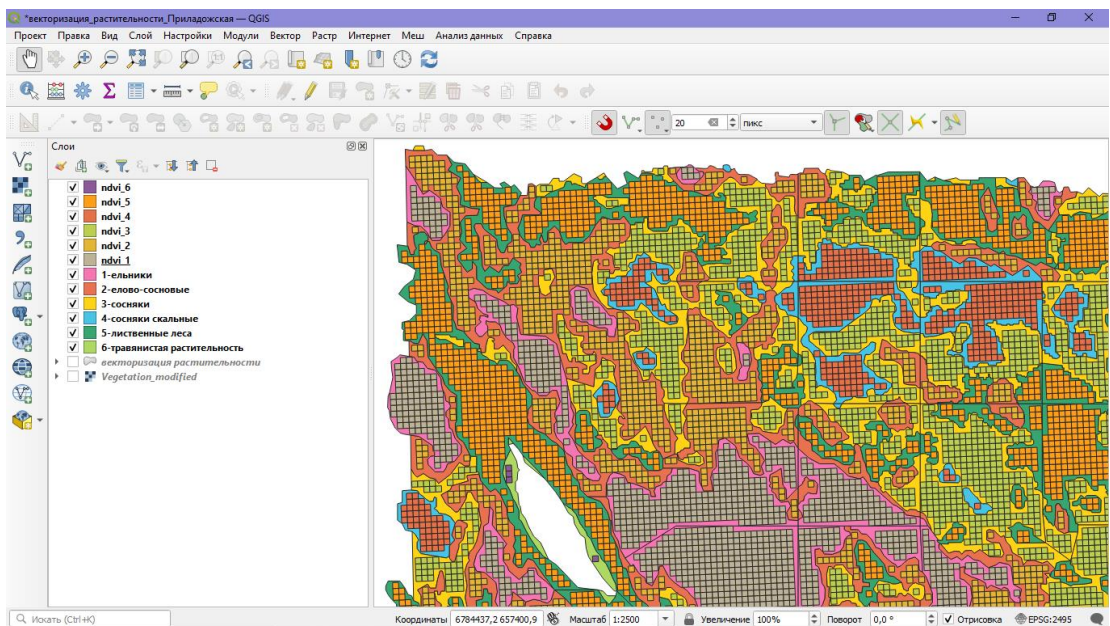


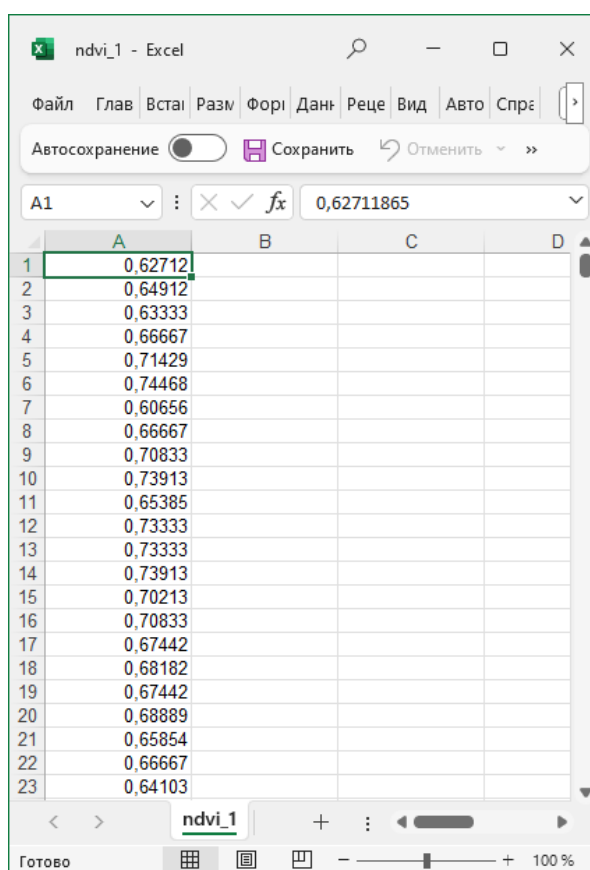
Рисунок 18. Данные NDVI

Для дальнейшего анализа значений NDVI сохраняли векторные слои «ndvi по классу 1-6» в формат электронной таблицы MS Office Open XML [XLSX].

6.4. Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных проводилась в Mathcad 15:

1. Открывали электронную таблицу в программе Microsoft Excel со значениями индекса NDVI определенного типа растительности (на рис. 19 для примера представлены значения ельников), удаляем ячейку с наименованием столбца и изменяем формат ячеек в числовой с 5 цифрами после запятой, при сохранении документа выбираем расширение .xls (книга Excel 97-2003) (рис. 19). Данный пункт выполняли для того, чтобы данные соответствовали формату требований программы, для расчета определенного критерия.



The screenshot shows a Microsoft Excel window titled 'ndvi_1 - Excel'. The active cell is A1, containing the value 0,62711865. The formula bar shows the same value. The spreadsheet contains 23 rows of data in column A, with values ranging from 0,62712 to 0,64103. The interface includes the standard Excel ribbon (Файл, Глав, Встав, Разм, Форм, Данн, Реце, Вид, Авто, Спр) and a status bar at the bottom showing 'Готово' and a zoom level of 100%.

	A	B	C	D
1	0,62712			
2	0,64912			
3	0,63333			
4	0,66667			
5	0,71429			
6	0,74468			
7	0,60656			
8	0,66667			
9	0,70833			
10	0,73913			
11	0,65385			
12	0,73333			
13	0,73333			
14	0,73913			
15	0,70213			
16	0,70833			
17	0,67442			
18	0,68182			
19	0,67442			
20	0,68889			
21	0,65854			
22	0,66667			
23	0,64103			

Рисунок 19. Пример значений индекса NDVI для последующей обработки в Mathcad 15

2. Открывали программу (критерий Пирсона) для определения гипотезы о соответствии эмпирических данных теоретическому распределению. Вставляли документ одного типа растительности (рис. 20). В окончании программы смотрели результат, делали вывод о том, по какому закону идет распределение индекса NDVI, а также вносили полученный результат в сводную таблицу для последующего анализа (рис. 21). Сохраняли полученный файл и проводили вычисления с помощью критерия Пирсона для других типов растительности в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

