



HAL
open science

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МЕРЗЛОТНЫХ
ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ: ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ И
ГОРНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ)**

Moisei Ivanovich Zakharov

► **To cite this version:**

Moisei Ivanovich Zakharov. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ: ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ И ГОРНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ). *Geography*. Aix-Marseille University; North-Eastern Federal University, 2021. Russian. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-03281453v1⟩

HAL Id: tel-03281453

<https://hal.science/tel-03281453v1>

Submitted on 8 Jul 2021 (v1), last revised 24 Jul 2021 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»
Институт естественных наук

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МЕРЗЛОТНЫХ
ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ: ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ (НА ПРИМЕРЕ СРЕДНЕТАЕЖНЫХ И ГОРНЫХ
МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ)**

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (ДИССЕРТАЦИЯ) АСПИРАНТА

05.06.01 - Науки о Земле

Специальность 25.00.23 – Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

Допущен к защите:
« 21» мая 2021 г.
Протокол № 1

Выполнил: аспирант
группы А-ФГ-18 ИЕН СВФУ
Захаров Моисей Иванович

Работа защищена:
« 19 » июня 2021 г.
Протокол № _____
с оценкой _____

Научный руководитель:
к.г.н., профессор эколого-
географического отделения
Данилов Юрий Георгиевич
Научный со-руководитель:
д.г.н. профессор
Университет Экс-Марсель
Гадаль Себастьян

Руководитель _____

Секретарь ГАК:

Итегелова А.Н.
ст. преподаватель
эколого-географического отделения

Рецензенты:
Нестеров Юрий Анатольевич
к.г.н. доцент кафедры геоэкологии и
мониторинга окружающей среды,
Воронежский ГУ
Саввинова Антонина Николаевна
к.г.н., доцент ЭГО ИЕН СВФУ

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ	10
1.1. Обзор развития понятия о мерзлотных ландшафтах и их классификация	10
1.2. Методы изучения мерзлотных ландшафтов	22
Общие выводы по I главе.	28
ГЛАВА II. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ И СРЕДНЕТАЕЖНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ В РАЙОНАХ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
2.1. Горные мерзлотные ландшафты Якутии и природные условия исследуемых участков	31
2.1.1. Природные условия Адыче-Эльгинская плоскогорной провинции	32
2.1.2. Природные условия Орулганской среднегорной провинции	36
2.2. Среднетаежные мерзлотные ландшафты Якутии и природные условия исследуемых участков	39
2.2.1. Природные условия Лена-Амгинской аласной провинция.....	41
Общие выводы по II главе.....	45
ГЛАВА III. ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИЗУЧЕНИИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ	46
3.1. Геоинформационное моделирование в изучении ландшафтов.....	46
3.2. Использование цифровых моделей рельефа для распознавания ландшафтов.....	56
3.3. Методика геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов.....	62
Общие выводы по III главе	75
ГЛАВА IV. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ЛАНДШАФТНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ГОРНЫХ И СРЕДНЕТАЕЖНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ	76
4.1. Пространственная структура горных мерзлотных ландшафтов по ключевым участкам	76
4.2. Особенности пространственной структуры и ландшафтное разнообразие Орулганской среднегорной провинции	100

4.3. Пространственная структура среднетаежных мерзлотных ландшафтов на примере ключевого участка в Лено-Амгинской аласной провинции ...	110
Общие выводы по IV главе	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	125
ПРИЛОЖЕНИЯ	139
Приложение А	140
Приложение Б	141
Приложение В	142
Приложение С	143

ВВЕДЕНИЕ

Получения достоверных и объективных сведений об пространственной организации природной среды и ландшафтного разнообразия Якутии является одной из основных задач региональных географических исследований. Актуальность таких исследований возрастает в связи с современным изменением климата и усилением негативного воздействия человека, которые провоцируют усиление деградации многолетней мерзлоты и интенсификацию опасных криогенных процессов [Гаврилова, 1981]. Уязвимость геосистем в регионах с значительным распространением многолетней мерзлоты и их влияние на глобальный климат подчеркивается в отчете 2012 года программы по окружающей среде ООН посвященной изменению климата [UNEP, 2012].

Комплексному изучению мерзлотных ландшафтов Якутии, в настоящее время, уделяется много внимания [Федоров, 2020]. При этом постоянно совершенствуется методика мерзлотно-ландшафтного картографирования [Самсонова, 1999], [Торговкин, 2001], [Шестакова, 2011], [Калиничева, 2019], как основного подхода к пониманию их структурно-динамической и пространственной организации. Актуальным является внедрение и адаптированных методов геоинформационного моделирования ландшафтных комплексов с использованием массы больших данных дистанционного зондирования Земли для многофакторного анализа современного состояния и эволюционно-динамических процессов в природной среде.

Поэтому **актуальность исследования** мы можем сформулировать следующими пунктами: 1) необходимость совершенствования методики картографирования и комплексного исследования Якутии, в особенности, для труднодоступных горных территорий; 2) востребованность в актуальных данных о пространственно-временной и структурной организации мерзлотных ландшафтов, для решения задач, связанных с рациональным природопользованием и мониторингом геосистем северных территорий; 3) накопление большого объема данных дистанционного зондирования с

космоса, дает возможность детально рассматривать пространственную структуру и ландшафтное разнообразие крупных региональных комплексов.

Таким образом, **цель работы** изучить особенности пространственной структуры среднетаежных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии с использованием методов геоинформационного моделирования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Рассмотреть теоретическую и методологическую основу геоинформационного моделирования пространственной структуры типологических единиц мерзлотных ландшафтов Якутии;
2. Раскрыть природные условия формирования и функционирования зональных и интразональных мерзлотных северотаежных зональных и горных ландшафтов Якутии;
3. Разработать адаптированную методику геоинформационного моделирования, основанную на использовании зонально-временных признаков объектов растительного покрова и геоморфометрического ГИС-анализа цифровой модели рельефа;
4. Обосновать методические разработки по геоинформационному моделированию данных дистанционного зондирования для изучения пространственной структуры мерзлотных ландшафтов
5. Установить современные особенности пространственной структуры и ландшафтного разнообразия мерзлотных среднетаежных зональных и горных ландшафтов Якутии.

Объект исследования - выступают зональные и интразональные среднетаежные и горные мерзлотные ландшафты Якутии. **Предмет исследования** - является пространственная структура мерзлотных ландшафтов.

Теоретической и методологической основой исследования выступает концепция таксономической организации природно-территориальных комплексов Ф.Н. Милькова, мерзлотно-ландшафтная классификация А.Н. Федорова, а также теория геосистем и системный подход к ландшафтному

картографированию В.Б. Сочавы. Методология геоинформационного моделирования ландшафтов и комплексной обработки спутниковых данных в работах отечественных ученых А.А. Глотова, Стыценко А.А., Истоминой Е.А. и зарубежных ученых М. Йоргенсон, Г. Гроссе и т.д.

Методы и материалы. Методикой изучения пространственной структуры мерзлотных ландшафтов в этом исследовании выступает геоинформационное моделирование, основанное на комплексном анализе и обработке разновременных спутниковых данных, цифровых моделей рельефа и базы геоданных по характеристикам мерзлотных ландшафтов. Исходными данными для геоинформационного моделирования послужили материалы космической съемки искусственных спутников Landsat 8 OLI/TIRS, Sentinel 2, цифровые модели рельефа ASTER GDEM. Материалы полевых изысканий за период 2019 г. и 2020 г. (июль и август). При проведении вычислительных экспериментов и обработки данных дистанционного зондирования Земли применялись программно-аппаратные комплексы ГИС: QGIS с модулем Semi-Automatic Classification, SAGA GIS, ILWIS GIS, GRASS GIS и облачная платформа Google Earth Engine.

