



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
(бакалаврская работа)

На тему: «Мониторинг снежного покрова с использованием
многоспектральных спутниковых снимков»

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»

И.о. заведующего кафедрой


(подпись)

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

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

« 31 » мая 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Предмет исследования	6
1.1. Снежный покров и его физические свойства	6
1.2. Изучение снежного покрова аппаратурой ДЗЗ.....	11
1.3. Спектральные кривые снега и их изменчивость	20
Глава 2. Методы дешифрирования	27
2.1. Исходные данные по перевалу Камчик, Тянь-Шань	27
2.2. Инструментарий.....	30
2.3. Методы дешифрирования.....	34
2.2.1. Метод RGB синтезирования	38
2.2.2. Метод индекса снега NDSI	47
Глава 3. Моделирование толщины снежного покрова по спектральным данным	53
3.1. Существующие модели.....	53
3.2. Моделирование толщины снега методом регрессии	57
Заключение	62
Список используемых источников.....	63

Введение

Снежный покров это один из самых важных параметров климатической системы: благодаря высоким показателям отражательной способности (альбедо), а также низкой теплопроводности, снег является ключевым элементом в энергетическом балансе Земли, а находящийся в снежном покрове запас воды – в водном балансе.

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 [1].

Ранее, для изучения снежного покрова в метеорологии использовались прямые методы измерений, такие как снегосъемные рейки, однако такого метода недостаточно для получения более обширной информации. Съемка из космоса впервые предоставила возможность единовременного нахождения и определения на обширных территориях распространения снежного покрова, а также изучения его изменчивости. Обе характеристики являются определяющими для оперативного картографирования снежного покрова. Это необходимо в первую очередь для гидрологических прогнозов. Для исследования снежного покрова используется, в преобладающем количестве, спутниковые снимки от метеорологических спутников, предоставляющих оперативное поступление информации.

Картографирование расположения снежного покрова осложняется различными факторами. Например, для равнинных территорий покрытыми лесами, несмотря на наличие снежного покрова, отличаются небольшой яркостью изображения, соответственно трудно судить об наличии снега в их

пределах, приходится ориентироваться на снег, который находится не очень больших безлесных зон внутри лесных массивов, топей, вырубок, долин рек, озер. Пределы оснеженного покрова в высоких районах опознаются хорошо вследствие отличительной для них дендритовой текстуры.

Особый интерес представляет не просто изучение границ снежного покрова на определенный день, а изучение его динамики на обширных территориях, обеспечиваемое ежедневными съемками с метеорологических спутников. Сезонная динамика покрова, скорость изменения его границ в весенний период представляет собой особый материал для гидрологического прогнозирования и является объектом оперативного картографирования. В этой области исследований снежного покрова достигнут большой прогресс – создана и реализована система автоматического картографирования территорий расположения снежного покрова по снимкам со спутника. Система предусматривает автоматический монтаж снимков и обработку телевизионных изображений по методу выбора минимальной яркости для фильтрации изображения облачности. В итоге изготавливаются фотокарты крупных регионов, на которых светлым тоном передаются изображения только снежного покрова. Карты могут составляться последовательно для ряда лет или осредненные, например, по декадам. Автоматическое составление таких карт открывает реальные возможности изучения сезонной и годовой динамики снежного покрова в глобальном аспекте [1]

Для гидрометеорологических прогнозов недостаточно данных только распространение снежного покрова, необходимы также данные о его высоте, или мощности, для определения водозапаса. Однако по яркости изображения на космических снимках на данный момент трудно различать категории мощности снежного покрова, что явно недостаточно для гидрометеорологии. Разрабатываются автоматизированные методы таких определений.

Так как главный и практический аспект изучения снежного покрова связан с гидрологическими прогнозами, особая роль принадлежит изучению, и определению толщины снежного покрова. Некоторые возможности открывает при этом использование многоспектральных снимков, а именно сравнение изображений, полученных в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра.

Также, важным аспектом является то, что спутниковые снимки, обладающие хорошим фото и графическим качеством, необходимы для изучения лавинной активности. Съемка в различных спектральных диапазонах представляет возможность разделять изображение снега, льда, соответственно, отслеживать сезонную динамику снегового покрова на леднике.

Объектом исследования в выпускной работе представлен перевал Камчик, горной системы Тянь-Шань и данные со снегосъемных рек данной местности предоставленные местным метеобюро.

Предметом исследования является совокупность данных снегосъемок местности перевала Камчик и спутниковых изображений этих территорий, которые могут быть применены в моделировании высоты снега посредством спутниковых изображений.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование по мультиспектральным спутниковым снимкам снежного покрова и составления модели зависимости высоты снежного покрова от его яркости на спутниковых изображениях для района перевала Камчик с помощью спутника Terra MODIS.

Решаемые задачи:

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

2. Рассмотреть основные методы для дешифрирования снежного покрова на спутниковых изображениях.

3. Создать архив спутниковых снимков, над изучаемым регионом перевала Камчик. Создать подборку комбинаций для дешифровки снега.

4. Использовать модель для выявления зависимости высоты снега от спектральной яркости канала в пикселе спутникового изображения.

Глава 1. Предмет исследования

1.1. Снежный покров и его физические свойства

Снежный покров – слой, на поверхности, сформированный снегопадами. 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.

Снежный покров влияет на климат, рельеф, гидрологические, а также почвообразовательные процессы. Влияние оснеженного покрова на климатические особенности выявляется через взаимодействие с атмосферой. Снег, обладая высокими показателями альбедо, сильно понижает приход коротковолновой радиации к поверхности земли. Характерные особенности снега значительно влияют на энергетический баланс атмосферы, чем изоляционные. Снег - это хороший излучатель и он теряет много тепла через длинноволновую радиацию. Особенности снежного покрова в своей сумме приводят к выхолаживанию воздуха и образованию приземных радиационных инверсий температуры (низкая температура выделяется у поверхности снежного покрова, а с высотой она растет). Весенний период характеризуется значительной частью поступающего тепла, которое направленно на таяние снега. Снег уменьшает направленный от почвы тепловой поток, уменьшая потери тепла в атмосферу, убавляя промерзание почв, а также амплитуды колебаний температуры. В сезон снеготаяния, снег удерживает приход тепла в почву. Запас воды, сосредоточенный в снежном покрове, оказывает влияние на водный режим почв. Значительна роль оснеженного покрова в обороте воды в природе. Снеговое питание заняло важное место в речном стоке территорий, где образовывается снежный покров. Снежный покров идентифицирует величину годового стока, величина весеннего половодья, ледовый режим рек, частота лавинных процессов и другое. Снег закрывает

поверхность на площади от 115 до 126 млн. км². Этот снежный «теплоизоляционный» слой отделяет поверхность суши от тропосферы, увеличивает альбедо и содействует охлаждению земной поверхности.

В устройстве возникновения и деградации оледенений роль снежного покрова определяющая. Любое затяжное глобальное похолодание способствует увеличению площадей и времени залегания снежного покрова, увеличивает глобальную отражательную способность и содействует дальнейшему похолоданию, также, если произойдет сокращение снежного покрова, глобальное альбедо уменьшится, способствуя большему потеплению.

Изучение снежного покрова, его высоты, плотности, расположение на территории имеет огромное практическое значение.

Снежный покров оказывает значительный вклад на водность рек, на деятельность транспорта, на сельское хозяйство, а также действуя на эрозионные процессы.

Свойства снежного покрова, сильно изменяющее теплофизическое состояние земной поверхности, которые заключаются в «белоснежной» поверхности, которая обладает во много раз значительной альбедо (до 80-95 %), чем свободная от снежного покрова почва и растительный покров (менее 20%). Отражательная способность снежных поверхностей изменяет радиационный баланс Земли и атмосферы. Поглощение приходящей солнечной радиации благодаря собственному значению альбедо снега уменьшается для планеты на 3%.

Высота снега и его физические и механические свойства непрерывно флуктуирует в зимнем сезоне. Среди характеристик оснеженного покрова необходимо отметить плотность, которая изменяется в широких пределах, от 10 до примерно 700 кг/м³, опираясь на вид снег, времени года. Динамика

плотности снега зависит от времени залегания, а внутри снега — от глубины. Оснеженный покров - это пористый объект из-за присутствия промежутков между кристаллами льда. Пористость снега меняется в зависимости от уплотнения от 98 до 20%. От этой характеристики зависит воздухопроницаемость. Уплотнение толщи снега, образование корок и увеличение водной составляющей способствует снижению воздухопроницаемости. Похожим вариантом структура оснеженного покрова указывает его водопроницаемость. В связи с расположением слоев, скорость фильтрации в горизонте и вертикале отличается. Водопроницаемость находится в обратной пропорциональной зависимости, водоудерживающая способность — самое большое количество воды во всех состояниях, которое снег способен удержать в себе после смачивания до полной влагоемкости. Сухой свежий снег способен удерживать примерно 44— 30% воды от общей массы воды и снега, а крупнозернистый плотный снежный покров (420 кг/м³) примерно 13%. Необходимо упомянуть такую особенность снега как его влажность — количество воды в жидком состоянии, что снег удерживает во всех его формах [1].

Главное значение данных снегосъемок сплетено 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:

- 1) Определение территории, занесенной снегом вокруг станции.
- 2) Определение высоты снега по рейкам;
- 3) Проведение снегомерных съемок;
- 4) Контроль снегосъемных точек (постоянные точки);
- 5) Съемки на местах с зимующей культурой;
- 6) Контроль выпадения твердых осадков;
- 8) Наблюдения в горах по маршрутам;
- 9) Наблюдения за лавинными процессами.



Рисунок 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.

Главные 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.

Данные свойства снежного покрова отображены в способности отражать, рассеивать, поглощать проходящую от Солнца радиацию, способности собственного излучения. Отражающие способности снега указаны его собственным альбедо. Альбедо снега значительно выше, льда, воды. Оно зависит от таких факторов: спектрального состава проходящей радиации, высоты и расположения Солнца, состояния оснеженного покрова. Данные факторы способствуют вариации альбедо от 0,98 у свежего снега до 0,20 у грязного и мокрого. Снежная поверхность неодинаково отражает проходящую радиацию в разных частях спектра: в крайях альбедо меньше, чем в видимой.

Механические свойства снега.

К таким свойствам относят упругость и прочность снежного покрова. Они определяют движение человека по снегу, устойчивость снега на склонах и возможность схода лавин. Снег имеет слоистое строение, внутри они отличаются по форме, толщине, размерам зерен. [4]

Многообразность деятельности человечества, временная и пространственная динамика оснеженного покрова как гидрометеорологического элемента выделяют тот объем необходимых

наблюдений, что должен выполняться на станциях и постах, а также посредством внедрения и использования спутниковой информации.

На сегодняшний день активно изучается и внедряется новейший способ получения глубины, а также плотности снега посредством наблюдения поверхности Земли с помощью метеорологических спутников.

1.2. Изучение снежного покрова аппаратурой ДЗЗ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) — это наблюдение поверхности Земли наземными, авиационными и космическими средствами, вооруженными разнообразными видами съемочной аппаратуры (рисунок 2). Дистанционное зондирование в текущих реалиях развития человеческого научного и технического прогресса представляет собой интенсивное и активно развивающееся направление в получении объективной, актуальной информации, данных о явлениях и процессах, которые происходят в разных геосферах Земли. Важным пунктом является дешифрирование полученной информации, что является практически самым важным методом для большинства наук, которые используют ДЗЗ [2].

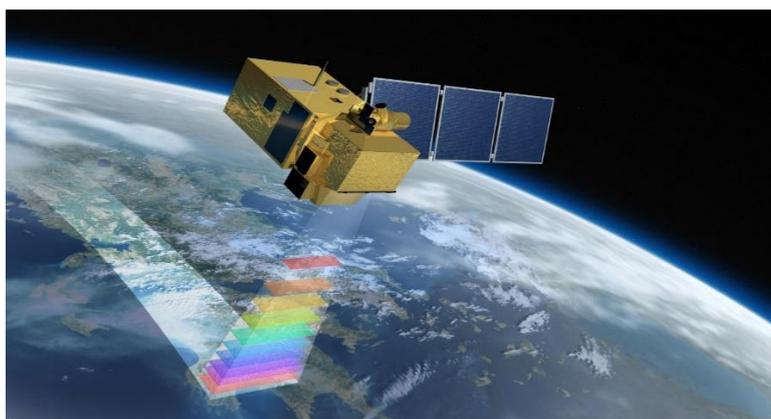


Рисунок 2 - Общее изображение принципа работы спутниковой аппаратуры

Способы дистанционного зондирования подразделяют на пассивные, которые используют естественное отраженное/вторичное излучение

изучаемых объектов, которому способствует солнечная активность, а также активные — которые используют излучение, вызванное сгенерированным источником направленного действия.

Информация зондирования, с космического средства, обуславливается значительной зависимостью от прозрачности атмосферы. Из-за этого на космических аппаратах используют многоканальные средства пассивного и активного типа, которые регистрируют электромагнитное излучение в разных диапазонах [2].

Космические средства ДЗЗ используются для выполнения задач метеорологии, а также наблюдения за природными ресурсами. Космический аппарат для изучения природных ресурсов вооружают оптическими и иногда радиолокационными средствами, для последней преимущество будет в возможности наблюдения поверхности Земли в любое время дня и ночи, вне влияния состояния атмосферы.

Благодаря орбитальным космическим средствам, ученые обладают возможностью создавать базы данных и передавать их вне зависимости от их диапазонов электромагнитного спектра, которые, в содействии с наземными средствами измерения и анализов, смогут обеспечивать необходимые данные мониторинга всех явлений и тенденций, в кратко и долго срочных перспективах.

Контроль со спутниковых средств поверхности представляется одним из самых важных и обособленных применениях дистанционного изучения. Получаемая информация используется для определения физического состояния поверхности, таких как лес, снежный покров и т. д., в том числе состояния сельского хозяйства и т. п. [2]

Сейчас существует достаточно большая группировка метеорологических спутников, которые обеспечивают гидрометеорологию

своей информацией. Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съёмочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны).

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

Виды спутникового вооружения:

1.Радар. 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 3).

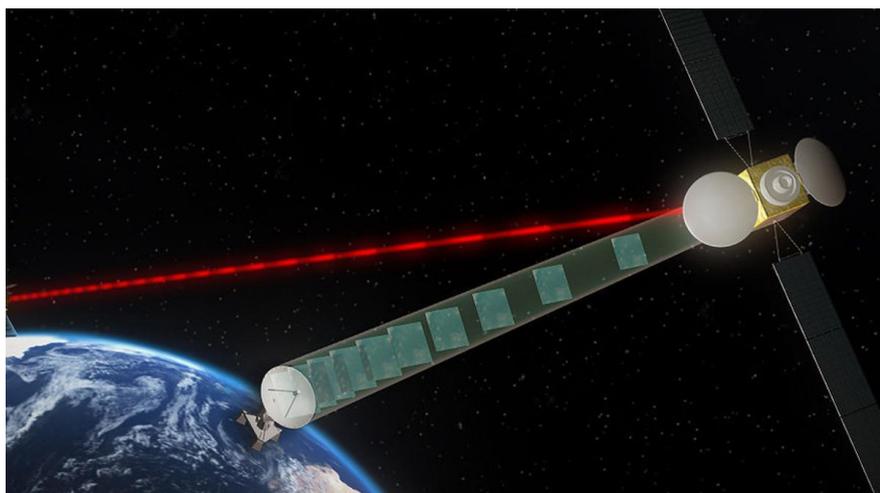


Рисунок 3 – Лазерный спутниковый высотомер

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 4).