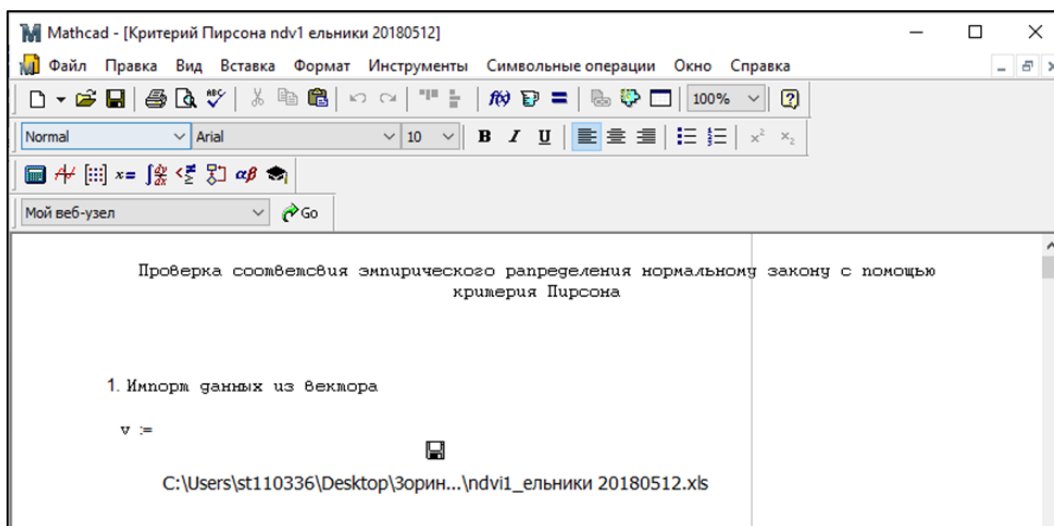


Рисунок 20. Пример использования критерия Пирсона

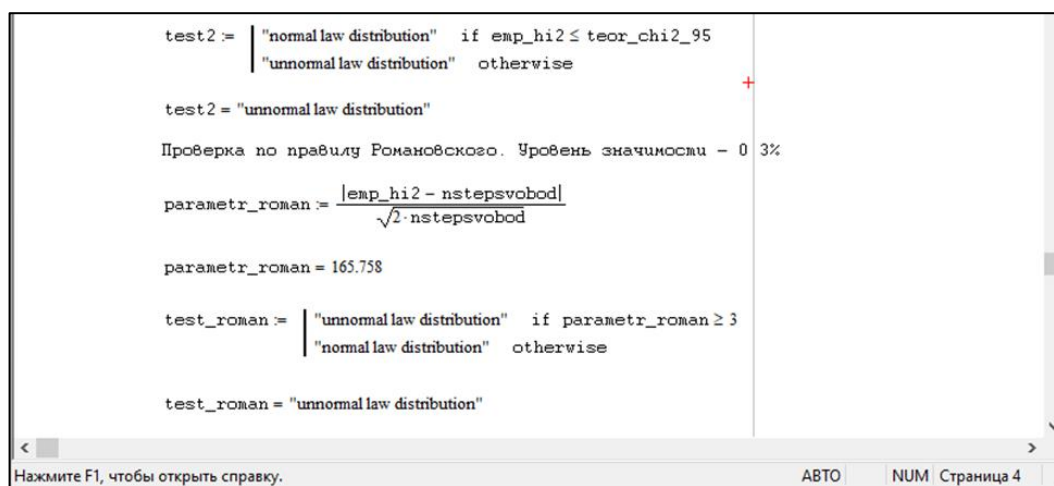


Рисунок 21. Пример результата программы критерия Пирсона

3. Открывали программу (критерий Уилкоксона-Манна-Уитни) для определения однородности с учетом повторяющихся значений; критерий основан на сравнении рангов выборок. Вставляли два документа одного типа растительности в рамках вегетационного периода одного года (рис. 22). В окончании программы смотрели результат, делали вывод о том, опровергается ли гипотеза однородности индекса NDVI, а также вносили полученный результат в сводную таблицу для последующего анализа (рис. 23). Сохраняли полученный файл и проводили вычисления с помощью данного критерия для других типов растительности в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Таким же образом определяли однородность различных типов растительности для смежных годов. Для этого нужно было вставить два документа одного типа растительности смежных годов (например, ельники 05.2021 и 05.2022 гг.).