Научная новизна исследования. Разработан и обоснован подход к геоинформационному моделированию на основе комплексного использования разновременных космических снимков и геоморфометрического ГИС-анализа цифровой модели рельефа для распознавания и среднемасштабного картографирования мерзлотных ландшафтов.

Установлены возможности выделения групп растительных ассоциаций и мезорельефа по совместному геоинформационному анализу данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа и на их основе составлены ландшафтные карты ключевых участков и Орулганской среднегорной провинции.

Выявлены особенности пространственной структуры и ландшафтного разнообразия Орулганской среднегорной провинции и ключевых участков в среднетаежных и горных мерзлотно-ландшафтных провинциях, установлено

значительное распространение зональных горных мерзлотных ландшафтов и значительная роль макросклонов в развитии интразональных ландшафтах.

Научно-практическая значимость. Научно-методологические разработки, предложенные в данном исследовании, могут быть использованы при улучшении результатов мерзлотно-ландшафтного картографирования, а также для учета и мониторинга агробиологических ресурсов и рационального природопользования в условиях криолитозоны. Разработанные методы моделирования для ключевых участков в Якутии могут быть применимы при изучении ландшафтов по всему миру, так как использованные данные дистанционного зондирования находятся в свободном доступе.

Данные о пространственной структуре среднетаежных и горных мерзлотных ландшафтов Республики Саха (Якутия) могут быть использованы при планировочных и оптимизационных мероприятиях в регионе, совершенствовании системы природопользования, защиты многолетней мерзлоты, проектировании дорожной инфраструктуры и населенных пунктов и др.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены сбор фактического материала, в том числе ГИС и геоданных, обработка ДДЗ, разработка методики моделирования, статистический анализ результатов обработки полевых данных и ДДЗ и формализация выводов.

Основные защищаемые положения:

1. Разработанная для изучаемых территорий адаптированная методика геоинформационного моделирования пространственной структуры мерзлотных ландшафтов на базе совместного использования разновременных спутниковых оптических изображений и цифровой модели рельефа диагностирует признаки растительного покрова, типы рельефа и стратиграфо-генетических комплексов мерзлотных ландшафтов.

2. Сформированные вариации геоинформационного моделирования по ключевым участкам позволяют определить особенности пространственной структуры и ландшафтного разнообразия типов местности и типов урочищ

мерзлотных ландшафтов, которые обусловлены природными условиями в том числе орографическими особенностями, субмеридиональным положением и геокриологическими процессами, а также интенсивностью проявления антропогенного фактора.

3. Пространственная структура региональных комплексов(провинций) Якутии неоднородна, геоинформационное моделирование позволяет более точно (на основе количественных данных) определить распространение зональных и интразональных типов(подтипов) мерзлотных ландшафтов.

Апробация работы. Основные научные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: VI и VII международная конференция Geographic Information System Theory, Application and Management (GISTAM) (Прага(онлайн), 2020г.), (Прага(онлайн), 2021г.), International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS (Гонолулу (онлайн), 2020г.), Международный симпозиум по землепользованию ILUS (Париж, 2019 г.), XI Всероссийская научно-практическая конференция “Геоинформационное картографирование в регионах” (Воронеж, 23-24 ноября 2020 г.). Отдельные аспекты работы обсуждались на научных семинарах лаборатории UMR 7300 ESPACE в январе 2020 г. и мае 2021 г. Методика выделения растительности обсуждалась на заседании Якутского отделения Русского ботанического общества в декабре 2020 г. Основные положения и результаты научно-квалификационной рассматривались на заседании географического направления эколого-географического отделения Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова

Публикации. По теме научно-квалификационной работы опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи в материалах международных конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science, 1 статья в журнале из списка ВАК.

Структура и объем. Научно-квалификационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем

– 143 страниц. Текстовая часть рукописи включает 39 рисунков, 9 таблиц и список литературы, состоящий из 128 наименований. Приложения размещены на 4 страницах.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в подготовке научно-квалификационной работы научным руководителям профессору д.г.н. С. Гадалю и к.г.н Ю.Г. Данилову За ценные советы и поддержку к.г.н. Ж.Ф. Дегтевой, д.б.н. М.М. Черосову, д.г.н. А.Н. Федорову, Ph.D Ю. Камичайтите, к.б.н. Е.И. Троевой, а также всему коллективу географического направления эколога-географического отделения Института естественных наук СВФУ и лаборатории UMR ESPACE CNRS. За финансовую помощь и за возможность обучаться и работать в Университете Экс-Марсель выражаю благодарность стипендиальной программе им. В.И. Вернадского Посольства Франции в России и Campus France.

ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Первая глава научно-квалификационной работы посвящена рассмотрению теоретической и методологической базы исследования мерзлотных ландшафтов. Для комплексных объектов моделирования таких как ландшафт, первостепенной методической задачей является разработка концептуальной модели, как набора теоретических знаний и методик изучения пространственной структуры мерзлотных ландшафтов. Решение данной задачи для геоинформационного моделирования ландшафтов заключается в формулировании набора теоретических положений о структуре, межкомпонентных взаимосвязях, классификации и функционировании ландшафтов (природно-территориальных комплексов).

Концептуальная модель основывается на множестве теоретических положений о природе определения ландшафтных единиц различного ранга и их организацию. Во многом теоретические основы различных авторов и ландшафтных научных школ могут сильно отличаться, в том числе из-за региональных особенностей территорий исследования. При этом изучение природно-территориальных комплексов Якутии сформировало свою методико-классификационную систему, которая имеет ярко выраженную мерзлотную направленность.

1.1. Обзор развития понятия о мерзлотных ландшафтах и их классификация

Концептуализация и формализация географических знаний о мерзлотных ландшафтах и ее пространственной структуре является необходимым элементом для создания базы данных предметной области моделирования, как комплексного объекта исследования состоящий из множества понятий, определяющих мерзлотные ландшафты их классификацию, структуру, функционирование и динамику. Возникновение

понятие “мерзлотные ландшафты” неразрывно связано с развитие ландшафтного направления географической науки начало которого было положено в середине XIX века, как учения о природно-территориальных комплексах.

