



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

Кафедра экспериментальной физики атмосферы
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование снежного покрова горных районов по
космоснимкам»

Исполнитель **Елисеев Артем Вячеславович**
(фамилия, имя, отчество)

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

Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Предмет исследования	7
1.1. Снежный покров и его физические свойства.....	7
1.2. Изучение снежного покрова аппаратурой ДЗЗ	11
1.3. Спектральные кривые снега и их изменчивость.....	20
Глава 2. Исходные данные и методы дешифрирования	27
2.1. Исходные данные по перевалам Камчик, Рокский, Снежный	27
2.2. База данных спутниковых снимков и инструментарий	33
2.3. Методы дешифрирования	38
2.3.1. Метод RGB синтезирования	42
2.3.2. Метод индекса снега NDSI	51
Глава 3. Моделирование толщины снежного покрова по мультиспектральным данным	56
3.1. Существующие модели и их задачи.....	56
3.2. Моделирование толщины снега методом регрессии.....	59
3.3 Сравнение модельных данных.....	65
3.4 Архив анализа снежного покрова перевалов Камчик, Рокский, Снежный	66
Глава 4. 3D моделирование слоя снежного покрова.....	68
4.1 Выбор редактора для модели слоя.....	68
4.2 Настройка и работа с базой данных OSM.....	69
4.3 Редактирование рельефа в редакторе OSM.....	76
4.4 Редактирование модулей OSM	78
4.5 Трехмерная модель снежного покрова	80
Заключение	84
Список используемых источников	86

Введение

Актуальность работы обозначена необходимостью контроля за снежным покровом в связи с острой необходимостью обеспечения безопасности человеческой жизнедеятельности в горных регионах, обеспечения бесперебойности работы логистических маршрутов и магистралей, а также с изменением климата, где особенно выражен вклад в энергобаланс земли снежным покровом и его отражающей способностью, и гидрологического режимов местности, необходимостью снабжения агрометеорологических и гидрометеорологических прогнозов, контроля изменений в природной среде (климатических динамики колебаний).

Объектом исследования в выпускной работе представлены снежный покров перевалов Камчик, Рокский, Снежный горных систем Тянь-Шань, Кавказских гор, Хибин соответственно и данные со снегосъемных рек предоставленные местными снеголавинными службами.

Предметом исследования является совокупность данных снегосъемок регионов перевалов Камчик, Рокский, Снежный и спутниковых изображений этих территорий, которые могут быть применены в моделировании высоты снежного покрова.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование по мультиспектральным спутниковым снимкам снежного покрова, моделирование его высоты по мультиспектральным спутниковым данным

Решаемые задачи:

1. Произвести анализ результатов снегосъемок по перевалам Камчик, Рокский, Снежный и спутниковых систем, для достижения цели работы.

2. Создать архив спутниковых снимков исследуемых областей и их продуктов.
3. Рассмотреть основные методы для дешифрирования снежного покрова на спутниковых изображениях и применить их для обнаружения снега на спутниковых снимках.
4. Сформировать регрессионную модель для выявления зависимости высоты снега от спектральной яркости канала в пикселе спутникового изображения.
5. Построить трехмерную модель снежного покрова на рельефе исследуемых регионов.

Структура

Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) состоит из введения, четырех глав и заключения.

В данной работе рассматривается исследование снежного покрова горных районов по космоснимкам и моделирования его высоты по мультиспектральным спутниковым снимкам и моделирование в 3D слоя снежного покрова для наглядного и информативного предоставления результатов моделирования покрова, и будущего использования в оперативной работе служб лавинной безопасности.

В первой главе содержится вводная информация о предмете исследования – снежном покрове и его свойствах.

Во второй главе приводится информация о методах дешифрирования снега и применения спутниковой аппаратуры, которая может быть применена в исследовательской работе.

В третьей главе приведены результаты моделирования толщины снежного покрова по обработанным спутниковым мультиспектральным снимкам.

В четвертой главе размещены ключевые шаги и результаты исследования в виде трехмерной модели снежного покрова в виде слоя на объемной карте.

В выводе приводятся результаты исследования и достигнутые результаты.

Список использованных источников содержит двадцать наименований, приведенных в соответствующем разделе.

Снежный покров это один из ключевых факторов климатической системы: благодаря значительным показателям отражательной способности (альбедо), а также низкой теплопроводности, снег является ключевым элементом в энергетическом балансе Земли, в водном балансе за счет содержания воды.

Мониторинг характеристик снежного покрова производится почти во всех странах. А для нашей страны - России – где, большая часть площади продолжительное время покрыта снежным покровом, покров играет одну из основополагающих позиций в формировании климата. Каждый год специалисты ведут подсчеты результатов глобального анализа изменений характеристик снежного покрова, которые помогают определять климатические особенности сезонов и даже годов. Также данные о снежном покрве представляют особую ценность в каждодневной работе снеголавинных служб, которые обеспечивают безопасность жизнедеятельности и бесперебойную работу логистических путей. [1].

На данный момент, для изучения снежного покрова в метеорологической практике основным инструментом остаются прямые методы измерений, такие как снятие данных по снегосъемным рейкам, однако такого метода недостаточно для получения более объемной информации. Спутниковые снимки впервые предоставила возможность единовременного нахождения и определения на обширных территориях распространения снежного покрова, а также изучения его изменчивости. Оба эти показателя играют ключевую роль в оперативном составлении карт снежных покровов. Это важно преимущественно для контроля снежного покрова в рабочем режиме. Основной метод изучения снежных покровов заключается в

использовании снимков метеоспутников, обеспечивающих дистанционное получение данных методом дистанционного зондирования.

Определение распределения снега затрудняется множеством факторов. Так, например, на равнинах, покрытых лесом, даже при наличии снежного слоя, изображение имеет низкую яркость, что затрудняет определение наличия снега; приходится полагаться на участки чистого снега в небольших открытых пространствах среди лесов, болот, вырубок, речных долин и водоемов. Определение границ снежного слоя в горных регионах легко осуществляется благодаря характерной дендритовой структуре. Однако стоит отметить, что спутниковый снимок должен содержать несколько разных объектов, чтобы обеспечивать точность интерпретации данных.

Значительное внимание привлекает анализ изменений снежного покрова на больших пространствах, который осуществляется благодаря ежедневной фиксации данных метеоспутников. Весенние колебания границы снежного покрова и их темп служат уникальным источником данных для составления гидрологических прогнозов и подлежат оперативному отображению на картах. В сфере изучения снежного покрытия достигнуты значительные успехи благодаря внедрению автоматизированной системы составления карт зон его распространения на основе спутниковых изображений. Алгоритм предполагает автоматизированную сборку кадров и анализ данных методом выявления наименьшей яркости для устранения облачного покрытия. В конечном счете создаются карты больших территорий, где светлыми оттенками отображается исключительно снеговой покров. Можно создавать карты либо поэтапно за определенный период времени, либо усреднять их данные, скажем, за десятилетия. Создание автоматизированных схем позволяет реально анализировать изменения снежного слоя по сезонам и годам в оперативной каждодневной работе. [1]

Чтобы составить точные гидрометеорологические прогнозы, необходимо учитывать не только площадь распространения снега, но и его толщину, которая важна для расчета водных ресурсов. На текущий момент сложно определить градации интенсивности снежного покрытия по яркости снимков космоса, что существенно усложняет текущие возможности гидрометеорологических исследований. Исследование снежного слоя имеет первостепенное значение благодаря его связи со снегопадами и лавинной безопасностью; ключевое место занимает определение его глубины. Многоспектральные снимки предоставляют уникальные преимущества, особенно когда сравнивают изображения в диапазонах видимого света, ближнего и дальнего инфракрасного излучения. Для анализа снежных лавин критически важны высококачественные спутниковые изображения. Использование съемки в разных световых диапазонах позволяет различать снежные и ледовые участки, обеспечивая мониторинг годовой динамики снежного слоя, данные о которых необходимо для служб лавинной безопасности, гидрометеорологических служб и т.д.

Глава 1. Предмет исследования

1.1. Снежный покров и его физические свойства

Снежный покров – слой, на поверхности, сформированный выпавшими твердыми осадками. Строение снега слоистое, что обуславливается разнесенными по времени снегопадами, а также другими осадками, солнечной радиацией, ветром и изменением состояния снега (возгонка, сублимация). Вода из снежного покрова может находиться в двух (сухой снег) или трех (мокрый снег) фазовых состояниях: жидком, твердом и как водяной пар.

Снеговое покрытие оказывает воздействие на погодные условия, ландшафт, водные циклы и формирование почв. Атмосферные взаимодействия с снежным покровом определяют изменения в погодных условиях. Высокое альbedo снежного покрова заметно снижает количество короткой волны солнечной энергии, достигающей земной поверхности. Специфические свойства снежного покрова оказывают значительное воздействие на тепловой режим атмосферы по сравнению с изолирующими свойствами. Снежные покровы активно передают тепло за счет интенсивной эмиссии длинноволнового излучения. Суммарные характеристики снежного слоя вызывают охлаждение атмосферы и формирование температурных инверсий вблизи земли, где холод сосредоточен ближе к снегу, а выше его значение возрастает. В весеннее время основная доля получаемого тепла используется для растапливания снежного покрова. Снег снижает теплопередачу от земли в воздух, предотвращая чрезмерные потери тепла и уменьшающее замерзание грунта, одновременно смягчая колебания температур. В период таяния снега, он задерживает проникновение тёплых лучей в землю. Содержание влаги в снеговом слое существенно влияет на гидропередачи в почве. Снеговой покров играет важную роль в круговороте водных ресурсов в окружающей среде. Снеговая составляющая стала ключевым элементом водного баланса рек в регионах со сформировавшимся

снежным покровом. Снежный покров определяет объем ежегодного водного потока, масштабы весенних паводков, условия замерзания водотоков, вероятность снежных сходов и прочие аспекты. Площадь снежного покрова варьируется от 115 до 126 миллионов квадратных километров. Снеговой покров, выполняющий функцию теплоизоляции между землей и атмосферой, повышает отражение солнечного света и способствует снижению температуры земли.

Снеговой покров играет ключевую роль в процессе формирования и деградации ледниковых явлений. Постоянное расширение снежного слоя приводит к росту его продолжительности и площади покрытия, усиливая отражение солнечного света и усугубляя холод; напротив, уменьшение такого слоя снизит общий коэффициент отражения Земли, стимулируя повышение температуры. Анализ параметров снежного слоя, включая толщину, плотность и пространственное распределение, играет ключевую роль в практическом применении, учитывая влияние снежного покрытия на уровень водных ресурсов, функционирование транспортной инфраструктуры, состояние аграрного сектора и воздействие на процессы размыва почв.

Альбедо снежного слоя, достигающего до 80-95%, значительно превосходит показатели почвы и растительности без снега (меньше 20%), существенно трансформируя тепловые характеристики земли. Радиационное равновесие между Землей и атмосферой модифицируется за счет собственного значения отражающей способности снежного покрова отражением светового потока снежными покровами. Физические характеристики снежного покрова постоянно меняются в течение зимнего периода. Важным параметром снежного слоя является его масса единичной объемной единицы, варьирующая от 10 до около 700 кг/м³, зависящая от типа снега и сезона. Изменение снежной плотности определяется продолжительностью его накопления и варьируется по вертикали слоя. Снежный слой представляет

собой многослойную структуру благодаря зазорам между ледяными частицами. Плотность снежного покрова варьируется от 2% до 98%, зависящая от степени его укатывания. Воздухопроницаемость напрямую связана с данной характеристикой. Сжатие снежного слоя, формирование ледовых покровов и рост влаги приводят к уменьшению способности снега пропускать воздух. Структура снежного слоя позволяет оценить степень её проницаемости водой. Различия в скорости фильтрации обусловлены положением слоёв по вертикали и горизонтали. Водопроницаемость обратно пропорциональна, тогда как максимальная водоносность снега определяется его способностью удерживать максимальное количество влаги после полного насыщения водой. Свежий сухой снег может вместить около 44–30% влаги по отношению к своей совокупной массе, тогда как крупный уплотнённый снежный слой (с плотностью 420 кг/м³) удерживает лишь порядка 13%. Стоит обратить внимание на влагосодержание снежного покрова – долю жидкости, которую он сохраняет в различных состояниях. [1].

Главное значение данных снегосъемок связано с изучением климатического, а также гидрологического режимов местности, необходимостью снабжения агрометеорологических и гидрологических прогнозов, контроля изменений в природной среде (климатических динамики колебаний). По мере контроля снежного покрова получены данные о его характеристиках:

1. Режимные характеристики снега: даты становления и схода снега, кол-во дней устойчивого снежного покрова.
2. Инструментальные наблюдения: высота; плотность; снегозапас.
3. Визуальные наблюдения: уровень покрытия поверхности снегом и его состояние; состояние почвы под покровом.

Измерения на снегосъемных постах включают: а)определение территории, занесенной снегом вокруг станции; б)определение высоты снега по рейкам; в) проведение снегомерных съемок; г)контроль снегосъемных точек (постоянные точки); д) съемки на местах с зимующей культурой; е)контроль выпадения твердых осадков; ж) наблюдения в горах по маршрутам; з) наблюдения за лавинными процессами.



Рисунок 1.1 – Снегосъемки по снегомеру

Помимо наземных наблюдений за снегом в некоторых УГМС проводятся, аэрофотосъемки, спутниковые съемки, которые особенно сильно внедряются в существующую метеорологическую сеть.

Термические свойства снега.

Главное термическое свойство — коэффициент теплопроводности и температуропроводности, теплоемкость, теплота плавления, испарения, конденсации, возгонки и сублимации. Рост коэффициентов происходит во время увеличения плотности снега. Соответственно снежный покров является хорошим изолятором: суточные флуктуации по температуре затухают на глубине 20—45 см (у старого снега более 60 см). Во время таяния снега флуктуации температуры возникают до глубины пропитывания снежного слоя

водой. Температура тающего снега неизменна и это ведет к размораживанию почвы после полного схода снежного покрова.

Радиационные свойства снега.

Способность снежного слоя отражать, рассредотачивать и поглощать солнечную энергию, а также его собственное излучение представлены данными характеристиками. Альbedo снежного покрова определяет его отражательные свойства. Снежные покровы обладают гораздо более высоким отражением света по сравнению с ледяными поверхностями и водной гладью. Этот аспект определяется рядом параметров: составом падающей прямой радиации, положением солнца по высоте и его местоположением, состоянием снежного слоя. Эти элементы обуславливают изменение коэффициента отражения от 0,98 у чистого снежного покрова до 0,20 у загрязненной влажной поверхности. Отражение солнечной радиации снежным покровом неравномерно распределено по спектральным диапазонам: наименьшее значение альbedo наблюдается в инфракрасной области, превышая показатели в оптическом диапазоне.

Механические свойства снега.

К данным свойствам относят упругость, прочность снежного покрова. Они определяют устойчивость снега на склонах и возможность схода лавин. Снег имеет слоистое строение, внутри он отличается по форме, толщине, размерам зерен. [4]

1.2. Изучение снежного покрова аппаратурой ДЗЗ

Разнообразие человеческой активности и временные изменения снежного слоя как компонента гидрометеорологии определяют необходимый объём мониторинга, который необходимо проводить через стационарные пункты наблюдения и применение данных со спутниковых снимков.

В настоящее время интенсивно исследуется и применяется передовая технология определения толщины снежного покрова и его плотности через мониторинг земной поверхности с использованием метеоспутников.

Наблюдение за земной поверхностью осуществляется посредством наземной, воздушной и космической техники, оснащенной различными типами съемочного оборудования (Рисунок 1.2). В современном контексте научно-технического прогресса дистанционное наблюдение выступает как быстрорастущее поле деятельности по сбору точных и оперативных сведений об изменениях и событиях во всех сферах земной поверхности. Расшифровать полученную информацию — ключевой аспект, являющийся ключевым инструментом для множества научных дисциплин, использующих данные дистанционного зондирования Земли [2].

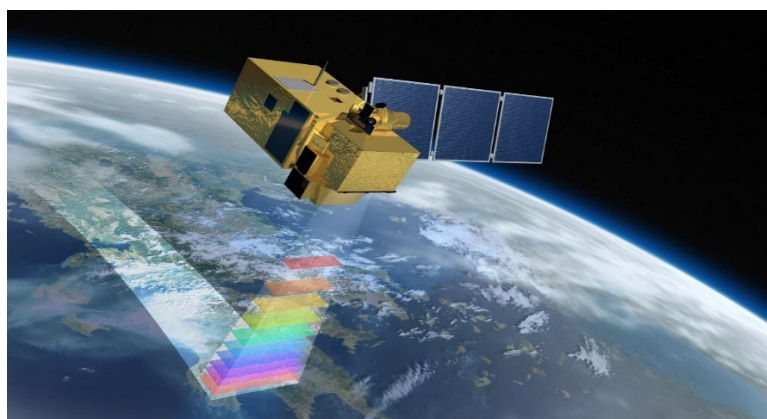


Рисунок 1.2 - Принцип работы спутниковой аппаратуры

Способы дистанционного зондирования подразделяют на пассивные, которые используют естественное отраженное/вторичное излучение от объектов, которому способствует солнечная деятельность, а также активные — которые используют излучение, вызванное сгенерированным источником направленного действия.

Данные дистанционного наблюдения, получаемые космическим аппаратом, существенно зависят от степени прозрачности атмосферы. Для

этой цели космические аппараты оснащены разнообразными системами, работающими по принципу активации и регистрации электромагнитных волн в различных частотных интервалах [2].

Для решения задач метеонаблюдения и мониторинга природных ресурсов применяются космические инструменты дистанционного зондирования. Спутники, изучающие природные ресурсы, оснащены как оптическими, так и радиолокационными приборами; последние особенно ценны благодаря способности наблюдать земную поверхность круглосуточно независимо от погодных условий.

Благодаря орбитальным спутникам ученые могут формировать массивы информации и распространять их независимо от спектральных характеристик электромагнитных волн. Эти данные, дополняемые результатами наземных измерений и анализа, позволят отслеживать любые процессы и тенденции как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективе.

Использование спутникового наблюдения за земной поверхностью считается ключевым и выделенным направлением в области дистанционного зондирования. Собранные данные служат основой для анализа характеристик ландшафта, включая растительность, снеговой покров и прочее, а также состояния аграрных угодий и подобных аспектов [2].

В настоящее время множество метеоспутников предоставляет данные для нужд гидрометеорологической службы. Съёмочная техника способна улавливать электромагнитные волны длиной от нескольких микрон (визуальное оптическое излучение) до сотен сантиметров (радиодиапазон).

Как пример - рабочий диапазон длин волн для аппаратуры спутника Terra MODIS составляет от 0,4 до 14,4 мкм. [2]

Виды спутникового оборудования:

1.Радарная установка. Основное применение в системах, раннего оповещения, контроля лесного покрова, сельского хозяйства и для получения метеорологических данных большого масштаба. Для получения метеорологических данных о направлении и скорости ветра, территориальной привязке и интенсивности осадков, информацию о ионизированном газе в ионосфере, а также создания моделей рельефа обширных участков местности.

2.Лазерные и радиолокационные высотомеры делают возможным получение разноплановой информации. Измерения уровня воды в океане, отображение особенностей рельефа морского дна с очень высоким разрешением (рисунок 1.3).

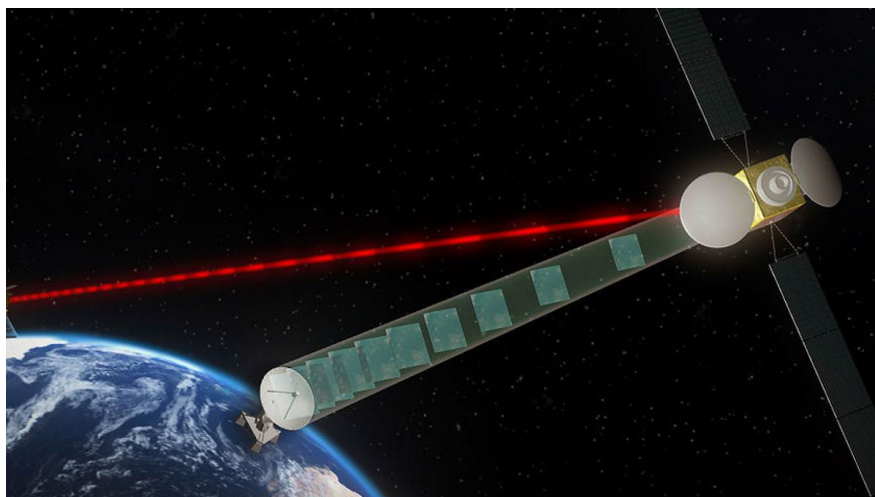


Рисунок 1.3 – Лазерный спутниковый высотомер

3.Лидар технологии светового обнаружения и определения дальности применяется в определении содержания разных химических веществ в атмосфере, вычисления высоты изучаемых предметов с большей точностью (рисунок 1.4).

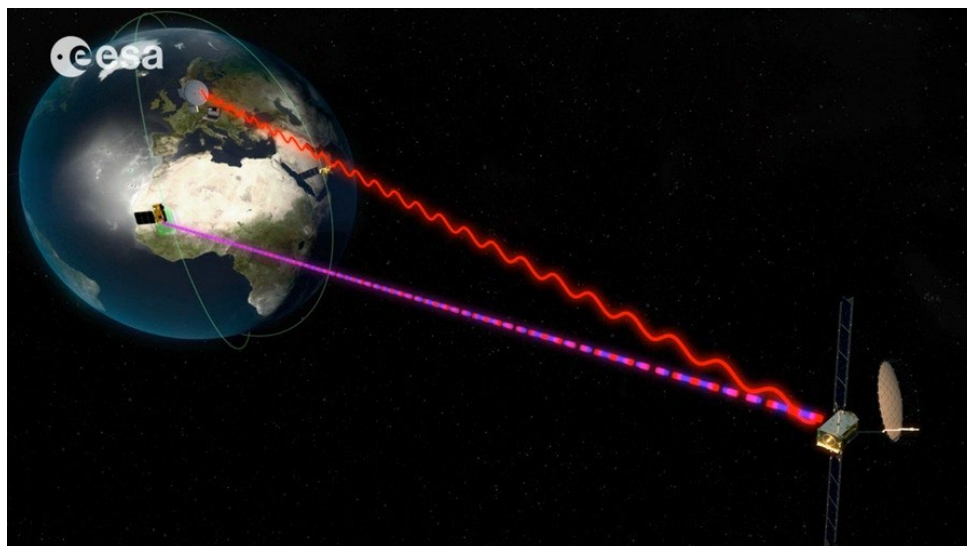


Рисунок 1.4 – Лидарная технология на спутнике

4. Радиометры и фотометры это самые используемое оборудование спутников. Они получают отраженное и излучаемое излучение в широком диапазоне частот. Повсеместными является аппаратура видимого и инфракрасного диапазонов, также микроволновые, реже датчики гамма-лучей и датчики ультрафиолета. Данная аппаратура используется для обнаружения эмиссионного спектра различных химических веществ, представляя информацию о концентрации их в атмосфере (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Радиометр на спутнике

Для формирования картографических данных применяются многодиапазонные устройства, такие как Sentinel, Landsat и Terra MODIS, фиксируя изображения через различные спектральные диапазоны электромагнитной волны.

С помощью спектрального отображения создаются изображения, где каждый элемент хранит всю спектральную характеристику объекта, представляя отдельные участки спектра внутри единого континуума [2].

Характеристики спутниковой аппаратуры:

Пространственное разрешение

Представляет собой размер пикселя (на поверхности в изображении), находящегося в растровой картинке — изменяется от 1 до 4000 метров (рисунок 1.6).

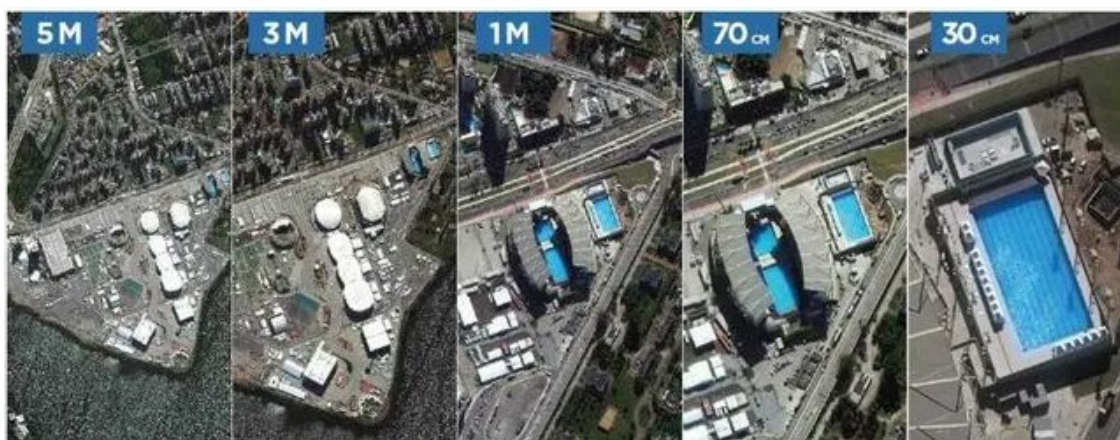


Рисунок 1.6 – Примеры пространственного разрешения

Спектральное разрешение

Формируется шириной спектральных зон съемки. Измеряется в нанометрах (нм) и микрометрах (мкм) (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Примеры спектрального разрешения

Радиометрическое разрешение

Это число уровней сигнала, которые сенсор может регистрировать. Изменяется от 8 до 14 бит, и соответствует от 256 до 16 384 уровней (рисунок 1.8).