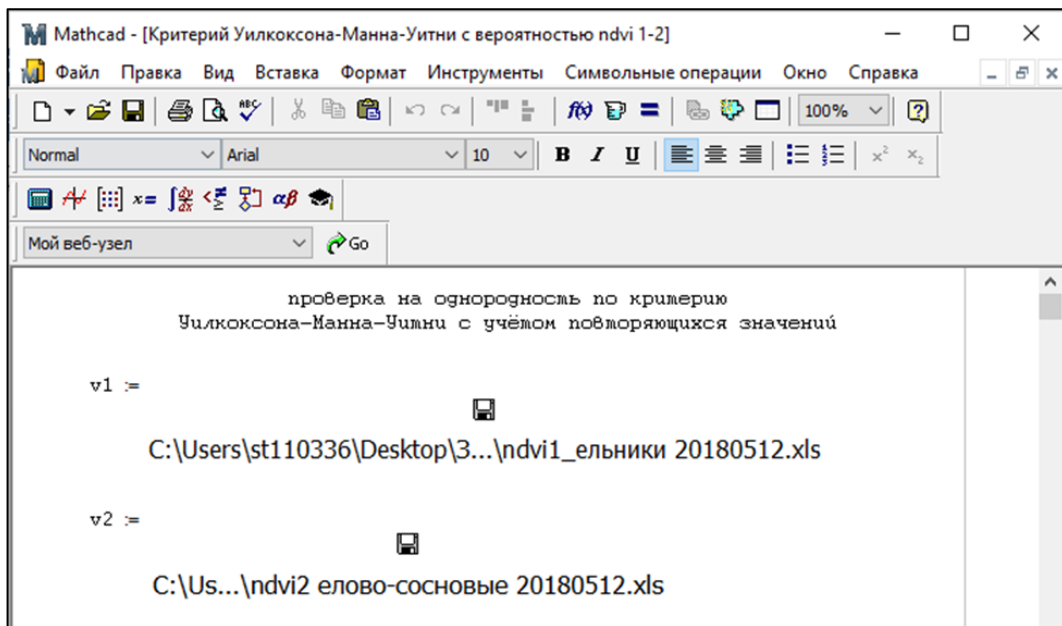


Рисунок 22. Пример использования критерия Уилкоксона-Манна-Уитни

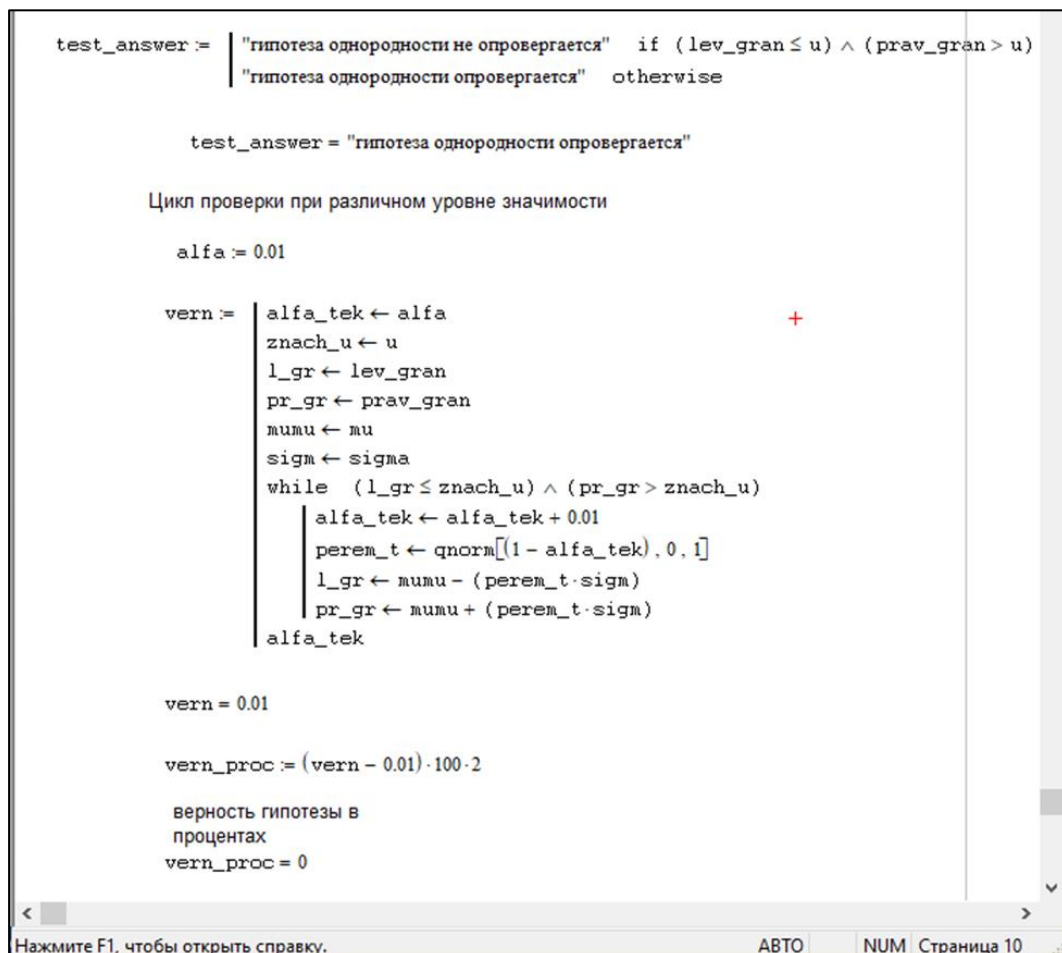


Рисунок 23. Пример результата программы критерия Уилкоксона-Манна-Уитни

4. Открывали программу (критерий Зигеля-Тьюки) для определения однородности с учетом повторяющихся значений; в отличие от критерия Уилкоксона-Манна-Уитни данная программа требует предположения о нормальности распределения данных и основана на

анализе дисперсии выборок. Вставляем документ двух типов растительности в рамках одного вегетационного периода (рис. 24). В окончании программы смотрели результат и делали вывод о том, опровергается ли гипотеза однородности индекса NDVI, а также вносили полученный результат в сводную таблицу для последующего анализа (рис. 25). Сохраняли полученный файл и проводили вычисления с помощью данного критерия для других типов растительности в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Таким же образом определяли однородность различных типов растительности для смежных годов. Для этого нужно было вставить два документа одного типа растительности смежных годов (например, ельники 05.2021 и 05.2022 гг.).