Природно-территориальные комплексы (ПТК) как объект исследования представляет относительно однородное территориальное образование, где все природные компоненты находятся в тесной взаимосвязи и обуславливают друг друга. В настоящее время ПТК и термин “ландшафт” являются синонимами при этом ландшафты — это общепринятое определение для природных и социальных территориальных комплексов в мировой науке. ПТК появился как результат развития идеи о единстве и взаимосвязанности природных явлений и процессов на Земле о которых писал в своих трудах еще А. Гумбольдт в конце XVIII и в начале XIX вв. Ввел понятие “ландшафты” в географическую науку Л.С. Берг в 1913 году, он определил его, как предмета изучения географии и им же были проведены первые работы по ландшафтному районированию в труде “Ландшафтно-географические зоны СССР” [Берг, 1930]. Начальный этап формирования ландшафтоведения связано с работами В.В. Докучаева по почвенному покрову и его роли, и значении в ПТК, в учении о географической оболочке А.А. Григорьева и биосфере В.И. Вернадского. Бурное развитие теоретических и методических основ изучения ландшафтов в физической географии приходится на середину XX века в Советском Союзе, где надо отметить формирование нескольких устойчивых концепций о организационной структуре и даже о понятиях ПТК. Огромный вклад в развитие теоретических основ классификации и таксономии ландшафтов этого периода принесли труды Н.А. Солнцева 1960, Преображенский 1966, В.Б.Сочавы 1967, Э. Нееф 1974, А.Г. Исаченко 1972, Ф.Н. Милькова 1977, Д.Л. Арманда 1975 и др. Обобщение и обзор этих концепций были проделаны многими географами, проводящие ландшафтно-географические исследования. При этом фундаментальной основой последующих исследований мерзлотных ландшафтов стала концепция организации

ландшафтов Ф.Н. Милькова. В нем принято разделять всю ландшафтную оболочку Земли на три таксономических категории ПТК: региональные, типологические и парагенетические комплексы (Рис. 1). Выделение комплексов на основе выявления парагенетических и парадинамических связей является основной особенностью таксономической схемы [Мильков, 1977] структурных единиц ПТК, которая позволила укорениться данной организации единиц ландшафтов и, в настоящее время, большинство ландшафтных исследований базируются на данную ландшафтную таксономию.



Рисунок 1. Таксономические единицы ландшафтной сферы Земли [Мильков, 1977]

Региональные комплексы представляют собой единицы физико-географического районирования с относительно однородным сочетанием типологических единиц. Иерархия региональных комплексов по Ф.Н. Милькову материк - пояс - страна - зона - провинция - район. Структура региональных комплексов зависит от пространственной комбинации типологических единиц. Например, при проведении мерзлотно-ландшафтного районирования Якутской АССР [Варламов, Федоров, 1989] и далее в Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) было выделено 55

физико-географических провинций - крупных региональных комплексов с относительно однородным сочетанием типологических мерзлотных ландшафтов в трех физико-географических странах - Горы Южной Якутии, Средняя Сибирь и Северо-Восток Сибири. В основе их выделения лежал принцип территориальной целостности и общего генезиса. Особенностью мерзлотно-ландшафтного районирования, заменивший физико-географическое районирование на уровне провинций является учет характера распространения ММП. Так провинций сгруппированы на группу провинций с сплошным, прерывистым и островным распространением многолетнемерзлых пород. Так, например, среди среднетаежной провинции Средней Сибири выделяются все три группы, а для Северо-Востока Сибири характерно только сплошное распространение многолетнемерзлых пород.

С типологическими ПТК чаще всего связано употребления слова “ландшафт”. Они представляют структурную организацию природной среды и являются главными объектами физико-географического и ландшафтного картографирования. Ранжирование и выделение типологических единиц является основополагающим элементом районирования и картографирования ландшафтов. Мильков предлагал выделять пять рангов типологических комплексов: варианты ландшафтной сферы - классы ландшафтов, типы ландшафтов, типы местности, типы урочищ [Мильков, 1970]. Например, существует также более сложная таксономическая система В.А. Николаева в которой выделяется 12 таксонов: отдел, система, подсистема, класс, подкласс, группа, тип, подтип, род, подрод, вид, подвид [Николаев, 2000]. При этом А.Н.Федоров в монографии по принципам мерзлотно-ландшафтного картографирования предлагает отнести к типологически единицам ландшафтов ПТК формирующиеся в условиях высотной поясности переключив их с категорий “зоны” и “пояса” региональных комплексов [Федоров, 1989].

Так мы приходим к главному понятию исследовательской работы “мерзлотный ландшафт”, данный термин возник и развивается в изучении

причинно-следственных связей между многолетнемерзлыми породами и природной средой. Проведение многолетних исследований в области причинно-следственных связей ММП и сущности природной среды в ландшафтно-криоиндикационных исследованиях устанавливают, что основные характеристики ММП, такие как температура, льдистость отложений, мощность сезонно-талого и сезонно-мерзлого слоя имеет существенный вклад в формирование и функционирования ПТК, там, где они присутствуют.

В целом изучение основных связей между компонентами природы осуществляется путем создания моделей природной среды, охватывающих множество факторов, влияющих на ее структуру, функционирование и динамику. Ландшафт является моделью природной среды, системой сочетаний определенных характеристик ландшафтообразующих факторов. [Федоров, 2020]. При этом мерзлотными называют ландшафты, формирование которой в значительной степени обусловлена криогенными факторами и образуется в пределах мерзлотной *криолитозоны*. Криолитозона - это верхняя часть земной коры, покрытая горными породами и почвами с устойчивой отрицательной температурой и наличием подземных льдов [Попова и др. 1985].

Из этого следует понимать, что в условиях распространения мерзлоты любой ландшафт обусловлен в том числе развитием криолитозоны, поэтому при изучении ПТК криолитозоны следует использовать термин мерзлотные ландшафты. Часть криолитозоны, где мерзлые породы характеризуются отсутствием периодических протаиваний называется *многолетнемерзлая порода (ММП)*. Около 25% земной поверхности и около 65% России покрыта ММП (Рис.2). При этом характер залегания ММП бывает четырех видов: сплошная, прерывистая, островная и спорадическая (Brown et al, 2002). Поэтому мерзлотные ландшафты занимают значительную долю всей ландшафтной оболочки Земли, в особенности Евразии и Северной Америке.

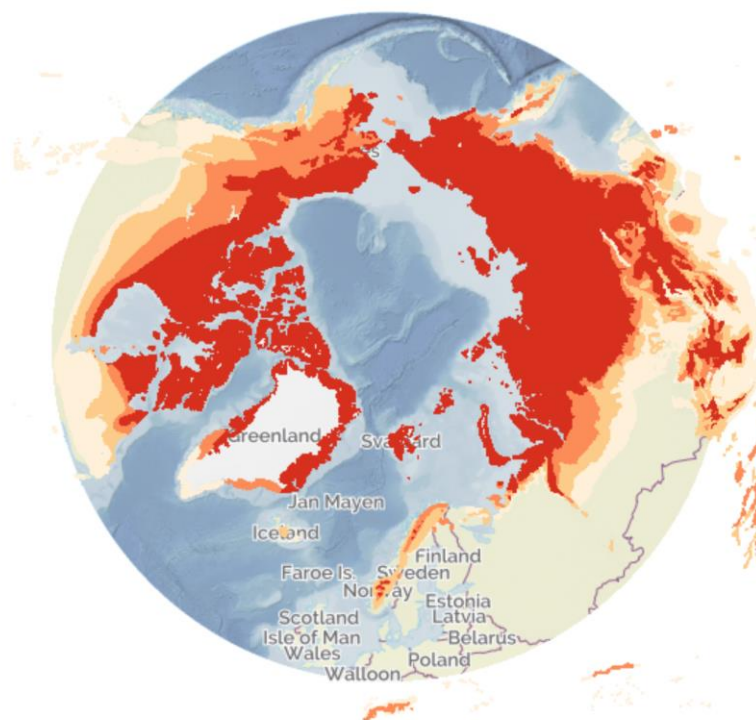


Рисунок 2. Области распространения ММП на Земле

(<https://geoportal.arctic-sdi.org/>)

Первые работы по классификации и картографированию ландшафтов с учетом условий залегания многолетнемерзлых пород были сделаны Е. С. Мельниковым. Им выделяет восемь соподчиненных таксономических единиц: страна – провинция – подпровинция – район – ландшафт – местность – урочище – фация [Мельников, 1983]. Им было предложено учитывать взаиморасположение многолетнемерзлых и талых пород (или их температуры) для выделения подпровинций, температурно-влажностный редим горных пород при выделении урочищ. По установленной им классификационной иерархии были проделаны работы по изучению картографированию ландшафтов Западной Сибири.