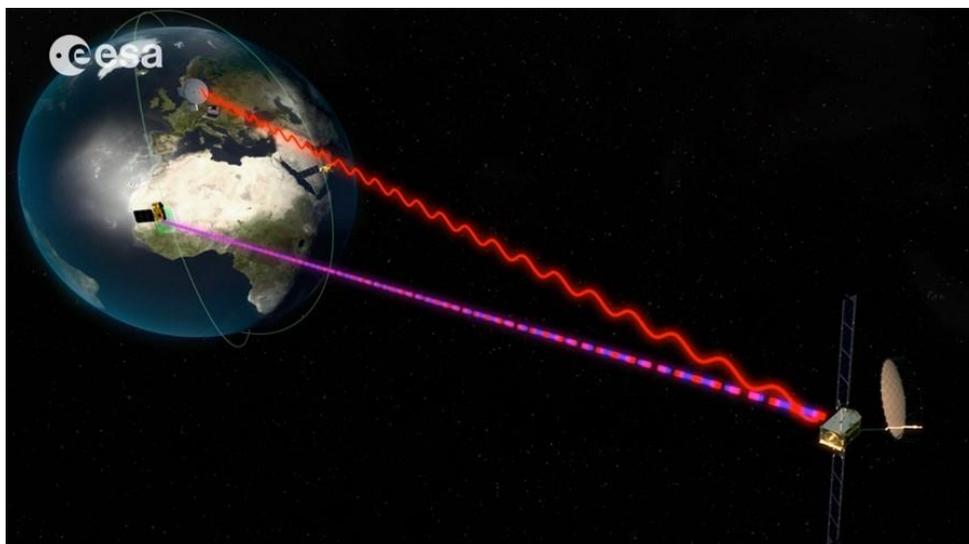


Рисунок 4 – Лидарная технология на спутнике

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 5).



Рисунок 5 – Радиометр на спутнике

Мультиспектральные аппаратные средства, как Sentinel, Landsat, Terra MODIS используются для создания карт путём получения изображений в нескольких каналах с разными длинами волн электромагнитного спектра.

Методом спектральной визуализации получают изображения, в которых каждый пиксель содержит полную спектральную информацию об объекте, отображая узкие спектральные диапазоны в пределах непрерывного спектра [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 6).



Рисунок 6 – Примеры пространственного разрешения

Спектральное разрешение

Формируется шириной спектральных зон съемки. Измеряется в нанометрах (нм) и микрометрах (мкм) (рисунок 7).



Рисунок 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 8).

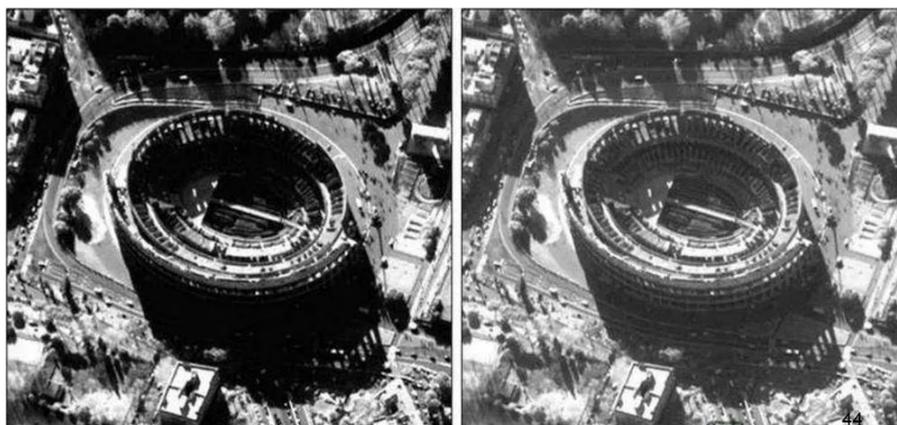


Рисунок 8 – Примеры радиометрического разрешения

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].

Общий принцип данных технологий, их получению и обработки с интерпретации информации о разных объектах земной поверхности без прямого контакта, используя фиксирование отраженной солнечной энергии и излученной тепловой энергии от изучаемого объекта, реализующегося

сенсорами, которые располагаются на орбитальных спутниках планеты (рисунок 9).

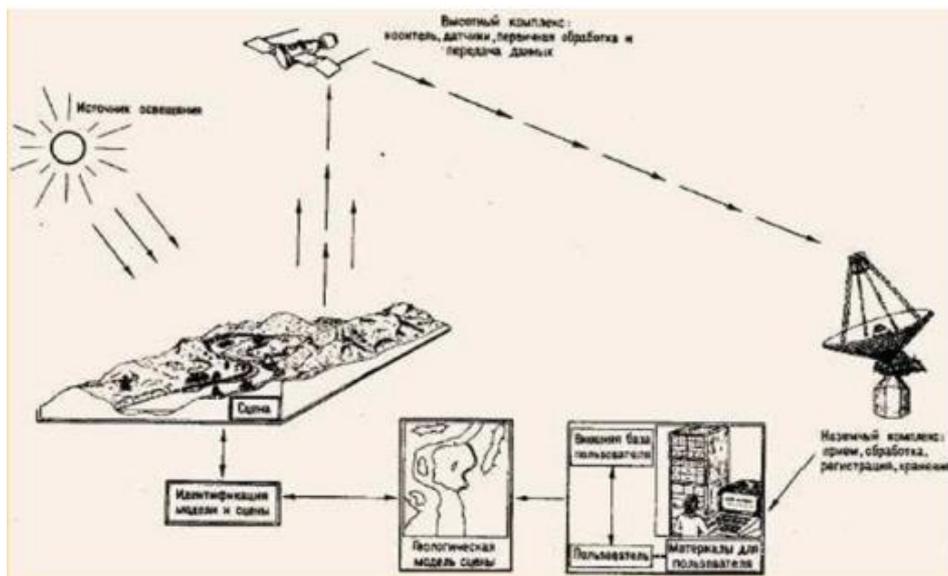


Рисунок 9 – Общий принцип дистанционного зондирования Земли

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

1. Распознавание территорий снежного покрова;
2. Распознавание плотности растительного покрова;
3. Термокартирование местности;
4. Определение антропогенных загрязнений;
5. Определение лесных пожаров.

Один из самых важных параметров – с применением спутниковой информации регистрировать зоны расположения оснеженного покрова на больших территориях. Повторные снимки создают основу для изучения динамики изменения площади снежного покрова. Наличие или отсутствие снега на открытых безлесных открытых территориях можно определить с очень высокой степенью достоверности и точности. При интерпретации снежного покрова на лесных территориях следует обращать внимание на

снежный покров на открытых участках: болот, вырубок, озер. Традиционно фактическое картирование снежного покрова и весеннего спада используется для гидрологического прогнозирования и других практических приложений. Количество накопленной воды определяется гидрологическими моделями. Некоторые параметры могут быть оценены косвенно. Например, участки, покрытые тающим снегом, идентифицируются в ближнем инфракрасном спектре, а толщина снежного покрова рассчитывается по большому количеству непрерывных изображений. [3]

В будущем система перейдет к использованию микроволновых радиометров для измерения толщины снежного покрова из космоса. Это позволит напрямую получать карты снежного покрова и снеговой воды изданных о плотности 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).

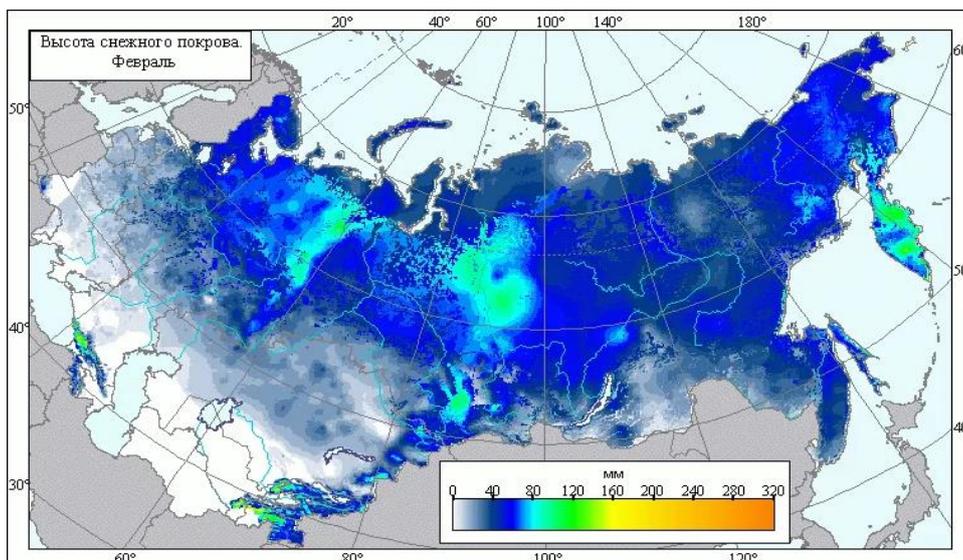


Рисунок 10 - Карта высот снежного покрова выполнения посредством спутника

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 11).

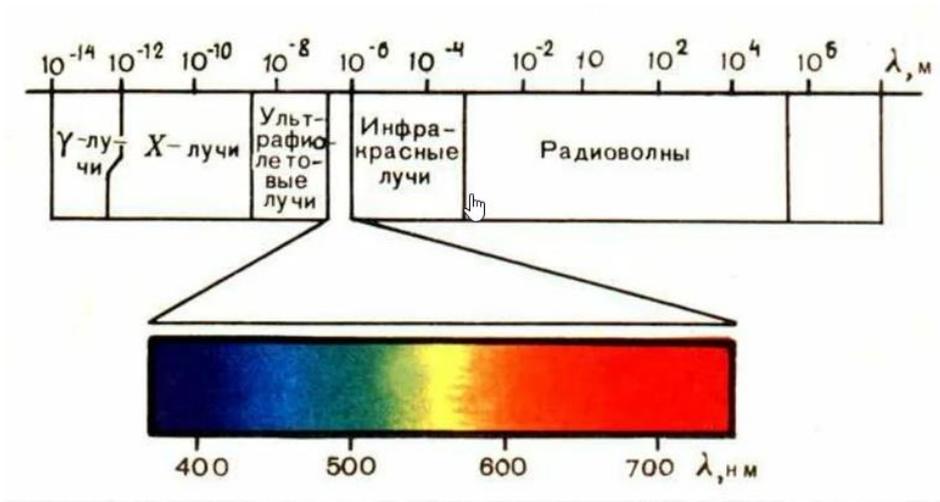


Рисунок 11 – Электромагнитный спектр

- 1) ультрафиолетовый менее $< 0,4$ мкм
- 2) видимый от $0,4$ до $0,8$ мкм
- 3) инфракрасный от $0,8$ до 1000 мкм

В инфракрасном диапазоне выделяют

- 1) ближнюю ($400-300$ нм)
- 2) среднюю ($300-200$ нм)
- 3) дальнюю (< 200 нм)

Видимый диапазон:

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 12).

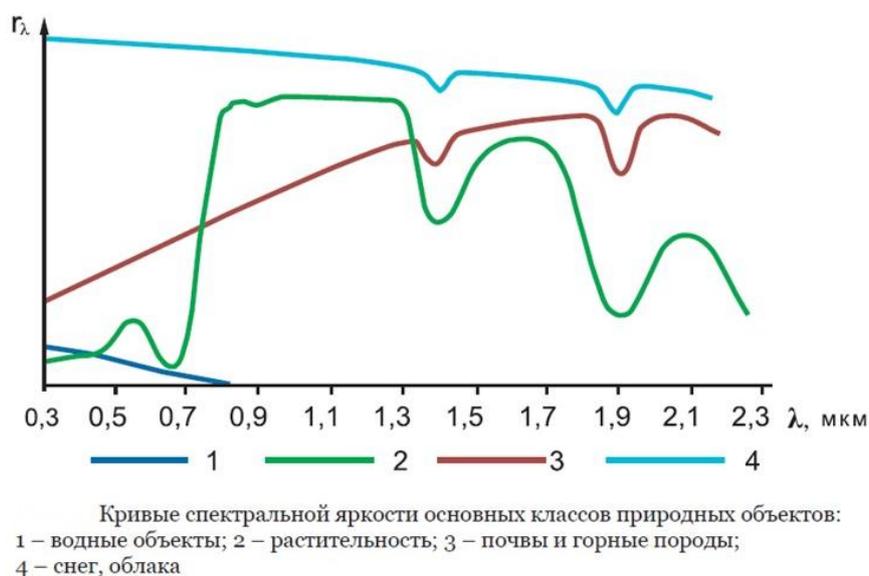


Рисунок 12 – Кривые спектральной яркости

Спектральная яркость хроматических объектов может изменяться в зависимости от спектрального хода. Экспериментально-экспериментальным путем можно определить спектральную яркость объекта.

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 дециметров диапазоне от 3-5 см проникают во все слои атмосферы, не зависимо от погодных условий и облачности (рисунок 13).

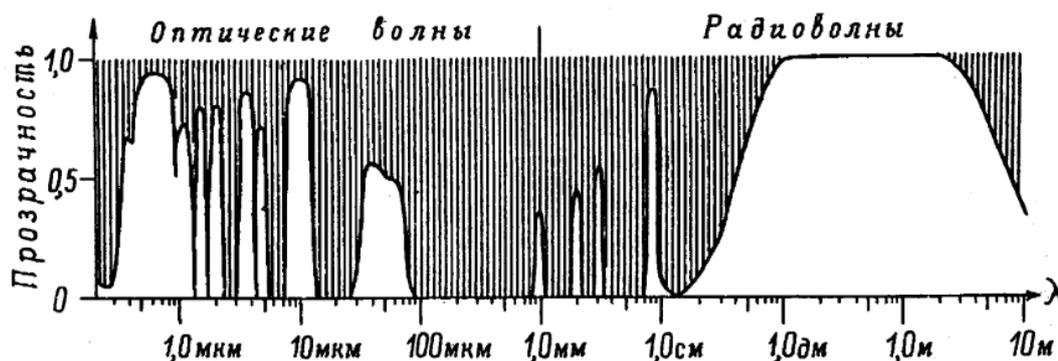


Рисунок 13 - Окна прозрачности атмосферы

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 14).