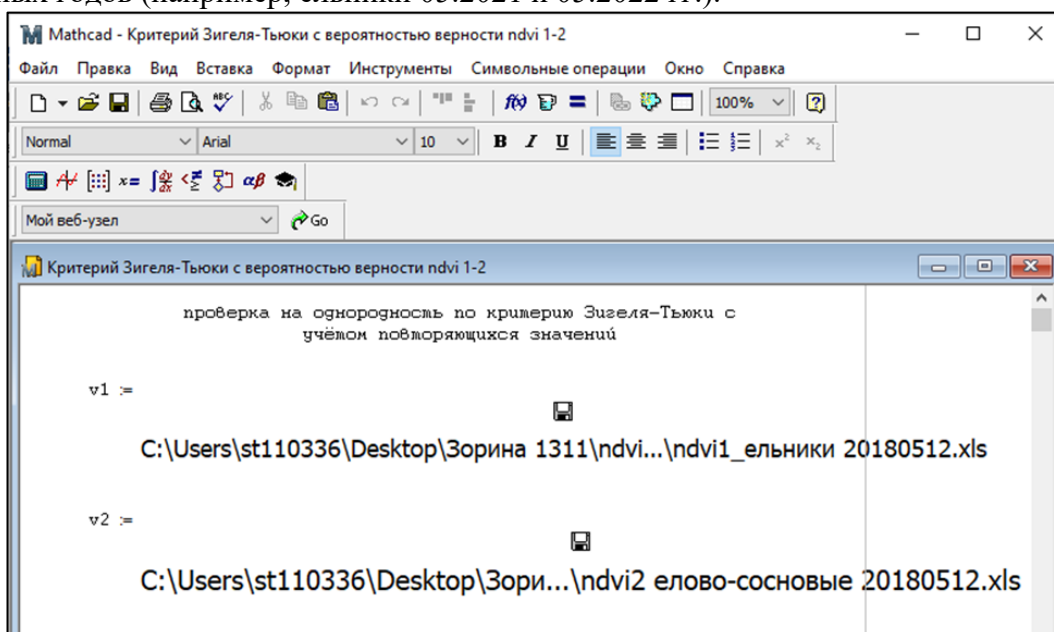


Рисунок 24. Пример использования критерия Зигеля-Тьюки

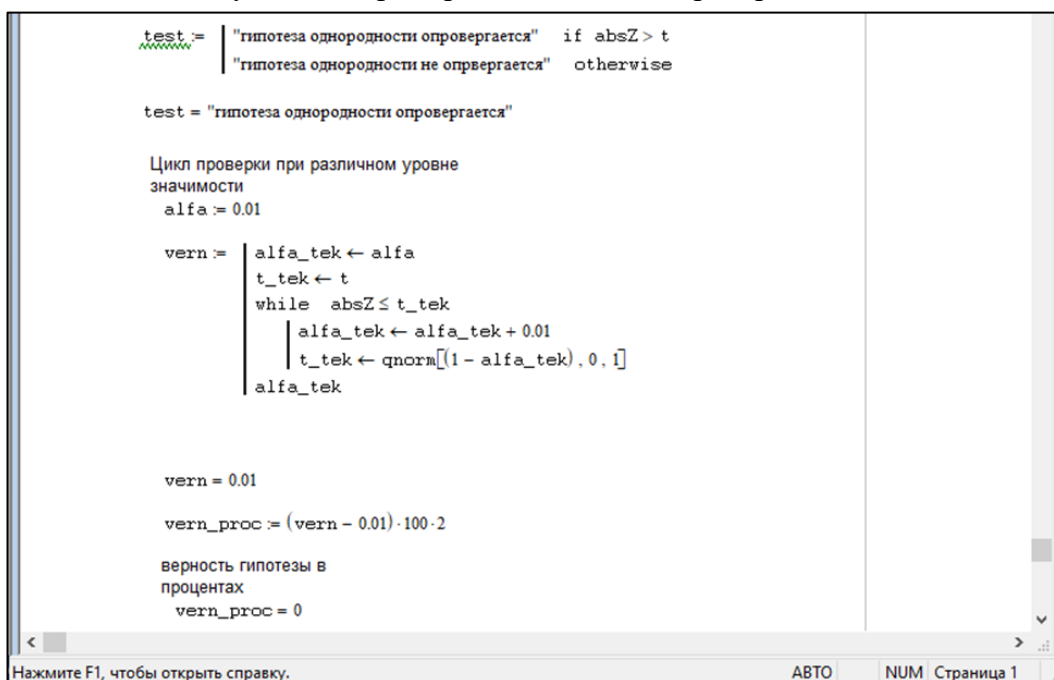


Рисунок 25. Пример результата программы критерия Зигеля-Тьюки

Глава 4. Результаты

В таблицах представлены вычисленные средние значения индекса NDVI для шести растительных сообществ в границах изучаемого периода (табл. 2-7), а на рис. 26-31 наглядно представлена динамика изменения средних значений индекса NDVI.

Таблица 2. Средние значения индекса NDVI для *ельников* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,67	0,79	0,82	0,80	0,77
2019	0,64	0,81	0,81	0,82	0,81
2020	0,68	0,85	0,86	0,87	0,69
2021	0,64	0,82	0,83	0,80	0,82
2022	0,70	0,81	0,84	0,86	0,79

Таблица 3. Средние значения индекса NDVI для *елово-сосновых* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,63	0,78	0,81	0,79	0,76
2019	0,60	0,79	0,80	0,82	0,80
2020	0,65	0,84	0,85	0,86	0,68
2021	0,60	0,82	0,82	0,78	0,81
2022	0,68	0,80	0,83	0,86	0,75

Таблица 4. Средние значения индекса NDVI для *сосняков* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,64	0,74	0,77	0,76	0,74
2019	0,61	0,76	0,78	0,79	0,77
2020	0,65	0,80	0,81	0,83	0,65
2021	0,62	0,78	0,79	0,74	0,78
2022	0,67	0,76	0,79	0,83	0,78

Таблица 5. Средние значения индекса NDVI для *сосняков скальных* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,64	0,69	0,73	0,72	0,72

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2019	0,61	0,71	0,74	0,76	0,74
2020	0,64	0,75	0,77	0,80	0,63
2021	0,60	0,74	0,74	0,69	0,75
2022	0,65	0,71	0,74	0,79	0,74

Таблица 6. Средние значения индекса NDVI для *лиственных лесов* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,56	0,84	0,84	0,82	0,76
2019	0,54	0,83	0,84	0,85	0,83
2020	0,65	0,88	0,89	0,88	0,70
2021	0,55	0,85	0,86	0,83	0,83
2022	0,68	0,84	0,88	0,88	0,62

Таблица 7. Средние значения индекса NDVI для *травянистой растительности* в течение вегетационного периода с 2018 по 2022 гг.

Год \ Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2018	0,47	0,84	0,74	0,78	0,74
2019	0,48	0,85	0,81	0,83	0,77
2020	0,57	0,88	0,88	0,85	0,65
2021	0,45	0,84	0,72	0,68	0,75
2022	0,67	0,84	0,88	0,74	0,76

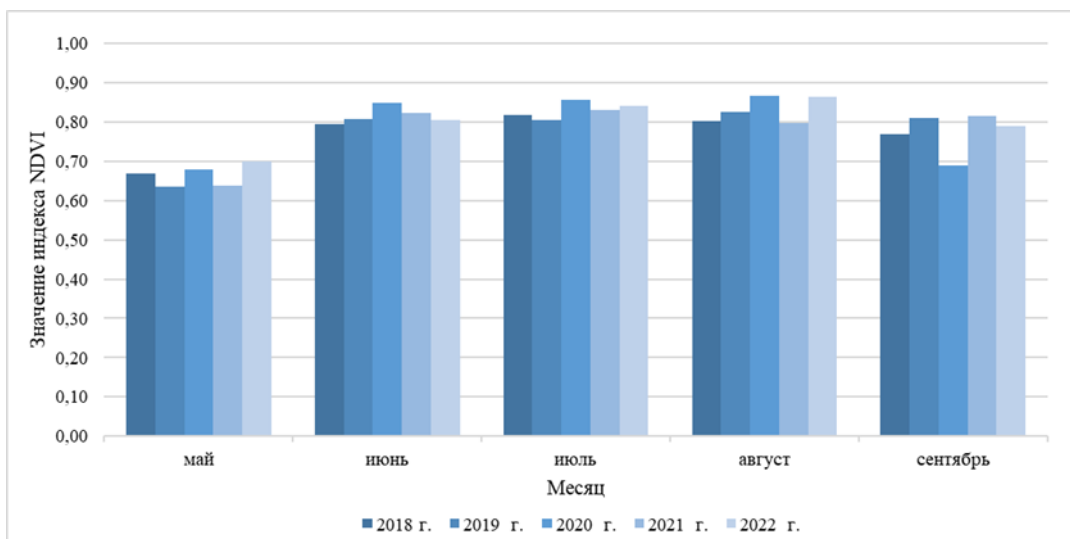


Рисунок 26. Динамика средних значений индекса NDVI для ельников в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

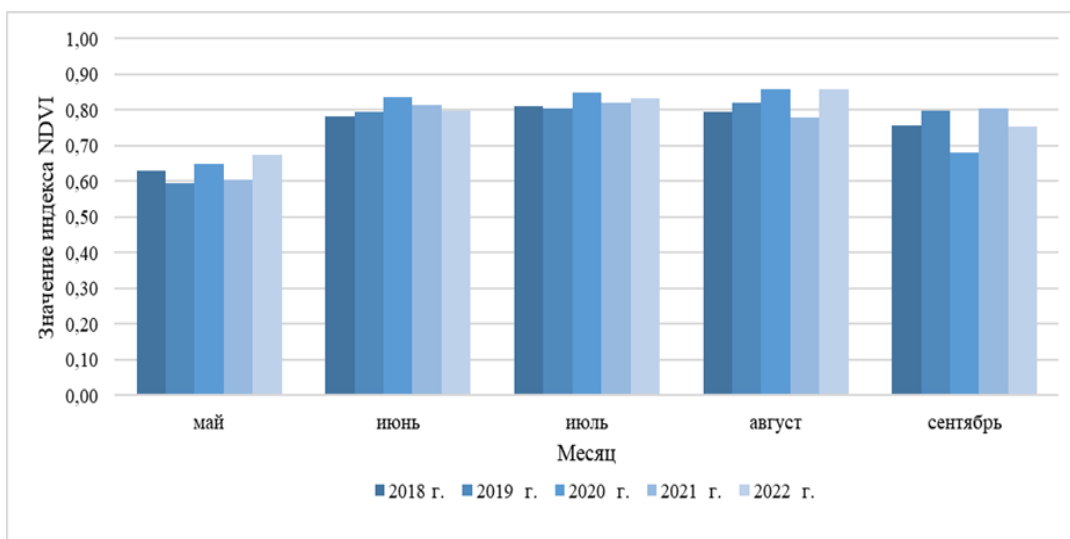


Рисунок 27. Динамика средних значений индекса NDVI для елово-сосновых в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