В настоящее время изучение ландшафтов ведет к установлению характеристик ландшафтообразующих факторов на различных организационных уровнях (таксонах) и их поведения. Так как в настоящее время установлено, что формирование, дифференциация и развитие любых

ПТК объясняется сочетанием взаимообусловленных и взаимосвязанных исторически сложившихся климатогенных, литогенных, биогенных и антропогенных факторов, выраженных в характеристиках компонентов ландшафта. Исследования многих ученых-ландшафтоведов, мерзлотоведов направлены на установление системных характеристик ландшафтов, парагенетических свойств компонентов и взаимообусловленность факторов. Довольно часто при этом исследуются типологические комплексы и их совокупность как парадинамическая система: бассейновые комплексы [Торговкин, 2001], долинно-речные ландшафты [Черных, 2011], [Глотов, 2013] и тд. Поэтому подходы к изучению ландшафтов, в том числе и мерзлотных можно назвать термином многофакторное моделирование. Следует отметить, что использование многофакторного моделирования мерзлотных ландшафтов также используется зарубежными исследователями. Так, например, канадские авторы предлагают рассматривать мерзлотные ландшафты в виде многоуровневой концептуальной модели, содержащую информацию (данные) от растительности до инфраструктуры. Многофакторное моделирование и применение межкомпонентных связей получило развитие в системном подходе к изучению мерзлотных ландшафтов. Развитие системного подхода в отечественной науке связано с теорией геосистем В.Б. Сочавы. При этом системный подход (Earth system approach) позволяет им определять структурные связи, предельные значения воздействий между компонентами системы, включая антропогенные факторы, что предлагается использовать для разработки стратегий управления в условиях ММП [Warwick et al, 2016].

Литосферных фактор является важнейшим, так как именно с верхними слоями литосферы связано развитие ММП. Температура горных пород являются интегральным показателем взаимодействия комплекса климатических характеристик – радиационного баланса, температуры и влажности воздуха, осадков и т.д, а также характера растительного покрова. В распределении мерзлотных ландшафтов существенную роль играют общегеографические закономерности пространственной дифференциации –

широтная зональность, долготная секторность и высотная поясность. Тектонические и геологические условия литогенной основы влияют на формирование отложений, что в свою очередь определяет возникновение криогенных текстур линзовидно-слоистых при глинистом составе элювиальных отложений карбонатных пород или массивных при супечано-песчаных терригенных отложениях [Федоров, 2020].

Климатогенный фактор мы можем определить, как наиболее динамичный фактор. Исследования динамики ландшафтов производится и коррелируются с глобальными и локальными трендами климатических параметров. Например, Москаленко исследуя динамику криогенных ландшафтов Северо-Запада Сибири определила устойчивое ежегодное повышение температуры воздуха на 0.03 градуса по Цельсию с конца 1970 гг. что вызвало увеличение мощности сезонно-талого слоя на 25% трия торфяно-болотных комплексах [Москаленко, 2012]. Современные климатические условия сложились в голоцене (5500 лет назад) и дальнейшее формирование современного облика ландшафтов Севера Евразии начинается с этого времени. Подробно ландшафтно-климатическое развитие начиная с позднего плейстоцена территории Якутии изучена А.Н. Федоровым, также им и коллективом авторов проведено районирование территории Якутии по изменениям климата с выделено 5 зон. Отмечено, что $\frac{3}{4}$ территории республики подвержена потеплению климата, относительно нулевой тренд характерен для тундровых и лесотундровых ландшафтов [Федоров, Свинобоев, 2000]. Кроме температуры и количества осадков на мерзлотные ландшафты также влияет соотношение тепла и влаги, ветровой режим и перераспределение снежного покрова (Железняк, 2005). Таким образом, климатогенный фактор, определяет все таксономические уровни ландшафтов от самой оболочки до отдельной фации по дифференциации наноклиматических параметров [Гаврильева, 1981])

Тесные связи растительного покрова и свойств ММП обуславливают использование биогенного фактора в качестве одного из основных в

дифференциации мерзлотных ландшафтов. Например, в работе Калиничевой С.В. было установлено, что характер растительного покрова оказывает влияние на распределение температуры пород и мощности СТС, в совокупности с мощностью снежного покрова и экспозиции склона [Калиничева, 2018]. Биогенный фактор, как наиболее динамичный, чутко реагирует на изменение климатогенного и литогенного факторов. Изучение динамики биоты позволяет рассматривать развитие мерзлотных ландшафтов во времени. В последних работах по картографированию мерзлотных ландшафтов учитывались сукцессионные стадии растительности при антропогенном воздействии и лесных пожарах [Шестакова, 2015]. Растительности (биоте) отводится определяющая роль в динамике ландшафтов через прохождение сукцессионных стадий [Коновалова, 2019]. Сукцессия растительности рассматривается как реакция природной среды на воздействия, в том числе и антропогенного характера.

На современном этапе развития природной среды влияние человека становится одним из основных в функционировании мерзлотных ландшафтов. Техногенные нарушения вызывают активизацию криогенных процессов – термокарста, термоэрозии, солифлюкции и других, в том числе комплексные термоденудационные процессы приводят к образованию обширных котловин, как например, провал Батагайка, такие процессы приводящих порой к коренной перестройке мерзлотных ландшафтов. Многие такие процессы были исследованы. Отметим, что созданные человеком техногенные системы, где существенно изменены мерзлотные условия – промышленные комплексы, мелиоративные системы, сельскохозяйственные угодья и другие, относятся к категории культурных или антропогенных ландшафтов [Мильков, 1973, 1977].

Влияние антропогенного фактора на развитие мерзлотных ландшафтов отмечено многими исследователями. Н.Г. Москаленко по материалам натуральных наблюдений установила, что на севере Западной Сибири уничтожение растительного покрова на торфяниках вызывает увеличение глубины протаивания в 2-3 раза [Москаленко, 2012]. Проведенные П.Н.

Скрябиным и Б.П. Сергеевым исследования на Енисейском Севере показали, что полное уничтожение растительного покрова вызывает увеличение глубины протаивания в 1,5-2,5 раза.

Несмотря на контрастность основных факторов, определяющих развитие мерзлотных ландшафтов, все они взаимосвязаны и действуют одновременно. Так, температура горных пород и мощность СТС-СМС являются продуктом взаимодействия климатогенного и литогенного факторов, осложненных биогенным и антропогенным факторами. Литогенная основа носит в себе отпечатки климатических условий формирования. В свою очередь, климатогенный фактор зависит от других, например, от составляющих литогенного фактора (тектоники и рельефа).

Поэтому выделение и классификация природно-территориальных комплексов в криолитозоне, даже при условии использования критериев сходства почвенно-растительного покрова, климата или форм рельефа, название “мерзлотные ландшафты” является приемлемой, так как во многом индикационные факторы и биогеохимические циклы обусловлены мерзлотными условиями.