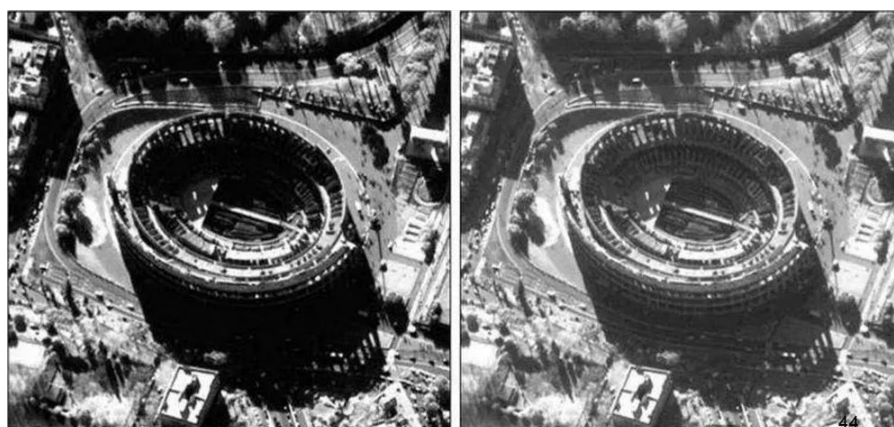


Рисунок 1.8 – Примеры радиометрического разрешения

Временное разрешение

Представляет собой частоту полета спутника над определенной территорией поверхности.

Однако при производстве карт на информации, полученной при дистанционном зондировании, необходимо изменить входные данные, чтобы устранить геометрические искажения. Снимок поверхности, направленным с

аппарата вниз, включает в себя искаженную картину с неискажённым изображением в центре снимка. Во время перемещения к краям снимка, расстояния меж точкой и соответствующему расстоянию становятся более отличными и требуют внесения коррекции [2].

Помимо этого, нужно ввести радиометрическую и атмосферную коррекцию. Коррекция должна изменить дискретные уровни сигнала, от 0 до 255, в их истинные физические значения, а также устранить спектральные искажения, принесенные наличием атмосферы [2].

Основной подход этих методов заключается в дистанционном сборе и анализе данных об элементах земной поверхности через регистрацию солнечного излучения и тепловых волн объектов исследования, осуществляемый датчиками, размещенными на космических аппаратах Земли (см. рисунок 1.9).

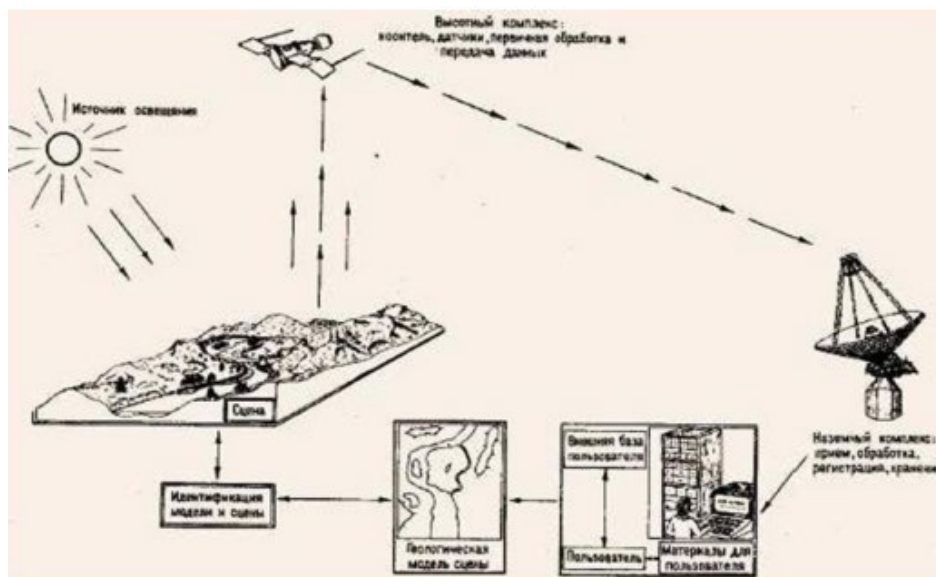


Рисунок 1.9 – Общий принцип дистанционного зондирования Земли

Обработка снимков, которые поступают со спутников позволяет выявить характеристики земной поверхности, такие как:

- А) Распознавание территорий снежного покрова;
- Б) Распознавание плотности растительного покрова;
- В) Термокартирование местности;
- Г) Определение антропогенных загрязнений;
- Д) Определение лесных пожаров.

Регистрация областей снежного покрытия на обширных пространствах с использованием данных со спутников является одним из ключевых аспектов. Динамика изменений снежного покрытия исследуется благодаря многократным фотографическим фиксациям. Определение наличия снежного покрова на исследуемых пространствах осуществляется с высочайшей точностью и надежностью. При анализе снега в лесных зонах важно учитывать его состояние на незатопленных пространствах: болотистых массивах, вырубках и водоемах. Обычно практическое картографирование снега и его таяния весной применяется для нужд гидрологических предсказаний и различных прикладных задач. Гидрологические модели определяют объем собранной влаги. Некоторые характеристики поддаются определению косвенным путем. Такие зоны со снегом, который начинает таять, выявляют через анализ ближнего инфракрасного диапазона, тогда как глубина снега определяется путём обработки множества последовательных снимков. [3] В перспективе космический мониторинг толщины снега будет осуществляться с помощью микроволновой радиолокации. Таким образом станет возможным непосредственное получение данных по распределению снежного слоя и запасов влаги в нем, учитывающих плотность снега.

Сезонный снежный покров играет важную роль в процессах, происходящих в горных регионах, формулирует режим речного стока,

оледенения и снежных лавин. Оказывая существенное воздействие на климат, он сам служит индикатором изменения климата [2].

Карты снежного покрова, полученные с помощью дистанционного зондирования, позволяют понять пространственные характеристики и взаимосвязи ледниковых систем. Точная информация о режиме, распределении и изменчивости снежного покрова необходима для оценки гидрометеорологической информации (рисунок 10).

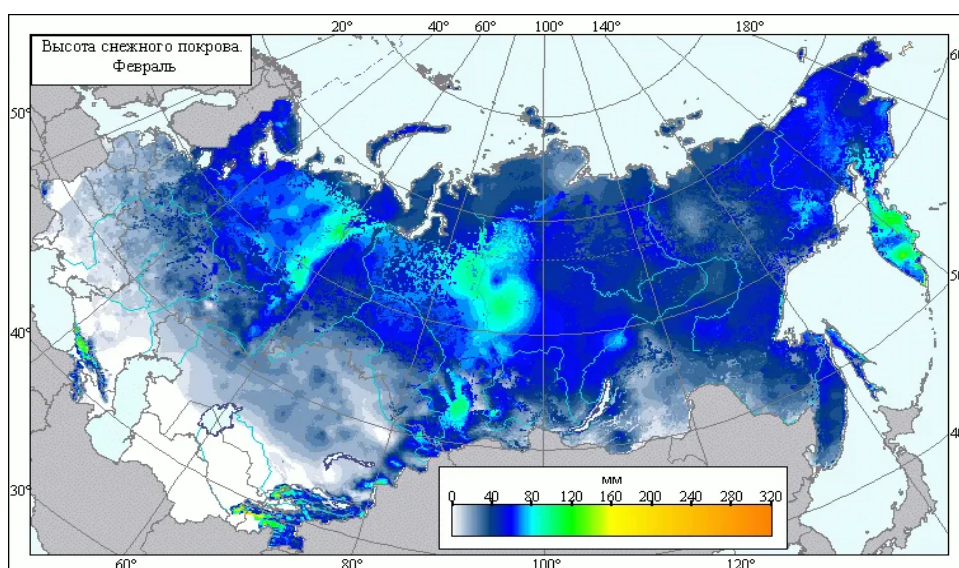


Рисунок 1.10 - Карта высот снежного покрова по спутниковым данным

Для того, чтобы оценить распределение снега, необходимо собрать максимально достоверный статистический массив данных о его текущем положении и динамике. Ограниченное число станций, проводящих регулярные наблюдения за снежным покровом, не может дать точного представления об изменении его состава в течение многих лет. Если говорить о межсезонных изменениях, то их не так уж и много. Недостаток данных может быть восполнен с помощью спутникового мониторинга.

1.3. Спектральные кривые снега и их изменчивость

При дистанционном методе исследования информация передается на регистрирующую аппаратуру с помощью электромагнитного излучения.

Различают электромагнитные волны по длинам волн. В спектре электромагнитных волн выделяются определенные участки. В зависимости от того, какой участок спектра мы исследуем, его разделяют на участки. (рисунок 1.11).

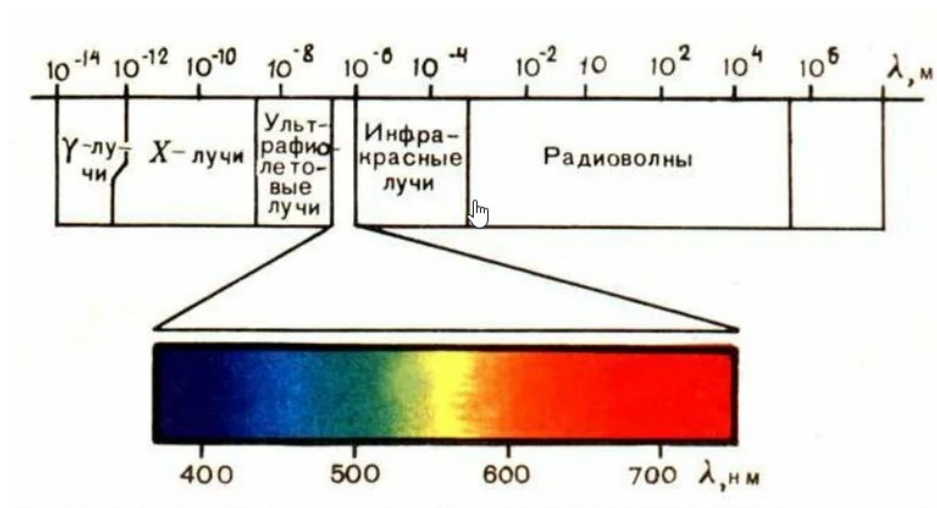


Рисунок 1.11 – Электромагнитный спектр

Электромагнитный спектр состоит из разделов: ультрафиолетовый менее $< 0,4$ мкм; видимый от $0,4$ до $0,8$ мкм; инфракрасный от $0,8$ до 1000 мкм

В инфракрасном диапазоне выделяют зоны: ближнюю (400 - 300 нм); среднюю (300 - 200 нм); дальнюю (< 200 нм)

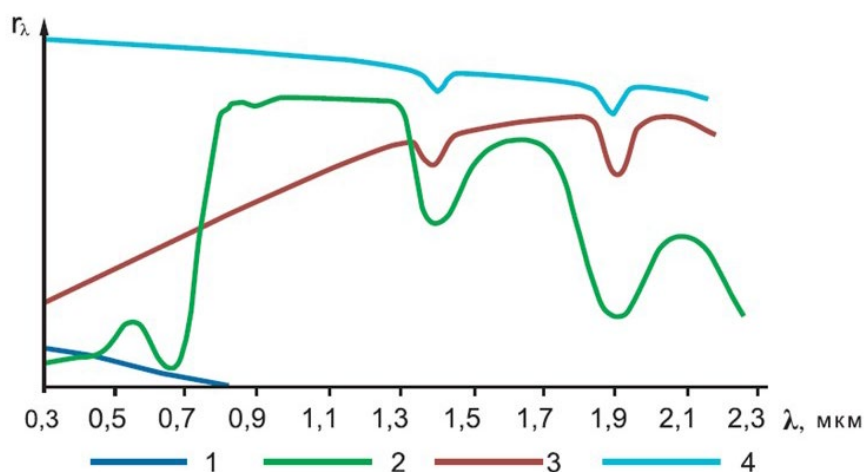
Видимый диапазон выделяют: От 390 до 450 (фиолетовый); от 450 до 480 (синий); от 480 до 510 (голубой); от 510 до 550 (зеленый); от 550 до 575 (желто-зеленый); от 575 до 585 (желтый); от 585 до 620 (оранжевый); от 620 до 800 (красный).

Диапазон инфракрасного (ИК) излучения подразделяется на поддиапазоны ближнего менее $< 1,5$ мкм, среднего от $1,5$ до 3 мкм и дальнего более > 3 мкм инфракрасного излучения. В ближней и средней зоне ИК-поддиапазона преобладает отраженное (солнечное) излучение, а в дальнем, тепловом, собственное излучение Земли. Участок спектра, в котором

расположены ультракороткие радиоволны, разбивают на диапазон миллиметровых, сантиметровых, дециметровых и метровых радиоволн. Сантиметровые и дециметровые волны обычно объединяют в сверхвысоких частот (СВЧ). В литературе миллиметровые и сантиметровые волны относят к одному диапазону, называемому микроволновым [2].

Атмосфера Земли поглощает электромагнитные волны с частотой от 0,3 мкм до 20 м. Именно на эти волны приходится наибольшее количество энергии в диапазоне 0,3-3 мкм. Испытываемое излучение отражается от какого-либо объекта и пропускается через него. Доля отраженного и рассеянного лучистого потока всегда равна единице. Важным фактором является отражение отраженного излучения от поверхности.

Объекты на земной поверхности имеют цвет, который имеет разную яркость в разных спектральных зонах, и характеризуется разными коэффициентами спектральной яркости. Изображают спектральную яркость графически в виде кривой спектральной яркости [2] (рисунок 1.12).



Кривые спектральной яркости основных классов природных объектов:
1 – водные объекты; 2 – растительность; 3 – почвы и горные породы;
4 – снег, облака

Рисунок 1.12 – Кривые спектральной яркости

Яркость хроматических объектов способна варьироваться в связи с изменениями спектра. Специальными опытами удалось установить световой спектр исследуемого предмета. Снежная поверхность имеет самые высокие коэффициенты отражения, особенно в инфракрасном спектре. Это происходит из-за насыщения снега влагой. Облачные образования близки к этому классу по характеру отражения с узкими полосами поглощающего излучения.

Не стоит забывать и о том, что в атмосфере могут возникать излучения разной длины волны. Непрозрачная атмосфера не пропускает ультрафиолетовое излучение. При переходе от коротковолновой части спектра к длинноволновой встречаются участки с высоким коэффициентом прозрачности. В оптическом диапазоне наибольший интерес представляют окна прозрачности, которые охватывают все видимые и отдельные участки инфракрасной области спектра. (3-5 мкм и 8-12 мкм). Миллиметровые радиоволны поглощаются газами, входящими в атмосферу: кислородом и водяным паром. В миллиметровом диапазоне есть несколько окон прозрачности, которые отличаются друг от друга. Наибольшее значение имеет окно прозрачности на длине волны 8,6 мм. Молекулярное поглощение перестает быть заметным при длинах волн свыше 1-2 см. Миллиметровые и световые, поглощаются туманом, дождем, градом, снегом. По мере того, как волны увеличиваются в размерах, они начинают проходить через них свободно. Волны в дециметровом диапазоне (от 3-5 см) проникают во все слои атмосферы, не зависимо от погодных условий и облачности (рисунок 1.13).

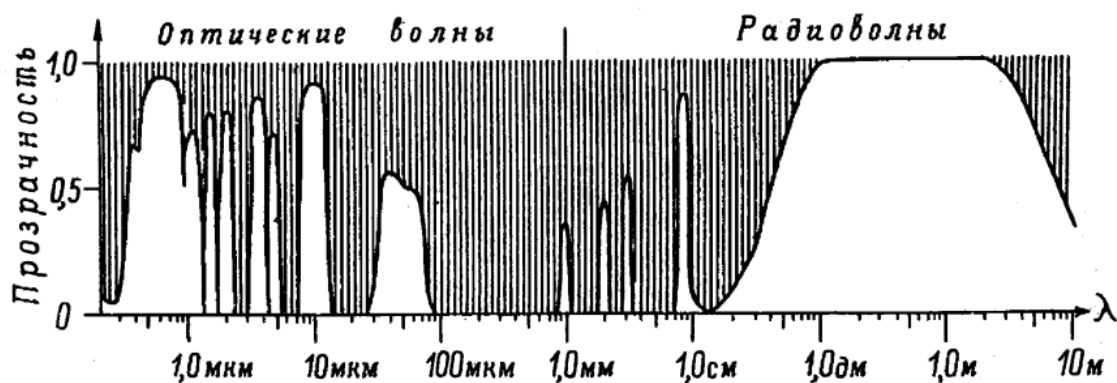


Рисунок 1.13 - Окна прозрачности атмосферы

Уменьшение яркости снега может быть вызвано различными факторами, в том числе и загрязнением. Наиболее важными факторами, влияющими на качество снега, являются: влажность, плотность и количество зерен.

Увеличение влажности снежного покрова сопровождается увеличением объема зерен. Уменьшение СКЯ снегового покрова происходит из-за уменьшения поглощения воды. Загрязнение снежного покрова приводит к его снижению. Кроме того, существует зависимость между зональными яркостями загрязненного снега и концентрацией в нем вредных веществ [3] (рисунок 1.14).

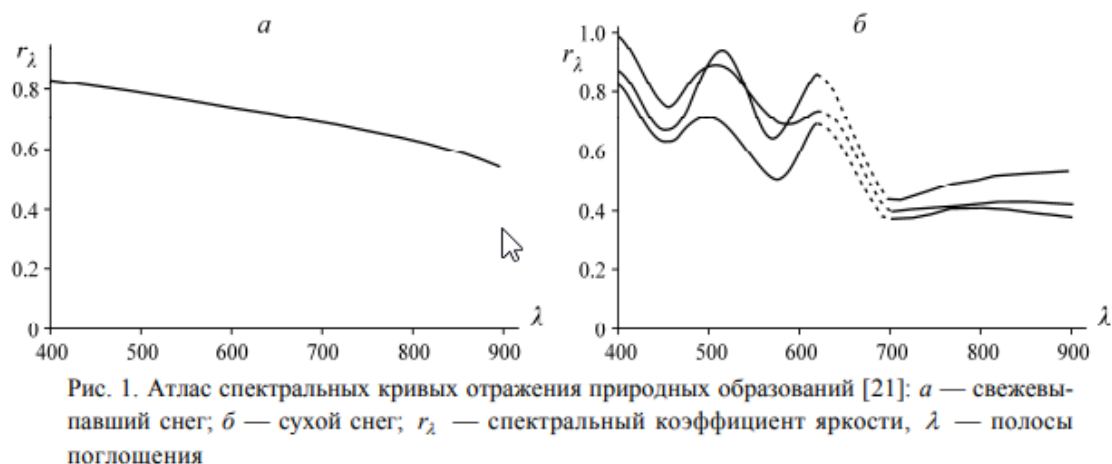


Рисунок 1.14 – Пример спектральных кривых различных состояний
 снега

В зависимости от состояния снега, его яркость может быть разной. Снеговой покров загрязненных и чистых территорий существенно отличается. Это происходит из-за того, что в снеге накапливаются загрязнители. Полевые спектрометрические исследования позволяют выделить ареалы с различными характеристиками снежного покрова, позволяющие разделять снег по цветности, и приличный список спектральных индексов (NDVI, NDSI, NDWI), избирательно чувствительных к содержанию воды в снеге, уровню запыленности, плотности и другим характеристикам (рисунок 1.15, 1.16).

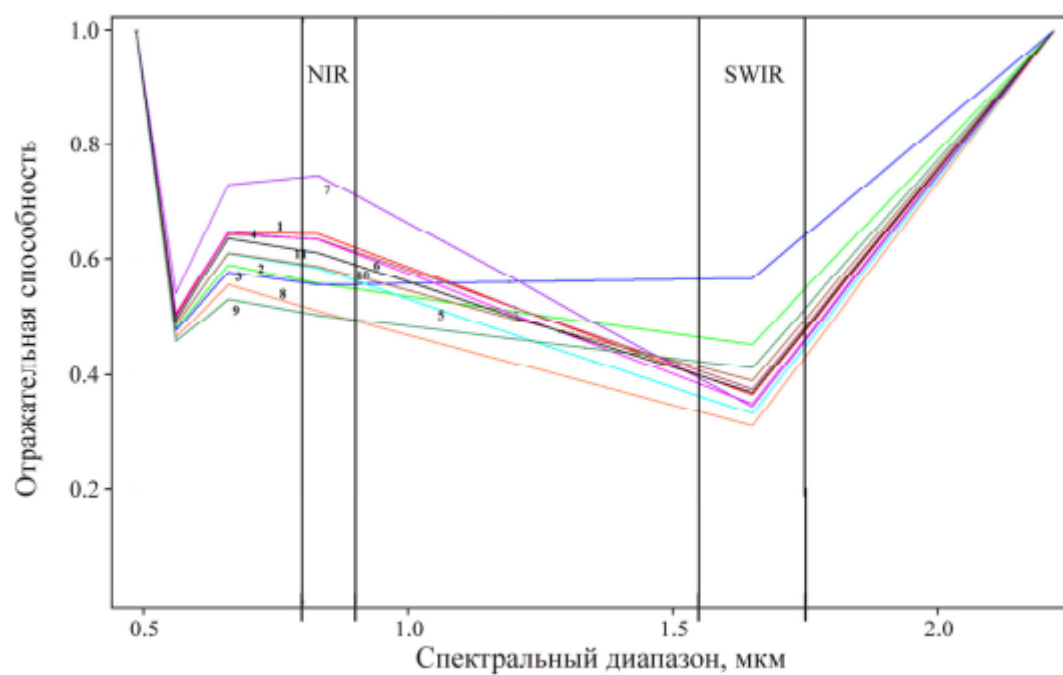


Рисунок 1.15 – Различные отражательные способности от состояния снега

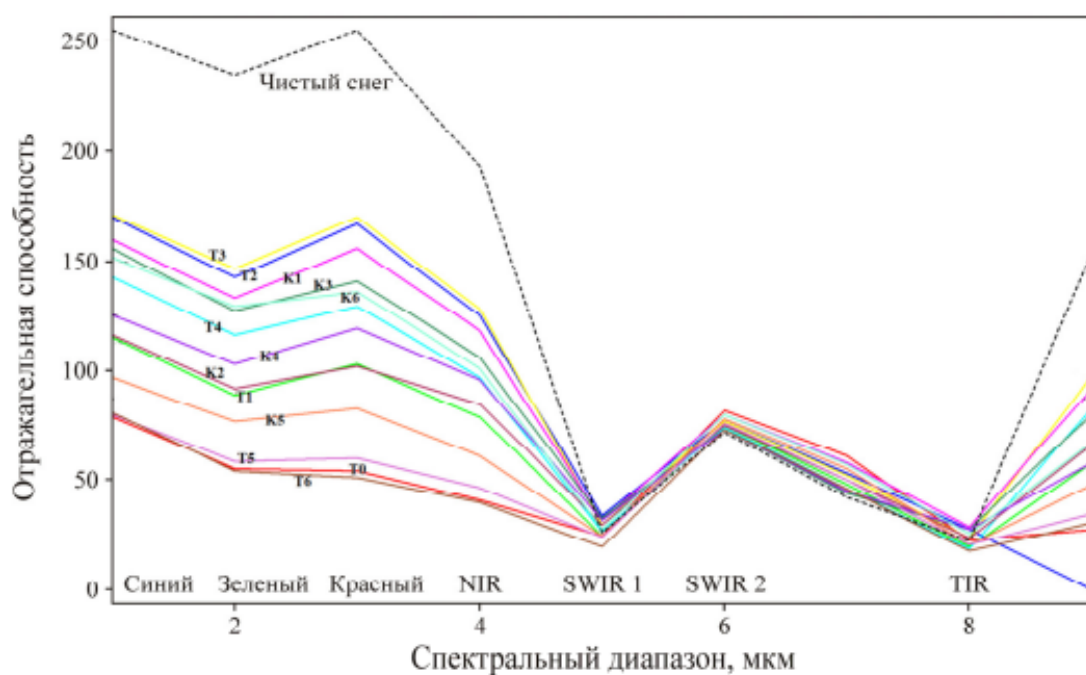


Рисунок 1.16 – Спектральные кривые отражающей способности снега в разных состояниях.