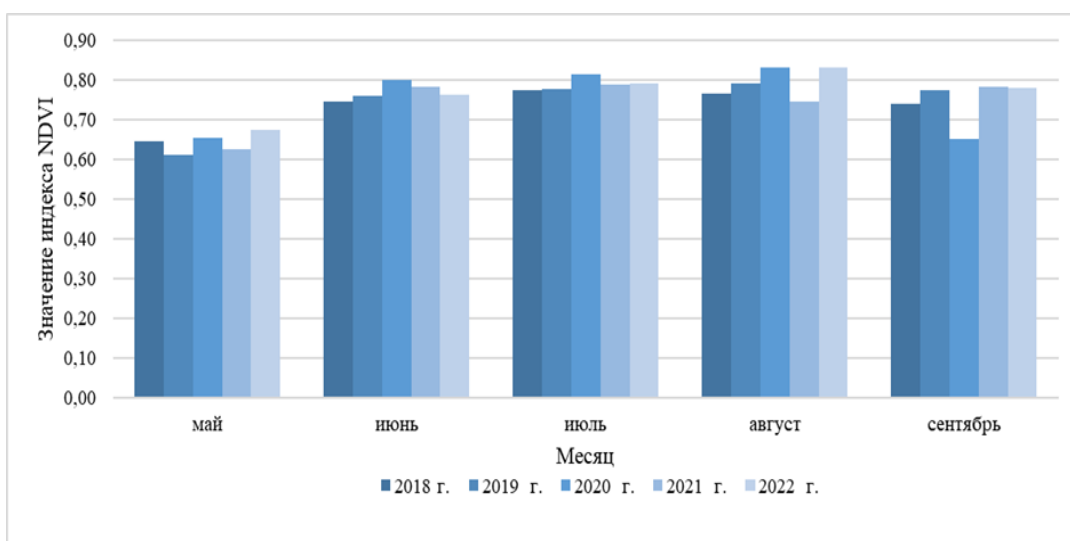


Рисунок 28. Динамика средних значений индекса NDVI для сосняков в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

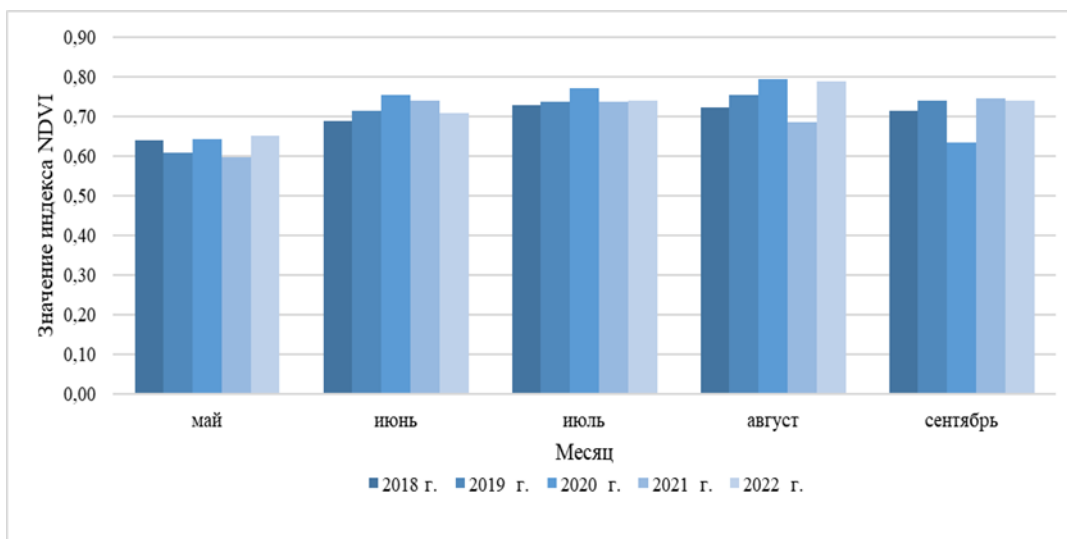


Рисунок 29. Динамика средних значений индекса NDVI для скальных сосняков в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

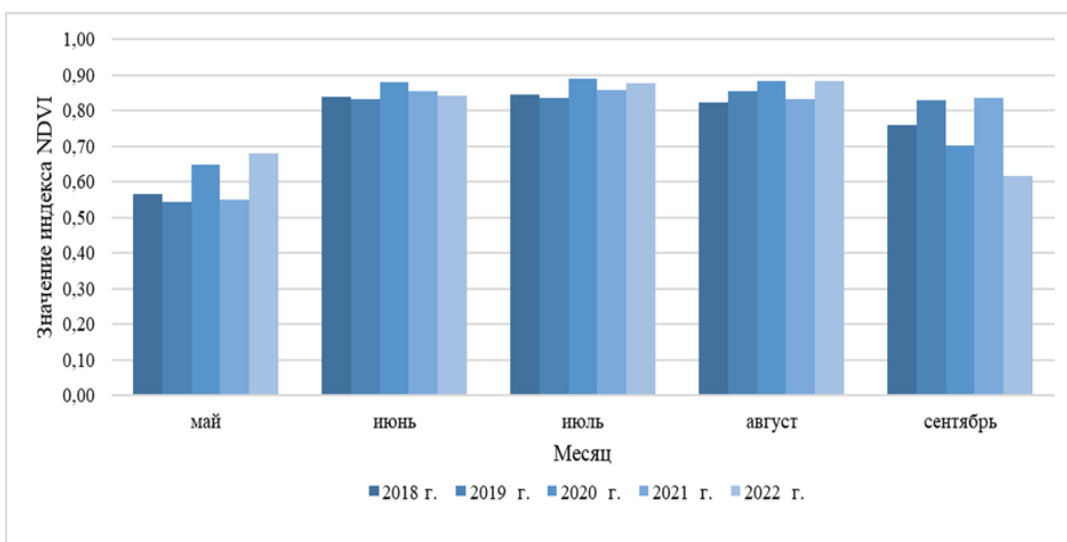


Рисунок 30. Динамика средних значений индекса NDVI для лиственных лесов в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