Рисунок 3. Типологические единицы мерзлотных ландшафтов и критерии их выделения [Федоров,1991]

Разработанная таксономическая классификация А.Н. Федорова вводит дополнительные типологические единицы дифференциации ландшафтов для областей распространения ММП и критерии их выделения, связанные с характеристиками ММП.

Тип ландшафта чаще всего определяется по биогеографическим и климатическим критериям, таким как биом и макроклимат (Рис. х).

Промежуточной единицей между подтипом ландшафтов и типом местности А.Н. Федоровым определен род ландшафта, выделяемый на основе характера распространения ММП (сплошное, прерывистое, островное распространение).

Подтип местности выделяется по литологическим особенностям внутри типа местности. Выделение данного таксона необходимо для индикации криогенного строения многолетнемерзлых пород.

Тип урочища — структурная часть местности, определяемый по микрорельефу и группой растительных ассоциаций. При выделении урочищ для мерзлотных ландшафтов наряду с физиономическими чертами индикатором выступает мощность сезонно-талого слоя (СТС), сезонно-мерзлого слоя (СМС) и температура пород.

Тип фации как наименьшая элементарная единица ландшафтов определяется по растительной ассоциации и характеризуется однородностью всех природных компонентов.

Дальнейшее развитие классификации определяется синергетическим развитием теории геосистем и геосистемного картографирования в ландшафтоведении и методов географических информационных систем (ГИС) исследования мерзлотных ландшафтов. Надо отметить значительный вклад в развитие мерзлотного ландшафтоведения учения о геосистемах. Термин «геосистема» введен в научную литературу В. Б. Сочавой и означает «целое, состоящее из взаимосвязанных компонентов природы, подчиняющихся закономерностям, действующим в географической оболочке или ландшафтной сфере» [Сочава, 1974]. Геосистемное учение ландшафтов

базируется на четырех аксиомах: (1) природная среда представляет собой иерархию управляющих и соподчиненных структур; (2) закономерности, присущие геосистемам, действуют в ограниченных пространственных пределах, которые сводятся к трем порядкам размерности – планетарному, региональному, топологическому; (3) геосистемы представлены коренными структурами и переменными состояниями, подчиненными одному инварианту. Изменение инварианта происходит при эволюции геосистем; (4) для природной среды характерно совмещение двух начал – гомогенности и разнокачественности (Коновалова, 2019). Так именно геосистемный подход позволяет обоснованно использовать дистанционные методы исследований и на их основе выявлять невидимые внутренние свойства ландшафтов.

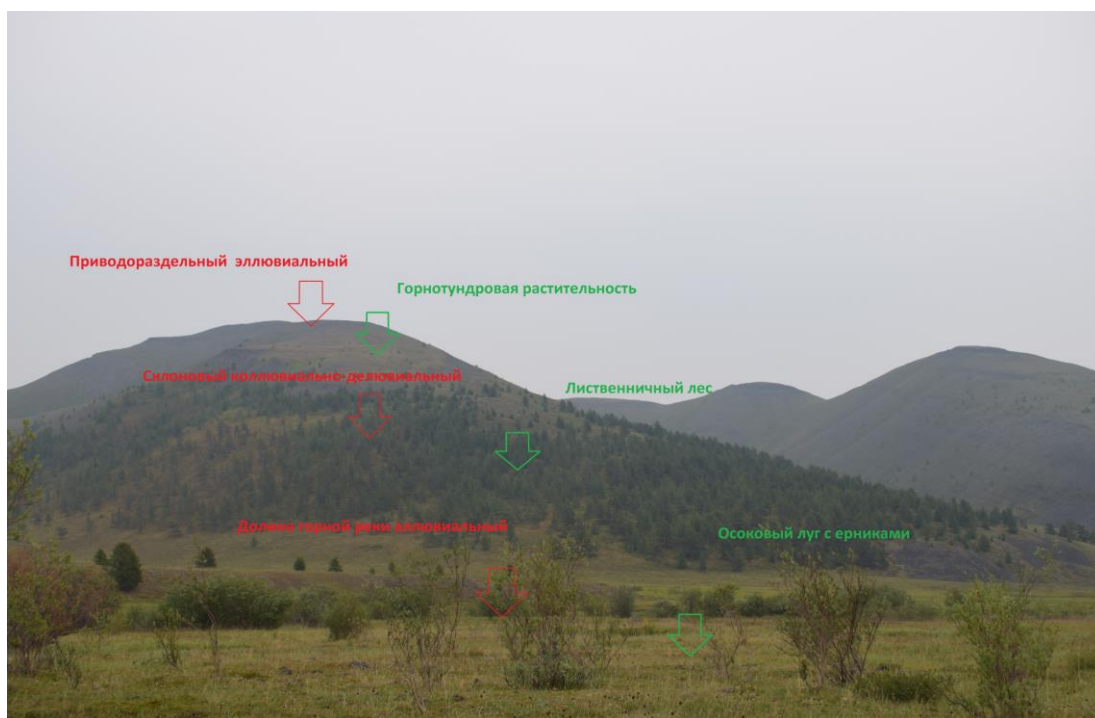


Рисунок 4. Растительность и рельеф - индикационные параметры мерзлотных ландшафтов (фото автора)

Ландшафт в парадигме изучения его, как целостной природной системы характеризуется общностью и взаимосвязанностью состояния внешних и внутренних свойств. Целостность природной системы, обеспечиваемая функциональными связями между компонентами. Данная постулат определил использование внешних, морфологических черт ландшафтов (в основном

сочетаний рельефа и растительности) в качестве индикаторов внутренних свойств (например, почв и стратиграфо-генетических отложений) и закономерностей климатических, гидроморфных и мерзлотных условий [Федоров, 2020].

Этот подход использует ГИС оверлейным методом в определении типов ландшафтов, типов местности и типов урочищ по связи между растительным покровом и формами рельефа в различных масштабах. Важнейшим результатом развития подхода стало широкие возможности для картографирования мерзлотных ландшафтов при помощи обработки данных дистанционного зондирования земли и методов ГИС-анализа и информационного моделирования. Именно развитие методов дистанционного зондирования в картографии обеспечили бурное развитие системного подхода и позволило увеличить точность получения сведений об пространственной структуре ландшафтов и картографирования в средних и крупных масштабах [Салищев, 1986].

1.2. Методы изучения мерзлотных ландшафтов

Основы изучения мерзлотных ландшафтов были заложены в результате исследований взаимосвязей компонентов природы с условиями залегания ММП. Методы изучения мерзлотных ландшафтов условно можно разделить на два взаимосвязанных блока: ландшафтные методы исследований, объединяющие использование ландшафтной классификации, ландшафтного профилирование, распознавание сущности и распределение свойств природной среды, ландшафтное картографирование основанный на ландшафтно-индикационном подходе. Пространственная систематизация и дифференциация производится путем определения видимых индикаторов мерзлотных ландшафтов - рельеф и растительность. Ландшафтно-индикационные исследования являются одним из направлений в сравнительно молодом методологическом направлении ландшафтоведения - *ландшафтная индикация*. Ландшафтная индикация возникла в трудах С.В. Викторова как

прикладное направления ландшафтоведения. Индикация — это выявление индикаторов, наиболее более полный сбор сведений о способах их распознавания на местности и при дешифрировании, раскрытие характера связи между индикатором и индикатом и практическое использование индикаторов [Обуховский, 2008]. Индикация использует физиономические и деципиентные параметры ландшафтов для интерпретации внутренних(невидимых) свойств ландшафтов. Всего выделяется четыре группы индикаторов: орофизиономическая, фитофизиономическая, гидрофизиономическая, педофизиономическая и комплексная [Марцинкевич, 1986]. Орофизиономические индикаторы связаны с использованием форм рельефа, например, мезорельеф используется при определении типов местности. Фитофизиономические индикаторы - это картируемые геоботанические подразделения (классы и группы растительный формаций и ассоциаций). Гидрофизиономические индикаторы определяют ландшафты по наличию водных объектов речной сети, озер или болот. Синтез или сочетание физиономичностей формирует комплексный индикатор компонентов ландшафта. Во многом развитие индикационных методов связано с возникновением дистанционных методов изучения, в первую очередь аэрофотосъемка и космическая съемка [Григорьев, 1975].