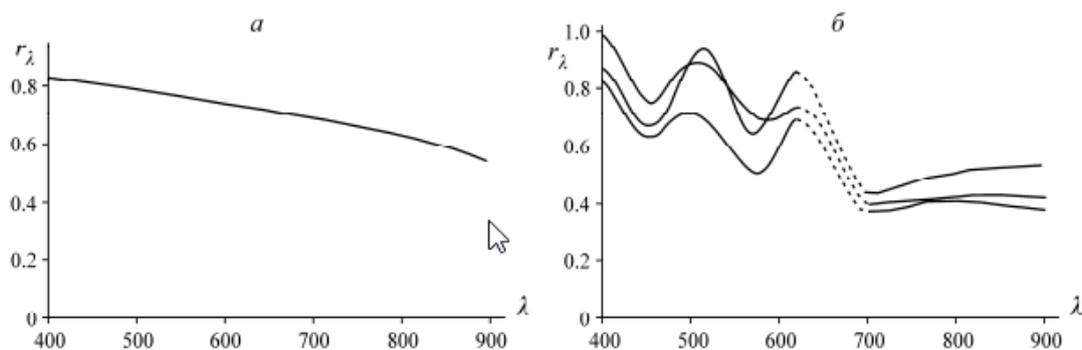


Рис. 1. Атлас спектральных кривых отражения природных образований [21]: *a* — свежавывалившийся снег; *б* — сухой снег; r_λ — спектральный коэффициент яркости, λ — полосы поглощения

Рисунок 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 пыленности, плотности и другим характеристикам (рисунок 15 16).

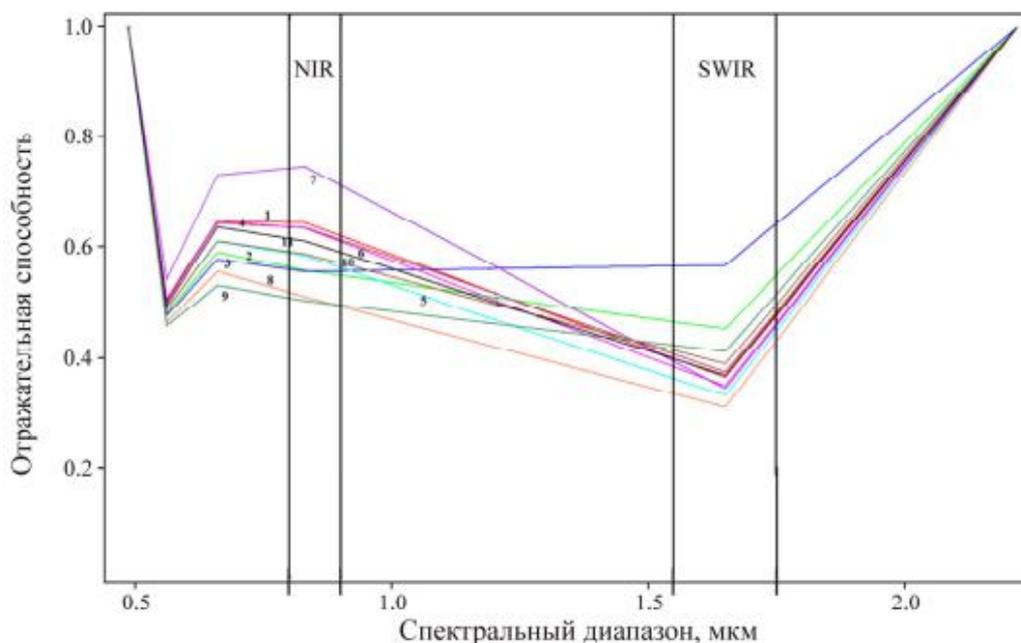


Рисунок 15 – Различные отражательные способности от состояния снега

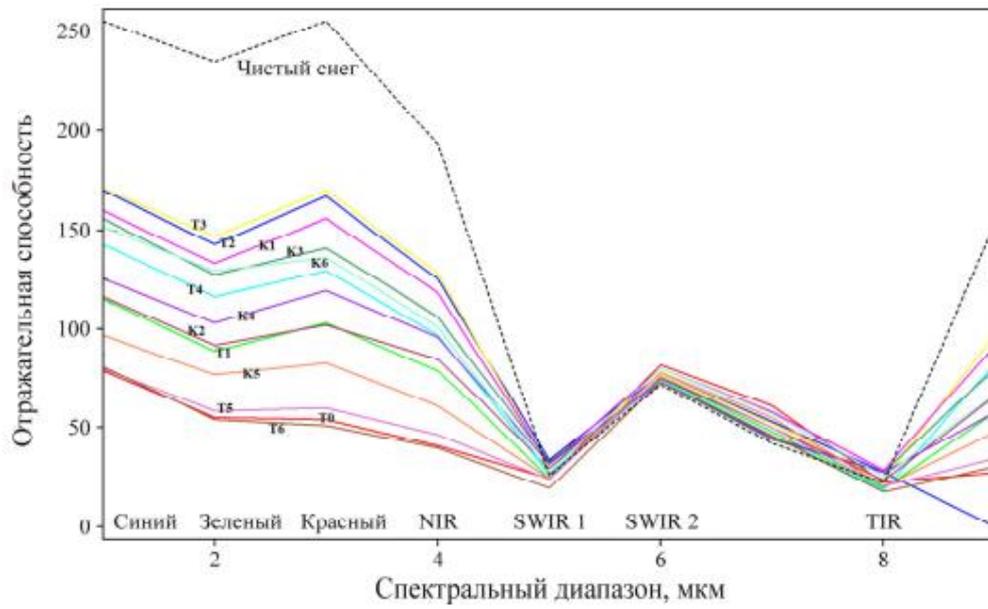


Рисунок 16 – Спектральные кривые отражающей способности снега в разных состояниях.

Глава 2. Методы дешифрирования

2.1. Исходные данные по перевалу Камчик, Тянь-Шань

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 17).

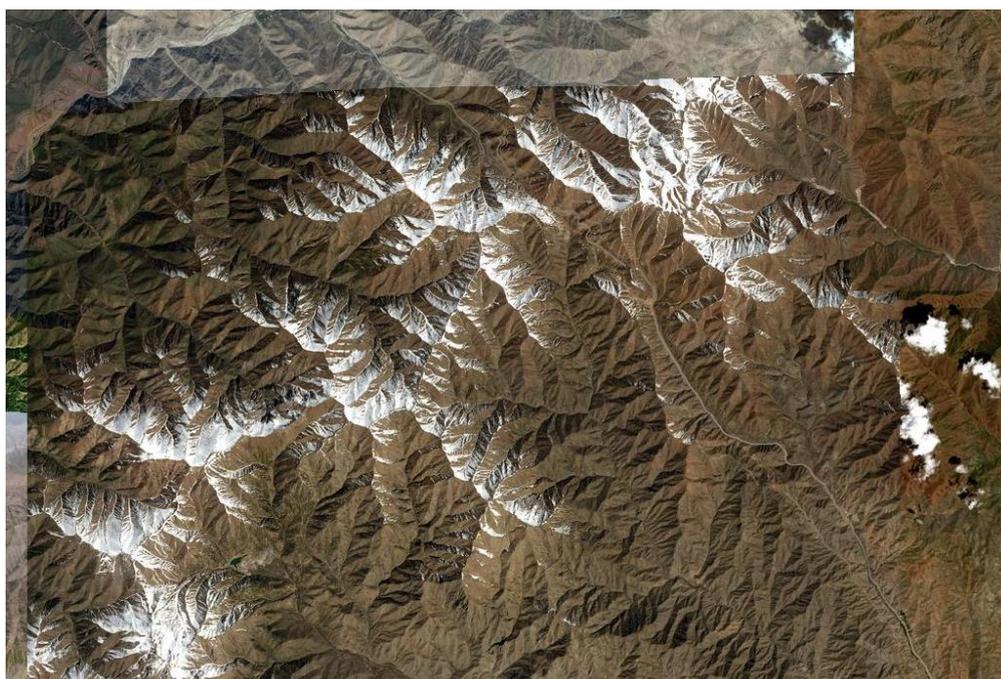


Рисунок 17 – Перевал Камчик (яндекс карта)

Перевал Камчик - это 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 была обеспечена снежными заслонами. На самых опасных участках дороги возвели 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 18).



Рисунок 18 – Перевал Камчик (фото из архива местной метеослужбы)

В своей выпускной квалификационной работе я буду использовать результаты снегосъемок, предоставленные местным метеобюро.

Были получены и сформированы таблицы снегосъемок за зимний сезон 2020-2021 с Ноября по Март.

Данные снегосъемок предоставленные местным УГМС представлены ниже на рисунках (19) (20):

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	10	30	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 19 – Пример данных по снегосъемкам

№ п/п	№ Рейз	№ л/с	Высота установки н.у.м.	Экс позиция	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 20 – Пример данных расположения снегомерных реек

2.2. Инструментарий

В ходе работы был выбран источник спутниковых изображений – американский сайт EARTHDATA LAADS DAA, который бесплатно предоставляет доступ к различным снимкам во всех спектрах, доступных для метеорологических спутников (рисунок 21).

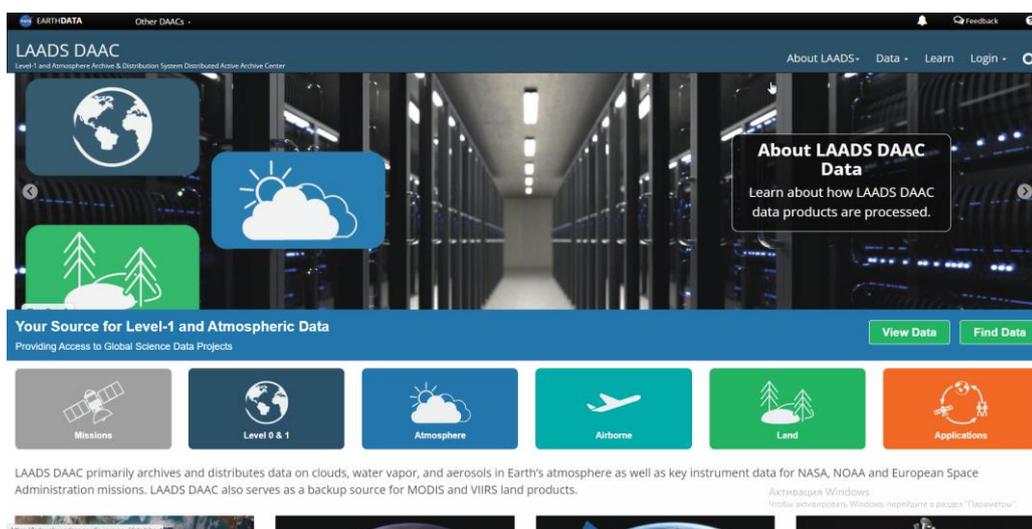


Рисунок 21 – Сайт EarthData, который я использую в своей работе

На данном сайте, исходя из задачи пользователя можно выбрать из списка любой подходящий спутник, его оборудование и необходимые каналы съемки (рисунок 22).

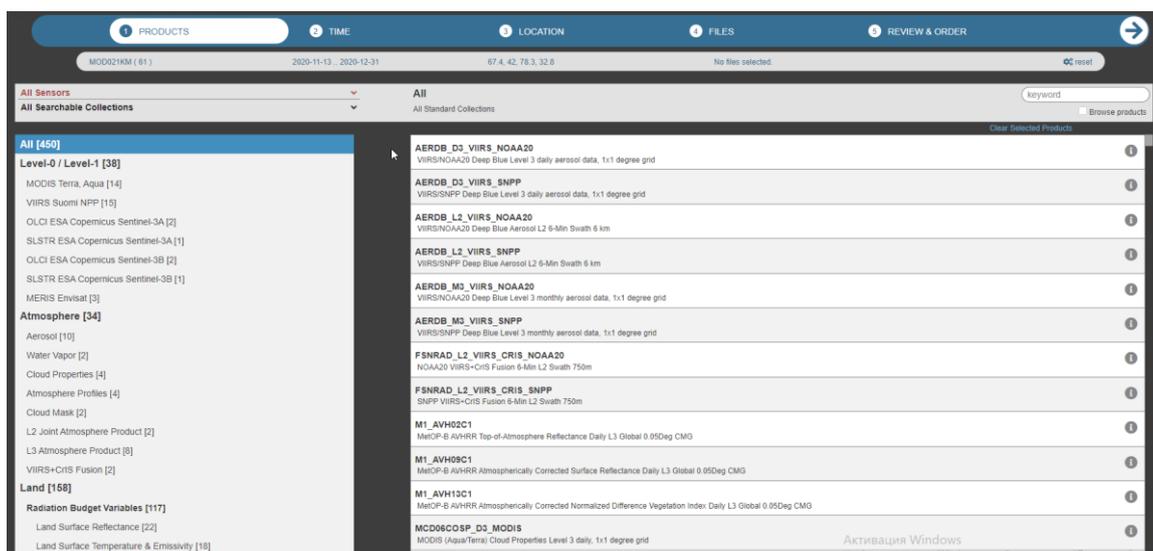


Рисунок 22 – Выбор спутника и канала съемки для моей работы

В моем случае я буду использовать MODIS Terra Aqua, в каналах MOD021KM Level 1B Calibrated Radiances 1km.

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 аппаратуры 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 23).

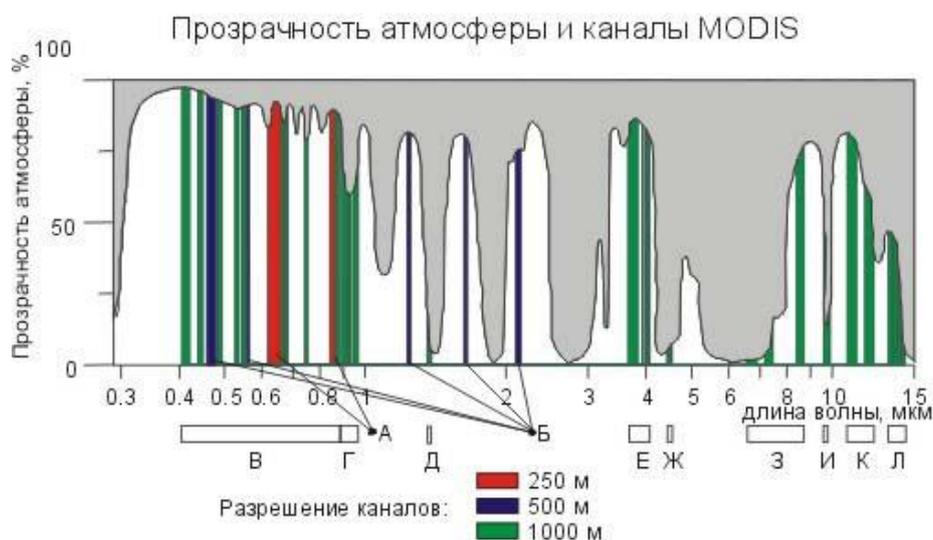


Рисунок 23 – Прозрачность атмосферы и каналы MODIS

На этом сайте далее необходимо выбрать время съемки и месторасположение объекта. В моем случае это перевал Камчик зимой 2020-2021 (рисунок 24).

Рисунок 24 – Выбор данных по дате

Последний шаг для получения данных, с которыми в последующем необходимо будет работать – выбор локации (рисунок 25).