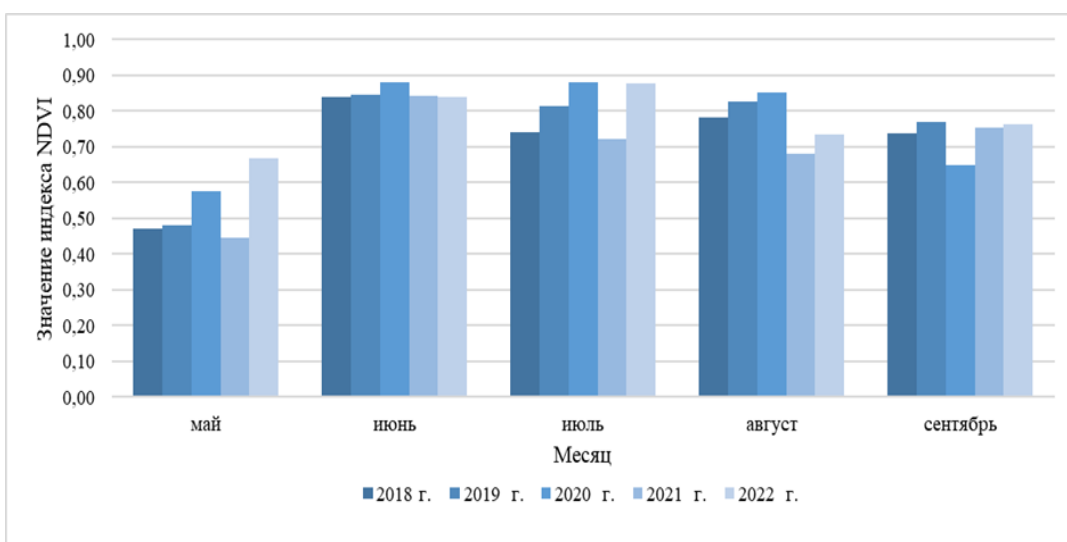


Рисунок 31. Динамика средних значений индекса NDVI для травянистой растительности в течение вегетационных периодов с 2018 по 2022 гг.

На рис. 26 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности ельники достигаются в основном в августе (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в августе (0,8),
- В 2019 г. в августе (0,82),
- В 2020 г. в августе (0,87),
- В 2021 г. в июле (0,83),
- В 2022 г. в августе (0,86).

Минимальные значения индекса NDVI для ельников наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,67),
- В 2019 г. в мае (0,64),
- В 2020 г. в мае (0,68),
- В 2021 г. в мае (0,64),
- В 2022 г. в мае (0,66).

На рис. 27 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности елово-сосновые достигаются в основном в августе (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в июле (0,81),
- В 2019 г. в августе (0,82),
- В 2020 г. в августе (0,86),
- В 2021 г. в июне и июле (0,82),
- В 2022 г. в августе (0,83).

Минимальные значения индекса NDVI для елово-сосновых наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,63),
- В 2019 г. в мае (0,6),
- В 2020 г. в мае (0,65),
- В 2021 г. в мае (0,6),
- В 2022 г. в мае (0,68).

На рис. 28 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности сосняки достигаются в основном в августе (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в июле (0,77),

- В 2019 г. в августе (0,79),
- В 2020 г. в августе (0,83),
- В 2021 г. в июле (0,79),
- В 2022 г. в августе (0,83).

Минимальные значения индекса NDVI для сосняков наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,64),
- В 2019 г. в мае (0,61),
- В 2020 г. в мае (0,65),
- В 2021 г. в мае (0,62),
- В 2022 г. в мае (0,67).

На рис. 29 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности сосняки скальные достигаются в основном в августе (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в июле (0,73),
- В 2019 г. в августе (0,76),
- В 2020 г. в августе (0,8),
- В 2021 г. в июне и июле (0,74),
- В 2022 г. в августе (0,79).

Минимальные значения индекса NDVI для сосняков скальных наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,64),
- В 2019 г. в мае (0,61),
- В 2020 г. в сентябре (0,63),
- В 2021 г. в мае (0,6),
- В 2022 г. в мае (0,65).

На рис. 30 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности лиственные леса достигаются в основном в июле и августе (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в июне и июле (0,84),
- В 2019 г. в августе (0,85),
- В 2020 г. в июле (0,89),
- В 2021 г. в июле (0,86),
- В 2022 г. в июле и августе (0,88).

Минимальные значения индекса NDVI для лиственных лесов наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,56),
- В 2019 г. в мае (0,54),
- В 2020 г. в мае (0,65),
- В 2021 г. в мае (0,55),
- В 2022 г. в мае (0,68).

На рис. 31 видно, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI для класса растительности травянистая растительность достигаются в основном в июне (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в июне (0,84),
- В 2019 г. в июне (0,85),
- В 2020 г. в июне и июле (0,88),
- В 2021 г. в июне (0,84),
- В 2022 г. в июле (0,88).

Минимальные значения индекса NDVI для травянистой растительности наблюдали в мае (в скобках указаны значения NDVI):

- В 2018 г. в мае (0,47),
- В 2019 г. в мае (0,48),
- В 2020 г. в мае (0,57),
- В 2021 г. в мае (0,45),
- В 2022 г. в мае (0,67).

Таким образом, для хвойных лесов максимальные значения вегетационного индекса NDVI наблюдали в августе, для лиственных – в июле и августе, для травянистой растительности в июне. Минимальные значения NDVI для хвойных и лиственных лесов, а также для травянистой растительности были отмечены в мае.

Статистический анализ был проведен с помощью критерия Пирсона, который показал, что гипотеза о соответствии эмпирических распределений значений индекса NDVI нормальному закону не подтверждается (кроме одного случая в мае 2020 для травянистой растительности).

Для значений вегетационного индекса NDVI для травянистой растительности в мае 2020 был проведен статистический анализ с помощью критериев Стьюдента и Фишера, которые показали, что для всех значений гипотеза однородности опровергалась.

Ко всем значениям вегетационного индекса NDVI, которые имели ненормальный закон распределения, мы применяли критерии Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки. В соответствии с критерием Уилкоксона-Манна-Уитни для выявления значимости между разными классами растительности в 2018 г. для 99% значений гипотеза однородности опровергалась, в 2019 г. – для 96%, в 2020 г. – для 91%, в 2021 г. – для 99%, в 2022 г. – для 95% (приложение 1). В соответствии с критерием Зигеля-Тьюки для выявления значимости между разными классами растительности в 2018 г. для 91% значений гипотеза однородности опровергалась, в 2019 г. – для 92%, в 2020 г. – для 80%, в 2021 г. – для 99%, в 2022 г. – для 89%.

В соответствии с критериями Уилкоксона-Манна-Уитни и Зигеля-Тьюки для выявления значимости значений индекса NDVI между разными годами для классов растительности в 2018-2019 гг. получили, что для 48% гипотеза однородности опровергалась, в 2019-2020 гг. – для 98%, в 2020-2021 гг. – для 50%, в 2021-2022 гг. – для 93%.

Заключение

Значения вегетационного индекса NDVI достигают своего максимума в июле, августе и далее снижаются к сентябрю, при этом минимальные значений индекса наблюдались в мае. Это связано со сменой фаз вегетативного развития: меняются состав и содержание пигментов в листьях растений, увеличивается биомасса, количество хлорофилла в зеленых листьях растений. В осенние месяцы уменьшение значений индекса связано с усыханием растительности и, следовательно, низким содержанием хлорофилла в ней (Adamovich, 2018).