Развитие методов изучения мерзлотных ландшафтов условно можно разделить на два этапа. Первый этап — это становление ландшафтных методов исследований мерзлотных условий связано с составлением геокриологических карт в работах В.Ф. Тумеля (1945), А.П. Тыртикова (1956), И.Я. Баранова (1961), В.А. Кудрявцева (1961), и других, а также при составлении Мерзлотно-ландшафтной карты Якутской АССР в масштабе 1: 2 500 000 А.Н.Федоровым и др. (1989) последняя обновленная версия которого была опубликована в 2017 году (Рис. 5). Данный труд стал первым обобщением по мерзлотным ландшафтам Якутии, где систематизированы обширные материалы по компонентам природной среды, прежде всего растительность, климат и рельеф. Были установлены основные принципы пространственной

организации и дифференциации мерзлотных ландшафтов Якутии с использованием свойств многолетнемерзлых пород, как одного из основных критериев их выделения. Были отображены 20 типов местности на основе анализа генетических типов четвертичных отложения, 35 типов ландшафтов по анализу растительного покрова (сочетание групп растительных ассоциаций) по карте растительности в масштабе 1:5 000 000. Таким образом, картографическая модель, как сочетание слоев типов местности и сочетаний групп растительных ассоциаций в комплексе отображает закономерности их пространственной дифференциации и взаимосвязи криолитологических, биогидроклиматических, геолого-геоморфологических факторов формирования мерзлотных ландшафтов.

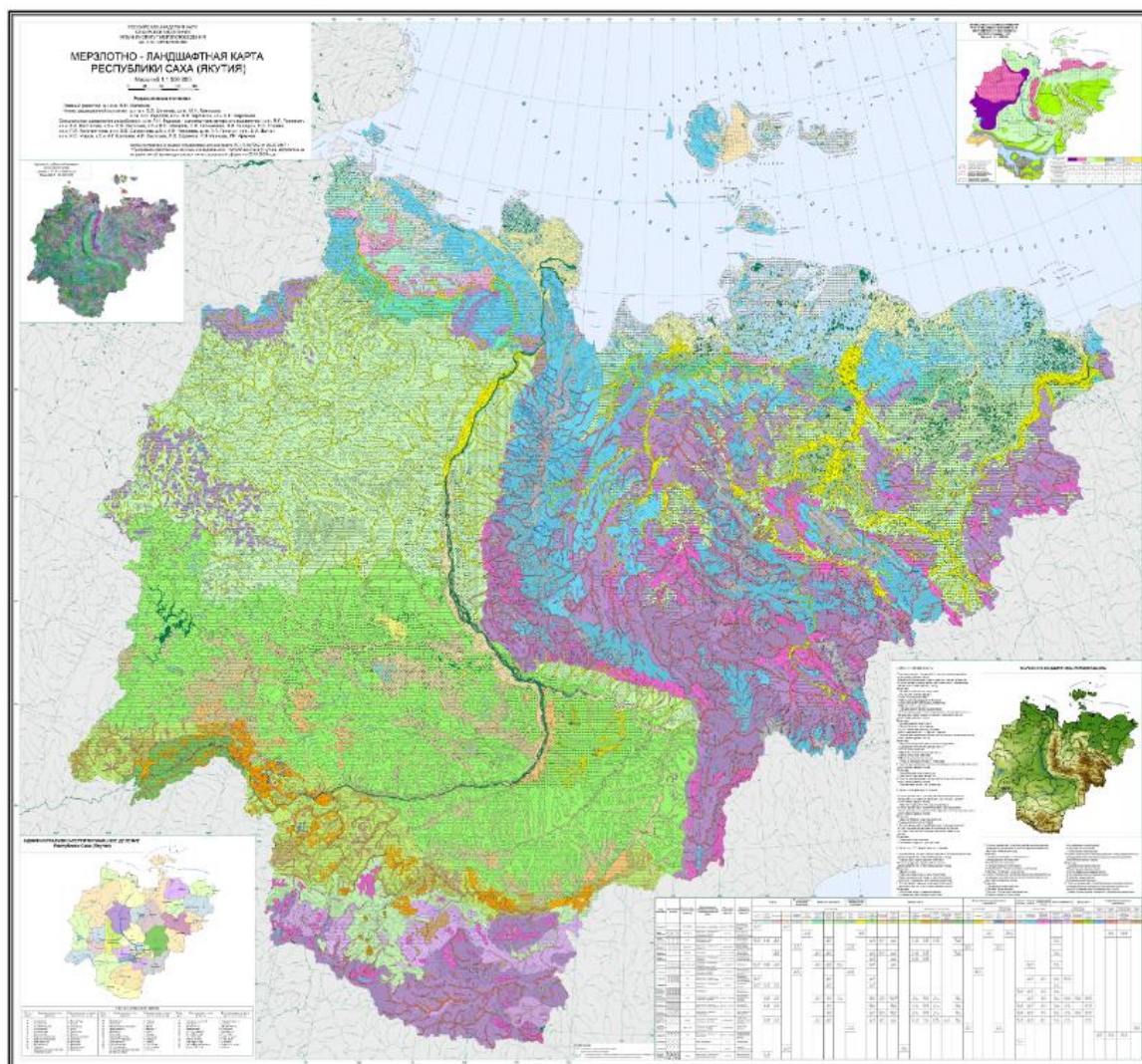


Рисунок 5. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) в масштабе 1:1 500 000 (Fedorov et al., 2018).

Второй этап связан с развитием и внедрением информационных технологий и дистанционного зондирования Земли. Новые методы дистанционного зондирования, основанные на растущем количестве спутниковых и бортовых платформ, которые охватывают широкий диапазон пространственных и временных масштабов, все в большей степени позволяют изучать мерзлотные ландшафты и их динамику [Jorgenson and Grosse, 2016]. В области современного применения дистанционного зондирования входят обнаружение и мониторинг изменений мерзлотных ландшафтов, включая температуру поверхности, снежный покров, рельеф, поверхностные воды, растительный покров и ее структура, а также нарушения в результате пожаров и деятельности человека. Jorgenson подчеркивает расширяющиеся возможности датчиков, новых методов обработки изображений и многомерного анализа, расширенный публичный доступ к данным и все более длинные архивы изображений, которые позволяют по-новому взглянуть на многолетнюю динамику мерзлотных ландшафтов.