Глава 2. Исходные данные и методы дешифрирования

2.1. Исходные данные по перевалам Камчик, Рокский, Снежный

Камчик является самым большим перевалом в Узбекистане. Он расположен на северо-востоке Киргизии, граничит со странами Средней Азии и Таджикистана. Горы окружают самую населенную долину Центральной Азии. Ферганская долина соединяется с Ферганской долиной перевалом. Высшая точка хребта находится на высоте 2268 м.

Ферганская долина является одной из самых труднодоступных областей в Узбекистане. По его территории перемещаются пассажирские и грузовые транспортные средства. Трасса на перевале имеет пропускную способность до 10 тысяч машин в день (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Перевал Камчик

Перевал Камчик - это очень опасный участок для передвижения. В зимнее время уровень снега может достигать 2,5 метров. Перевалы часто перекрывают из-за сходов лавин и обильных осадков. Из-за обилия снега на

дорогах, люди гибнут под его тяжестью. Постоянные снежные завалы на дорогах затрудняют передвижение. Безопасность на перевале обеспечивается снежными заслонами. На самых опасных участках дороги возводятся щиты, предупреждающие о снежных лавинах.

Снежные покровы на перевале Камчик сохраняются до мая. В последний раз лавины на горных склонах здесь случались в начале 2000-х годов, когда порывы ветра достигали 30 м/с и приводили к гибели людей. Обильные снегопады и обильные снегопады привели к закрытию перевала.



Рисунок 2.2 – Перевал Камчик

Рокский перевал горная седловина в центральной части Главного Кавказского хребта. Расположен между вершинами Ресы-Хох и Сохс. Высшая точка седловины 2996 м.

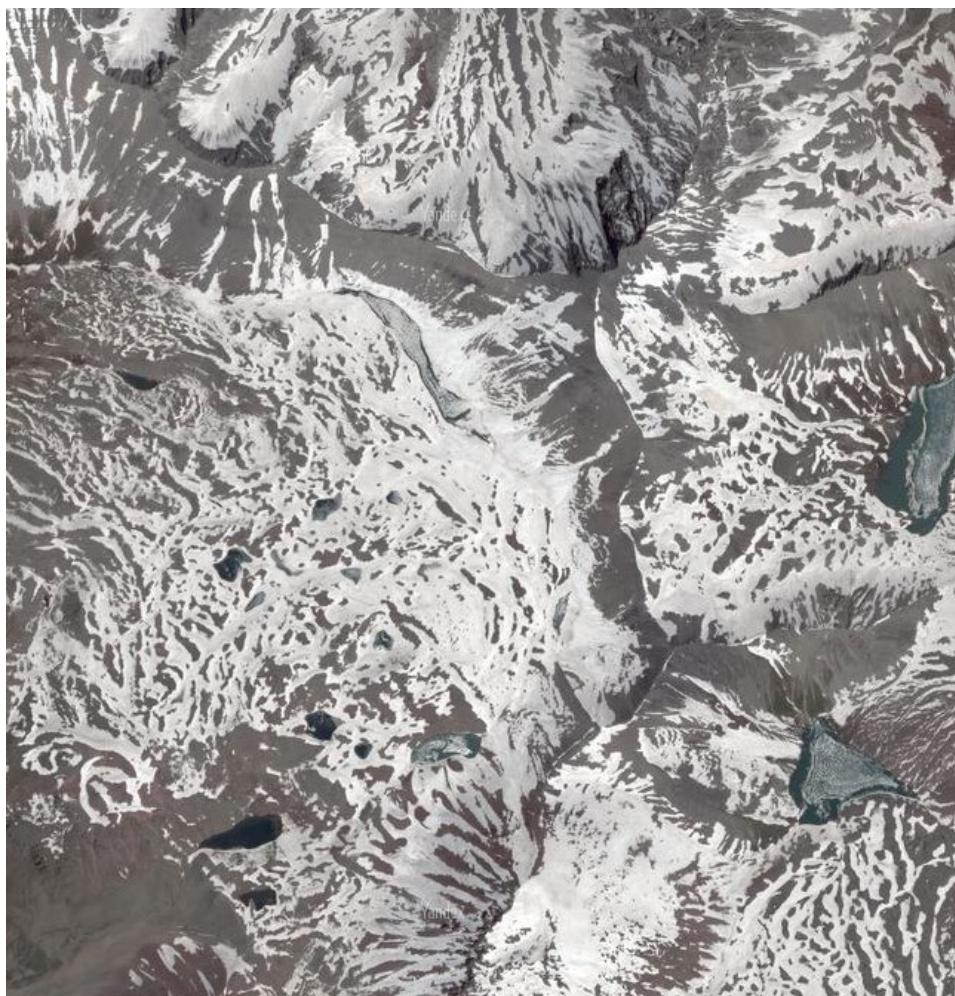


Рисунок 2.3 – Перевал Рокский

На данный момент по перевалу проходит важная Транскавказская автомагистраль. Рокский тоннель выполняет стратегически важную функцию связующего звена между республикой Северная Осетия и Южная Осетия. На перевале Рокский снеголавинная безопасность обеспечивается местными службами для борьбы с лавинами устанавливаются противолавинные галереи.



Рисунок 2.4 – Перевал Рокский

Перевал Снежный в Хибинах один из перевалом сложного туристического маршрута крупнейшего горного массива на Кольском полуострове.



Рисунок 2.5 – Перевал Снежный

Хибины популярны у горных и лыжных туристов, а также альпинистов. Обеспечение снеголавинной безопасно в данном регионе ведет КО «АО Апатит» устанавливая метеостанции и снежные щиты.



Рисунок 2.6 – Перевал Снежный

В своей выпускной квалификационной работе я буду использовать результаты снегосъемок по исследуемым регионам, предоставленные местным службами лавинного контроля. Были получены таблицы снегосъемок за зимние сезоны 2014-2024 года. Данные снегосъемок представляются службами в едином утвержденном формате в виде информационных таблиц представлены ниже на рисунках:

Дата отсчета высоты снега (см)															
Ноябрь				Декабрь						Январь					
13	19	24	29	5	10	15	21	24	29	5	10	15	20	24	29
20	30	20	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	20	20	30	40	30	30	45	45	40	40	40	40	60	50	40
30	20	20	30	30	20	20	35	35	30	30	30	30	50	40	40
20	30	20	20	20	10	10	20	10	10	0	0	0	20	20	10
20	30	20	30	30	20	10	30	30	30	20	20	10	30	30	20
30	60	50	50	50	40	10	30	30	30	20	10	0	30	30	10
20	20	10	10	10	10	10	30	20	20	20	10	0	20	20	0
10	40	30	30	30	30	20	40	40	30	30	30	20	40	40	20
20	50	30	40	40	30	20	40	40	30	30	20	10	30	40	30
20	20	10	20	20	20	10	30	30	20	20	20	10	20	20	10
30	20	10	30	30	30	20	40	40	40	40	40	30	30	40	30
20	30	10	20	30	30	20	40	30	30	30	30	20	20	20	0
20	50	40	40	50	40	40	60	50	50	50	40	30	30	40	30
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	50	40	50	60	50	40	60	50	50	50	50	40	40	60	50
30	50	50	50	50	40	30	60	60	60	60	60	40	50	60	50
40	40	30	40	40	30	30	50	40	40	40	40	30	40	50	40
20	40	30	30	30	30	20	50	40	40	40	30	20	20	30	10
20	40	30	40	40	30	20	30	30	30	50	40	30	30	40	30
30	40	30	50	50	40	30	50	50	50	50	50	40	40	50	40
20	30	10	10	20	20	10	30	20	20	20	20	10	10	10	0
20	50	40	50	50	40	30	50	40	40	40	30	20	40	50	40
30	40	30	20	20	20	10	30	30	30	30	30	20	20	30	20
20	20	10	10	10	10	10	20	10	10	10	10	0	10	10	5
20	20	10	10	10	10	10	20	10	10	10	10	0	10	10	5
30	30	20	30	30	30	20	50	50	40	40	30	20	50	50	40
30	30	20	30	30	30	20	50	40	40	40	30	20	40	50	30
20	30	20	40	50	40	30	50	40	40	40	30	20	30	40	20
30	40	40	40	40	30	20	40	40	40	40	40	30	30	40	20

Рисунок 2.7 – Пример данных по снегосъемкам по перевал Камчик

Предоставленные данные имеют номера реек и места съемки с указанием высоты и экспозиции, что в дальнейшем поможет провести географическую привязку на местности спутниковых карт и точек снегосъемного маршрута.

№ п/п	№ Рей ки	№ л/с	Высота установки н.у.м.	Экс пози ция	Дата отсчета в				
					Февраль				
					03	11	16	22	26
1	4	61	2330	ВСВ	-	-	-	-	-
2	5	61	2350	СВ	40	50	40	40	60
3	6	61	2350	СВ	40	50	50	50	70
4	7	0	2270	ЮЮЗ	0	20	5	10	10
5	8	1а	2375	ЮЮЗ	10	40	20	20	40
6	9	1б	2415	ЮЮЗ	0	-	-	-	-
7	10	1в	2480	ЮЮЗ	0	20	0	5	10
8	11	2	2485	ЗЮЗ	10	30	10	20	30
9	12	2	2430	ЗЮЗ	20	40	20	20	30
10	13	3	2470	З	0	20	10	20	20
11	14	4	2320	ЮЗ	20	40	20	20	20
12	15	4	2380	З	0	20	0	10	10
13	16	4	2480	ЮЗ	20	50	30	40	40
14	17	5	2490	ЗЮЗ	-	-	-	-	-
15	18	5	2500	ЮЗ	-	-	-	-	-
16	19	5	2495	ЮЮЗ	40	70	40	50	50
17	20	6	2475	З	40	60	30	40	70
18	21	6	2465	ЗЮЗ	30	50	30	40	50
19	22	6	2450	ЗЮЗ	10	20	0	10	30
20	23	6	2575	ЮЮЗ	30	40	10	20	30
21	24	7	2470	ЮЗ	30	40	30	40	50
22	25	7	2570	ЮЮЗ	0	20	0	5	10
23	26	7	2510	Ю	30	50	40	40	50
24	27	8	2355	ЗЮЗ	20	40	10	10	10
25	28	9	2435	ЗЮЗ	0	20	0	10	10
26	29	10	2460	ЗЮЗ	0	20	0	10	10
27	30	11	2500	З	30	50	30	40	40

Рисунок 2.8 – Пример данных расположения снегомерных реек для перевала Рокский

2.2. База данных спутниковых снимков и инструментарий

В ходе работы был выбран источник спутниковых изображений – сайт EARTHDATA LAADS DAA, который на бесплатной основе предоставляет доступ к различным снимкам во всех спектрах, доступных для метеорологических спутников (рисунок 2.9).

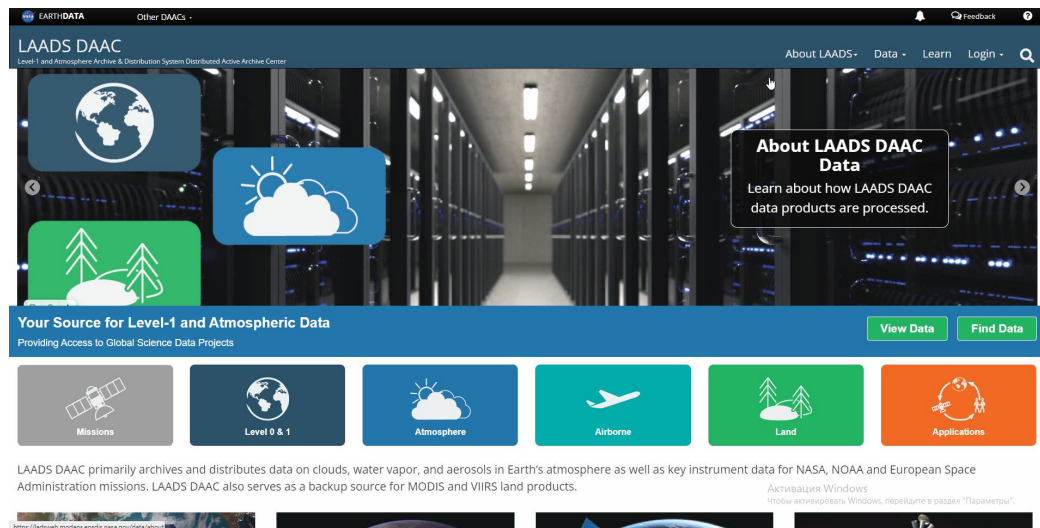


Рисунок 2.9 – Сайт EarthData

На данном сайте, исходя из задачи пользователя можно выбрать из списка любой подходящий спутник, его оборудование и необходимые каналы съемки (рисунок 2.10).

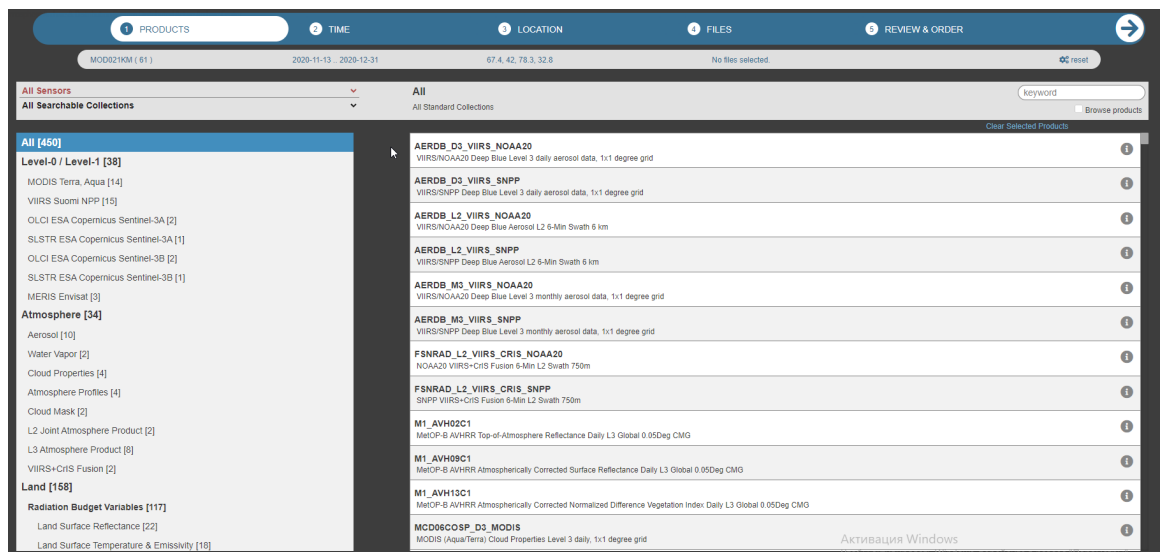


Рисунок 2.10 – Выбор спутника и канала съемки

В моем случае я выбрал инструментом для работы спутник MODIS с оборудованием Terra, в каналах MOD021KM Level 1B Calibrated Radiances 1km, 250m. Съёмочные системы на борту Terra: MODIS MOPITT, CERES, ASTER, MISR.

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения) – это вторая, наряду с ASTER, гиперспектральная система на борту спутника Terra.

Радиометрическое разрешение исходных снимков находится на высоком уровне: 12 бит. Максимально достигнутая скорость передачи данных составляет 10.6 Мбит/с. Траектория движения спутника и угол обзора апертуры 110° (при ширине полосы обзора 2330 км) позволяют MODIS за один день получить изображение почти всей поверхности Земли, за исключением небольших промежутков между полосами сканирования.

Спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) является одним из основополагающих оборудований на борту спутников Terra и Aqua которые находятся на высоте 705км и в среднем могут провести повторную съемку одной и той же местности 2 раза за сутки. Спутниковые снимки MODIS находятся в свободном доступе для всех пользователей. Непрерывный режим работы позволяет снимать все, что находится в радиусе видимости станции. На основе данных, полученных в ходе мониторинга природных явлений на территории крупного региона, можно решать различные задачи по контролю за природными явлениями. MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах, с пространственным разрешением в надире для разных каналов 250м 500м 1000м (рисунок 2.11).

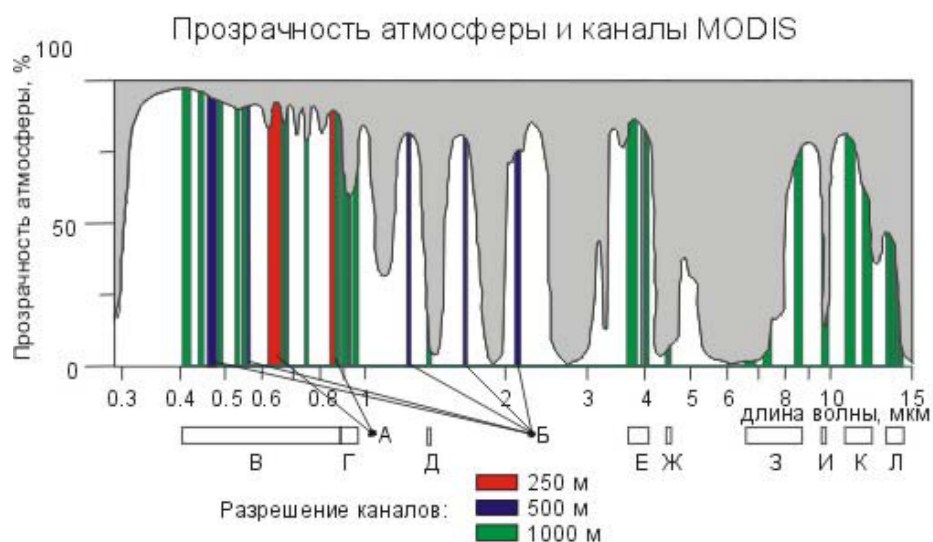


Рисунок 2.11 – Прозрачность атмосферы и каналы MODIS

На этом сайте далее необходимо выбрать время съемки и месторасположение объекта. В своей работе я создал обширный банк спутниковых снимков для трех перевалом Камчик, Рокский, Снежный за промежуток с 2014 по 2024 год.

Date Range Single Date

Display as: YYYY-MM-DD

2020-11-01 - 2021-01-31

Add Date

+ Advanced

Рисунок 2.12 – Выбор данных по дате

Последний шаг для получения данных, с которыми в последующем необходимо будет работать – выбор локации (рисунок 2.13).

После выбора снимков необходимо проверить географическую привязку (рисунок 2.15). Данными фигурами (квадратами) выделены границы зон спутниковых снимков, которые мы можем визуально проверить, куда попадает центр спутникового снимка.



Рисунок 2.15 – Проверка геометрической привязки снимков

2.3. Методы дешифрирования

Важными параметрами при дешифрировании являются технические характеристики, то они выражаются в параметрах, описывающих чувствительность и точность регистрации. Важную роль играет обзорность, ширина полосы и сезонная съемка. Разрешение изображения - один из ключевых параметров, зависит от размера пиксела, который соответствует минимальному участку земной поверхности. Именно информация пиксела дает представление о дешифрируемом объекте. Принято считать, что яркость пиксела определяется количеством электромагнитного излучения, попавшего на сенсор. Элементы светочувствительного сенсора (матрицы) не являются

квадратными, так же, как и соответствующие им участки земной поверхности, квадратный элемент изображения, яркость которого определяется интегральной величиной количества электромагнитной энергии, попавшей на чувствительный элемент сенсора (регистрирующего прибора). В зависимости от размера пикселей, можно сделать вывод о местоположении объекта на местности. Если использовать косвенные признаки, то можно получить дополнительную информацию [4].

В зависимости от поставленных задач акцент делается именно на визуальной дешифровке. Важным элементом визуальной дешифровки является анализ пейзажа с точки зрения его развития и взаимосвязи с окружающей средой. Важным фактором, влияющим на качество визуальной дешифровки, является профессиональная эрудиция и опыт эксперта (рисунок 2.15).

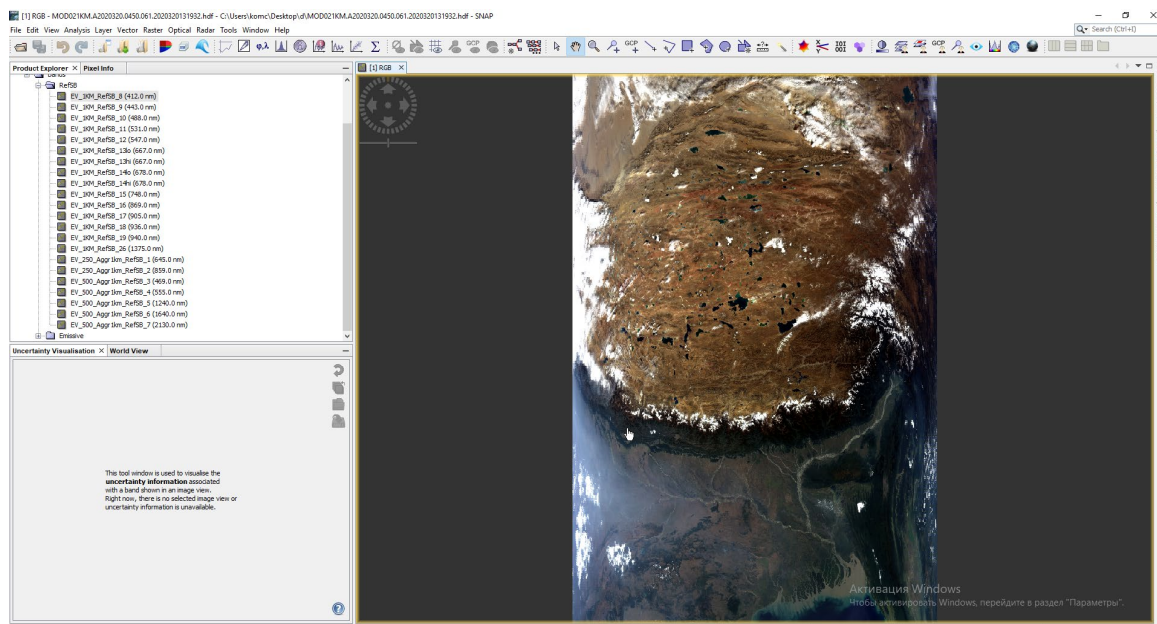


Рисунок 2.15 – Визуальное обнаружение снега.

Приемы, используемые при дешифрировании снимков, имеют предметно-ориентированный характер. Географическое дешифрирование может быть геоморфологическим, ландшафтным и гидрологическим.

Различают несколько видов видеоматериалов, отличающихся степенью детальность и качеством изображения. Разновременные снимки необходимы для анализа динамики изменений. Выделяют топографическое, ландшафтное, геоморфологическое, гидрологическое и другие виды дешифрирования. Дешифрация осуществляется с помощью специальных алгоритмов, обеспечивающих наиболее эффективное отображение информации в дешифрованном виде. Разновременные снимки необходимы для анализа динамики изменений. Типовой съемочный материал может быть избыточен, так и недостаточен информации [4].

Методология дешифрирования имеет такие этапы как: а) изучение местности работы; б) поиск объектов работы; в) подбор средств для решения задачи; г) дешифрация снимка и его проверка достоверности; д) представление итогового продукта.

Дешифровка – это распознавание (различение) объектов с помощью дешифровки. Положительные и отрицательные признаки могут быть определены с помощью прямых или косвенных признаков. К прямым относят те признаки, которые присущи самим объектам. Косвенными признаками дешифрирования являются косвенные признаки, которые указывают на то, что данный объект находится в другой природной или искусственной среде.

Прямые дешифровочные признаки могут быть простыми и сложными. Прямой простой признак состоит в том, что изображение имеет определенную форму, размер, тень т.д. Прямые сложные дешифровочные признаки – текстура и структура объекта, т.е. рисунок изображения. Текстура может быть вариативной, тонкой и однородной взаимной. Прямым дешифрированием называется прямое (прямое) расшифровывание. Прямое дешифрирование в видимой области доступно любому дешифровальщику.

Например, самое простое свойство – яркость изображения, которая может зависеть не только от яркости объекта, но также от его температуры, влажности, влагосодержания (радиоволнового диапазона) и даже от типа падающего на него излучения. Формы искусственных объектов обычно имеют простые геометрические формы, но природные образования могут быть наделены специфическими элементами (например, прямые углы и дуги переменного радиуса). Тон объекта в изображении позволяет легко выделить снег, растительность и водоемы. Разные значения яркости в разных каналах могут быть соотнесены с спектральной кривой, что позволяет определить объект по одному пикселю. Тень объекта обычно имеет высокую контрастность, что позволяет обнаружить высокие объекты и небольшие объекты. Рисунок изображения – это устойчивый сложный признак, объединяющий характерную структуру и текстуру изображения.

Статистический анализ параметров пространства, включая форму, размеры, структуру и текстурность, лежит в основе уникальной разновидности – дешифрования. С помощью специальных таблиц фиксируют взаимосвязи между состоянием индикаторов и расшифровываемыми элементами объектов. [4]. В качестве примера традиционной интерпретации можно привести белую поверхность на горных склонах, сигнализирующую о снежном покрове в данной местности.