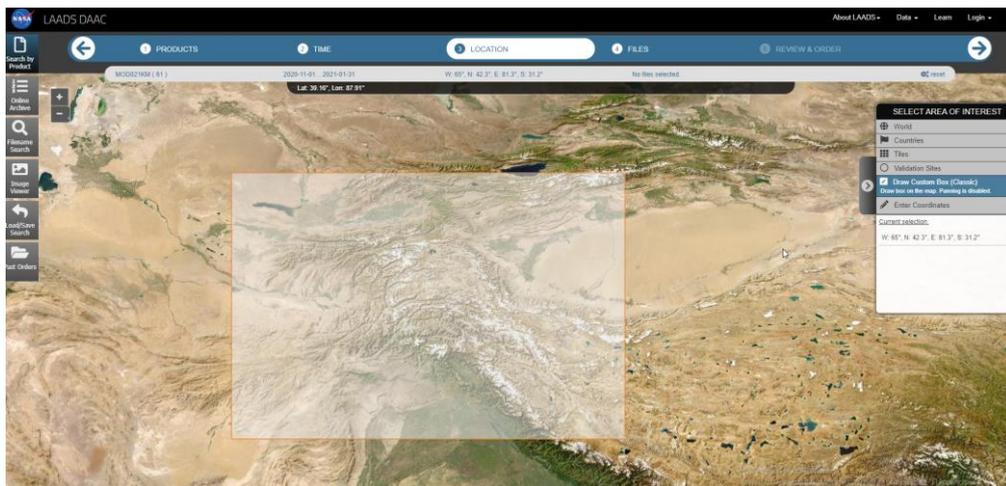


Рисунок 25 - Выбор локации съемки

После выполнения всех шагов я получил спутниковые съемки перевала Камчик за нужный мне промежуток времени, которые мне нужно обработать для дешифровки снега на перевале в местах снегосъемок.

Мною были опробованы такие программы для обработки как: Idrisi Kilimanjaro, QGIS, ARGIS, SNAP. Далее из опробованного обширного вида программ для обработки и работы со спутниковыми снимками я остановился на программе SNAP (аналог VISAT), который очень удобен, оптимален в функциях, и предоставляет обширный набор инструментов (рисунок 26).

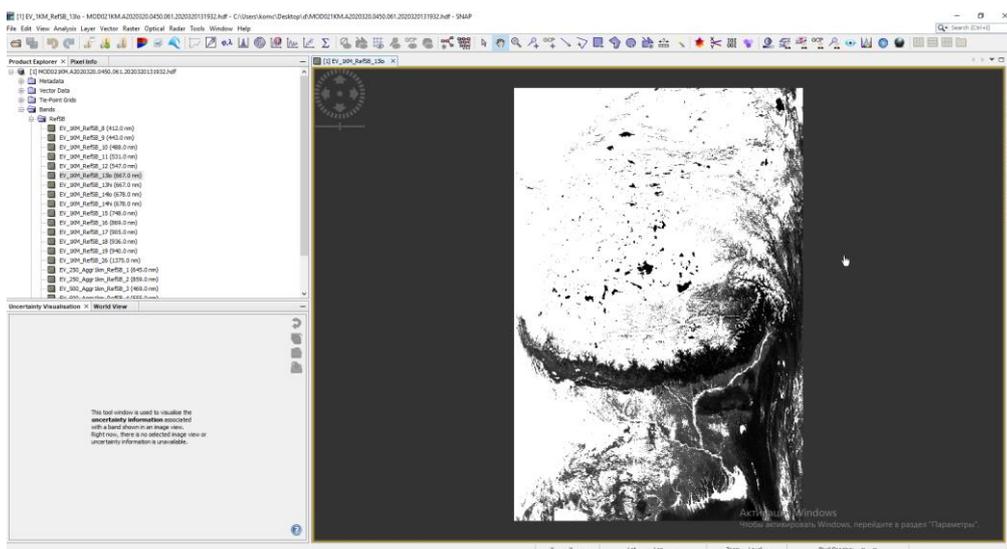


Рисунок 26 – Приложение для обработки SNAP

После выбора снимков необходимо проверить географическую привязку (рисунок 27).

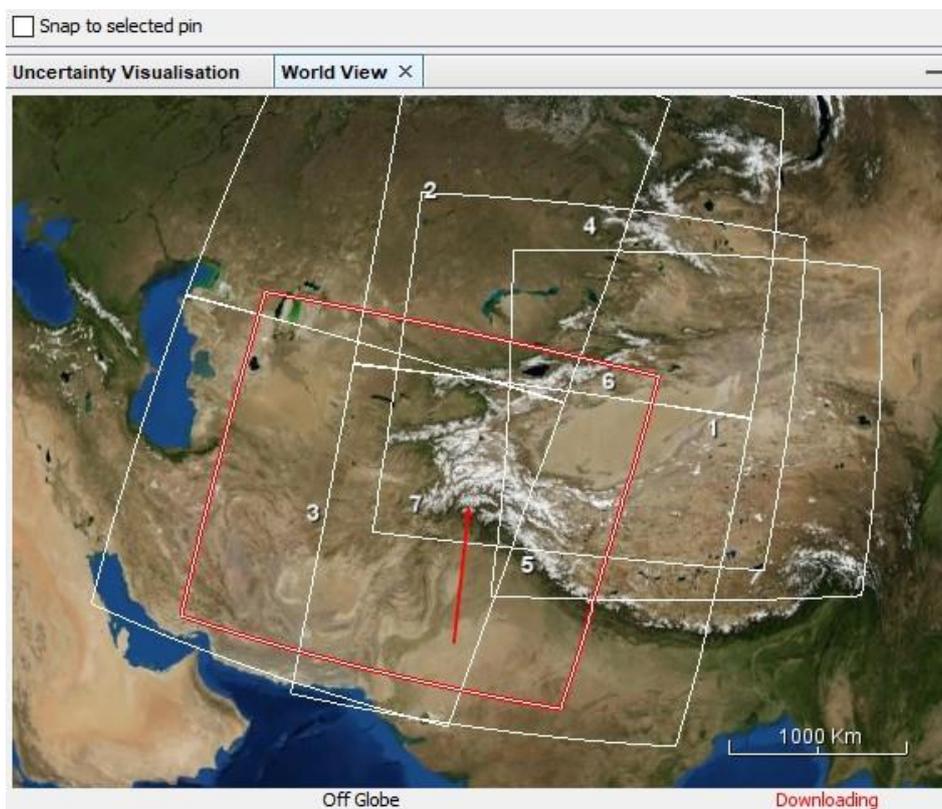


Рисунок 27 – Проверка геометрической привязки снимков

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 пикселя дает представление о дешифрируемом объекте. Принято считать, что яркость пикселя 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 27).

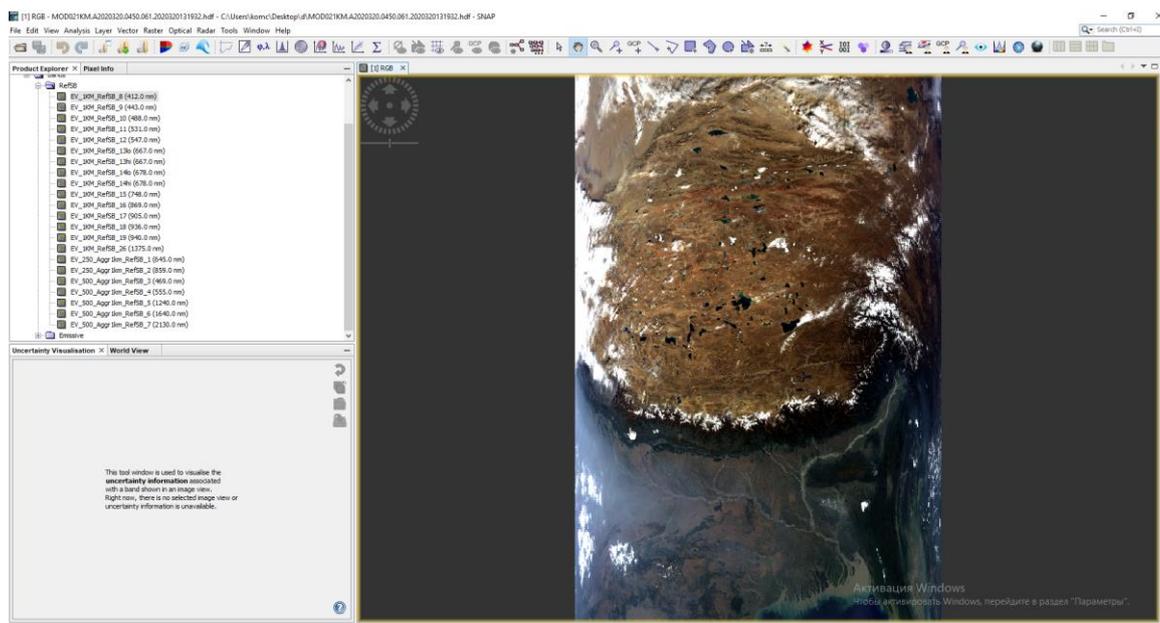


Рисунок 28 – Визуальное обнаружение снега.

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:

- 1) Изучение местности работы
- 2) Поиск объектов работы
- 3) Подбор средств для решения задачи
- 4) Дешифрация снимка и его проверка достоверности;
- 5) 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. Необходимо обратить внимание на некоторые особенности.

Например, самое простое свойство – яркость изображения, которая может зависеть не только от яркости объекта, но также от его температуры, влажности, влагосуждения (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.

Особой разновидностью является дешифрование, которое основано на статистических данных о пространственных параметрах, таких как форма и размер, структура и текстура.

Индикационными таблицами отмечают связи между типом (состоянием) индикатора и соответствующими дешифрируемыми объектами. [4].

Так, одним из примеров необычной дешифровки может служить белая текстура на склонах горы, которая указывает на наличие снега в горной 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].

При визуальном распознавании снега и льда обычно используется синтез каналов, в которых снег и лед имеют голубой или белый цвет. В каналах «естественный цвет» снег имеет ярко-белый оттенок, а ледовый покров – прозрачность. Описанные спектральные характеристики используются для автоматического выделения площадей, покрытых снегом на спутниковых снимках. Дешифрирование снежных покровов позволяет первоначально определить площадь, покрытую снегом, а после получить зависимую от этого информацию.

Приведенные выше признаки и используемые на них приемы дешифрирования дают лишь краткое представление о реальных работах, основанных на профессиональных компетенциях конкретных специалистов. Однако, содержательный аспект и конечные результаты определяются уровнем специалистов по дешифрированию.

2.2.1. Метод RGB синтезирования

При цветовом синтезе спутниковых изображений спектральные каналы одного спутникового изображения преобразуются в одно изображение (рисунок 29).

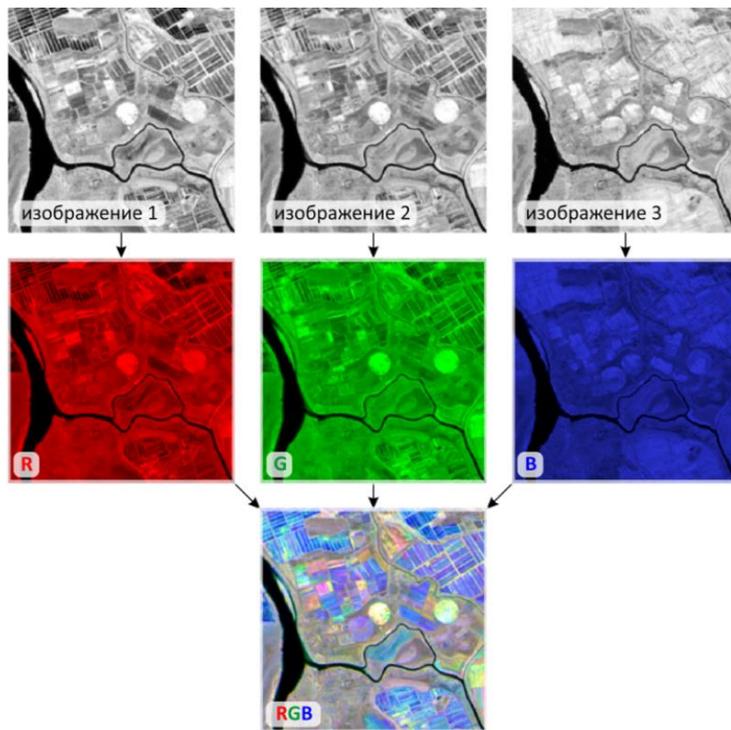


Рисунок 29 – Принцип RGB синтеза изображений

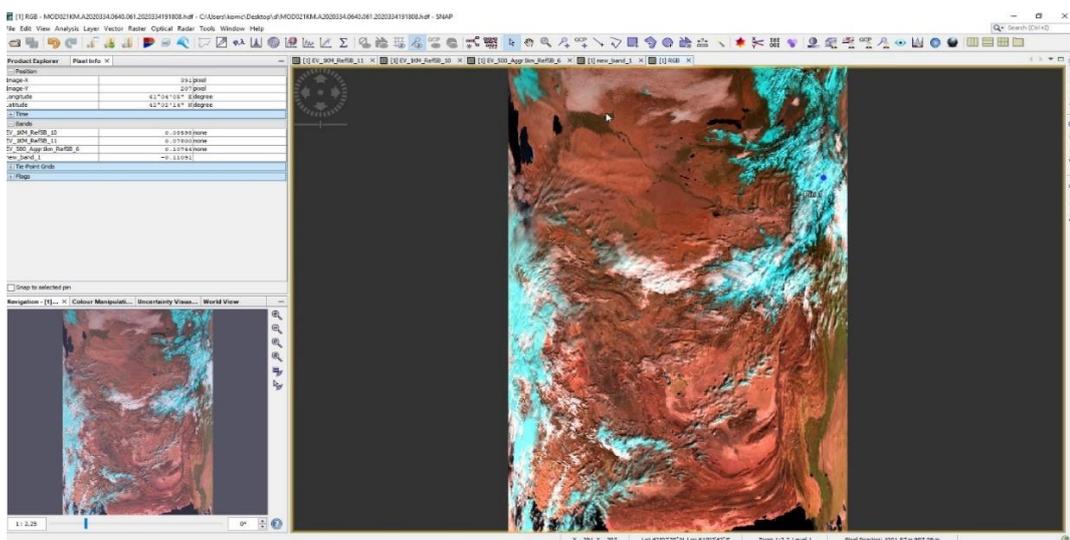


Рисунок 30 – Пример синтезированного изображения

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

Для работы с первым методом дешифрирования, 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:

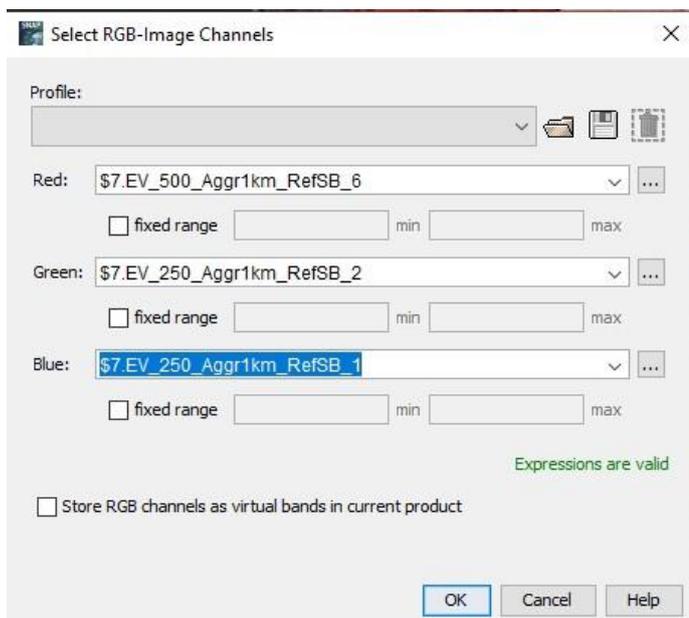


Рисунок 31 – Выбор каналов RGB синтеза

В своей выпускной работе я на практике составил архив палитр, которые представляют наибольшую информативность для определения месторасположения снега. Составленные мною комбинации для приложения SNAP аппаратуры MODIS представлен ниже:

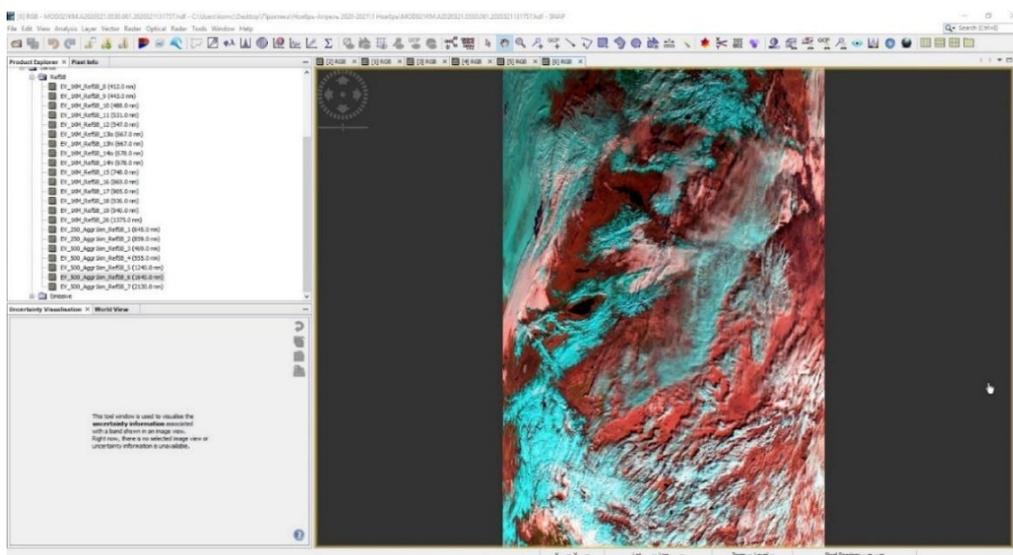


Рисунок 32 – Комбинация 1 Каналы: R (1.6нм) G (0.8нм) B (0.6нм)

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.

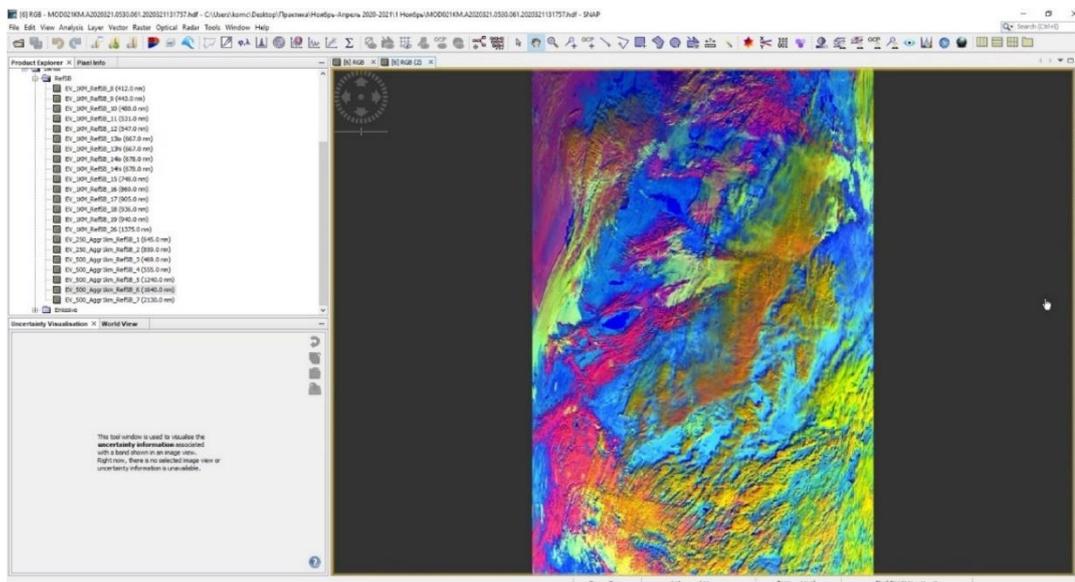


Рисунок 33 – Комбинация 2 Каналы: R (0.6нм) G (1.6нм) B (12.0нм)

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

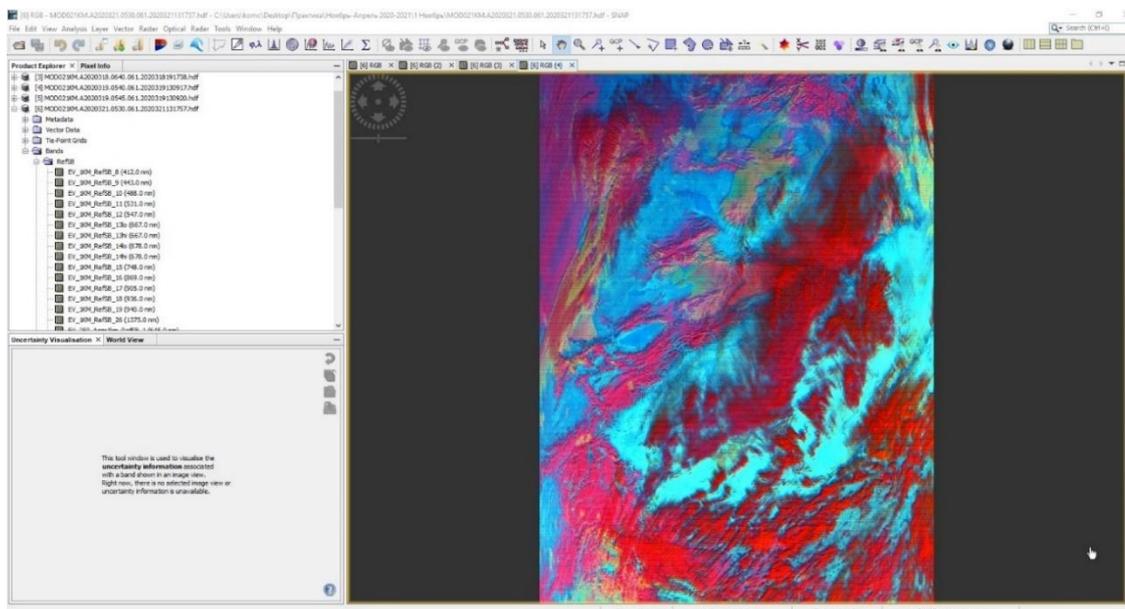


Рисунок 34 – Комбинация 3 Каналы: R (0.6нм) G (3.9нм) B (10.8нм)

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

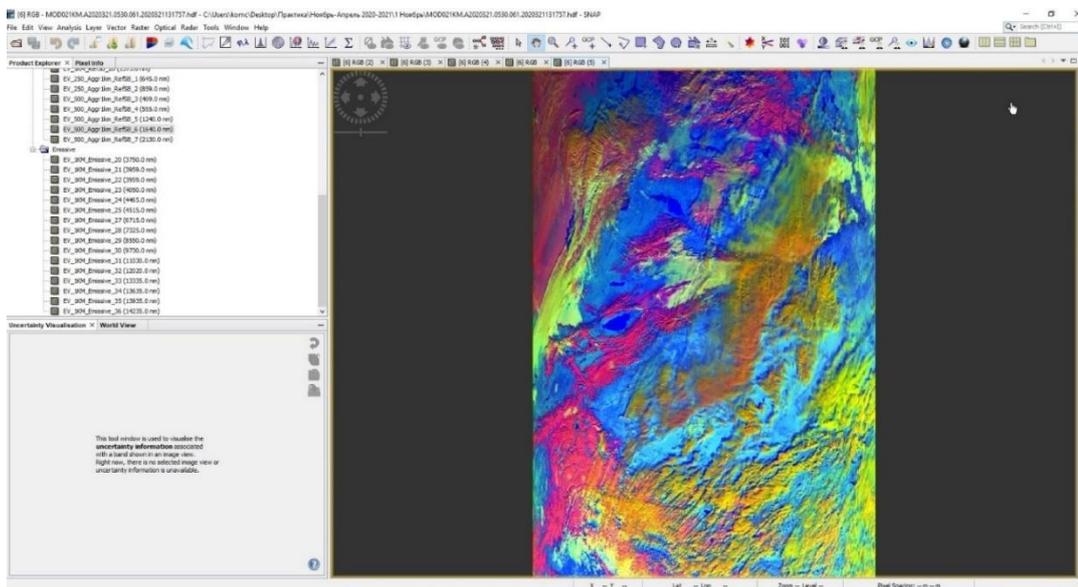


Рисунок 35 – Комбинация 4 Каналы: R (0.6нм) G (1.6нм) B (10.8нм)

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.

Мною, в ходе моей работы было выполнено вручную большое количество RGB синтезирования. Для будущих работ можно взять на заметку то, что в будущем будет возможно подключить к обработке машинное обучение и искусственный интеллект или алгоритм программы для автоматической обработки, как представлено в крупных государственных структурах. Однако нужно заметить, что полностью исключить человека-дешифратора невозможно.

Состав моего архива снимков сформировался благодаря тому, что в среднем спутник Terra пролетал над исследуемой в моей работе территорией

в среднем 2-3 раза. В моей работе я изучал снимки не только за даты снегосъемок, но и даты вокруг. В конечном этапе у меня получилось собрать архив из более чем 500 обработанных снимков.

Было обработано более 500 снимков, которые соответствуют предоставленным мне данным снегосъемок на промежуток зимы 2020-2021 и создана архивная база синтезированных RGB изображений, на которые были нанесены пункты снегосъемок местного УГМС. Необходимо отметить, что присутствует погрешность в нанесении точек съемок на карту для будущей обработки.

В ходе своей работы я решил остановиться на своей комбинации 1, так как она для меня является наиболее подходящей с визуальной точки зрения.

Ниже представлены несколько примеров из моего архива обработанный спутниковых снимков:

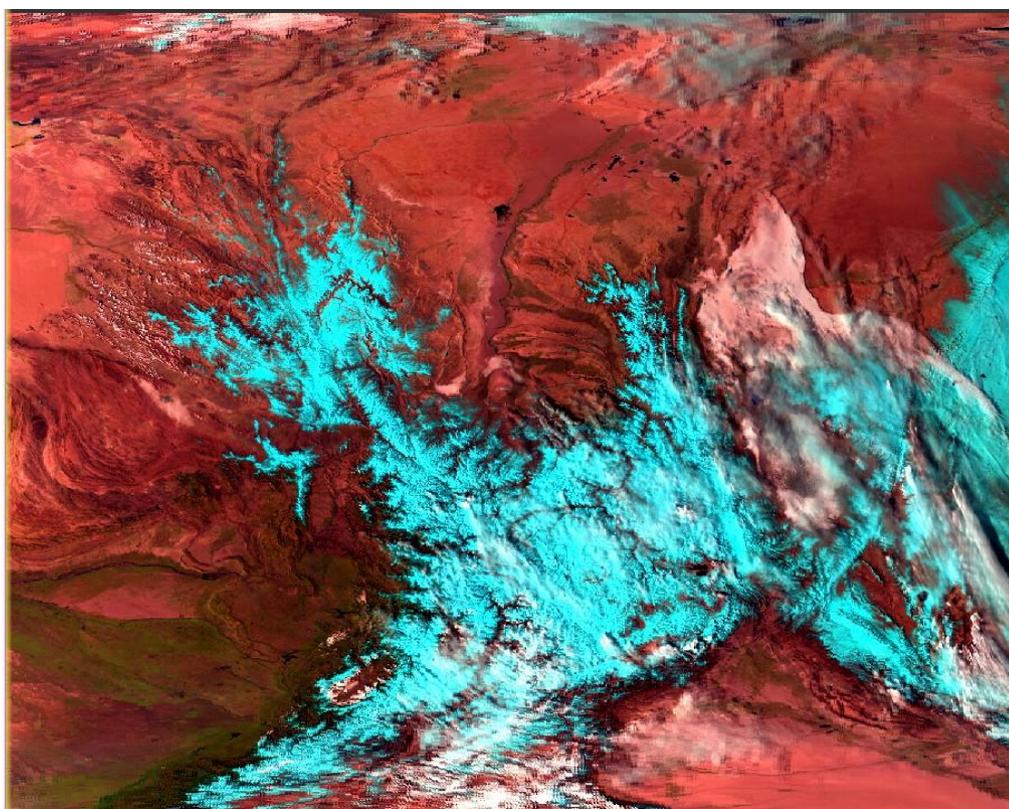


Рисунок 36 – Комбинация 1 2020 Ноябрь 13 число. День снегосъемок.

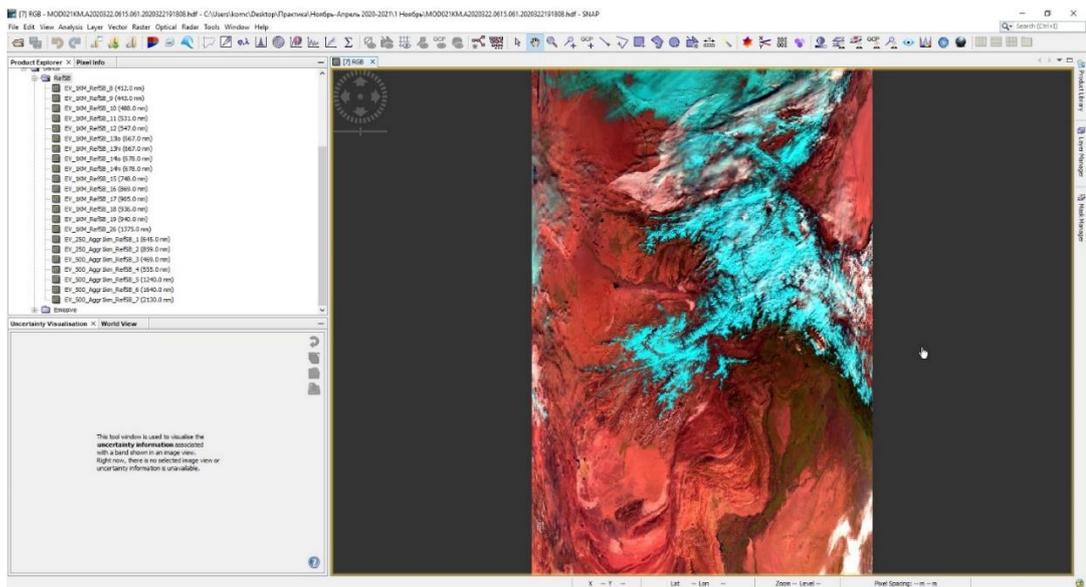


Рисунок 37 – Комбинация 1 2020 Ноябрь 14 число.