По результатам статистического анализа было выявлено, что значения вегетационного индекса NDVI распределяются по ненормальному закону (1 случай нормального распределения со 100% опровержением гипотезы однородности) и гипотеза однородности опровергается в 93% случаев между разными классами растительности и в 73% случаев между разными годами с 2018 г. по 2022 г. Следовательно:

- наблюдали различия в растительном покрове между исследуемыми сообществами и периодами времени;
- значения вегетационного индекса NDVI значимо различаются между исследуемыми областями и периодами. Это может указывать на наличие различных условий роста растительности в этих областях или на изменения в состоянии растительного покрова со временем.
- значения вегетационного индекса NDVI можно использовать для определения текущего экологического состояния растительности на исследуемой территории, для выявления возможного антропогенного воздействия.

Список использованной литературы

1. Акковецкий В.И. Дешифрирование снимков / В.И. Акковецкий. – М.: Недра, 1983. – 374 с.
2. Афонин А.Н., Соколова Ю.В., Бардаков Н.Н., Сахаров И.О., Дешифрирование растительности северо-западного Приладожья по космической съёмке высокого разрешения с использованием ординации по комплексу морфолого-физиологических показателей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. Т. 15. №1. С. 147–156.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России./ С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов – М.:ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
4. Барталев С.А. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таёжных лесов / С.А. Барталев, Т.С. Курятникова, Х.Ю. Стибиг // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 217-227.
5. Бычков И. В., Плюснин В. М., Ружников Г. М. и др. Создание инфраструктуры пространственных данных в управлении регионов // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 145–150.
6. Геология СССР. Том 27: Карельская АССР / ред. Антропов П.Я., Вологовская Н.А., Кратц К.О., Нумерова В.Н.; Ком. по делам геологии при СНК СССР. - Москва; Ленинград: Госгеолиздат, 1960. - 740 с.
7. Елсаков В.В. Спектрональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала / В.В. Елсаков, И.О. Марущак // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 281-286.
8. Жирин В.М. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2014. – № 5. – С. 3-12.
9. Исаев А.С. Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин // Лесоведение. – 2003. – № 2. – С. 3-9.

10. Касаткина Г.А., Кухтевич А.М., Романенко Е.В. Почвы Карельского перешейка: разнообразие, свойства и возможности использования // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 2(61). – С. 9-21.
11. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Незамаев С. А., Губаев А. В., Лежнин С. А., Полевщикова Ю. А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 3 (19). С. 72–82.
12. Лупян Е. А., Саворский В. П., Шокин Ю. И. и др. Современные подходы и организация работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 9, № 5. С. 45–54.
13. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: Учебник. М., 2010. 424 с.
14. Нарыкова А.Н. Анализ информативности предикторов модели запасов лесного почвенного углерода республики Карелия и Карельского перешейка /Нарыкова А.Н., Плотникова А.С. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – М., 2022. – С. 38-40.
15. Немчинов П.А., Остриков К.В., Мурашко И.И., Стулов Ф.Н. Состояние окружающей среды в Ленинградской области – СПб., 2019. – 528 с.
16. Семенчук А.В. Создание постоянно действующей гидрогеологической модели вендского водоносного комплекса в пределах Карельского перешейка на территориях г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области с целью обеспечения управления недропользованием (гос.к. К.41.2015.014). АО «Росгео», Москва, 2017 – ФБУ «ТФГИ по СЗФО» Инв.№28815.
17. Суворова Г.Г., Попова Е.В. Фотосинтетическая продуктивность хвойных древостоев Иркутской области / отв. ред. Р.К. Саляев. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2015. С. 7.
18. Схема комплексного использования и охраны водных объектов рек и озер бассейна Финского залива (от границы Российской Федерации с Финляндией до северной границы бассейна реки Невы), Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство водных ресурсов Невско-Ладожское бассейновое водное управление, 2015.
19. Терехин Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А.

Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2017. – Т. 14, № 4 – С. 112-124.

20. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2020 – 49,6 Мб ; 191 с. : ил. – Режим доступа : shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf.. Дата обращения: 23.04.2023.

21. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М., 2008. 312 с.

22. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. №2. С. 45-53; 98-102.

23. Шовенгердт Р. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений . М., 2010. 560 с.

24. Adamovich T.A., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve «Nurgush» // Theoretical and Applied Ecology. 2018. № 1. P. 18–24.

25. Beck P. S. A., Jönsson P., Høgda K.-A., Karlsen S. R., Eklundh L., Skidmore A. K. A ground-validated NDVI dataset for monitoring vegetation dynamics and mapping phenology in Fennoscandia and the Kola peninsula // Int. J. of Rem. Sens. 2007. Vol. 28:19. P. 4311–4330.

26. Hermosilla, T. Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics / T. Hermosilla, M.A. Wulder, J.C. White, N.C. Coops, G.W. Hobart // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 170. – P. 121- 132.

27. Homolova L., Malenovský Z., Clevers J. G., Garcia-Santos G., Schaepman M. E. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping // Ecological Complexity. 2013. Vol. 15. P. 1–16.

28. Kennedy, R.E. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms / R.E. Kennedy, Z. Yang, W.B. Cohen // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114, Issue 12. – P. 2897-2910.

29. Kuenzer C., Ottinger M., Wegmann M., Guo H., Wang C., Zhang J., Dech S., Wikelski M. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks // Int. J. of Rem. Sens. 2014. Vol. 35:18. P. 6599–6647.

30. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1995 V. 33 P. 481–486.
31. Petrou Z. I., Manakos I., Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets // Biodiversity and Conservation. 2015. Vol. 24. № 10. P. 2333–2363.
32. Senf, C. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe / C. Senf, D. Pflugmacher, P. Hostert, R. Seidl // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing – 2017. – Vol. 130. – P. 453-463.

Интернет-источники

1. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/leningradskaja-oblast-priroda-d95585>. Дата обращения: 09.10.2023.
2. Группа Экоанализ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecoanaliz.ru/prirodnye-usloviya-leningradskoj-oblasti/>. Дата обращения: 09.10.2023.
3. ДЗЗ и наблюдение за растениями // Совзонд: сайт. – URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/corporate/7968/>. Дата обращения: 23.04.2023.
4. Донгак Джамиль Айыр-Санаевич, Монгуш Артыш Валерьевич, Монгуш Чинчи Буяновна, Чулдум Шыдар Орланович. Дистанционное изучение сезонной динамики вегетационного индекса (NDVI) растительного покрова массива Монгун-тайга // СНВ. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/distantcionnoe-izuchenie-sezonnoj-dinamiki-vegetatsionnogo-indeksa-ndvi-rastitelnogo-pokrova-massiva-mongun-tayga>. Дата обращения: 29.11.2023.
5. Комарова А. Ф., Журавлева И. В., Я. В. М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Princ. ekol. 2016. №1 (17). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otkrytye-multispektralnye-dannye-i-osnovnye-metody-distantcionnogo-zondirovaniya-v-izuchenii-rastitelnogo-pokrova>. Дата обращения: 29.11.2023.
6. Пигольцина Г. Б. Ресурсы солнечной радиации Ленинградской области // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2009. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/resursy-solnechnoy-radiatsii-leningradskoj-oblasti>. Дата обращения: 20.04.2024.