Снежно-ледяная дешифровка используется в различных областях науки и практической деятельности – от прогнозирования уровня и расхода воды на весеннее половодье до мониторинга состояния ледников для оценки их влияния на климатические изменения. Важным признаком для всех видов снежных и ледовых покрытий является высокий уровень отражательной способности в ИК-диапазоне, а затем резкое падение в среднем спектральном диапазоне. Это позволяет отличать лед от снега и льда, а также другие яркие объекты (бетон, бетон или песок) [4].

В процессе анализа снежного и ледового покрытия часто применяют комбинированные каналы, где данные элементы отображаются голубым или белым оттенком. В изображениях натурального цвета снежные участки выглядят ярко белыми, тогда как лёд демонстрирует свою полупрозрачную природу. Автоматическое выделение снежного покрова на изображениях со спутника осуществляется благодаря указанным спектральным параметрам. Анализ снежного покрова помогает сначала установить размеры заснеженных территорий, а затем извлечь данные, зависящие от этих показателей. Описанные ранее характеристики и применяемые методы расшифровки представляют собой краткий обзор обширной практики, основанной на уникальных навыках отдельных экспертов. В конечном итоге качество результатов зависит от квалификации экспертов по расшифровке данных.

2.3.1. Метод RGB синтезирования

При цветовом синтезе спутниковых изображений спектральные каналы одного спутникового изображения преобразуются в одно изображение (рисунок 2.16).

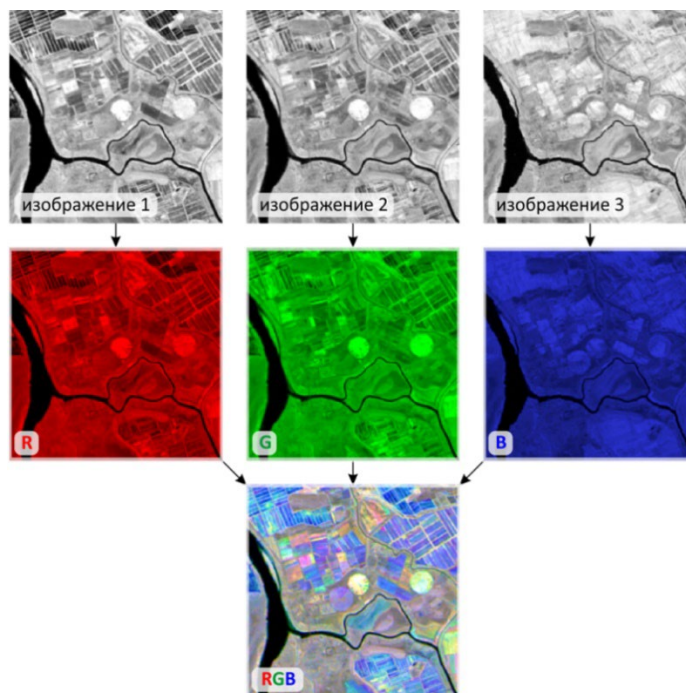


Рисунок 2.16 – Принцип RGB синтеза изображений

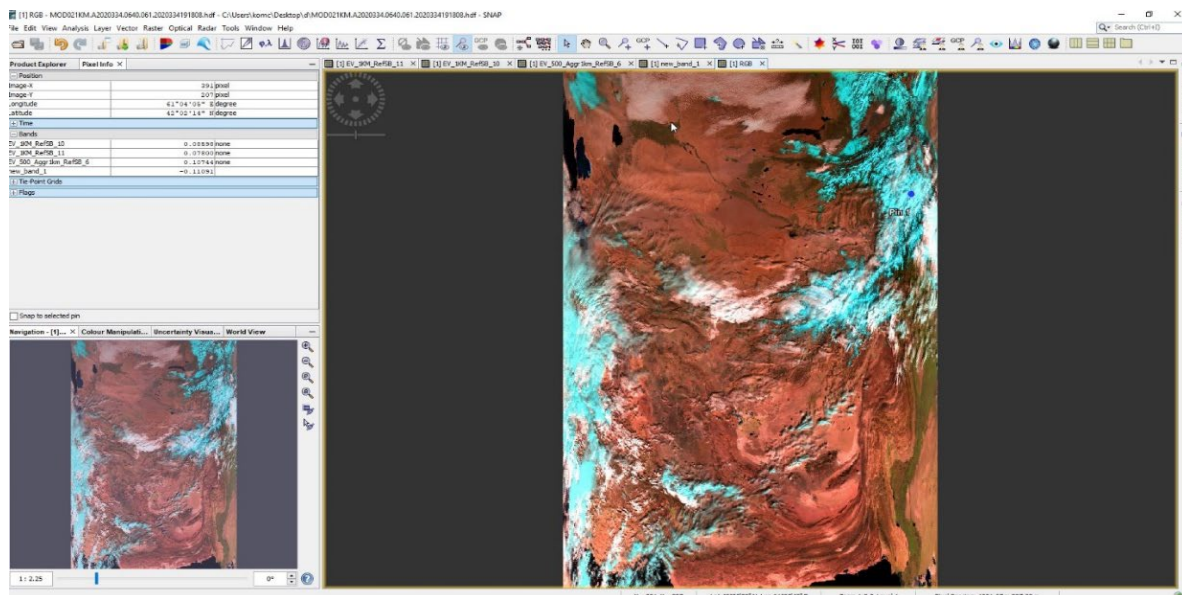


Рисунок 2.17 – Синтезированное изображение, перевал Камчик

Синтезированное изображение может включать любой спектральный канал, доступный для картографического интерфейса. на заданной территории.

Для работы с первым методом дешифрования, которым я буду пользоваться в своей выпускной работе необходимо открыть в приложении SNAP калькулятор RGB синтеза и выбрать необходимые для работы каналы, как показано на рисунке ниже:

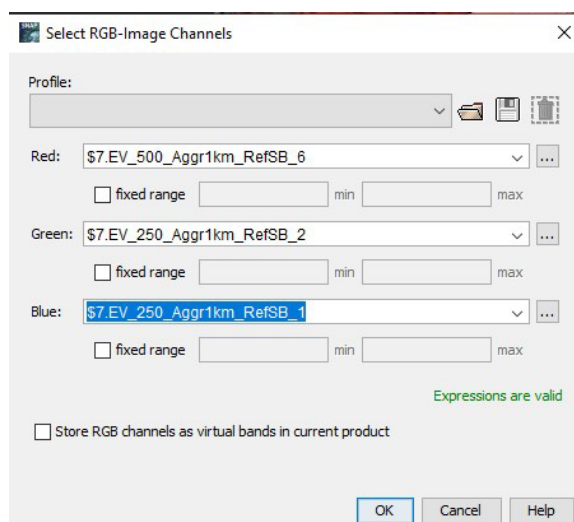


Рисунок 2.18 – Выбор каналов RGB синтеза

В своей выпускной работе я на практике составил архив палитр, которые представляют наибольшую информативность для определения месторасположения снега.

В комбинация были применены такие каналы как:

- 0.6 мкм – Канал для оконтуривания снежного покрова.
- 0.8 мкм - Канал для оконтуривания водосодержащих объектов, т.к. вода сильно поглощает ближние инфракрасные волны.
- 1.6 мкм – Канал отличает лед и снег (светлый тон) от облаков (темный тон).
- 3.9 мкм – Канал для идентификации облачности
- 10.8 мкм – Канал температурный для измерения температуры излучающей поверхности
- 12.0 мкм - Канал температурный для измерения температуры излучающей поверхности

Составленные мною комбинации для приложения SNAP аппаратуры MODIS представлен ниже:

После применения моей первой комбинации, снег на снимке выделен циановым цветом. От облачности его будет определять переход циана в белый – признак того, что перед нами облачность – Рисунок 2.19

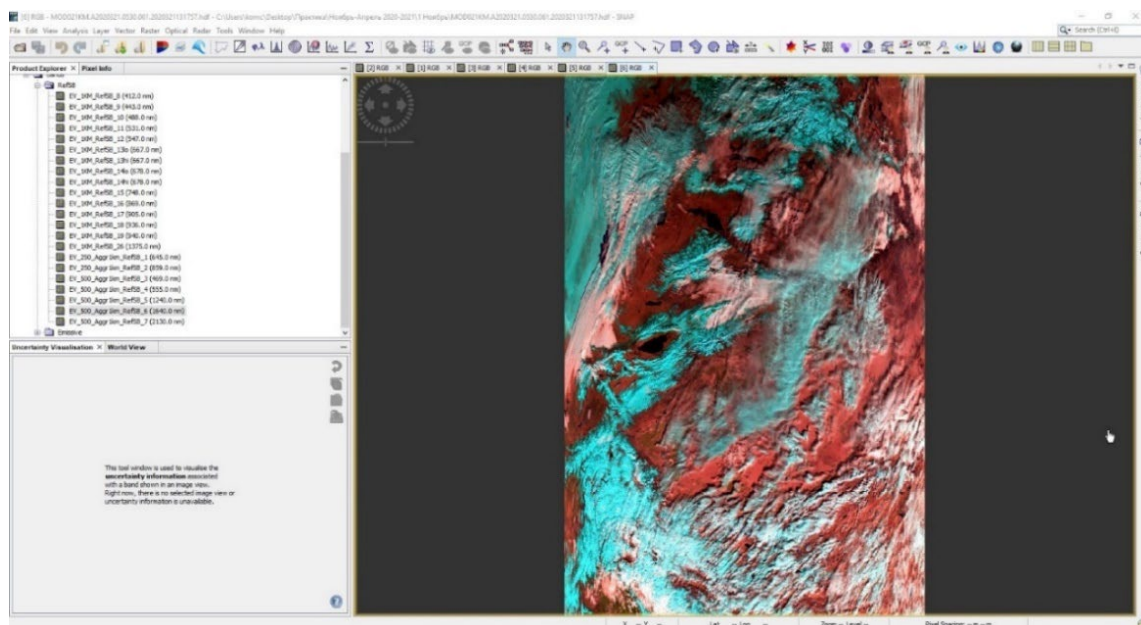


Рисунок 2.19 – Комбинация 1 Каналы: R (1.6нм) G (0.8нм) В (0.6нм)

После применения моей комбинации палитры, снег на снимке выделен ярко оранжево-красным цветом. От облачности его будет определять цвет – оранжево-коричневый будет соответствовать облачности – Рисунок 2.20

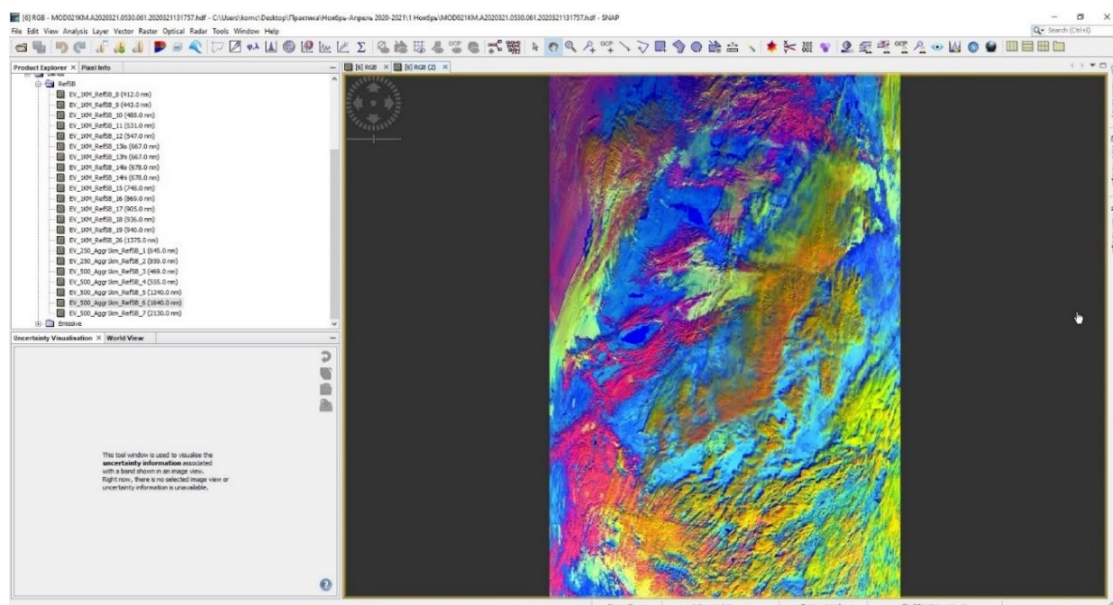


Рисунок 2.20 – Комбинация 2 Каналы: R (0.6нм) G (1.6нм) В (12.0нм)

После применения моей комбинации, снег на снимке выделен оттенками красного и оранжевого. От облачности его будет определять цвет – синий и циан будет соответствовать облачности – Рисунок 2.21

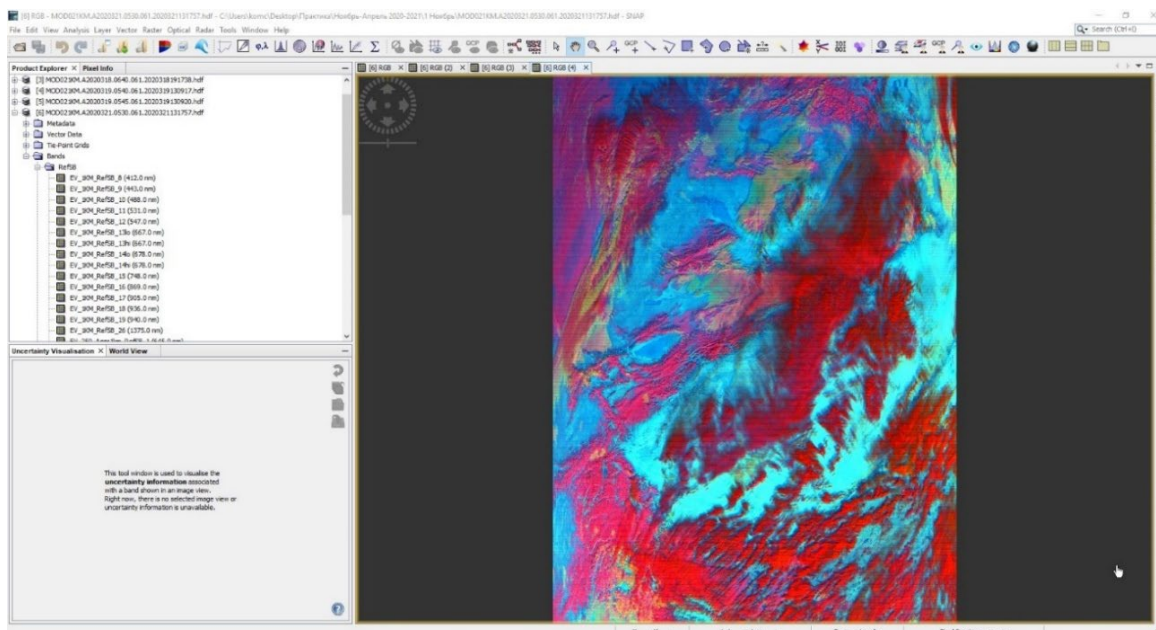


Рисунок 2.21 – Комбинация 3 Каналы: R (0.6nm) G (3.9nm) B (10.8nm)

После применения моей четвертой комбинации, которая имеет сходство со второй, однако она является более наглядной и яркой версией второй палитры. Снег на снимке выделен ярко розовым цветом. От облачности его будет определять цвет – оранжево-коричневый будет соответствовать облачности – Рисунок 2.22

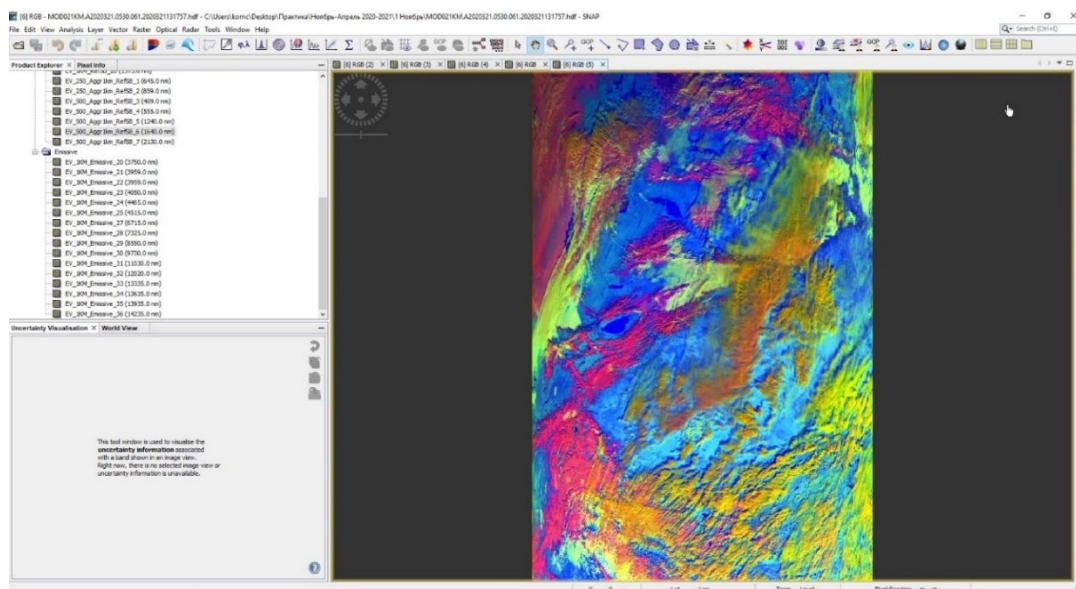


Рисунок 2.22 – Комбинация 4 Каналы: R (0.6nm) G (1.6nm) B (10.8nm)

В ходе работы я выполнил вручную большое количество RGB синтезирования для трех исследуемых мною районов перевалов Камчик, Снежный, Рокский. Для каждого из регионов было получено в среднем 1560 снимков, данное число варьируется в зависимости от перевала. Суммарно архив данных составил 3159 снимков. Для дальнейших работ приоритетно изучение возможности применения в обработке машинного обучения и искусственного интеллекта, а также алгоритм программ для автоматической обработки. Состав моего архива снимков сформировался благодаря тому, что в среднем спутник Terra производил съемку исследуемой в моей работе территорией в среднем 2-4 раза. Также для данной работы я использовал спутниковые снимки не только за даты снегосъемки, но и даты вокруг для отслеживания динамики изменения снежного покрова. В конечном итоге архив данных составил суммарно 5377 обработанных снимков, сопоставимыми с датами физической снегосъемки исследуемых перевалов Камчик, Рокский, Снежный на промежуток 2014-2024. Необходимо также отметить, что даже с применением дополнительных методов уточнения,

присутствующая погрешность в нанесении точек не уходит, что связано также с максимальной разрешением съемки в 250м на пиксель. В ходе своей работы, я использовал комбинацию 1, которая приведена выше, так как она удовлетворяет меня с визуальной точки зрения и целей моей работы.

Ниже представлены несколько примеров с применением первой комбинации из моего архива обработанный спутниковых снимков:

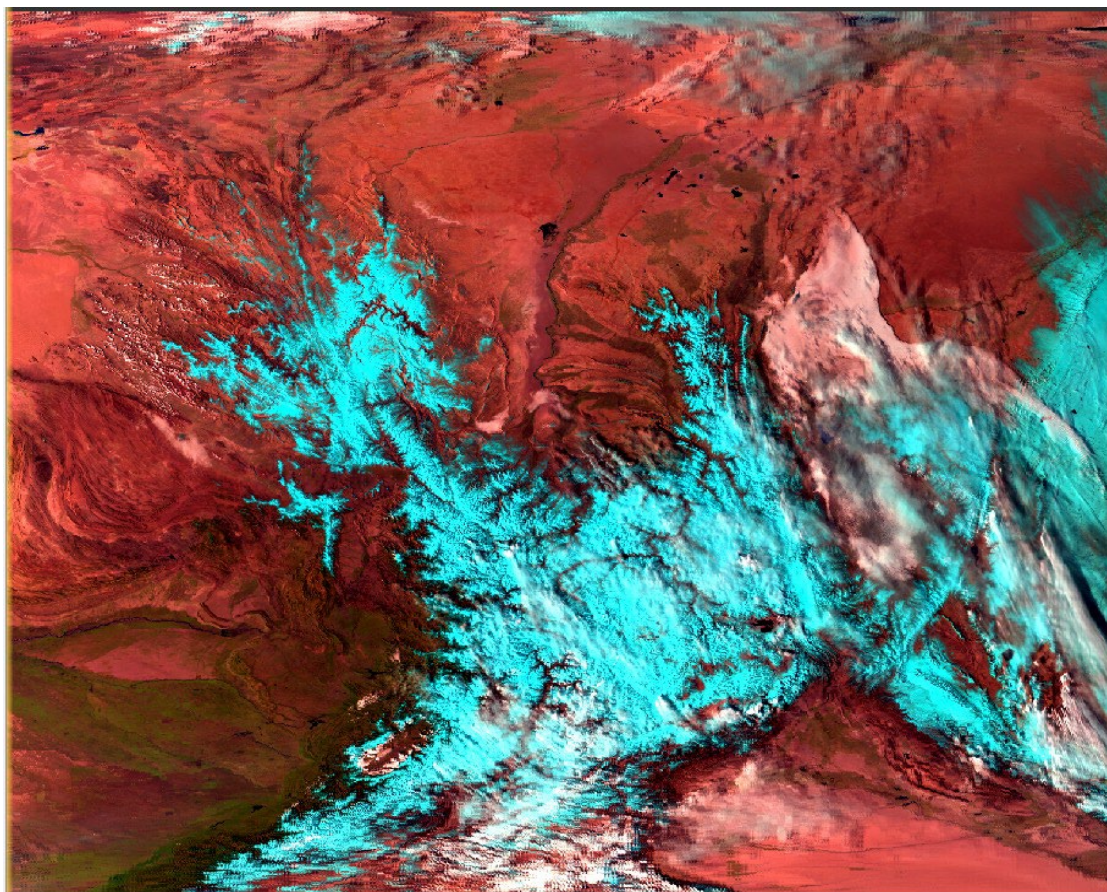


Рисунок 2.12 – Комбинация 1, 13 ноября 2020, перевал Камчик.

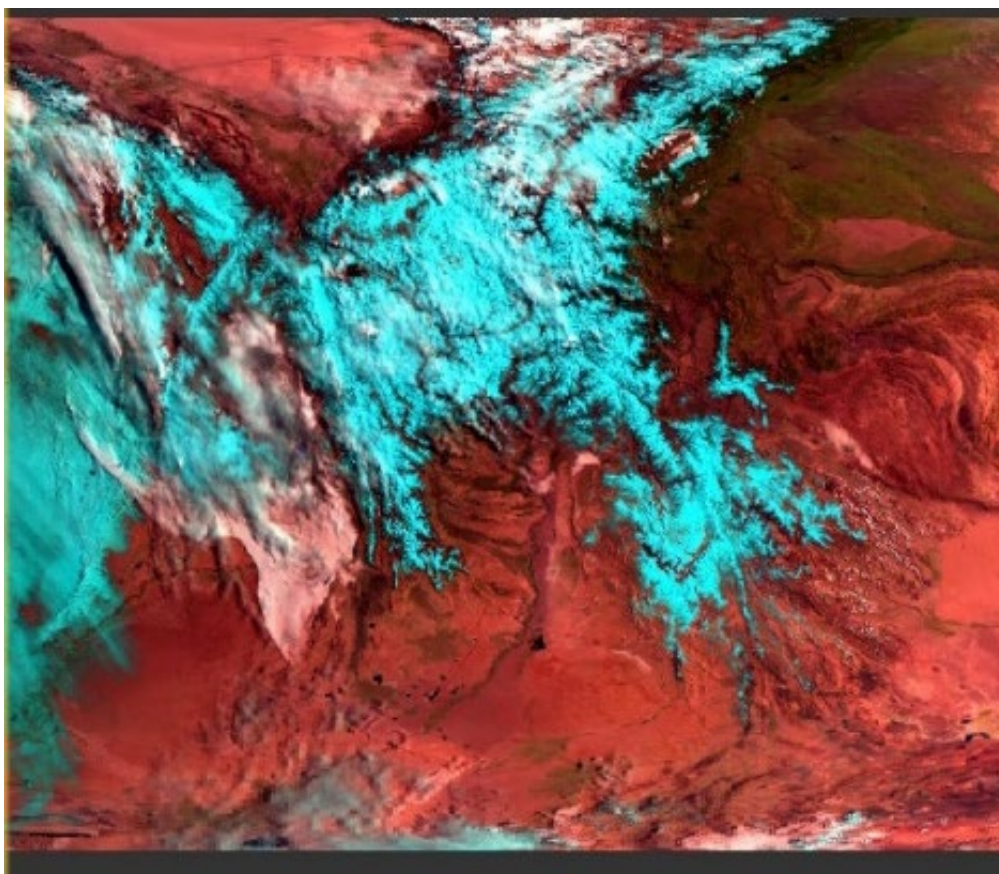


Рисунок 2.13 – Комбинация 1, 13 ноября 2020, перевал Камчик.