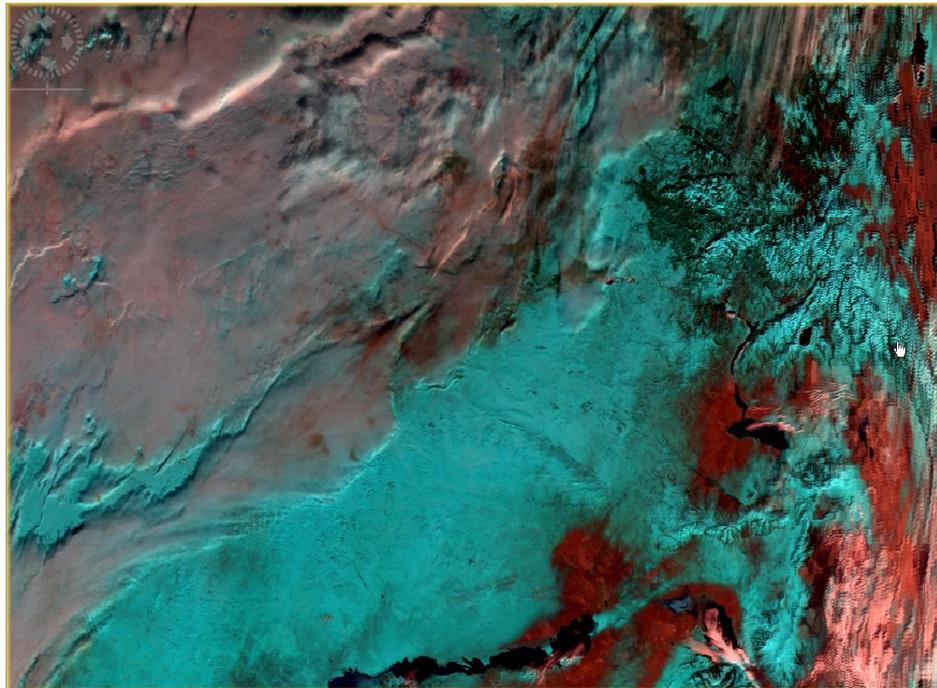


Рисунок 38 – Комбинация 1 2020 Декабрь 17 число. Перевал в правом углу снимка.

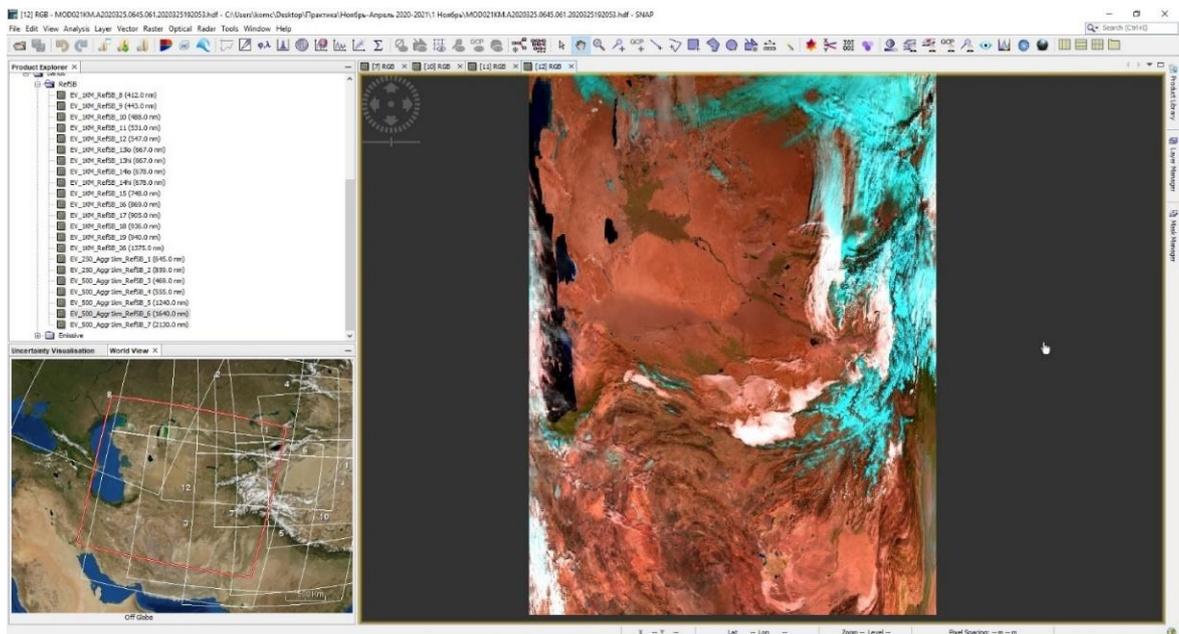


Рисунок 39 – Комбинация 1 2020 Ноябрь 20 число. Перевал в правой части снимка.

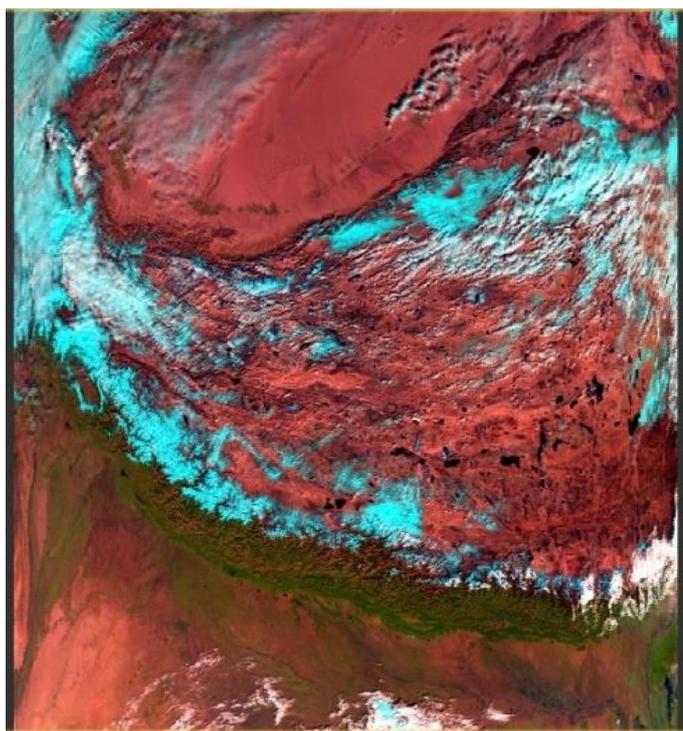


Рисунок 40 – Комбинация 1 2020 Декабрь 23 число. Перевал в левой части снимка.

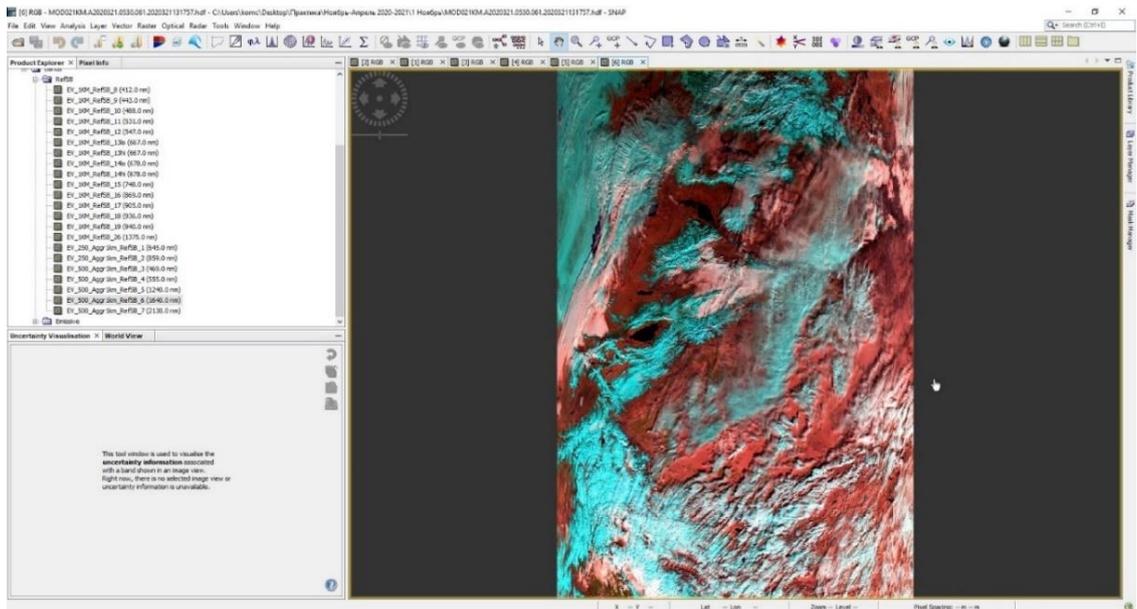


Рисунок 41 – Комбинация 1 2020 Январь 10 число. Перевал в центре снимка. День снегосъемок.

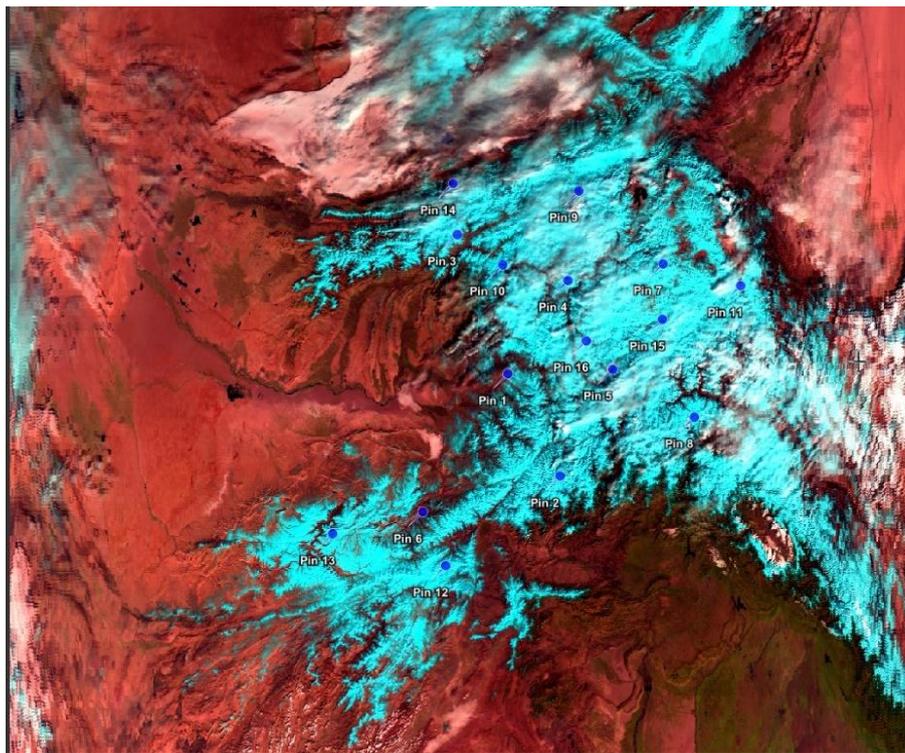


Рисунок 42 – Комбинация 1 2021 Февраль 11 число. День снегосъемок. На данном снимке указаны места снегосъемных реек для дальнейшего использования их в моделировании толщины снежного покрова.

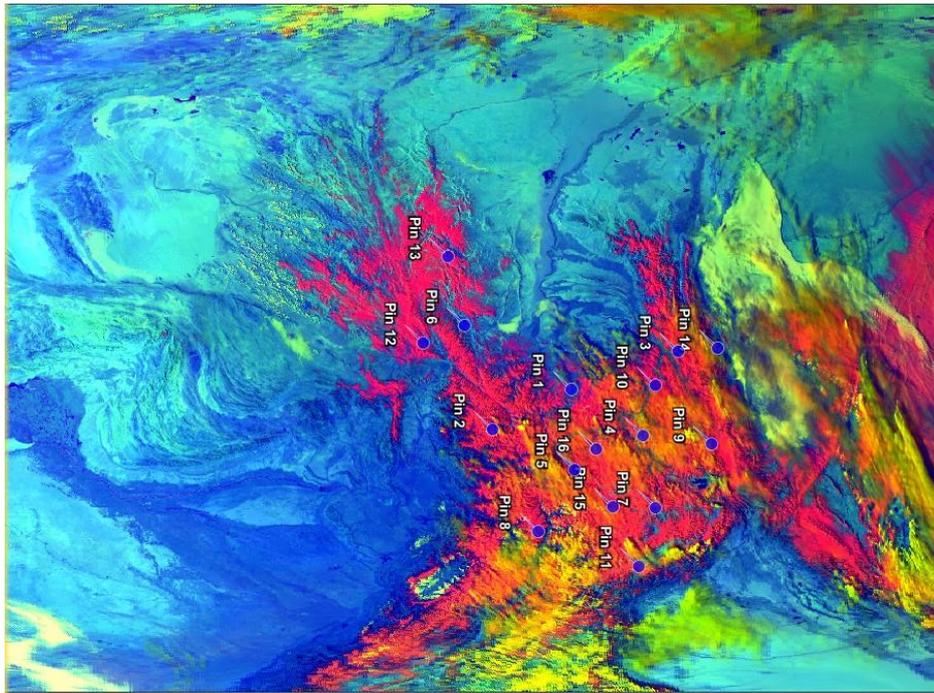


Рисунок 43 – Палитра 2 2021 Февраль 22 число. Перевал в центре снимка. День снегосъемок.

2.2.2. Метод индекса снега NDSI

Для того, чтобы разграничить снеговой покров и облака, используется индекс. Нормализованный разностной снежный индекс NDSI для отделения облаков от снега на крупномасштабных снимках (многоспектральные снимки) (рисунок 44).

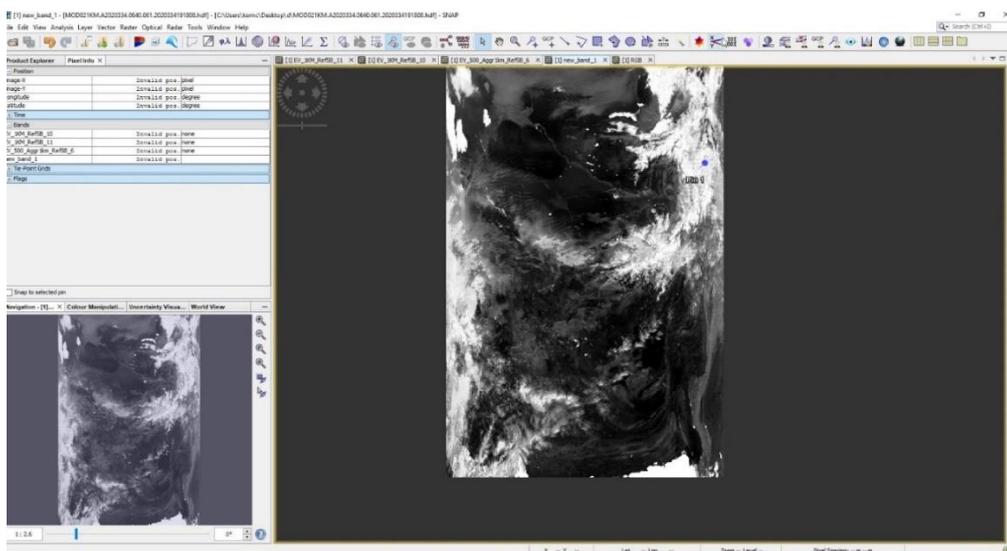


Рисунок 44 – Пример использования индекса снега

Показана возможность использования индекса NDSI для того, чтобы отделить снег от облачности.