7. Лиджиева Л. Ц., Уланова С. С., Федорова Н. Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона черные земли // Изв. Саратов. ун-та Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2012. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-indeksa-vegetatsii-ndvi-dlya-opredeleniya-biologicheskoy-produktivnosti-fitotsenozov-aridnoy-zony-na-primere-regiona>. Дата обращения: 29.11.2023.

8. Sentinel Hub EO Browser: [Электронный ресурс] / URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Дата обращения: 24.03.2023.

9. Meteocast. Метеопрогноз, погода, прогноз погодных условий, новости погоды, климат. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.meteocast.in/windrose/ru/kuznechnoye/>. Дата обращения: 12.10.2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В таблицах 8-49 в скобках указана верность гипотезы.

Таблица 8. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2018 г.

Дата	2018.05						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни / Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/не опровергается	Не опровергается/не опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается
Сосняки				Не опровергается/не опровергается	Не опровергается/не опровергается	Опровергается/опровергается	Опровергается/опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/не опровергается	Не опровергается/не опровергается	Опровергается/опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/не опровергается	Не опровергается/не опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/не опровергается

Таблица 9. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2018 г.

Дата	2018.06						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (36%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 10. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2018 г.

Дата	2018.07						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (16%)	Не опровергается (66%)/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 11. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2018 г.

Дата	2018.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (74%)	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 12. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2018 г.

Дата	2018.09						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (72%)	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (78%)	Не опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (20%)
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 13. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2019 г.

Дата	2019.05						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ не опровергается (34%)	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 14. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2019 г.

Дата	2019.06						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	опровергается/ не опровергается (10%)	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	опровергается/ опровергается	опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 15. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2019 г.

Дата	2019.07						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновы е	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Не опровергается (58%) / опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновы е			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (12%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Не опровергается (18%) / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 16. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2019 г.

Дата	2019.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (16%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 17. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2019 г.

Дата	2019.09						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновы е	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновы е			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ не опровергается (30%)	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (44%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Не опровергается (18%) / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 18. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2020 г.

Дата	2020.05						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					Стьюдента/ Фишера
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (84%)	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность	Нормальный закон распределения						Не опровергается/ не опровергается

Таблица 19. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2020 г.

Дата	2020.06						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 20. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2020 г.

Дата	2020.07						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (46%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (78%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 21. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2020 г.

Дата	2020.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (46%)	Не опровергается (26%) / не опровергается (86%)
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (64%)	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ не опровергается (90%)
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 22. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2020 г.

Дата	2020.09						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ не опровергается (12%)	Не опровергается (92%) / опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ не опровергается (54%)	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ не опровергается (70%)
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 23. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2021 г.

Дата	2021.05						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (44%)	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 24. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2021 г.

Дата	2021.06						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 25. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2021 г.

Дата	2021.07						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Не опровергается (12%) / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 26. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2021 г.

Дата	2021.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 26. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2021 г.

Дата	2021.09						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается	Опровергается/ опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается/ опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 27. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2022 г.

Дата	2022.05						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (40%)	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / не опровергается (24%)	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Не опровергается (12%) / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 28. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2022 г.

Дата	2022.06						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Не опровергается (42%) / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается	Опровергается / опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 29. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2022 г.

Дата	2022.07						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /не опровергается (12%)	Опровергается / не опровергается (48%)
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Не опровергается (28%) /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 30. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2022 г.

Дата	2022.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 31. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2022 г.

Дата	2022.08						
Критерий	Пирсона	Уилкоксона-Манна-Уитни /Критерий Зигеля-Тьюки					
Растительное сообщество		Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Ельники	Ненормальный закон распределения	Гипотеза однородности не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается / не опровергается (14%)	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Елово-сосновые			Не опровергается/ не опровергается	Не опровергается (74%) /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается
Сосняки				Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается /опровергается	Опровергается / не опровергается (12%)
Сосняки скальные					Не опровергается/ не опровергается	Опровергается / не опровергается (24%)	Опровергается / не опровергается (52%)
Лиственные леса						Не опровергается/ не опровергается	Опровергается /опровергается
Травянистая растительность							Не опровергается/ не опровергается

Таблица 32. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2018 и 2019 гг.

Дата	05.2018-2019					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 33. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2018 и 2019 гг.

Дата	06.2018-2019					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 34. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2018 и 2019 гг.

Дата	07.2018-2019					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Не опровергается (66%)	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Дата		07.2018-2019				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 35. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2018 и 2019 гг.

Дата		08.2018-2019				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 36. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2018 и 2019 гг.

Дата		09.2018-2019				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 35. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2019 и 2020 гг.

Дата		05.2019-2020				
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
	Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 36. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2019 и 2020 гг.

Дата		06.2019-2020				
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
	Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 37. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2019 и 2020 гг.

Дата		07.2019-2020				
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
	Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Дата		07.2019-2020				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
	ости опровергается					

Таблица 38. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2019 и 2020 гг.

Дата		08.2019-2020				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 39. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2019 и 2020 гг.

Дата		09.2019-2020				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (56%)	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 40. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2020 и 2021 гг.

Дата	05.2020-2021					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 41. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2020 и 2021 гг.

Дата	06.2020-2021					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 42. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2020 и 2021 гг.

Дата	07.2020-2021					
Растительное сообщество Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Дата		07.2020-2021				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 43. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе 2020 и 2021 гг.

Дата		08.2020-2021				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 44. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2020 и 2021 гг.

Дата		09.2020-2021				
Растительное сообщество	Ельники	Елово-сосновые	Сосняк и	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Критерий						
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)	Не опровергается (98%)

Таблица 45. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в мае 2021 и 2022 гг.

Дата		05.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Листо-венные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 46. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июне 2021 и 2022 гг.

Дата		06.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Листо-венные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Не опровергается (20%)
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 47. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в июле 2021 и 2022 гг.

Дата		07.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Листо-венные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Дата		07.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности не опровергается (30%)	Не опровергается (18%)	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Не опровергается (18%)

Таблица 48. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в августе мае 2021 и 2022 гг.

Дата		08.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается

Таблица 49. Результат статистического анализа значений индекса NDVI для растительных сообществ в сентябре 2021 и 2022 гг.

Дата		09.2021-2022					
Растительное сообщество	Критерий	Ельники	Елово-сосновые	Сосняки	Сосняки скальные	Лиственные леса	Травянистая растительность
Уилкоксона-Манна-Уитни	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается
Зигеля-Тьюки	Гипотеза однородности опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается	Опровергается