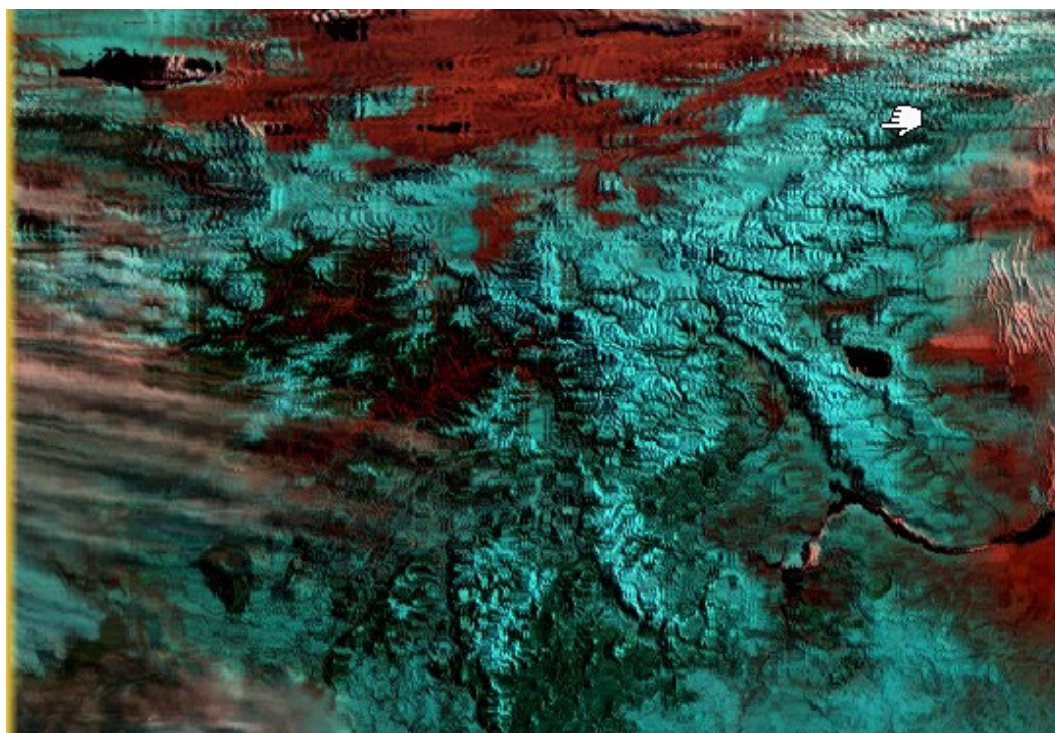


Рисунок 2.14– Комбинация 1, 13 ноября 2024, перевал Снежный.

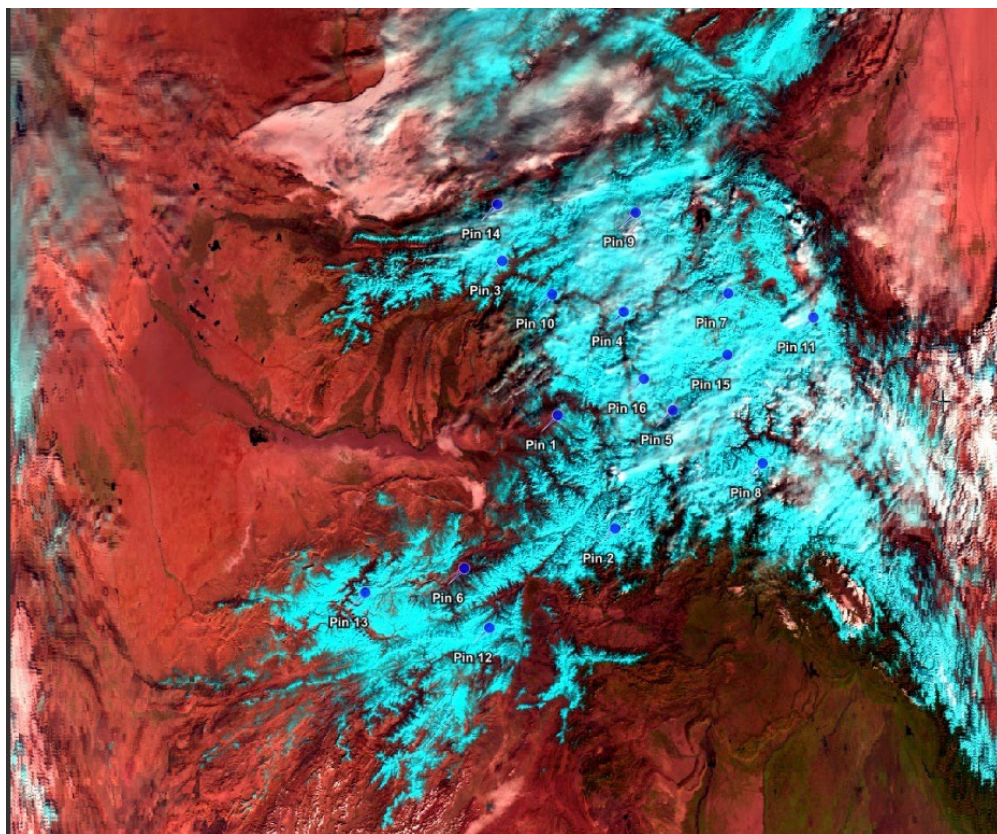


Рисунок 2.15– Комбинация 1, 13 ноября 2020, перевал Камчик. На данном снимке указаны места снегосъемных реек точками с номером.

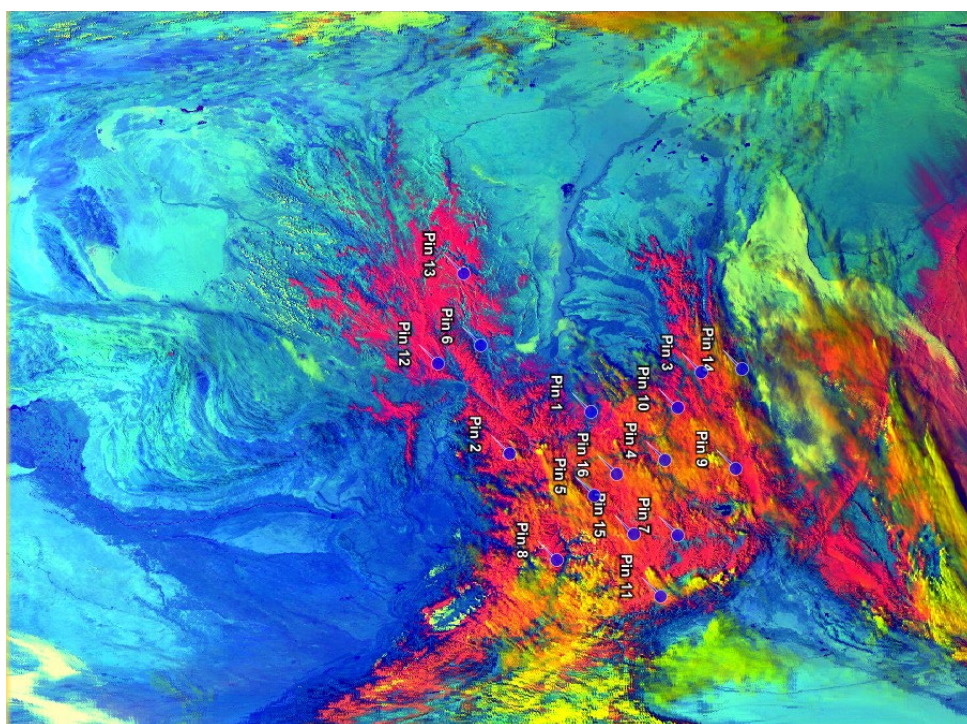


Рисунок 2.16– Комбинация 2, 20 февраля 2021, перевал Камчик.

2.3.2. Метод индекса снега NDSI

Для того, чтобы распознать и отделить друг от друга снеговой покров и облака, используется снежный индекс - Нормализованный Разностной Снежный Индекс (NDSI), который используется для отделения облаков от снега на крупномасштабных мультиспектральных снимках. Пример использования индекса NDSI приведен на рисунке 2.17.

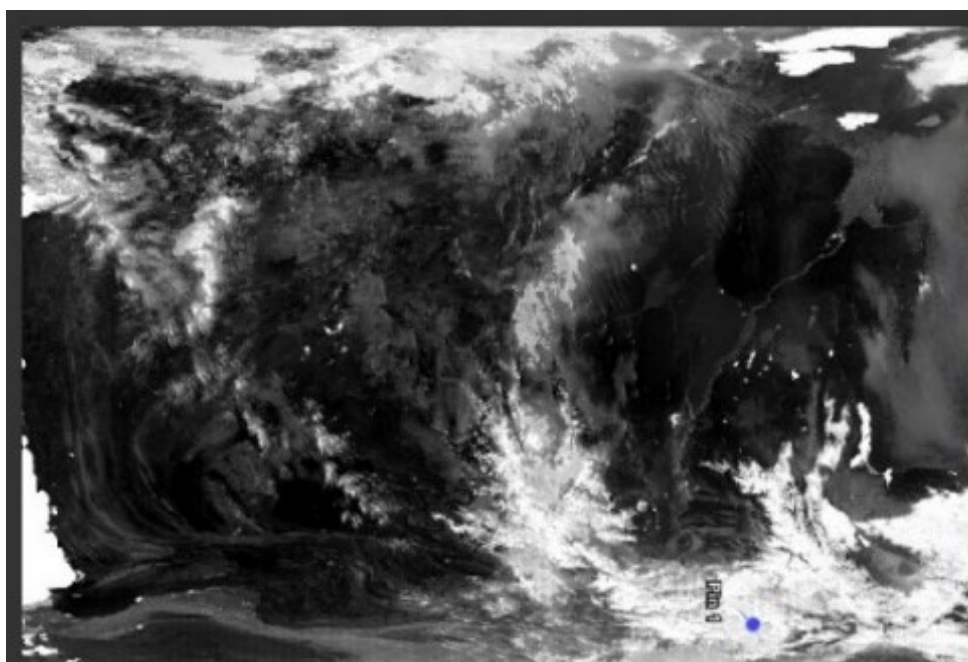


Рисунок 2.17 – Пример NDSI, перевал Рокский.

В связи с тем, что снег и облака имеют такую же закономерность в распределении яркости спектра, максимум отраженного света приходится на синюю зону, а минимальная — на ближнюю ИК (отличается высокоинтегральная яркость). Снежный покров и облака являются самыми яркостными объектами. Яркость снегового покрова стабильна в течение дня при условии отсутствия схода лавин, накопления новых осадков и процессов таяния снега, а облачность изменяется во времени. Это значит, что суммарная яркость облачного покрова за определенный промежуток времени больше, чем

снега. Тающий снег и дождевых облака имеет относительно невысокую яркость по сравнению с ближней частью ИК-спектру.

NDSI — это относительная величина, характеризующаяся различием отражательной способности снега в красном (RED) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах. Для этого использовался синтез каналов 6 (1.6 мкм) и 1 (648 нм). Значение NDSI для уверенного нахождения снежного покрова должно быть больше 0.4 у.е. яркости.

Данный метод дешифрирования я использовал в своей работе для повторной проверки распределения снежного покрова по исследуемым территориям перевалов Камчик, Рокский, Снежный, это позволяло гарантированно определить границы снежного покрова и избежать неточностей определения в дальнейшей работе. В приложении SNAP я воспользовался функцией расширенного индексного калькулятора каналов съемки. Необходимо было подставить нужный индекс, в моем случае NDSI, как показано на рисунке 2.18 и 2.19.

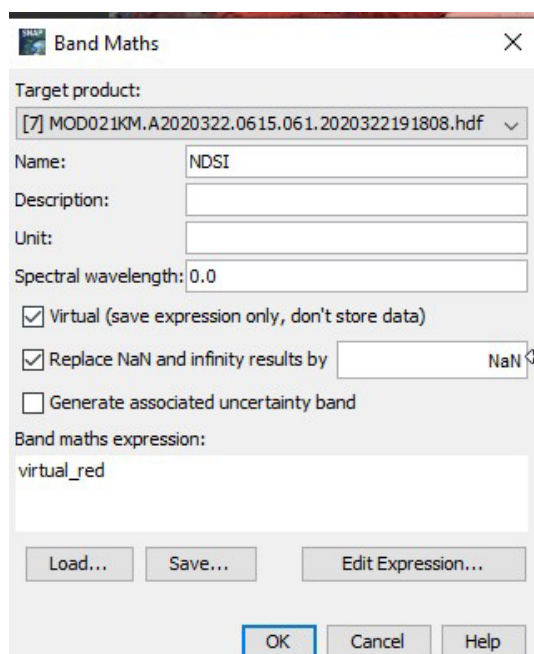


Рисунок 2.18 – Выбор индекса

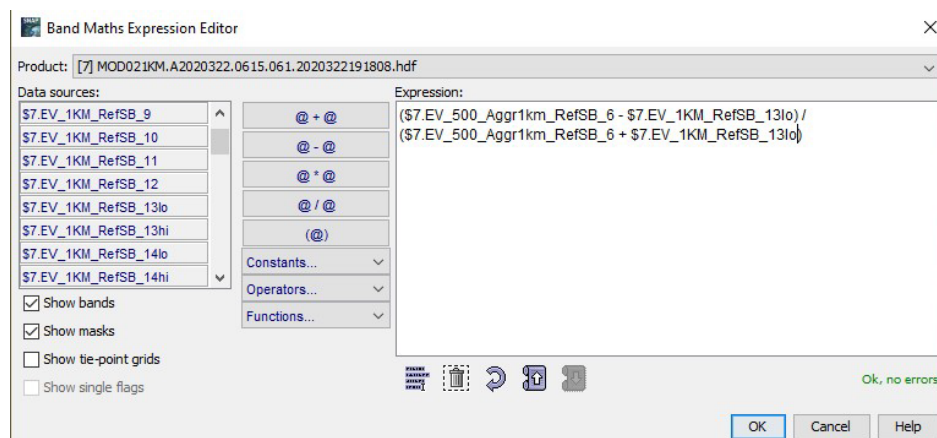


Рисунок 2.19 – Калькулятор каналов

Индекс NDSI и обработанные спутниковые снимки я использовал для улучшения качества определения снежного покрова и его границ. Особенно важным являлось то, что используя такие спутниковые снимки повышало точность нахождения и определения снежного покрова.

Ниже представлены несколько примеров из моего архива обработанный спутниковых снимков – Рисунок 2.20, 2.21, 2.22.

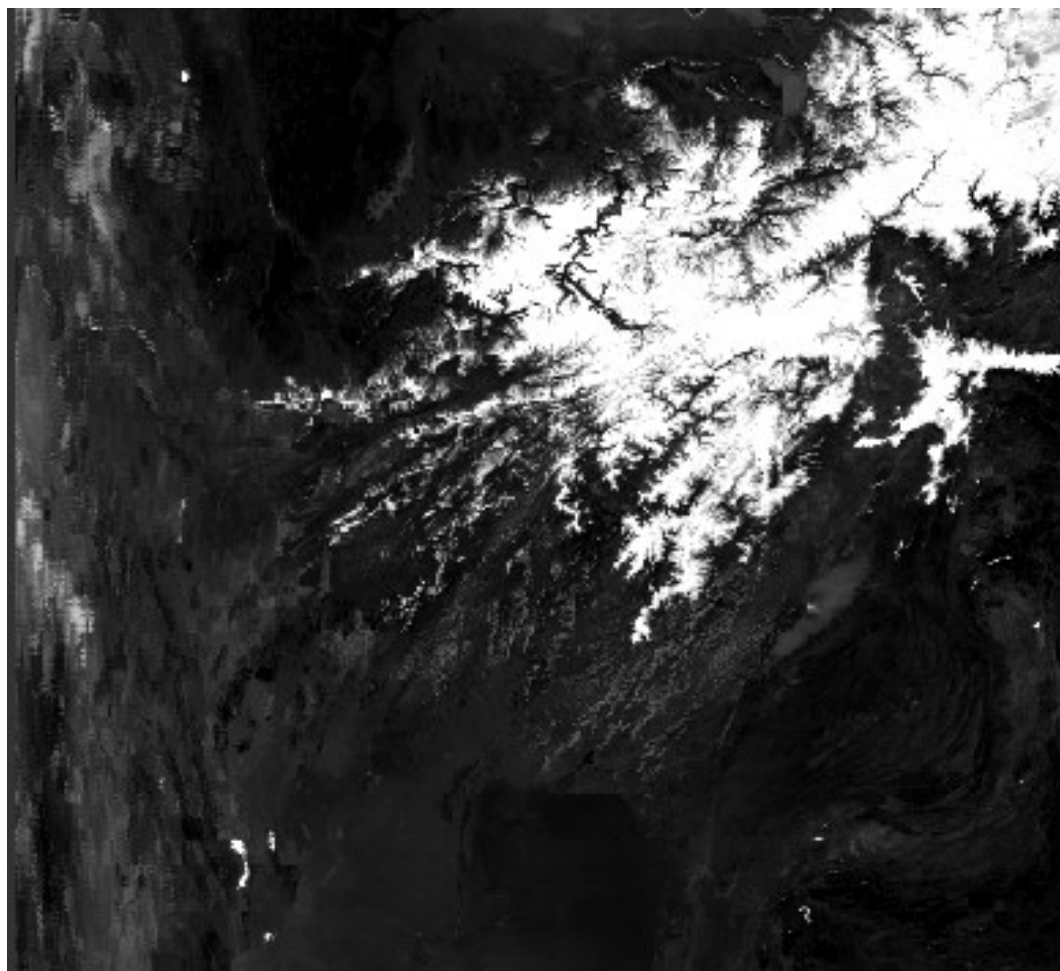


Рисунок 2.20 – NDSI, перевал Камчик, 10 ноября 2019

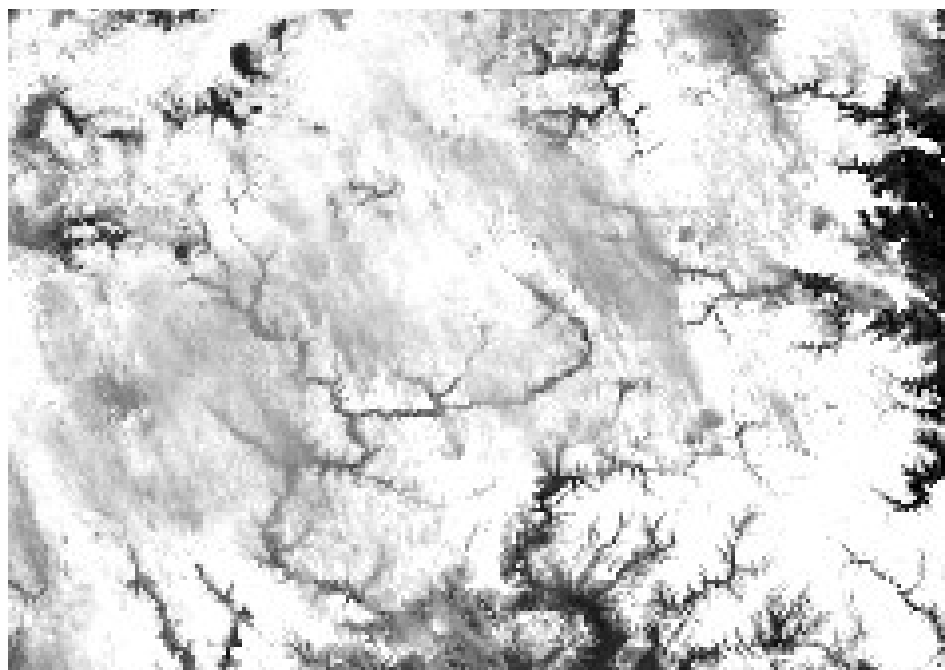


Рисунок 2.21 – NDSI, перевал Рокский, 16 декабря 2017

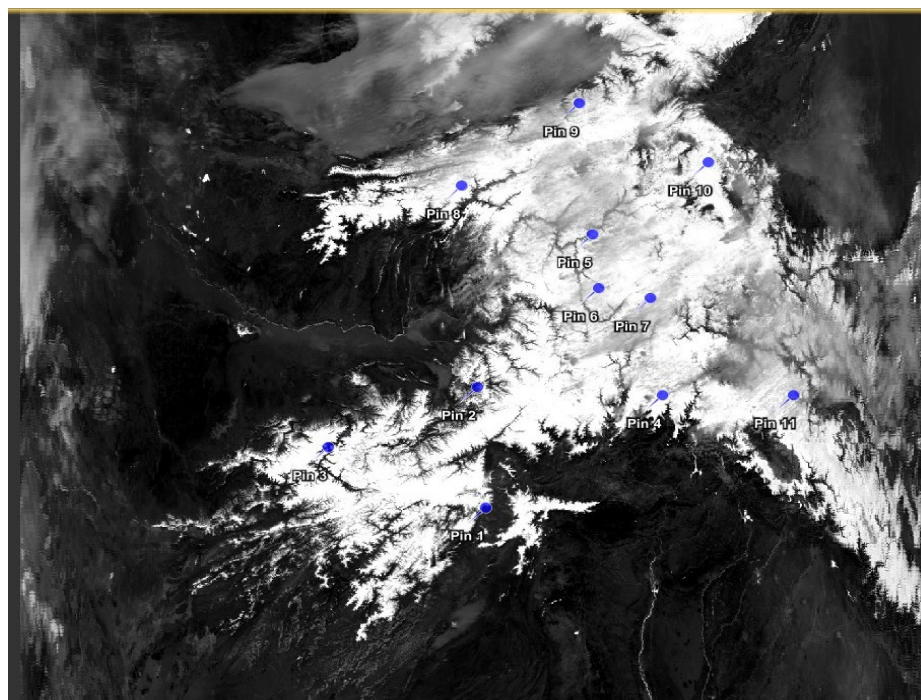


Рисунок 2.22 – NDSI, перевал Камчик, 10 ноября 2019. Снегоъемные рейки отмечены на снимке точкой с номером.

После проведенной проверки снимков практически все значения яркостей пикселя составили не менее 0.60, (более 95% обработанных спутниковых снимков), что удовлетворяет условие для индекса снега, $NDSI > 0.4$ и можно говорить о том, что данный пиксель на месте расположения рейки действительно является снегом для выбранных мною перевалов Камчик, Снежный и Рокский.

Также есть основания говорить о том, что значения спектральной яркости связаны и с состоянием снежного покрова. Этот особо важный параметр очень важен для горной местности в связи с возникновением опасности схода лавин, что особенно важно для моей исследовательской работы. Можно достоверно утверждать, что с помощью данного индекса можно разделять типы лавин, такие как «мокрые» или «сухие». Также данный индекс может быть применен в оценке последствий схода лавин по изменению спектральной яркости в точке до и после схода лавины, что является достаточно важным аспектом определения лавинной деятельности.

Глава 3. Моделирование толщины снежного покрова по мультиспектральным данным

3.1. Существующие модели и их задачи

В настоящее время доступно множество вариантов моделирования снега, включая сложные системы описания нижних слоев снежного покрова, где детально представлена структура снега. Из-за высокой значимости снежного покрова в климатической системе, глобально используются многокомпонентные модели снега в рамках климатического моделирования.

В рамках международного проекта PILPS, начатого в 1992 году, изучалась деятельность 30 различных моделей, включая российские разработки SPONSOR и SWAP, направленных на оценку параметров ландшафта и взаимодействия с поверхностью земли. На данный момент времени в составе - Global Land Atmosphere System Study (GLASS), проверка прошла по четырем моделям PILPS, включая снежные условия. Модели включают анализ показателей снежного покрытия, включая водные эквиваленты осадков и дополнительные параметры, полученные от соответствующих симуляций. Исследование привело к созданию диаграмм классификации и распределения снежного покрова, где выделены четыре категории в зависимости от температуры снега и уровня поглощения радиации. Международная группа экспертов запустила новое исследование, где анализировали 26 различных алгоритмов предсказания состояния снега, оценивая их способность точно предсказывать погодные условия.

В рамках проекта ES1404 изучались способы оценки параметров снежного слоя. Охватывало анализ характеристик снежного слоя, способов его оценки и использования для разработки модели покрова. Кроме того, совершенствование подходов анализа информации о снеге и его состоянии в рамках моделирования прогнозирования и гидрологических процессов, равно как и оценка точности измерительных полей является приоритетной задачей.