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). Облака и снег являются самыми яркими объектами. Яркость снегового покрова стабильна в течение дня, а облачность изменяется во времени. Это значит, что суммарная яркость облачного покрова за определенный промежуток времени больше, чем снега. Интенсивность яркости облаков и льда понижается, если они находятся в жидкой форме. Тающий снег и дождевых облака имеет относительно невысокую яркость по сравнению с ближней частью ИК-спектру.

Для выделения территорий, покрытых снегом, рассчитан нормализованный дифференциальный индекс снега NDSI по формуле. NDSI — это относительная величина, характеризующаяся различием отражательной способности снега в красном (RED) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах. Для снега $NDSI > 0.4$.

Для работы со вторым методом дешифрирования, которым я буду пользоваться в своей выпускной работе необходимо открыть в приложении SNAP расширенный калькулятор каналов съемки. Необходимо подставить нужную формулу, в моем случае индекса снега, как показано на рисунке ниже:

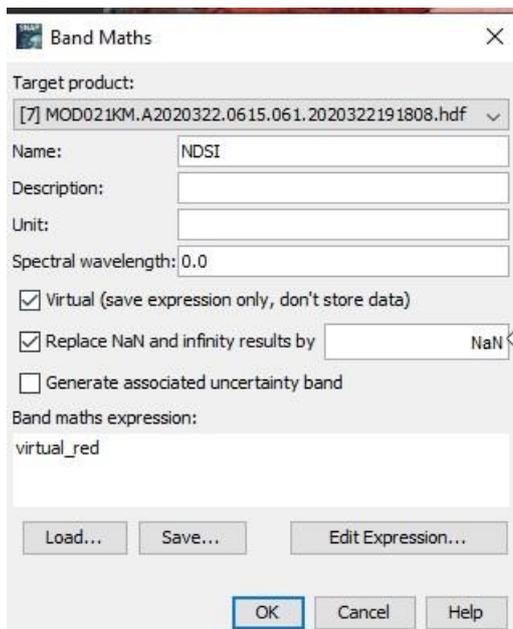


Рисунок 45 – Выбор индекса

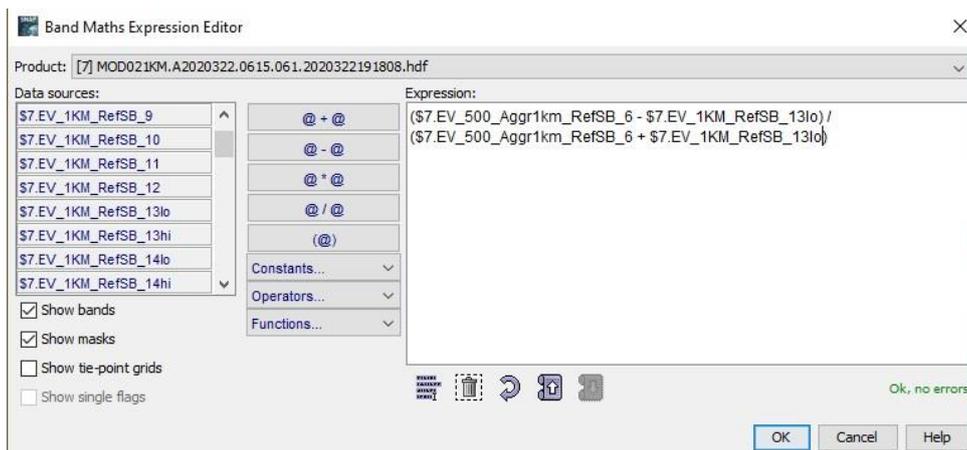


Рисунок 46 – Калькулятор каналов

Мною, в ходе моей работы было выполнено вручную большое количество расчетов NDSI индекса снежного покрова. Для будущих работ можно взять на заметку то, что в будущем будет возможно подключить к обработке машинное обучение и искусственный интеллект или алгоритм программы для автоматической обработки, как представлено в крупных государственных структурах. Однако, нужно заметить, что полностью исключить человека-дешифратора невозможно.

Состав моего архива снимков сформировался благодаря тому, что в среднем спутник Terra пролетал над исследуемой в моей работе территорией в среднем 2-3 раза. В моей работе я изучал снимки не только за даты снегосъемок, но и даты вокруг. В конечном этапе у меня получилось собрать архив из более чем 500 обработанных снимков.

Было обработано более 500 снимков, которые соответствуют предоставленным мне данным снегосъемок на промежуток зимы 2020-2021 и создана архивная база обработанных с помощью индекса снега NDSI изображений, на которые были нанесены пункты снегосъемок местного УГМС. Необходимо отметить, что присутствует погрешность в нанесении точек съемок на карту.

Ниже представлены несколько примеров из моего архива обработанный спутниковых снимков. Для этого использовался синтез каналов 6 (1.6 нм) и 1 (648 нм).

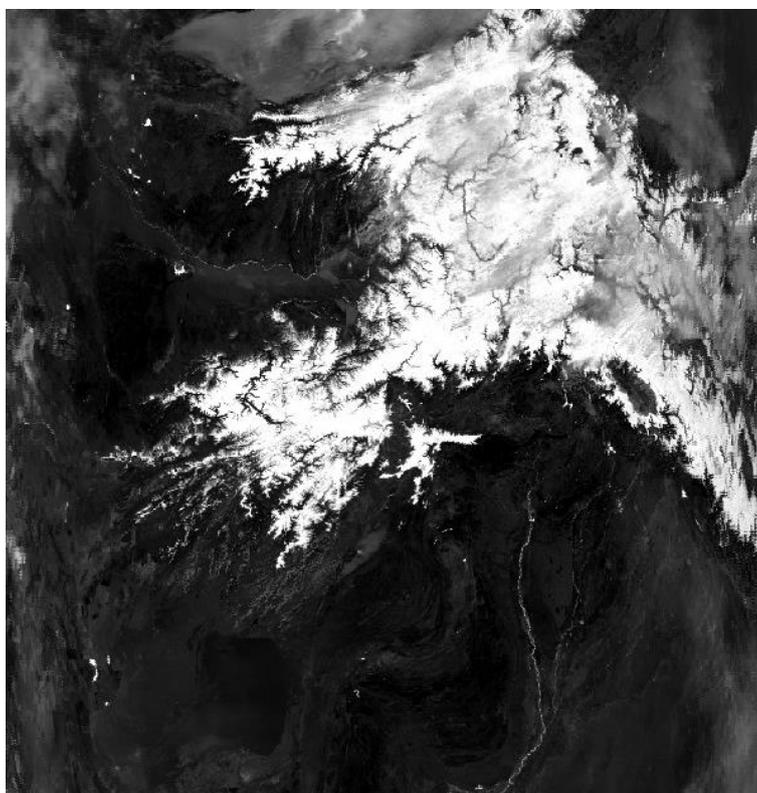


Рисунок 47 – Индекс снега 2020 Ноябрь 13 число.

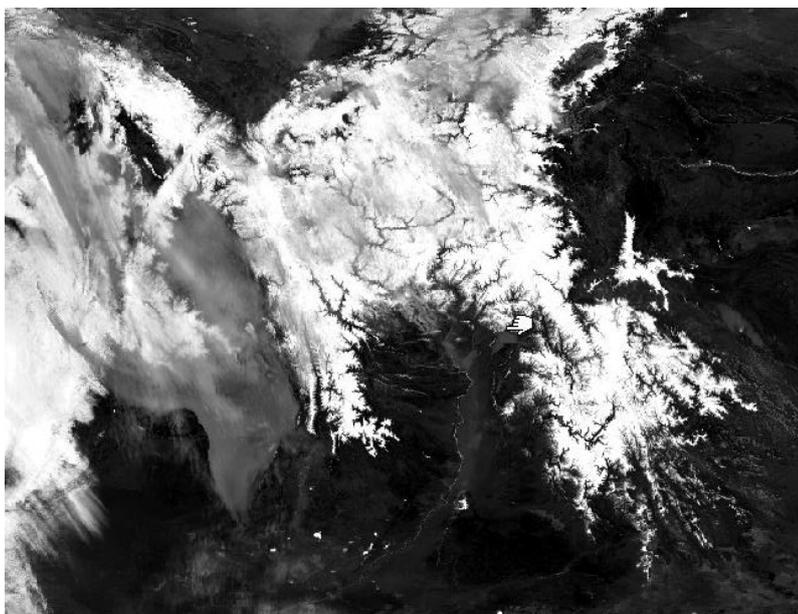


Рисунок 48 – Индекс снега 2020 Ноябрь 14 число.

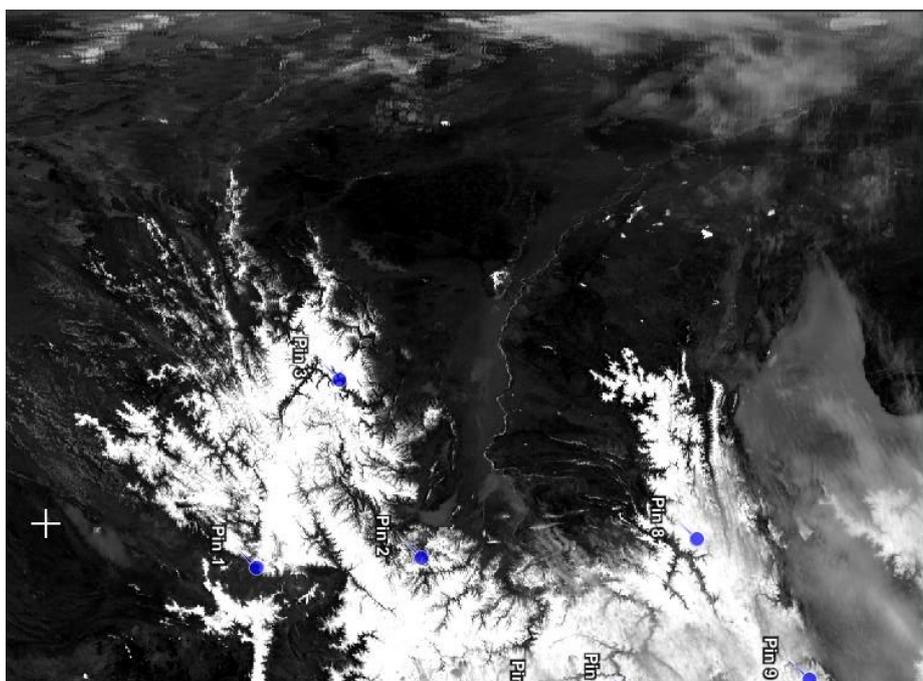


Рисунок 49 – Индекс снега 2020 Декабрь 10 число. День снегосъемок. Снегосъемные рейки отмечены на снимке для будущего моделирования толщины снега.

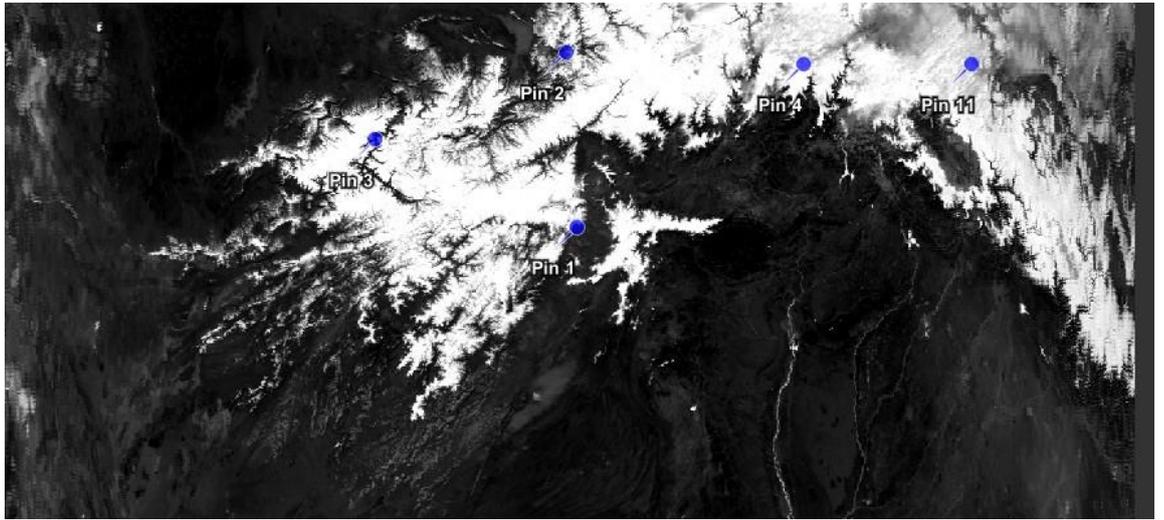


Рисунок 50 – Индекс снега 2020 Ноябрь 29 число. День снегосъемок. Снегосъемные рейки отмечены на снимке.

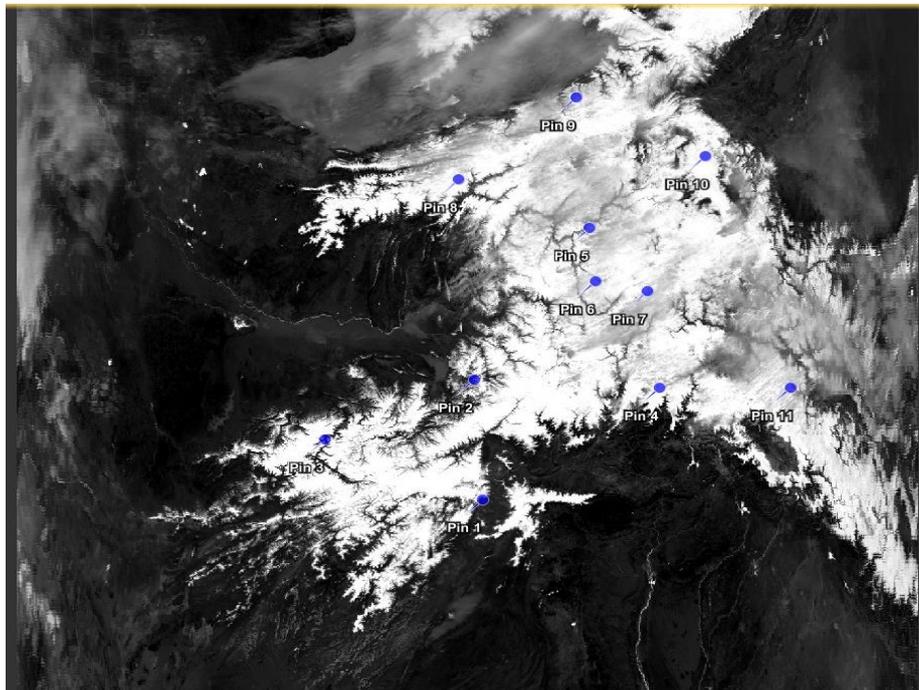


Рисунок 51 – Индекс снега 2021 Февраль 22 число. Перевал в центре снимка. День снегосъемок. Снегосъемные рейки отмечены на снимке.