ГИС методы картографирования получили развитие в исследованиях отечественных ученых, прежде всего это так называемый “оверлейный метод”. Ландшафтная структура территории определяется через наложение слоев растительности и рельефа составленные по оцифровке аэрофотоснимков, топографических карт, оцифровки старых бумажных геокриологических карт и космических снимков путем ГИС инструментов пространственного анализа [Торговкин, 2005]. Характеристика мерзлоты стали изучать через вычисление температуры поверхности, особое развитие данное направление получило при появлении сенсоров с возможностью съёмок в тепловом инфракрасном диапазоне Landsat 5 Thematic Mapper, Landsat 7 ETM+ и датчик TIRS спутника Landsat 8.

Одним из основных сведений который мы можем получить с помощью ландшафтного картографирования являются характеристики пространственной структуры, ландшафтного разнообразия и локальные

особенности географических закономерности распределения ландшафтообразующих компонентов.

Пространственная структура ландшафтов - это упорядоченная устойчивая организация разнокачественных ландшафтных комплексов и их компонентов разного ранга типологических единиц и закономерностей их пространственного распространения [Исаченко, 1991]. Пространственная структура ландшафтов, являющаяся одновременно результатом и элементом пространственной организации, то есть сложившийся набор характеристик компонентов ландшафта и их взаимосвязи друг с другом объясняются пространственным расположением ПТК и их разнообразием. Поэтому важно отметить различие понятий структура и организация. В первом случае фиксируются относительно инвариантные и статические закономерности, относящиеся строению и способам взаимосвязи компонентов, во втором – динамические, касающиеся функционирования, поведения и взаимодействия этих частей [Сочава, 1967]. Хотя в литературе чаще встречается понятие ландшафтная структура [Волкова, 1998], [Черных, 2001] мы используем понятие пространственная структура, так как полагаем, что он более емко отражает суть выявления взаимосвязей и взаиморасположения в пространстве ландшафтных комплексов. Так как структурирование ландшафтов производится за счет пространственных особенностей ландшафтов, выявленных методами дистанционного зондирования Земли и ГИС, то вполне обоснованным является использование понятия “пространственная структура ландшафтов”.

Пространственная структура объясняет ландшафтное разнообразие территории, который является интегральным показателем системности организации ландшафтов и характере выполнения ими экологических и социальных функций [Марцинкевич, 2006]. Оценка ландшафтного разнообразия территорий усложняется сложностями точного картографирования ландшафтов, в особенности для удаленных горных областей, таких как Северо-Восток Сибири. Поэтому работ по

пространственной структуре ландшафтов и оценке их разнообразия и закономерностей функционирования достаточно мало [Идрисова, 2009]. Но при этом в настоящее время достижения современной науки в области интерпретации данных дистанционного зондирования Земли, а также накоплением знаний и массива архивных и оперативных данных спутникового мониторинга позволяет проводить такие работы. Проведением таких исследований может в значительной мере понять организацию мерзлотных ландшафтов и по-новому оценить их хозяйственное значение, а также их устойчивость к изменению климата и антропогенным воздействиям.

Общие выводы по I главе.

1. Мерзлотные ландшафты - это природно-территориальные комплексы, часть ландшафтной сферы Земли, формирование которого связано с развитием криогенеза и литогенная основа которого характеризуется наличием многолетнемерзлых пород
2. Теоретической и методологической основой изучения мерзлотных ландшафтов Якутии является представления о схеме таксономической организации Ф. Н. Милькова в дальнейшем получившее расширение классификации типологических и региональных комплексов за счет внедрение характеристик ММП и геосистемного подхода к картографированию В.Н. Сочавы.
3. В настоящее время мерзлотно-ландшафтное картографирование базируется на применении методов ландшафтной индикации. Индикационный метод выводит на первый план морфологические характеристики ландшафтов (индикаторы) - растительность и рельеф. Оверлейное соединение этих двух факторов формирует разнообразие ландшафтной структуры территории. Из понимания системных внутриландшафтных и парагенетических связей комплексов выводятся скрытые параметры ландшафтов в том числе и мощность СТС и СМС, температура пород и криогенные явления, присущие тому или иному типу ПТК.
4. При изучении мерзлотных ландшафтов на типологическом уровне усиливается роль методов ГИС-анализа и обработки данных дистанционного зондирования Земли.

ГЛАВА II. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ И СРЕДНЕТАЕЖНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ В РАЙОНАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Республика Саха (Якутия) самый крупный субъект Российской Федерации. Он занимает площадь в 3 млн. км² и характеризуется большим многообразием ландшафтов обусловленной протяженностью по широте и наличием горных систем с выраженной высотной поясностью и долготной секторальностью [Данилов, 2016]. В ландшафтное изучение Якутии внесли вклад многие ученые. Ведущую роль в ландшафтной изученности Якутии играет Институт Мерзлотоведения П.И. Мельникова СО РАН, где мерзлотное ландшафтоведение зародилась в 1980-х, как направление природоохранных геокриологических исследований, направленных на оценку устойчивости природной среды к антропогенным воздействиям, особенно техногенного характера [Граве, 1980]. Первым важным результатом ландшафтных исследований стала Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР [Федоров, 1989]. После данного труда были проведены множество стационарных и полевых ландшафтных исследований, что постоянно совершенствует методику и детальность картографирования, а также обогащает науку знаниями о пространственной организации ландшафтов Якутии [Торговкин, 2001], [Самсонова, 2006], [Шестакова, 2011], [Калиничева, 2018]. Мерзлотно-ландшафтные карты в различных масштабах и типологических уровнях используются многими другими исследователями Якутии для прикладных работ [Десяткин, 2005], [Скрябин, 2013], [Дегтева, 2017].

Территория Якутии располагается в пределах трех физико-географических стран. Средняя Сибирь, представленная здесь тремя областями: (1) таежной, (2) лесотундровой и областью северных редколесий и (3) тундровой. Страна Прибайкалья и Забайкалья (в мерзлотно-ландшафтном районировании страна называется Горы Южной и Северо-Восточной Сибири) представлена областью Северо-Байкальских гор. Страна Северо-Восточная Сибирь представлена 9 областями: Верхоянская горная, Яно-Оймяконская

горная, Момско-Черская горная, Уяндинско-Эрчинская горная, Колымская горная, Анюйская горная, таежная, редколесная мерзлотная и тундровая [Раковская,2013].