Модернизация второго проекта SNAPS («Снежные покровы, ледники и лавинные приложения») улучшила прогнозирование опасных условий снега и лавин. В ходе реализации программы созданы атласы параметров снеговых покровов, анализ космических снимков, данные измерений, выводы симуляций атмосферных процессов, предостережения о лавинной угрозе и оценки вероятности обрушения снега. Методы описания снежного покрова, используемые в моделировании климата и гидрологии, активно применяются для уточнения прогнозов погодных условий на основе метеорологических данных. Моделирование процессов накопления снежного покрова помогает решать вопросы не только гидрологии, но и климата. На горных районах существует специальная проблема описания динамики снежного покрова, решаемая через разработку моделей снежного покрова. Информация о погодных условиях доступна через данные наземных и спутниковых наблюдений, создание массивов информации возможно через повторную обработку данных либо их слияние с результатами мониторинга как наземных, так и удаленных источников. Также применяются гидромодели, анализирующие явления в снежной оболочке. Например, программа для моделирования водотоков HEC-Ras, производящее моделирование перехода состояния элементов снежного слоя. При анализе снежного покрова важно принимать во внимание размеры взаимодействующих частиц, их плотность, микроскопическую структуру и общую мощность слоя. Первоначально данная система создавалась швейцарскими структурами для предсказания сходов снежных лавин.

В последние годы модель "SNOWPACK" применяется для анализа воздействия снега на арктическую среду, расчета энергетического баланса снежных слоев, а также отслеживания перемещения растворенных химикатов внутри них. Российские исследователи продемонстрировали значительные достижения в области предсказания опасных снежных сходов. Создание модели снежного слоя представляет собой сложную задачу из-за

изменчивости его характеристик под воздействием погодных факторов. Точность предсказания погодных условий напрямую связана с учетом начальных параметров снежного покрова, включая его плотность, высоту и водную массу, влияющие на точность анализа приземной атмосферы. В процессе компьютерного моделирования снежного слоя применяются алгоритмы, отражающие взаимодействие слоев. Сложность описания снежного слоя варьируется в зависимости от поставленных задач конкретной модели. Модели HIRLAM, ALADIN и COSMO, применяют ряд параметров, аналогичную используемой для предсказания погодных условий и захватывающие данные о снежном покрове. Стоит также упомянуть, что ряд снежных моделей был создан первоначально для специализированных задач прогнозов погоды, после чего стали применяться в численном моделировании. Кроме того, эти же модели находят применение в расчетах климата. Например, моделирование локальных тепловых балансов в области метеорологии.

Главным параметром снежного покрова является его объем. Снежный покров изменяется от разных факторов: таких как давление нижележащих слоёв снега на вышележащие слои, метаморфизм, фазовые переходы и перемещение талого снега по склону, а также изменение рельефа и влияние ветра. Уровень и плотность определяют запас воды на поверхности снега, который мог бы образоваться в случае полного таяния снежного покрова. Он равен квадратному соотношению высоты и плотности, которое измеряется в миллиметрах. Важную роль в распределении запасов снеговой воды играют неровности поверхности, возвышенности и холмы. Влияние возвышенностей, циркулирующих потоков воды и климатических условий особенно ярко проявляется во время малоснежных зимних месяцев. Свежий снег под воздействием собственного веса сжимается. По мере формирования новых слоев снегового покрова, нагрузка на него увеличивается, что приводит к дополнительному уплотнению. Эксперименты по изучению силы тяжести в снежном покрове проводились в 1950-1960-х гг. учеными из Японии.

Включаются две модели: CROCOCUS, SNTERM и CROCASE. Также приведем описание того, как происходит уплотнение снега в различных моделях снежных масс. CRO и ST имеют значение для моделей CROcUS, SNTERM – для моделей СНТХЕРМ. Индекс CRO, ST и индекс CRO относятся к модели CROCOCUS или SNTERM. В зависимости от характера снежных покровов и их эволюции, в снежном покрове могут образовываться различные по структуре слои: ледяная корка, слой уплотненного снегом снега, глубинная изморозь и слои со сложной структурой. Одна из наиболее важных особенностей снежной массы заключается в том, что в ней есть ледяные прослойки, которые влияют на интенсивность воздуха и влагообъема внутри снега. После начала активного снежного покрова ледяные образования формируются путем поверхностного замерзания, последующего затвердевания и прикрытия прослойками свежеснегавшим снегом. Когда капли дождя падают на поверхность снега, они замерзают и превращаются в лед. На склонах горы эти процессы осложняются тем, что снег имеет разную плотность и плотность, а также напряжение сдвига и смещения. Все это приводит к тому, что в снежном покрове могут образовываться слои с различным строением и структурой. Кроме того, в снежном покрове есть ледяные прослойки, которые влияют на воздухопроницаемость и проходимость снежных целин. Поверхностное таяние происходит в результате воздействия радиации и образования прослоек льда, которые впоследствии перекрываются слоями выпавшего снега. На снежных склонах происходит процесс замерзания воды, которая в свою очередь превращается в лед. [12]

3.2. Моделирование толщины снега методом регрессии

После шага выполнения обработки двумя методами дешифрирования RGB синтезирования и метод индекса NDSI, можно приступать к моделированию толщины снежного покрова.

Предполагается, что толщину можно измерить с использованием полученных значений яркости в нескольких каналах методом регрессии и регрессионного анализа.

Для этого были построены точки на обработанных снимках, в соответствии с данными снегосъемок, которые обозначают рейки (рисунок 3.1).

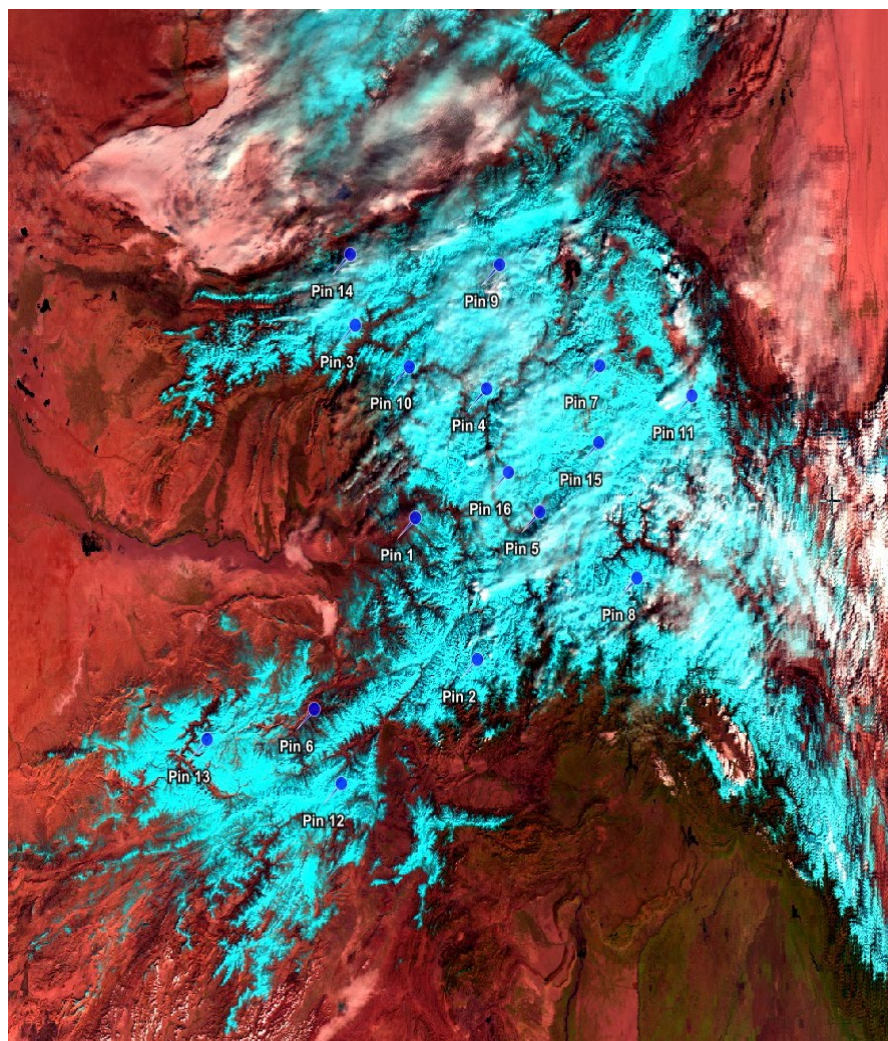


Рисунок 3.1 – Пример обработанного снимка с отмеченными рейками.

Моделирования высоты снега по спектральным данным для исследуемых регионов перевалов Камчик, Снежный и Рокский будет производиться в программе Microsoft Excel инструментом «Регрессионный анализ».

Для достижения цели своей работы я составил таблицы в программном пакете Microsoft Excel с осредненными значениями снегосъемных реек для каждого перевала, в частности, и привел для каждой рейки значения яркости пикселя в данном месте. Пример приведен ниже на рисунке 3.2.

Необходимо уточнить, что существует погрешность, вводимая пространственным разрешением апертуры и качеством изображения. В будущем, с прогрессом развития метеорологических спутников возможно будет проводить точные наблюдения, однако в моей работе ошибка по пространству составляет 200м, обосновываясь разрешением оборудования. Однако ей можно пренебречь в контексте моей работы, и условия того, что съегосъемка проводится на маршрутах, а не только в строго установленных точках. Множественная линейная регрессия часто используемый метод статистики, который хорошо себя показывает для обоснования наличия связей между параметрами с подтверждением результатов при помощи статистического пакета. В своей работе я хочу просчитать, влияние спектральной яркости в разных каналах на вычисление толщины снежного покрова. Для исследования зависимостей параметров, которые могут быть применены для определения высоты снежного покрова был применен регрессионный анализ. Статистические данные, которые приведены ниже однозначно доказывают обоснованность применения данных параметров и их связь с исследуемой возможностью определения высоты снежного покрова с помощью многоспектральных спутниковых снимков. В качестве примера ниже приведено оценочное регрессионное уравнение и некоторые статистические параметры.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,903681712
R-квадрат	0,890951603
Нормированный R-квадрат	0,887723575
Стандартная ошибка	2,350075485
Наблюдения	1321

Рисунок 3.2 – Регрессия для всего промежутка с данными снегосъемок

Был проведен регрессионный анализ по значениям для каждого дня ряда лет наблюдений 2014-2024 для перевалов Камчик, Рокский и Снежный.

Было составлено оценочное уравнение толщины снега:

$$L = -112 + (212 * X1) + (66 * X2) - (59 * X3) - (34 * X4) + (13 * X5) + (0,028 * X6)$$

где:

L – толщина снега, см.

X1, X2, X3, – яркости пикселя в используемых каналах

X4 – высота в точке (пиксель)

X5 – наклонение склона

X6 – состояние снега

Интерпретация статистических значений:

Множество R (0,90368) - множественная корреляция между переменной и переменными-предикторами.

R-квадрат: (0,890951) - коэффициент детерминации, для дисперсии переменной отклика, которая может быть объяснена объясняющими переменными. В моем анализе 97% вариаций высот снега можно объяснить значением яркости пикселя в разных каналах.

Скорректированный квадрат R: (0,887723) - представляет собой значение R-квадрата, скорректированное с учетом количества переменных-предикторов в модели.

Стандартная ошибка (2,33) - среднее расстояние, на которое наблюдаемые значения отходят от линии регрессии.

Наблюдения - размер выборки набора данных регрессионной модели, которые составили 1321 случая для перевала Камчик, 989 для перевала Рокский, и 1013 случаев для перевала Снежный.

Значение F Это p-значение, связанное с общей статистикой F. Он говорит нам, является ли регрессионная модель в целом статистически значимой.

В этом случае p-значение меньше 0,05, что указывает на то, что независимые переменные количество вместе имеют статистически значимую связь с высотой снежного покрова. В моем случае это $7,51 \times 10^{-21}$

Коэффициенты: для каждой независимой переменной говорят нам о среднем ожидаемом изменении переменной отклика при условии, что другая независимая переменная остается постоянной.

Мы интерпретируем коэффициент для перехвата как означающий, что ожидаемая высота снега, при отсутствии излучения в каналах составляет -112, что можно квалифицировать как отсутствие снега.

По показателю R^2 можно достоверно судить о существующей связи яркости и глубины снега.

Анализируя таблицу остатков, абсолютная погрешность будет составлять ± 2 см от реально замеренной толщины снега. Часто встречалась ситуация точного расчета глубины.

Максимальная погрешность составила 4-6 см от реальных замеров, так как такой результат встречается в весенние месяцы, то скорее всего данный результат связан с процессом снеготаяния. Погрешность в определении высоты снежного покрова также можно объяснить необходимостью использования в дальнейших работах космоснимков с высоким разрешением изображений, более точной географической привязкой, учета экспозиции склона, метеорологических величин (ветер, температура воздуха) и текущего состояния снежного покрова с применением учета микрофизики.

Пример вывода остатков, перевалы Камчик, Рокский, Снежный. Среднее отклонение от значения высоты снега, определенного по рейкам снегосъемного маршрута.

- Ноябрь 2015 Камчик - Среднее отклонение 1 см. (макс. 3,2 см)
- Ноябрь 2015 Рокский - Среднее отклонение 2 см. (макс. 3 см)
- Ноябрь 2015 Снежный - Среднее отклонение 1,9 см. (макс. 3 см)
-
- Декабрь 2021 Камчик - Среднее отклонение 1 см. (макс. 2 см)
- Декабрь 2021 Рокский - Среднее отклонение 1 см. (макс. 2 см)
- Декабрь 2021 Снежный - Среднее отклонение 2,2 см. (макс. 2,6 см)
-
- Февраль 2024 Камчик - Среднее отклонение 2,7 см. (макс. 3 см)
- Февраль 2024 Рокский - Среднее отклонение 2,2 см. (макс. 3,3 см)
- Февраль 2024 Снежный - Среднее отклонение 2,4 см (макс. 3 см)
-
- Март 2019 Камчик – Среднее отклонение 4 см (макс. 5 см)
- Март 2019 Рокский – Среднее отклонение 5,2 см (макс. 6 см)
- Март 2019 Снежный – Среднее отклонение 4,1 см (макс. 5,5 см)

Интересной особенностью стало ухудшение показаний модели при внесении большего числа предикторов. Однако стоит упомянуть, что добавляемые предикторы не имели такой высокой точности определения, как в первом (основном) регрессионном уравнении. Скорее всего, так как некачественно определенные значения предикторов уже имели свои ошибки определения, то суммарно это дало еще большую ошибку в итерациях вычисления связей регрессионным методом. Отклонения от реальных значений высот снежного покрова составляли для данного усложнения порядка 7 см от абсолютного значения.

Полученное регрессионное уравнение было проверено на трех горных регионах перевалов Камчик, Рокский и Снежный, что подтверждает работу метода и отвергает его ненадежность в виду отсутствия разных данных и условий. Таким образом данные результаты подтверждают возможность

применения данного метода определения высоты снежного покрова с помощью мультиспектральных спутниковых снимков.

3.3 Сравнение модельных данных

В ходе работы было также принято решение сравнить полученные данные о высоте снежного покрова методом регрессии и данные модели GFS реанализа (NCAR). Для сравнения данных, далее в работе приведен пример сравнения данных о высоте снежного покрова с данными модели GFS с шагом сетки 13 км.

Полученные результаты с применением спутниковых снимков сравнивались с данными фактических снегосъемных наблюдений и с данными модели GFS. Результаты сравнения по абсолютным величинам

Карта высот залегания снега по данным модели для перевала Камчик представлена на рисунке 3.3, сравнительная таблица приведена в таблице 3.1.

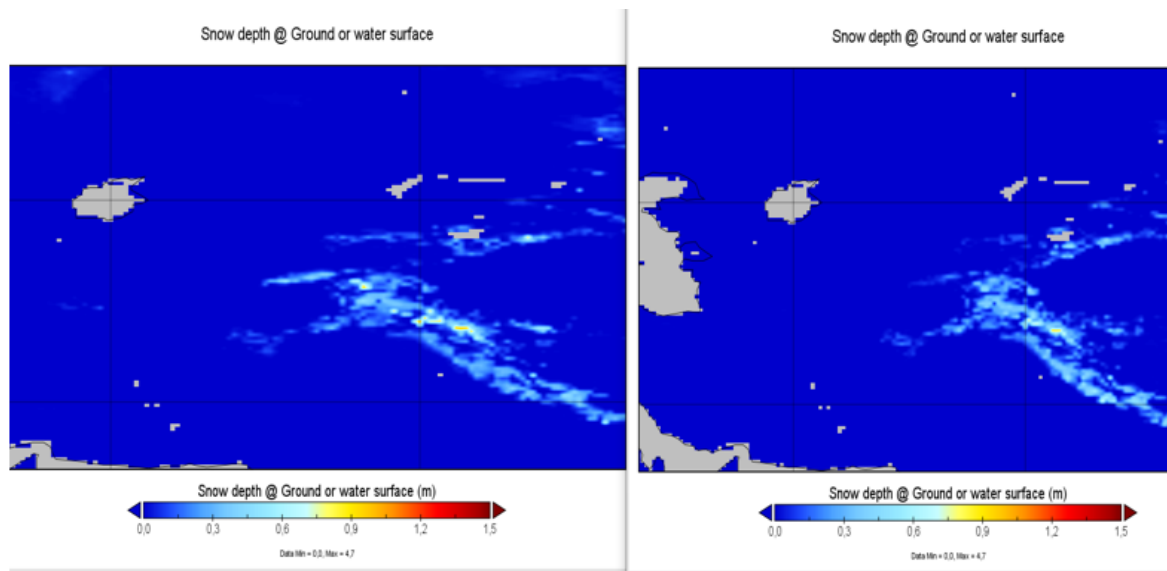


Рисунок 3.3 - Построение карт высот залегания снега по модельным данным реанализа, GFS (NCAR).

Дата	Факт (снегосъемка)	Спутниковый снимок	Модель (GFS) 15:00
17 Ноябрь	20 см	21,11 см	15 см
7 Декабрь	22 см	22,43 см	20 см
13 Январь	30,5 см	28,87 см	35 см
18 Февраль	25 см	27,92 см	20 см
23 Март	16,5 см	11,72 см	10 см

Таблица № 3.1. Сравнительная таблица высот снежного покрова, полученных разными методами.

3.4 Архив анализа снежного покрова перевалов Камчик, Рокский, Снежный

Анализируя снежный покров в ходе моей исследовательской работы в ходе работы над мультиспектральными спутниковыми снимками и фактическими данными было создано краткое описание для снежного покрова на исследуемых областях в виде краткой текстовой и табличной сводки, которая также отражала параметры снега и лавин, которые удалось определить в ходе работы. Для сходов лавин было определено изменение индекса снега NDSI на несколько единиц, что являлось неоспоримым показателем изменения в снежном покрове.

Пример описания из моей работы приведен ниже, в виде краткого описания:

Лавинная активность, перевал Камчик

Особенность зимы 2015-2016г

Небольшие снегопады (выявлены по метеотаблицам снеголавинной службы) в лавинообразующие месяцы - январь, февраль, март способствовало средней лавинной активности. Сход лавин наблюдался в декабре в пик выпадения снега в виде осадков, рост толщины снежного покрова способствовал началу активной лавинной деятельности. В ноябре, январе, марте и апреле сход лавин не наблюдался. Общее количество лавин за зимний период 2015 – 2016гг. составило – 4 шт, подтвержденных

спутниковыми снимками и изменением NDSI индекса. Причина схода – снегопады с ветровым переносом преимущественно северо-западных направлений (согласно метеотаблицам), со скоростями от 3 до 16м/с. Генезис лавин - свежевывавшего, метелевого снега – сухие.

Пример метеотаблиц с данными о датах и ущербе лавин приведен ниже на рисунке 3.4.

№ п/п	Период лавинной опасности	Осадки (мм)	Температура воздуха, С			Скорость ветра /м/с ср./ макс.	Высота снега на МП (см)	Продолж. метел. явления (час)	Число лавин	Место схода лавин, №л-сб	Ущерб, причиненный, лавинами
			Ср. сут.	Мин.	Макс.						
1	17/ХП	25,6	-0,2	-1,3	+2,5	2/10	51	-	-	-	-
	18/ХП-05г. С00 до 8 ³⁰	15,6	-5,1	-10,6	-0,8	5/14	67	7,7	-	-	-
2	25/1-05г.	16,1	-4,0	-6,5	-2,0	4/13	81	9,1	-	-	-
	26/1 с 18ч. до 02ч 19/1	16,2	-4,6	-7,5	-1,3	4/19	94	9,4	9		
	31/1-05г.	8,9	-11,2	-15,4	-7,6	0	91	-	-	-	-
3	1/-П5г. с 12ч	61,4	-4,7-	-8,4	-2,5	2/12	128	1,7	73	массовый	6 чел.погибло на объектах. Разрушен жил.пос.«Отрар» и оборудование УзГидропес. Повалена опора ЛЭП 6кВ снесен в овраг вагончик ГАИ. Оборваны провода ЛЭП- 220кВ Ангрен-Наманган и др. повреждения. Снесено склонов масса снегоуд.штитов и тормоз, сооружений. 3/П-05г. разрушено лавиной здание ООООВ в/ч 07648.
	2/П	56,4	-3,0	-4,5	-1,2	3/14	>180	2,2		сход	
	э/п	59,0	-4,4	-6,5	-3,1	4/13	220	18.0		лавины	
	4/П	6,0	-8.0	-10,4	-6.0	4/10	225	6.8	?	?	
	5/П до 10ч	0,7	-7,5	-12,7	-2.0	2.11	220	10,2			

Рисунок 3.4 – Метеотаблица, перевал Камчик 2013

Глава 4. 3D моделирование слоя снежного покрова

4.1 Выбор редактора для модели слоя

Для представления данных в удобном и информативном формате мною было выбрано трехмерное моделирование исследуемых регионов с наложением полученных значений высоты снежного покрова в виде цифрового слоя с привязкой по точкам.

Для реализации данной задачи мною были изучены различные варианты:

1. Применение ГИС Idrisi Kilimanjaro
2. Применение ГИС ArcGIS
3. Применение OpenLayers
4. Применение Organic Maps
5. Применение OSM

В ходе работы были опробованы все варианты и выявлены недостатки, для ГИС (пункт 1,2) отмечено неудобство в работе со своим слоем, так как в ГИС предусмотрены собственные функции и закрытый код. Для пункта 3, OpenLayers, которая является достаточно высокопроизводительной библиотекой для задач картографии, можно отметить усложненное управление и требовательность к пользователю и его навыкам работы с конкретным приложением. Пункт 4, Organic maps, хоть и берет за основу OSM, но модифицирован таким образом, что в нем неудобное использование функции шаблон слоя — это пакет слоя только со схемой, которая отображала только символы и первичные данные. Итоговым решением стало использовать OSM, как самую гибкую и модифицируемую основу.

Построение было выполнено при помощи открытой платформы Open Street Maps (OSM), которую на данный момент многие коммерческие компании в своих ГИС технологиях используют как удобную и модифицируемую основу. В 2006 году для развития проекта был учрежден фонд OpenStreetMap Foundation, а распространение геоданных базы стало осуществляться по лицензии ODbL, лицензия открытой базы данных — использовать можно, но необходимо ссылаться на источник при использовании). OSM в частности позволяет применять кризисмапинг — когда нужно постоянно обновлять данные для понимания масштаба бедствия, помощи пострадавшим и службам спасения. Во время нескольких стихийных бедствий проект взаимодействовал с ведомствами разных стран и получал от них спутниковые снимки высокого разрешения, благодаря этому карты обновлялись максимально оперативно.

Карты компаний, например Google и «Яндекс», мы получаем в готовом виде и вносить изменения в них нельзя. В отличие от них, доступ к внутреннему коду OSM полностью открыт. База данных OpenStreetMap позволяет сформировать карту под конкретную задачу и включить в нее только те объекты, которые необходимы для конкретной работы. Пользоваться всей базой сразу нерационально — если необходим конкретный регион его можно выбрать с помощью удобного редактора.

Это позволило мне полностью преобразовать и настроить карту под свои интересы, было выполнено нанесение слоев, редактирование рельефа, нанесение спутниковых снимков.

4.2 Настройка и работа с базой данных OSM

Рабочий стол OSM приведен на рисунке 4.1. Данные в OpenStreetMap представляют собой сводную таблицу двумерных объектов с указанием широты и долготы или их совокупностью. Плюс к этому есть специфическое описание каждого объекта с помощью тегов и атрибутов. Первым шагом был выбор местностей на карте OSM для загрузки файлов-подложки для исследуемых регионов.