После проведенной проверки снимков все значения яркостей пикселя составили не менее 0.60, что удовлетворяет условие для индекса снега, $NDSI > 0.4$ и можно говорить о том, что данный пиксель на месте расположения рейки действительно является снегом.

Глава 3. Моделирование толщины снежного покрова по спектральным данным

3.1. Существующие модели

На сегодняшний день существует огромное количество моделей снега, в том числе и комплексные схемы подстилающего слоя, в которых содержится описание снежной поверхности. В связи с тем, что снег является наиболее активным элементом климата, многослойные модели снега были предложены для использования в климатических моделях по всему миру.

В 1992 г. был проведен международный проект по измерению схем поверхности подстилающих поверхностей – PILPS (Project for the Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes) в ходе которого была проанализирована работа 30 моделей (Российские – SPONSOR и SWAP)

На данный момент времени в состава - Global Land Atmosphere System Study (GLASS). Было проведено 4 тестирования моделей PILPS, в том числе, снега. В рамках моделей есть сравнение прогнозов водного эквивалента снега, а также других характеристик, полученных по моделям снежного покрова.

По результатам исследования были составлены классификационные схемы и схемы снежных покровов, включающие в себя четыре класса по температуре снега и количеству поглощенной радиации. Международная комиссия по снегу и льду (позднее – Комиссия по науке Криосфера) организовала еще один проект, в ходе которого сравнивались 26 моделей снегового покрова для оценки того, насколько успешно они прогнозируют различные метеорологические элементы.

В первом проекте ES1404 тестировались использования измерений характеристик снежного покрова.

Включало в себя изучение особенностей оснеженного покрова, методов измерения и применения в составлении прогнозов. Кроме того, развитие

методов изучения данных о снежном покрове в модели прогноза и гидрологии, а также методов оценки качества полей измерений.

Второй проектной моделью SNAPS (Snow, Ice and Avalanche Applications) улучшилось моделирование снежного покрова где снег и лавины могут представлять угрозу.

В рамках проекта были разработаны карты характеристик снежных покровов, спутниковые данные, измерения и результаты моделируемых моделей атмосферы, прогнозы лавинной опасности и сброса снегового покрова. Сходные подходы в описании снежной массы, применяемые для моделирования климатических и гидрологических задач, нашли широкое применение в параметризации прогнозов погоды на основе данных о погоде. Динамики снега и их модели позволяют решить не только гидрологические задачи, но климатические. Для описания процессов в снежном покрове на горных территориях существует отдельная задача, которая может быть реализована (в частности, модель снежных покровов в бассейнах). Данные о метеорологических характеристиках можно получить из данных, полученных наземными и дистанционными станциями, или из глобальных баз данных. Базы данных могут быть сформированы в результате реанализов или их гибридизации с данными наблюдений наземного и дистанционного наблюдения.

Также существуют гидрологические модели, которые учитывают процессы, протекающие в снежном покрове. Например, гидравлическая модель HECRAS (HEC-Ras).

Моделируется фазовый переход между составляющими снегового покрова. Для определения толщины и плотности слоев снега необходимо учитывать не только толщину, плотность и размер контактирующих друг с другом зерен, а также микроструктуру. Первоначально модель была разработана для использования противоположными организациями

Швейцарии в прогнозировании лавинных явлений. Однако в дальнейшем ее использование было значительно расширено.

В последнее время модель "SNOWPACK" используется для оценки влияния снегового покрова, определения баланса масс и энергии снежного покрова в Арктике, подсчета миграции растворов химических веществ в снежных покровах. Отечественные ученые достигли значительных успехов по прогнозированию лавинных рисков.

Моделировать снежный покров довольно трудоемкая задача, так как его свойства могут меняться в зависимости от климатических условий. Для прогнозирования погоды важно знать начальные данные о плотности, высоте и водном эквиваленте снежных масс, так как от этого зависит правильность прогноза приземного климата. При численном моделировании снежного покрова используются схемы, описывающие процесс подстилающего снега. При этом сложность параметризации снежного покрова зависит от того, какие задачи ставит перед собой атмосферная модель.

Модель параметризации совпадающая с моделью прогнозирования погоды используется во многих метеорологических центрах Европы, таких как HIRLAM (High Resolution Limited Area Model), ALADIN (Aire Limitee Adaptation dynamique Developpement InterNational), COSMO (The Consortium for Small-scale Modelling). Также необходимо отметить то, что некоторые модели снега изначально разрабатывались для решения конкретных задач по прогнозированию погоды, а затем использовались в задачах численного моделирования. Помимо этого, некоторые модели используются для климатических расчетов. Например, локальное теплобалансовое моделирование климатологии. SPONSOR лаборатории климатологии Института географии РАН, RAMS, BATS.

Главной характеристикой снежной массы является ее плотность, а не объем. Снежный покров изменяется в зависимости от различных 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 снежного 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

свежевыпавшим 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.NDSI) можно приступить 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 52).

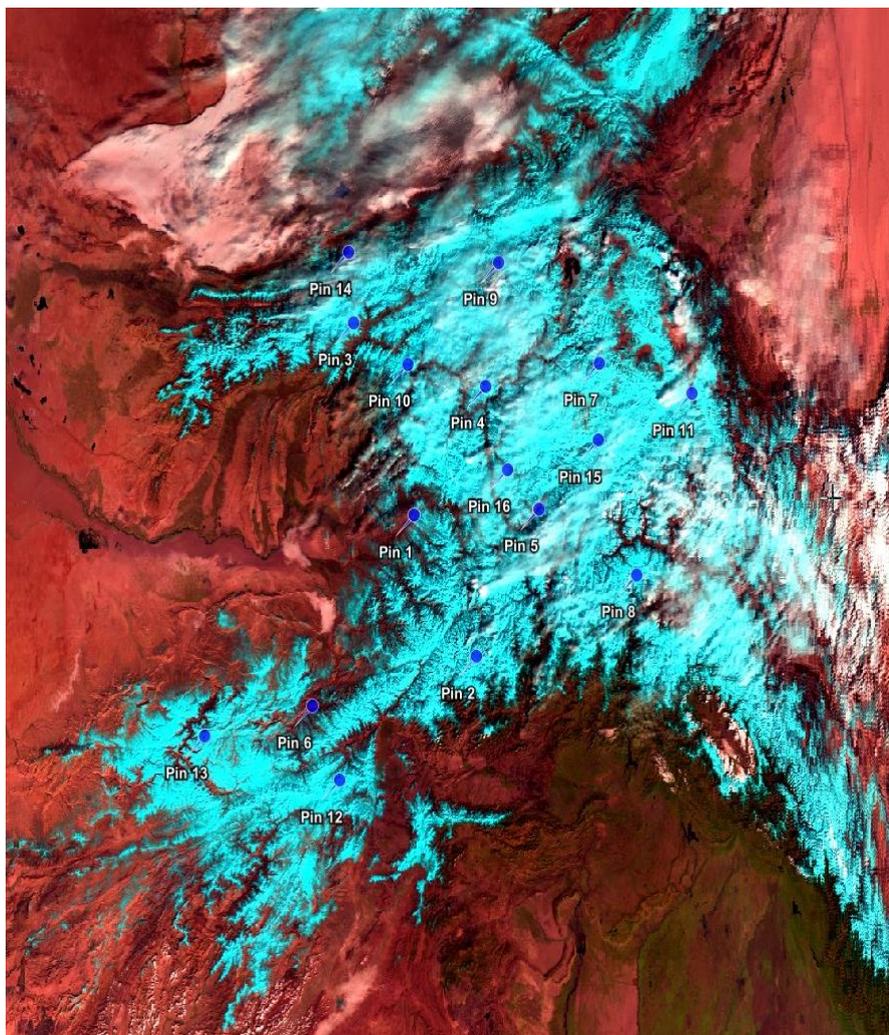


Рисунок 52 – Пример обработанного снимка с отмеченными рейками.

Моделирования высоты снега по спектральным данным будет производиться в программе Microsoft Excel инструментом «Регрессионный анализ».

Для достижения цели своей работы я составил таблицы в эксель с осредненными значениями снегосъемных реек и привел для каждой рейки значения яркости пикселя в данном месте (рисунок 53).

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 500-1000м, 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.

Снег (см)	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Порядок	Снег (см)	Канал 1	Канал 2	Канал 3
20	0,7	0,16	0,45	1	20	0,7	0,16	0,45
40	0,77	0,2	0,5	2	40	0,8	0,18	0,5
30	0,8	0,15	0,48	3	30	0,78	0,15	0,48
30	0,82	0,14	0,5	4	30	0,79	0,14	0,48
30	0,77	0,13	0,47	5	30	0,77	0,13	0,47
35	0,82			6	35	0,82	0,12	0,47
30	0,8			7	30	0,79	0,13	0,46
20	0,7			8	20	0,7	0,17	0,44
40	0,77			9	40	0,81	0,15	0,5
40	0,87			10	40	0,82	0,12	0,51
35	0,82			11	35	0,82	0,13	0,5
33,33333	0,8			12	33,33333	0,8	0,14	0,48
30	0,8			13	30	0,78	0,13	0,48
20	0,79			14	20	0,7	0,16	0,44
30	0,7			15	30	0,77	0,15	0,48
35	0,78			16	35	0,78	0,14	0,44
40	0,79			17	40	0,79	0,11	0,42
25	0,81			18	25	0,7	0,23	0,44
30	0,69			19	30	0,76	0,17	0,5
20	0,71			20	20	0,71	0,16	0,44
40	0,82			21	40	0,8	0,12	0,41
25	0,7			22	25	0,73	0,15	0,45
30	0,76			23	30	0,76	0,14	0,46
40	0,8			24	40	0,8	0,13	0,43
31	0,75			25	31	0,75	0,16	0,5
70	0,9			26	70	0,95	0,1	0,38
70	0,89			27	70	0,94	0,12	0,39
70	0,91			28	70	0,95	0,1	0,38
55	0,87			29	55	0,87	0,12	0,4
36	0,82			30	36	0,8	0,13	0,4
60,2	0,88			31	60,2	0,9	0,13	0,4

Вывод Итогов					
Регрессионная статистика					
Множественный R	0,985368				
R-квадрат	0,970951				
Нормированный Стандартный	2,557693				
Наблюдения	31				
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	значимость F
Регрессия	3	5903,707	1967,902	300,8201	7,51E-21
Остаток	27	176,6284	6,541792		
Итого	30	6080,335			
Коэффициентная статистика - значения критические 95% верхние 95% нижние 95% средние 95,0%					
Y-пересек	-111,728	13,41872	-8,32628	6,18E-09	-139,261 -84,1951 -139,261 -84,1951
Перемен 1	207,0873	10,15011	20,40246	6,14E-18	186,261 227,9136 186,261 227,9136
Перемен 2	87,79921	25,71854	3,413849	0,002037	35,02913 140,5693 35,02913 140,5693
Перемен 3	-63,1052	13,61531	-4,63487	8,13E-05	-91,0415 -35,1689 -91,0415 -35,1689
Вывод остатка					
Наблюдения: заказан					
Остатки	1	18,88359	1,116406		
	2	38,15905	1,806954		
	3	32,67943	-2,67943		
	4	33,87231	-3,87231		
	5	29,48362	0,516377		
	6	38,96	-3,96		

Рисунок 53 – Регрессия для всего промежутка с данными снегосъемок

Был проведен регрессионный анализ по значениям для каждого месяца наблюдений и для всего промежутка вместе.

Было составлено оценочное уравнение толщины снега:

$$L = -111 + 207 \cdot F_{x1.6} - 63 \cdot F_{x0.6} + 87 \cdot F_{x0.8}$$

F – яркости пикселя со снегом в используемых каналах

x- используемый спектральный канал

L – толщина снега

Значение R² при надежности 95 процентов по каждому месяцу составили:

Ноябрь 0,781 Макс. Отклонение 4см.

Декабрь 0,864 Макс. Отклонение 3см.

Январь 0,997 Макс. Отклонение 0,5см.

Февраль 0,952 Макс. Отклонение 0,8см.

Март 0,972 Макс. Отклонение 2см.

Множественная линейная регрессия часто используемый метод статистики.

В своей работе я хочу просчитать, влияние спектральной яркости в разных каналах на вычисление толщины снежного покрова.

Интерпретация важных значений:

Множество R (0,985368) - множественная корреляция между переменной и переменными-предикторами.

R -квадрат: (0,970951) - 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 : (0,967723) - представляет собой значение R -квадрата, скорректированное с учетом количества переменных-предикторов в модели.

Стандартная ошибка (2,55) - среднее расстояние, на которое наблюдаемые значения отходят от линии регрессии.

Наблюдения - размер выборки набора данных регрессионной модели.

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 -111, 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 см от реальных замеров.

Погрешность можно объяснить необходимостью использования более четких изображений со спутников, а также возможно более точной географической привязкой. Возможно необходимо внедрить в модель большее число параметров, которые влияют на состояние снега.

Заключение

Нельзя недооценить полезность и необходимость синтезации моделирования и применения современной спутниковой информации для решения задач гидрометеорологии. Нужно внедрять опыт применения передовых технологий и развивать отвечающие современным вызовам методы дистанционного мониторинга и зондирования для решения задач гидрометеорологии.

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

1. Проанализировал исходные данные месторасположения и значения снегосъемных измерений. Произвел подбор необходимого программного обеспечения, таких как приложения QGIS ARGIS IDRISI SNAP и выбора используемого источника данных такого как NASA EARTH DATA.

2. Изучил основные методы дешифровки снежного покрова и применил методы RGB синтеза и метода индекса снега NDSI. Овладел навыком дешифровки спутниковых изображений с гидрометеорологическими элементами.

3. Создал архив обработанных мною спутниковых изображений посредством дешифровки методами Снежного Индекса NDSI и метода синтезированного изображения RGB. Также, составленные мной комбинации для RGB синтеза и архив обработанных снимков будет выложен в общий доступ в сети Интернет на сайте спутниковой обработки SNAP Instruments в виде инструмента для работы с изображениями спутника Terra MODIS.

4. Использовал модель регрессии для выявления зависимости высоты снега от спектральной яркости канала в пикселе спутникового изображения.

Считаю, что цель моей выпускной дипломной работы была раскрыта и достигнута в полной мере.

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. Симоненко Ю.В., Семенов П.В. Мониторинг снежного покрова в горах Тянь-Шань на основе данных дистанционного зондирования Земли. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2014 Argis <https://www.argis.com/>

9. Liu G., Chen Y., Wu R., et al. Spatio-temporal variations of snow cover over the Tianshan Mountains using MODIS data (2001–2016). Remote Sensing of Environment, 2019

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