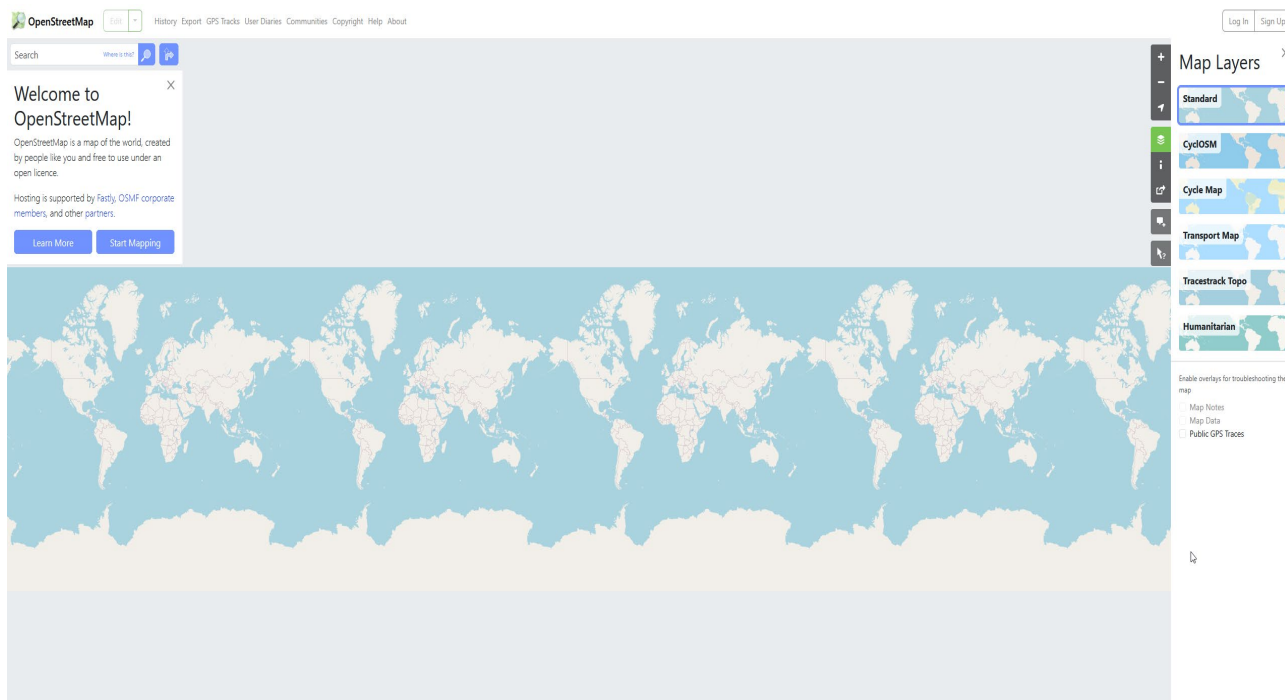


Рисунок 4.1 – OSM Рабочий стол

Данные базы представляют собой слои с векторными и растровыми изображениями. Векторные изображения удобнее и функциональнее: они при увеличении не теряют своего качества, в отличие от растровых.

OSM включает четыре объекта по классам:

- точка — координаты на карте с высокой точностью
- линия — совокупность соединенных точек для отображения протяженного объекта
- полигональная фигура — совокупность точек и линий с замкнутым контуром. Применяется для объектов с некой площадью.
- составной объект — включает точки, линии и полигональные фигуры.

Пример выбора исходного региона в программе приведен на Рисунке 4.2.

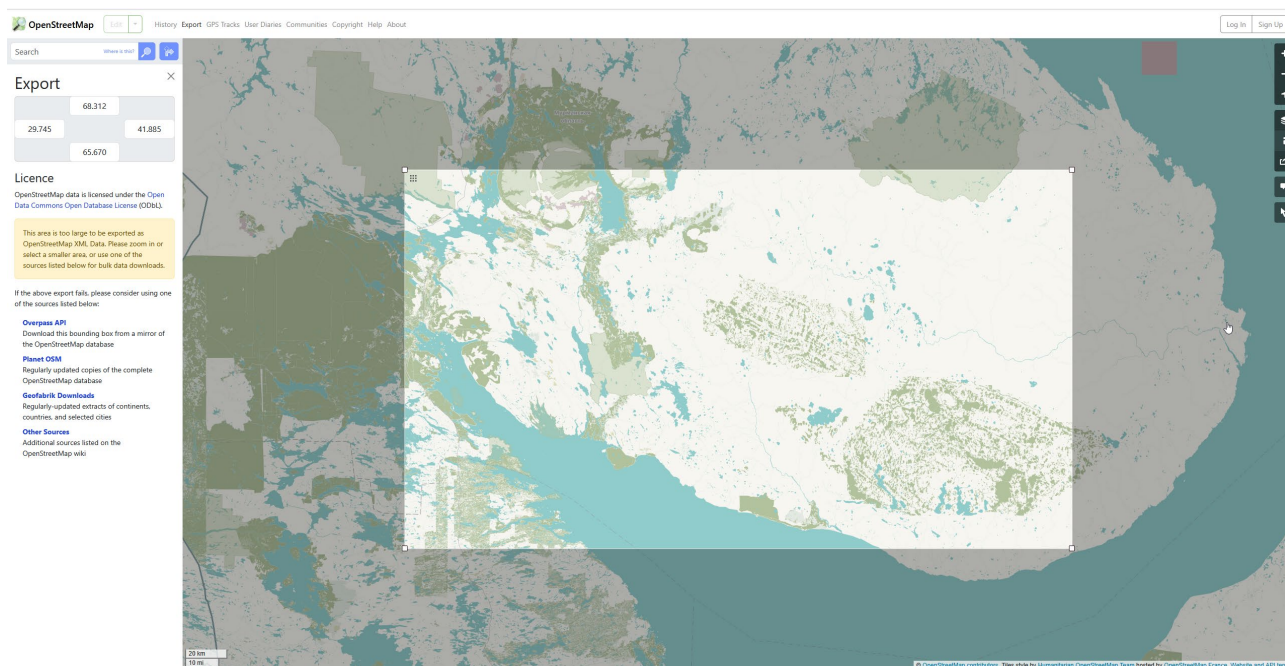


Рисунок 4.2 – Выбор региона в OSM

Важно также отметить, что в ходе работы я не ограничивал область только узкими границами исследуемого региона, но и также захватывал соседние части, которые в последующем потребуются для удобного представления модели и рендеринга области программой обработки наложения слоев и обработки полигонов объектов рельефа без сильных изменений рельефа по примеру Высота: 2000м – Высота 0, что потребуется для сглаживания рельефа по краям модели.

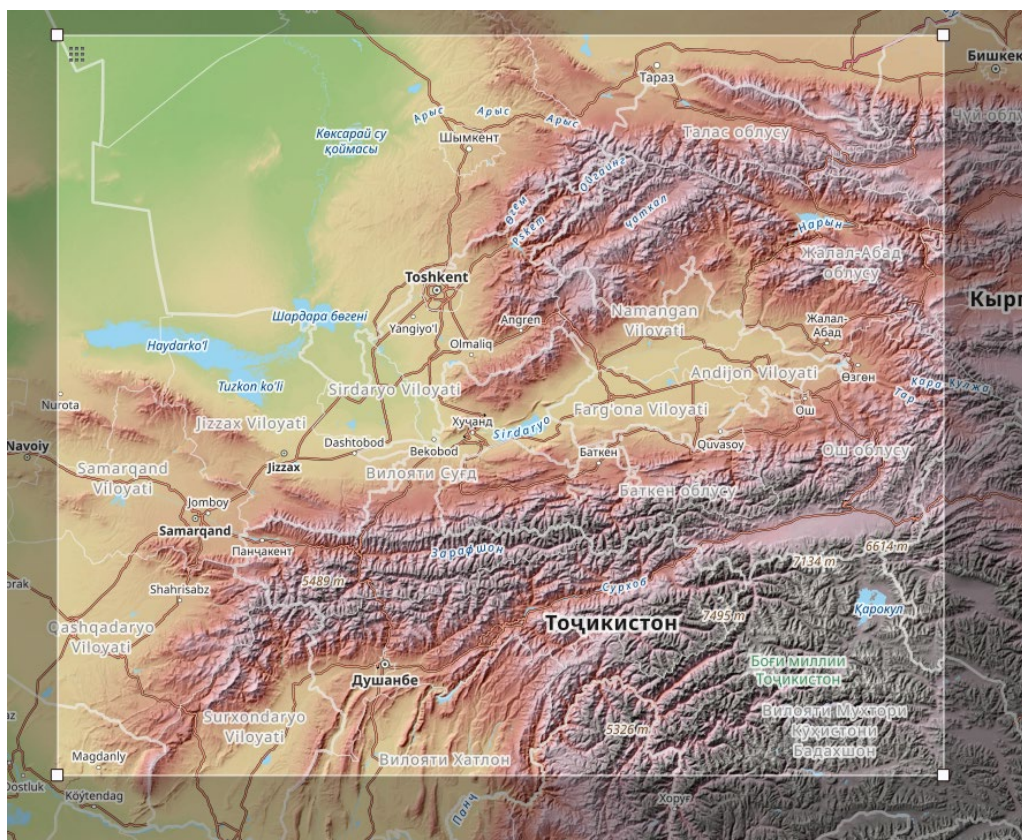


Рисунок 4.3 – Регион перевала Камчик



Рисунок 4.4 – Регион перевала Снежный

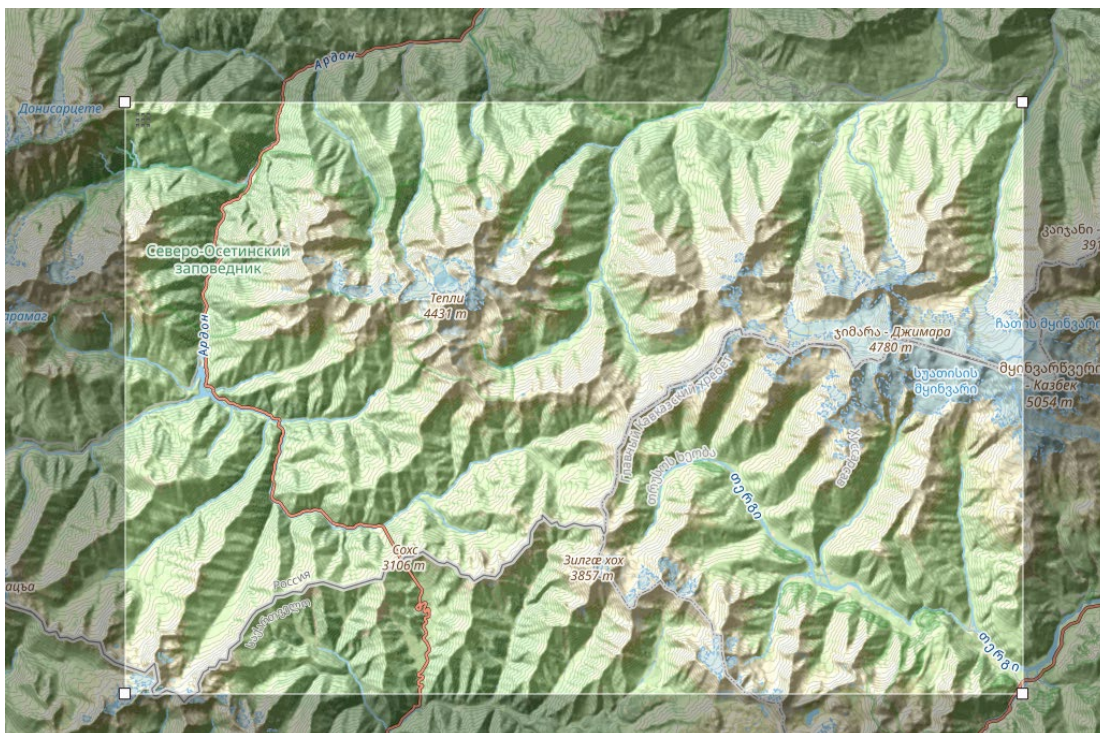


Рисунок 4.5 – Регион перевала Рокский

Скаченные файлы местности загружаются в стандартном расширении `osm` со стандартным наименованием `map`. В ходе работы отметил, что файл в ходе работы лучше не переименовывать и оставлять оригинальное стандартное наименование.

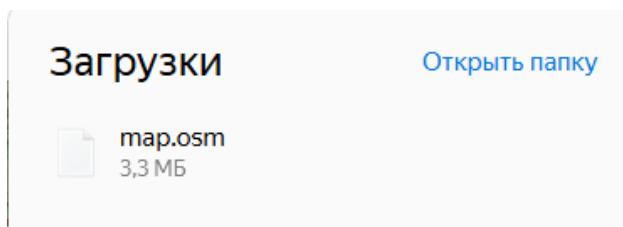


Рисунок 4.5 – Файл OSM

Далее для работы потребуется определить файл `map.osm` в директорию `jostm` в раздел проектов, чтобы в дальнейшем была возможность открыть его в редакторе.

На рисунке 4.6 приведены все типы приложений и файлов, которые требуются для работы на данном этапе:

Под цифрами:

- 1- Файл региона, который должен быть перемещен в `jostm`

- 2- JOSM дебаггер, в котором вводятся правки в файлы osm
- 3- JOSM редактор, рабочая программа
- 4- Visual Studio Code – программа для работы с кодом JOSM

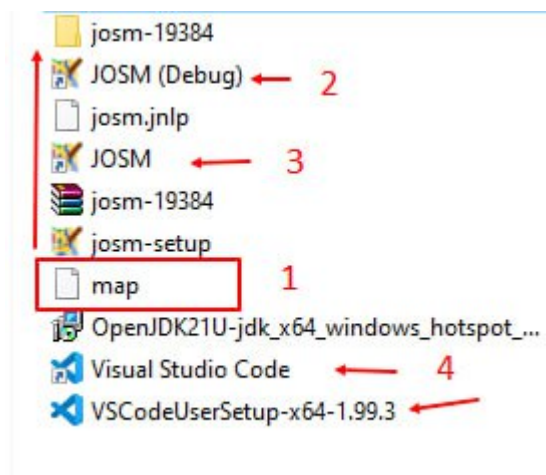


Рисунок 4.6 – Список рабочих файлов для редакции

Помимо широты и долготы у каждого объекта есть описание, которое вводится с помощью атрибутов. Атрибуты и теги помогают понять, что за объект изображен на карте. Ввод данных происходит через связку «ключ=значение». В стандартной версии OpenStreetMap не отображают особенности рельефа, которые традиционно отрисовываются кольцами и тенями (например, высоту над уровнем моря).

Стандартные OSM — плоские. Но для выполнения данной и подобных работ и необходимости создания 3D карты можно подключить слои с результатами сканирования поверхности Земли со спутников, где высоты прорисованы. Съемку рельефа проводили в ходе экспериментальных полетов спутники разных стран, но в открытый доступ попали только данные, которые обработали специалисты NASA и этим данным можно доверять. Пользователи OpenStreetMap обновляют карты через редакторы. Это можно делать онлайн, либо с помощью специальных компьютерных программ:

- iD — встроенный в портал OpenStreetMap редактор. Он позволяет ознакомиться с уже внесенными объектами и добавить свои точки интереса (Point of interest, POI) и видовые точки (point of view, POV). Требуется установка Adobe Flash плеера. Подходит для новичков.
- Rapid — похож на iD, но использует еще искусственный интеллект. Подойдет продвинутому пользователю.
- StreetComplete — один из мобильных редакторов карт OSM для новых пользователей. Знакомит с тегами, учит расставлять точки, использует квесты и элементы игры для большей вовлеченности.

- JOSM — самый известный десктопный Java-редактор (для ПК/ноутбука). Обладает расширенным функционалом, позволяет подробно отрисовывать объекты, использовать слои со снимками спутников, локальные файлы и данные из интернет-источников, поддерживает загрузку треков. Подойдет для опытных, в интернете есть текстовые инструкции и YouTube-уроки по освоению.
- Vespucci — Android-редактор с большим набором функций для продвинутых пользователей.
- Every Door — программное обеспечение для iOS и Android с функцией быстрого добавления точек. Чаще используется для работы по городской среде.

В ходе работы применялся именно JOSM Java редактор, версий от 19370 до 19384 включительно. В ходе работы было выяснено, что лучше всего работать на редакторе Java восьмой версии (Java 8.8), которая будет стабильнее Java 10 на момент проведения мой работы. Обновления можно скачать с сайта разработчиков – Рисунок 4.3.

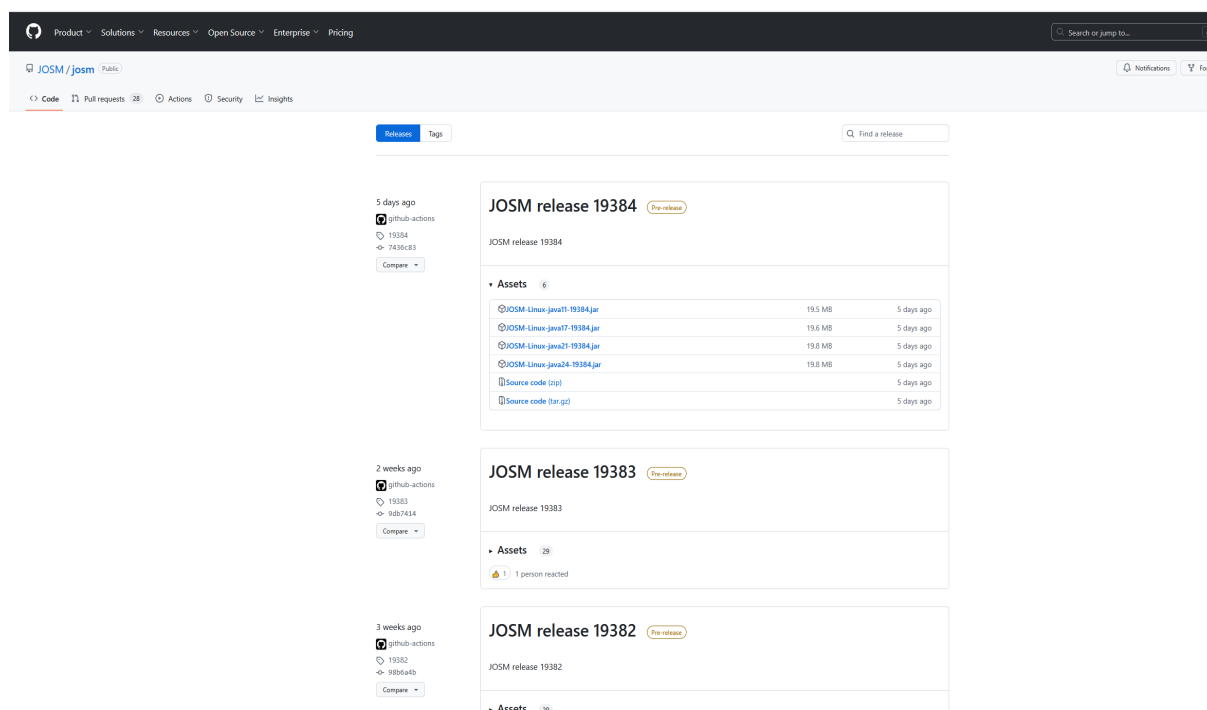


Рисунок 4.3 – JOSM версии GitHub

4.3 Редактирование рельефа в редакторе OSM.

Поскольку система является гибкой, производимая мною настройка точек рельефа и их корректировка вводится вручную, в ходе работы был спроектирован рельеф для перевалов Камчик, перевала Рокский и перевала Снежный в исследуемых регионах. Были изучены возможности редактора, которые позволяют вносить корректировки по точкам вручную меняя особенности рельефа на карте – Рисунок 4.3

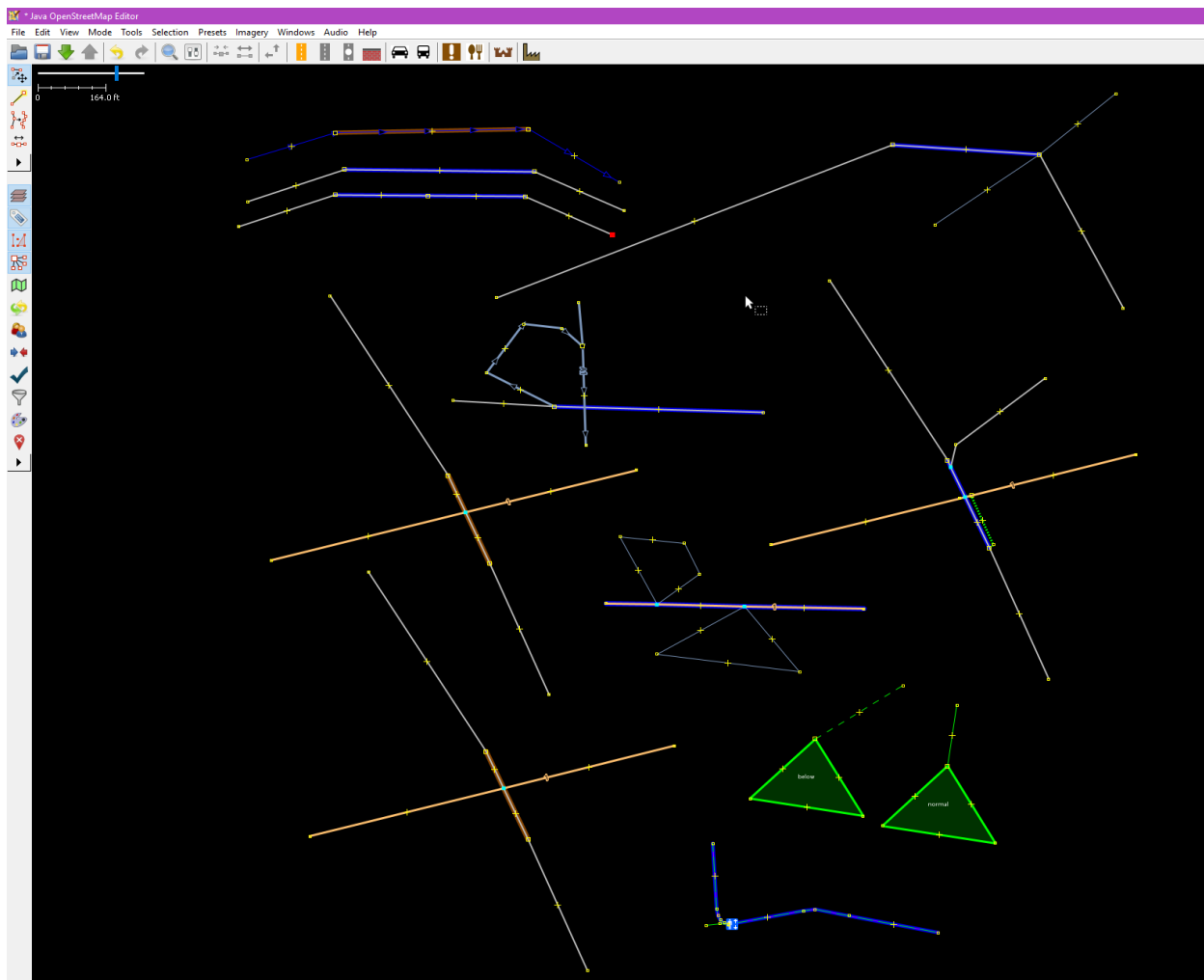


Рисунок 4.3 – Пример работы с рельефом JOSM

Редакция производилась по отдельным точкам рельефа, пример редакции приведены на Рисунке 4.3. На рисунке видно, что линия рельефа образуют собой овальную область замкнутыми линиями, которые отвечают за уровень высот горной местности. Таких замкнутых линий-уровней может быть несколько, поправки вводятся вручную, предоставляя возможность

редактировать и вводить несколько разных высот для коррекции, что позволяет улучшить модель рельефа, на которую будет накладываться слой снежного покрова. Также это позволяет улучшить отображение склонов, которое является важным параметром определения снежного покрова и его параметров.

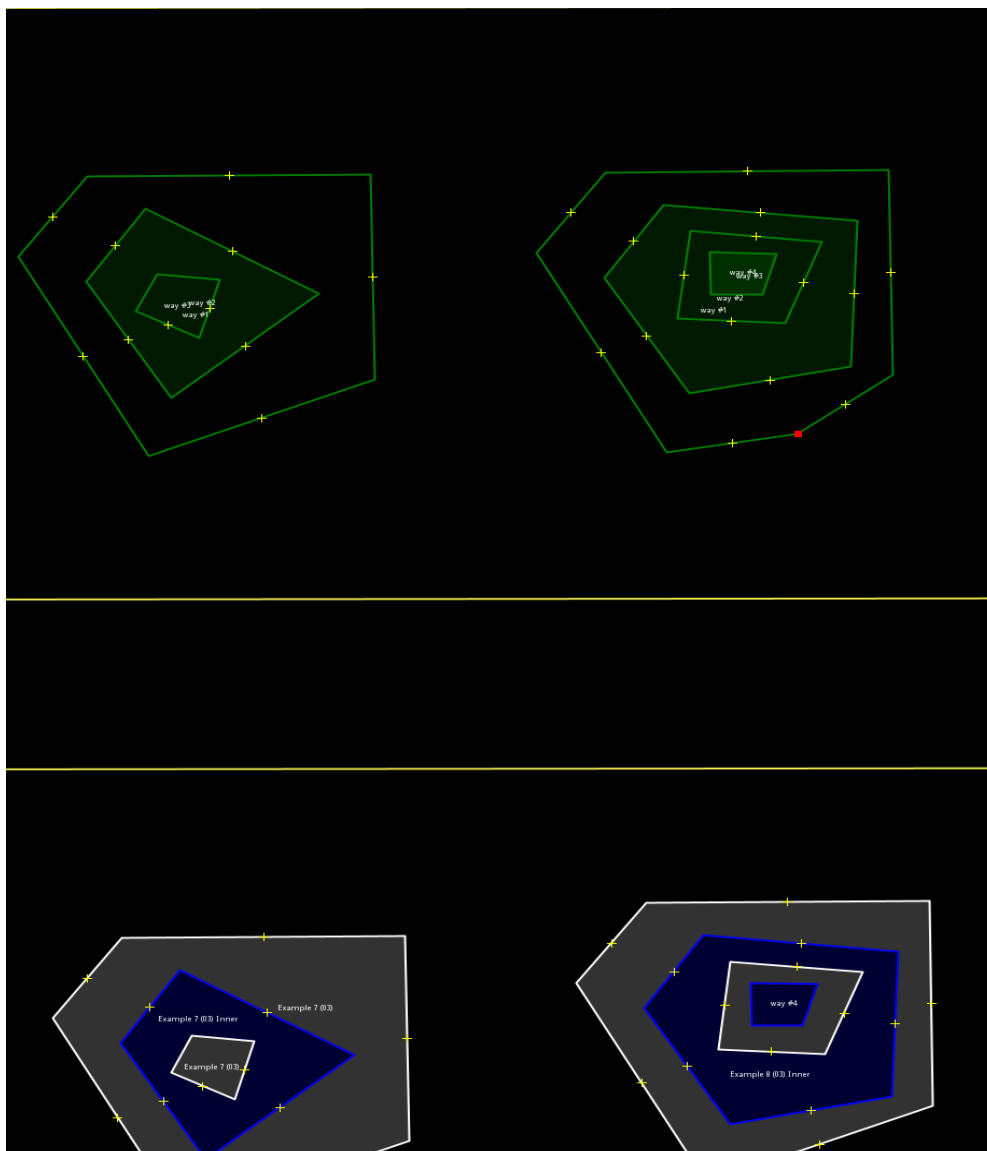


Рисунок 4.4 – Пример рендера для перевала Камчик

В работе я использовал интерпритатор со встроенными библиотеками для работы с Java8.8-Java10 Visual Studio. Я использовал данный редактор для отрисовки трехмерного рельефа исследуемых регионов перевалов Камчик, Рокский, Снежный.

4.4 Редактирование модулей OSM

Для получения слоя снежного покрова для всех трех регионов был написан фрагмент кода, который позволяет наносить на рельеф слои, которые отвечают за снежный покров в исследуемом регионе – Рисунок 4.6

```
621
622 sub loadModule($)
623 {
624     my $Name = $_[0];
625     if(defined $LoadedModules{$Name}) {
626         return;
627     }
628     my $Path = $MODULES_DIR."/Internals/$Name.pm";
629     if(not -f $Path)
630     {
631         print STDERR "can't access \'$Path\'\n";
632         exit(2);
633     }
634     require $Path;
635     $LoadedModules{$Name} = 1;
636 }
637
638 sub readModule($$)
639 {
640     my ($Module, $Name) = @_;
641     my $Path = $MODULES_DIR."/Internals/$Module/".$Name;
642     if(not -f $Path) {
643         exitStatus("Module_Error", "can't access \'$Path\'");
644     }
645     return readFile($Path);
646 }
647
```

Рисунок 4.5 – Работа с модулями внесение изменений в код OSM для нанесения слоев

Особенно важным в данной работе является работа с исходным кодом раздела модулей OSM, которые отвечают за нанесения требуемых слоев на подготовленную карту рельефа. В ходе работы было уделено большое количество времени и внимания модулям, которые нужно было правильно установить в свой редактор и присвоить все значения и доступы в директории с файлами, исходными данными и модулями OSM с запрашиваемым «SRDEER» блоком, который отвечает за путь-файлы и доступы модулей к внесению правок в слой.

На Рисунке 4. 6 представлена часть моей работы, в которой я вносил изменения в код OSM через редактор Java JOSM для нанесения слоев. Работа заключалась в присвоении класса в директорию модулей, например класс-уровень который в дальнейшем наносится на 3D - макет рельефа подложки OSM. Сверка ошибок в файлах карты и слоя который отвечает за снежный покров критична, доступы в директории модулей и запрашиваемых OSM

запросов должны быть связаны дополнительной функцией «SIGN KEYPASS» и прописаны связи между путями и файлами «Aviable JavaFX» директории файловых путей, которые отвечают за модуль - распространение карты пути-доступа слоя карты снежного покрова и присвоения статуса-доступа уровня редактор для внесения правок на исходный файл.



```
583 #Report
584 my $ContentID = 1;
585 my $ContentSpanStart = "<span class=\"section\" onclick=\"sc(this, 'CONTENT_ID')\">\n";
586 my $ContentSpanStart_Affected = "<span class=\"sect_aff\" onclick=\"sc(this, 'CONTENT_ID')\">\n";
587 my $ContentSpanEnd = "</span>\n";
588 my $ContentDivStart = "<div id=\"CONTENT_ID\" style=\"display:none\">\n";
589 my $ContentDivEnd = "</div>\n";
590 my $Content_Counter = 0;
591
592 sub getModules()
593 {
594     my $TOOL_DIR = dirname($0);
595     if(not $TOOL_DIR)
596     { # patch for MS Windows
597         $TOOL_DIR = ".";
598     }
599     my @SEARCH_DIRS = (
600         # tool's directory
601         abs_path($TOOL_DIR),
602         # relative path to modules
603         abs_path($TOOL_DIR)."/../share/japi-compliance-checker",
604         # install path
605         'MODULES_INSTALL_PATH'
606     );
607     foreach my $DIR (@SEARCH_DIRS)
608     {
609         if($DIR!~/\A(\\|\\w+:[\\\/])/)
610         { # relative path
611             $DIR = abs_path($TOOL_DIR)."/".$DIR;
612         }
613         if(-d $DIR."/modules") {
614             return $DIR."/modules";
615         }
616     }
617 }
```

Рисунок 4.6 – Фрагмент работы с внесение изменений в код OSM модуля слоев

```

59 </condition>
60 <available property="svn.present" file="${base.dir}/.svn"/>
61 <available property="git.present" file="${base.dir}/.git"/>
62 <property name="build.dir" location="${base.dir}/build"/>
63 <property name="dist.dir" location="${base.dir}/dist"/>
64 <property name="resources.dir" location="${base.dir}/resources"/>
65 <property name="modules.dir" location="${dist.dir}/modules"/>
66 <property name="tools.dir" location="${base.dir}/tools"/>
67 <property name="pmd.dir" location="${tools.dir}/pmd"/>
68 <property name="checkstyle.dir" location="${tools.dir}/checkstyle"/>
69 <property name="spotbugs.dir" location="${tools.dir}/spotbugs"/>
70 <property name="javacc.home" location="${tools.dir}"/>
71 <property name="mapcss.dir" location="${src.dir}/org/openstreetmap/josm/gui/mappaint/mapcss"/>
72 <property name="proj-build.dir" location="${base.dir}/build2"/>
73 <property name="script-build.dir" location="${base.dir}/build2"/>
74 <property name="epsg.output" location="${resources.dir}/data/projection/custom-epsg"/>
75 <property name="commons-lang3.jar" location="${tools.dir}/commons-lang3.jar"/>
76 <property name="dist.jar" location="${dist.dir}/josm-custom.jar"/>
77 <property name="dist-optimized.jar" location="${dist.dir}/josm-custom-optimized.jar"/>
78 <property name="dist-sources.jar" location="${dist.dir}/josm-custom-sources.jar"/>
79 <!-- When incrementing the minimum Java version, don't forget to update the Java versions users will update to
80 | (PlatformHook#getJavaUrl, PlatformHook#startupSanityChecks and PlatformHook#warnSoonToBeUnsupportedJava) -->
81 <property name="java.lang.version" value="11" />
82 <property name="test.headless" value="true" />
83 <property name="noErrorProne" value="false"/>
84 <property name="jacoco.includes" value="org.openstreetmap.josm.*" />
85 <property name="jacoco.inclbootstrapclasses" value="false" />
86 <property name="jacoco.inclnolocationclasses" value="false" />
87 <property name="junit.printsummary" value="on" />
88 <property name="default-junit-includes" value="**/*Test.class"/>
89 <property name="default-junitIT-includes" value="**/*TestIT.class"/>
90 <!-- build parameter: compression level (ant -Dclevel=N)
91 | N ranges from 0 (no compression) to 9 (maximum compression)
92 | default: 9 -->
93 <condition property="clevel" value="${clevel}" else="9">
94 | <isset property="clevel"/>
95 </condition>

```

Рисунок 4.7 – Фрагмент работы программы при внесении слоя на карту

4.5 Трехмерная модель снежного покрова

Так как JOSM редактор и OSM карты совместимы и предназначены также для работы со спутниковыми снимками, данные о рельефе и базу данных высоты снежного покрова можно подготовить в виде спутникового снимка для коррекции и базы данных смоделированного высот снежного покрова по мультиспектральным спутниковым снимкам в виде документа формата CSV, который можно получить, преобразовав мои исходные данные. Для нанесения слоя снежного покрова на подготовленный макет рельефа были подготовлены спутниковые снимки Terra в трех указанных ранее каналах. Со снимков были сняты значения яркости в точках, соответствующих местам снегосъемки, и помещены в базу данных.

Для создания слоя подготовленная база данных была внесена через редактор JOSM функции матрицы и обработки через модуль интерполяции (потребуется библиотека для Java), также был наложен спутниковый снимок на карту, с учетом искажения при наложении для редактирования рельефа и границ региона, были внесены правки вручную.

```

649 {
670 {
671     if(defined $Class1->{"Access"})
672     and $Class1->{"Access"} =~ /private/ {
673         next;
674     }
675
676     if(not classFilter($Class1, 1, 1)) {
677         next;
678     }
679
680     my $ClassName = $Class1->{"Name"};
681     my $GenericName = getGeneric($ClassName);
682     my $Class2_Id = undef;
683
684     if(defined $TName_Tid{2}{$ClassName}) {
685         $Class2_Id = $TName_Tid{2}{$ClassName};
686     }
687     elsif(defined $TName_Tid_Generic{2}{$GenericName}) {
688         $Class2_Id = $TName_Tid_Generic{2}{$GenericName};
689     }
690
691     if($Class2_Id)
692     { # classes and interfaces with public static fields
693         if(not defined $Class_Methods{1}{$ClassName})
694         {
695             my $Class2 = getType($Class2_Id, 2);
696
697             foreach my $Field (keys(%{$Class1->{"Fields"}}))
698             {
699                 my $FieldInfo = $Class1->{"Fields"}{$Field};
700
701                 my $FAccess = $FieldInfo->{"Access"};
702                 if($FAccess =~ /private/) {
703                     next;
704                 }
705
706                 if($FieldInfo->{"Static"})
707                 {
708                     $CheckedTypes{$ClassName} = 1;
709
710                     if(not defined $Class2->{"Fields"}{$Field})
711                     {
712                         %{$CompatProblems{".client_method"}{"Removed_NonConstant_Field"}{$Field}} = (
713                             "Target"=>$Field,
714                             "Type_Name"=>$ClassName,
715                             "Type_Type"=>$Class1->{"Type"},
716                             "Field_Type"=>getTypeName($FieldInfo->{"Type"}, 1));
717                     }
718                 }
719             }
720         }
721     }
722
723     if(defined $Class1->{"Annotation"})
724     {
725         my %AnnParam = ();
726         foreach my $VN (1, 2)
727         {
728             foreach my $Method (keys(%{$Class_Methods{$VN}{$ClassName}}))
729             {
730                 my $MInfo = $MethodInfo{$VN}{$Method};
731                 $AnnParam{$VN}{$MInfo->{"ShortName"}} = {"Default"=>$MInfo->{"Default"}, "Return"=>getTypeName($MInfo->{"Return"}, $VN)};
732             }
733         }
734         foreach my $AParam (sort keys(%{$AnnParam{1}}))
735         {

```

Рисунок 4.8 – Часть кода, ответственного за ячейки карты и далее за интерполяцию сетки

Результатом работы программы является построенный трехмерная модель рельефа с цветовой отрисовкой слоя снежного покрова, которая приведена на Рисунке 4.9

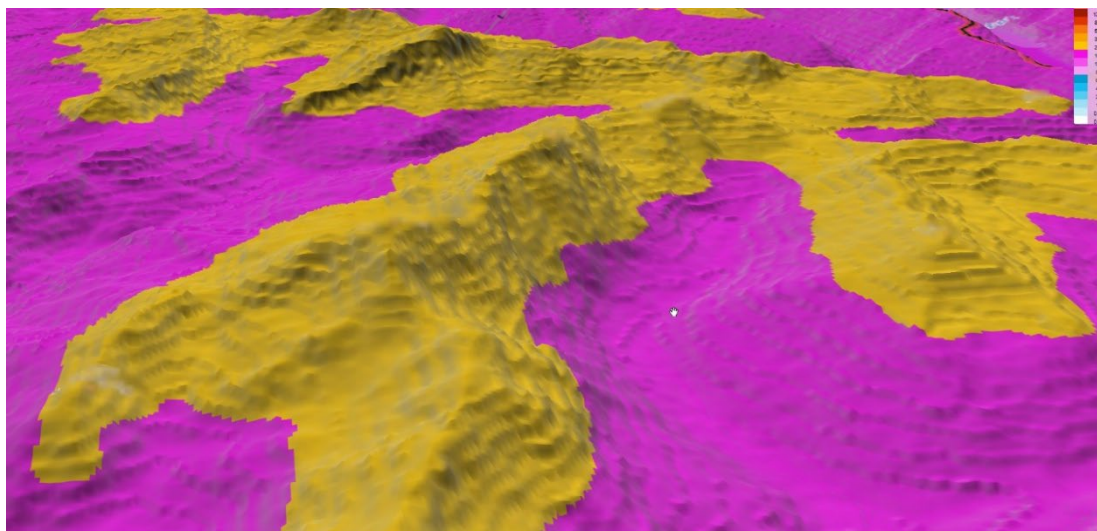


Рисунок 4.9 – Результат работы рендера для перевала Камчик

Важным моментом в ходе выполнения части рендера территории и слоя снежного покрова является затрачиваемое время, которое зависит от кол-во вводимых данных и наложением их на сетку рельефа с применением математических функций, например интерполяцией. Макет пререндера приведен на рисунке 4.10

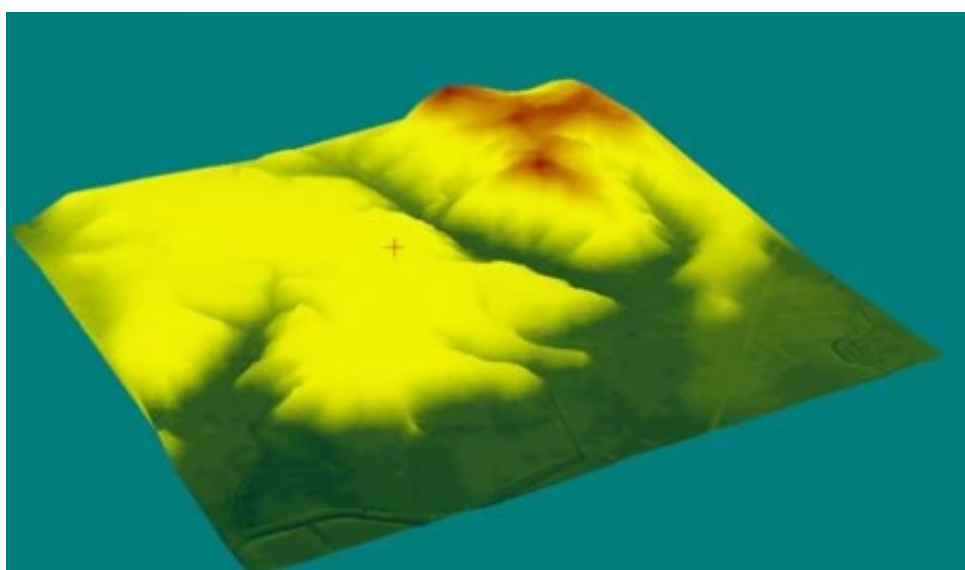


Рисунок 4.10 – Макет пререндера для перевала Рокский

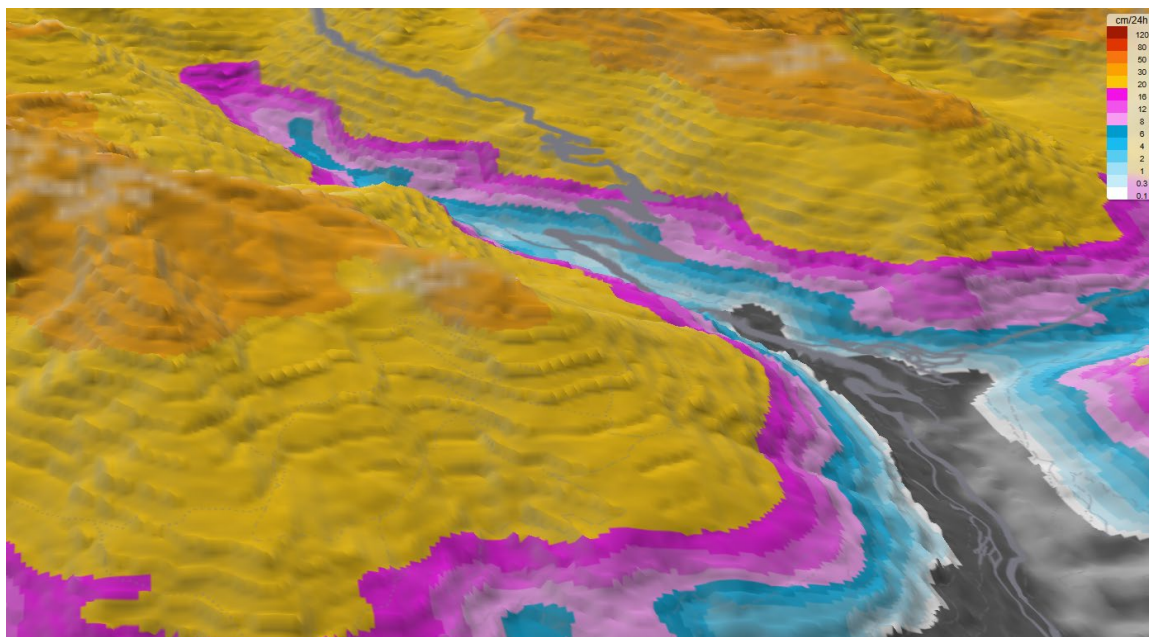


Рисунок 4.11 – 3D модель снежного покрова для перевала Снежный, Хибин

На рисунке 4.11 и 4.12 присутствует легенда, отражающая глубина залегания снежного покрова, цветовая схема: белый равен нулевой глубине снежного покрова, а оттенки желто красного до 120 см.

Данные трехмерные модели были выполнены для каждого исследуемого перевала – Камчик, Рокский и Снежный.

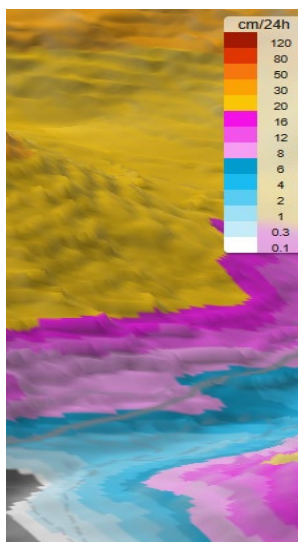


Рисунок 4.12 Легенда соотношения «цвет-высота»

Заключение

Нельзя недооценить полезность и необходимость синтеза моделирования и применения современной спутниковой информации для решения задач гидрометеорологии и мониторинга за окружающей средой. Необходимо ускорять внедрение опыта применения передовых технологий и развивать отвечающие современным вызовам методы дистанционного мониторинга и зондирования для решения задач обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и расчета рисков, как финансовых, так и человеческих. Особенно это важно и проявляет себя в зонах повышенной опасности, таких как горные массивы, где сходы лавин за все время наблюдений по всему миру нанесли колоссальный финансовый ущерб, а также унесли множество человеческих жизней.

В ходе своей работы я смог достичь в полной мере поставленных задач:

1. Проанализировал исходные данные месторасположения и значения снегосъемных измерений на перевалах Камчик, Рокский, Снежный. Произвел подбор необходимого программного обеспечения, необходимого для работы со спутниковыми снимками.
2. Создал архив спутниковых снимков исследуемых областей перевалов Камчик, Рокский, Снежный.
3. Рассмотрел основные методы для дешифрирования снежного покрова, представленные методами RGB синтезирования и индексом NDSI и применил их для обнаружения снега на спутниковых снимках.
4. Построил регрессионную модель для выявления зависимости высоты снега от спектральной яркости канала в пикселе спутникового изображения, определи высоту снежного покрова для перевалов Камчик, Снежный, Рокский методом регрессии.

5. Построил трехмерную модель снежного покрова на рельефе для исследуемых регионов с применением OSM и пакета программного кода.

Считаю, что цель моей выпускной магистерской диссертации была раскрыта и достигнута в полной мере.

В качестве вывода можно сказать, что предоставленный и раскрытый мною в моей исследовательской работе материал имеет практическую значимость, в частности и особенности для служб контроля лавинной безопасности, которые могут применить данные моего исследования для обеспечения безопасности жизнедеятельности человека, уменьшения ущерба от лавинной активности, планирования постройки снегосборных укреплений и уменьшении нагрузки на бюджет в связи с эффективным расположением средств защиты и активных воздействий (подрывных мероприятий), обеспечению бесперебойности работы логистических цепей и безопасности жизнедеятельности человека. Данные моей исследовательской работы могут найти свое применение в работе обеспечения как бесперебойности логистики, как например важнейшие связующие магистрали перевала Камчик и перевала Рокский, по которым проходят дороги соединяющие целые регионы и представляющие важные транспортные узлы еще с середины прошлого века, так и в обеспечение безопасности в районах туризма и экстремальных видов спорта, как например на перевале Снежный в Хибинах, который является частью маршрута альпинистов и туристов-экстремалов.

Список используемых источников

1. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов ДЗЗ. Редакция 7, ООО Инженерно-технологический Центр «СканЭкс». Иркутск. 2008.
2. И.А, Лабутина. Дешифрирование аэрокосмических снимков. 2004. – 184 с.
3. И.К. Лурье, А.Г. Косиков. Теория и практика цифровой обработки изображений Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Под ред. А.М. Берлянта. -М.: Научный мир, 2003. - 168 с.
4. Мониторинг снежного покрова на территории Российской Федерации. О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, В.Н. Разуваев Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск
5. Интернет ресурс SNAP instruments
<https://step.esa.int/main/download/snap/>
6. Интернет ресурс NASA EARTHDATA LAADC
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>
7. Интернет ресурс USGS Earth Explorer <https://earthexplorer.usgs.gov/>
8. QGIS <https://qgis.org/ru/site/index.html>
9. Argis <https://www.argis.com/>
10. USGS US GEOLOGICAL SURVEY <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-snow-index>

11. Е.В. Казакова Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды диссертация кандидата физико-математических наук.

12. Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 2024); Елисеев А.В. Симакина Т.Е. «Исследование снежного покрова с помощью мультиспектральных спутниковых снимков»

13. Материалы студенческой научной конференции для магистров "Мы- будущее метеорологии" Российский Государственный Гидрометеорологический Университет; Елисеев А.В. Симакина Т.Е. «Определение высоты снежного покрова с помощью мультиспектральных спутниковых снимков»

14. Материалы студенческой научной конференции «Фундаментальные и прикладные научны исследования в гидрометеорологии и их актуальность», Российский Государственный Гидрометеорологический Университет; Елисеев А.В. Симакина Т.Е. «Снежный покров на мультиспектральных спутниковых снимках»

15. М.С. Делеур «Космические методы изучения снежного покрова Земли», Ленинград Гидрометеиздат, 1980 80с.

16. М.В. Горшков «Экологически мониторинг, Учебное пособие 2-е изд. испр. и доп.», Издательство ТГЭУ, 2010, 300с

17. Дмитриев А.В., Дмитриев В.В. «Аппроксимационный алгоритм картирования снежного покрова по спутниковым данным», Омский Государственный

18. Снег. Справочник / Под ред. Д.М. Грея и Д.Х. Мейла; пер. с англ. – Ленинград Гидрометеиздат, 1986
19. «The superiority of the Adjusted Normalized Difference Snow Index (ANDSI) for mapping glaciers using Sentinel-2 multispectral satellite Imagery» ,Babak Mohammadi, Petter Pilesjö, Zheng Duan, 2023 60с.
20. Open Street Maps <https://www.openstreetmap.org/#map=1/1.4/-111.8>