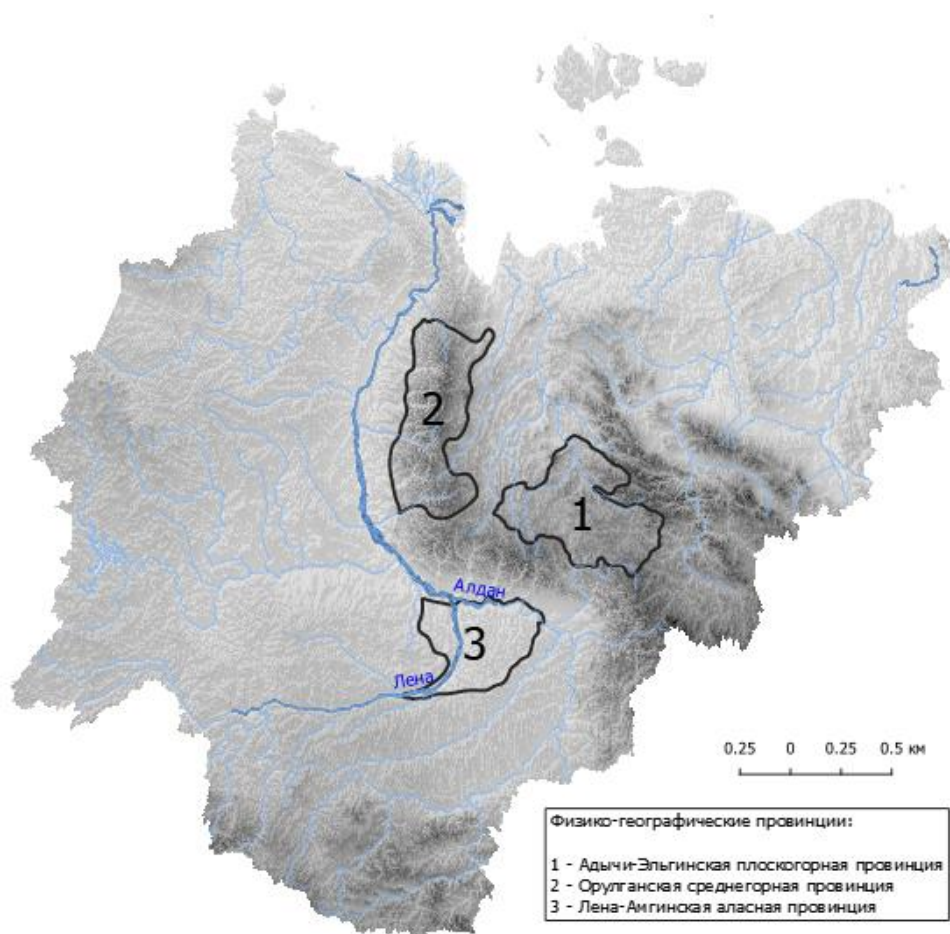


Рисунок 6. Карта исследуемых физико-географических провинций Якутии

В настоящем исследовании для геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов выбраны ключевые участки в трех мерзлотно-ландшафтных провинциях: среднетаежная Лено-Амгинская аласная провинция с сплошным распространением многолетнемерзлых пород, горноредколесная и горнотундровая Орулганская среднегорная провинция с сплошным распространением многолетнемерзлых пород и горноредколесная Адыче-Эльгинская плоскогорная провинция с сплошным распространением многолетнемерзлых пород (Рис 6). В физико-географическом отношении провинции относятся к Средней Сибири и к Северо-Восточной Сибири (Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия), 2018). Ключевые

участки для исследований выбраны таким образом, чтобы охватывать наибольшее количество типологических единиц ландшафтов на уровне типов местности и типов урочищ.

2.1. Горные мерзлотные ландшафты Якутии и природные условия исследуемых участков

Горные мерзлотные ландшафты Якутии занимают 60% всей территории Якутии. Для горных территорий принято выделять следующие природные комплексы (плоско-, низко-, средне-, высокогорные) в соответствии с ландшафтной ярусностью (последовательное гипсометрическое изменение ландшафтообразующих факторов) [Черных, 2001]. На территории Якутии выделено 9 плоскогорных, 7 низкогорных и 7 среднегорных провинций. Высокогорные не выделяются.

К горным мерзлотным ландшафтам относятся следующие типы ландшафтов, объединенных по климатическим условиям биома и сочетании групп растительных ассоциаций [Федоров, 1989]:

Горные пустыни представлены эпилитно-лишайниковым покровом приуроченная к водоразделам среднегорных и высокогорных ландшафтов, *горные тундры* – лишайниковыми и кустарничково-моховыми тундрами или *подгольцовые кустарниковые заросли* – кедровым стлаником в сочетании с ольховником и ерниками относятся к склоновым ландшафтам, обычно занимая верхние части склонов [Данилов, 2016] , *горные редколесья* – лиственничными редколесьями и рединами на сплошной криолитозоне и лиственничными редколесьями на прерывистой криолитозоне в Южной Якутии наиболее дифференцируемая часть горных мерзлотных ландшафтов занимают нижние части склонов и *горная тайга* представлена сосновыми и сосново-лиственничными лесами представленными в зоне прерывистой и островной криолитозоны [Мерзлотно-ландшафтная карта, 2018], то есть горнотаежный ландшафт характерен только для Гор Южной Якутии.

Интразональный горные мерзлотные ландшафты долин рек: *Горно-долинный* – приурочен к днищам долин горных рек, сложенных современными

аллювиальными отложениями горно-долинные, подразделяют на *горнотундровый* на сплошной криолитозоне с комплексом горнотундровой долинной растительностью. Дно речных долин, по которым проходил некогда ледник, принимает корытообразную форму [Данилов, 2016]. *Горноредколесные, северо-таежные* и *горнтаежные* состоящий из приречных лесов. *Ледниково-долинный* – занимает днища троговых долин, заполненных ледниковыми (гляциальными) отложениями на сплошной криолитозоне с комплексом горнотундровой долинной растительности. Поперечный профиль троговых долин принимает V-образную форму.

Типы горных мерзлотных ландшафтов остаются относительно однородными, хотя их абсолютные высоты могут быть разными. Так, например, горные пустыни на денудационных останцах Приморской низменности могут появляться с абсолютной высоты 200 м, то в Верхоянских горах – с 1000-1300 м, а в горах Южной Якутии – с 1600-1700 м. Однако, структура ландшафтов от этого сильно не отличается. Спектр высотных поясов – горных ландшафтов отличается и зависит от широты местности и орографических особенностей районов. На севере, в зоне тундр на денудационных останцах характерны только два типа горных ландшафтов – горные пустыни и горные тундры. В Верхоянских горах этот спектр усложняется подгольцовыми кустарниковыми зарослями и горными редколесьями, а в Южной Якутии на подножье гор появляется горная тайга, имеющимся горным редколесьям, подгольцовым кустарниковым зарослям, горным тундрам и горной пустыне [Fedorov et al, 2015].

2.1.1. Природные условия Адыче-Эльгинская плоскогорной провинции

Адыче-Эльгинская плоскогорная провинция занимает южную часть Верхоянского района северную часть Томпонского района. В пределах провинции находится северная часть Сартано-Адычанского нагорья, а также несколько среднегорных цепей и массивов. К их числу относятся цепи Тирехтяхская (до 1770 м) и Нельгесинская (до 1712 м), а также цепи Боронг. Тектоническая структура провинции хорошо изучена благодаря

геологоразведочным работам связанные с наличием крупных запасов золотоносных и серебряных месторождений (Западно Верхоянская золотоносная провинция). Рельеф характеризуется сочетанием плоских возвышенностей, межгорных впадин и невысоких хребтов. Территория расположена в пределах Эльга-Адычинской пологоскладчатой зоны Яно-Индибирского мегасинклинория и Верхояно-Чукотской области мезозойской складчатости, сложенный карбон-пермско-триасовыми комплексами. Карбонатные отложения состоят из доломитистых и др. песчаников, доломитов, глинистых, криноидных и детритовых известняков, черных и др. кремней, кремнистых, углистых и др. аргилитов, алевролитов, гравелитов, мергелей, остатков кораллов и др. фауны. Основные геологические породы пермской и триасовой системы - темно-серые и черные алевролиты, аргилиты и песчаники, иногда - с пропластами галечных полимиктовых конгломератов [Николин, 2011].

Типы местности провинции: плоскогорно-привершинный, горно-склоновый, горно-долинный, ледниково-долинный и предгорный моренный. Эти ландшафты отличаются близким залеганием коренных пород, перекрытыми тонким слоем выветрелых их обломков. Для выровненных участков характерны криогенное выветривание, морозная сортировка. На склонах развиты обвально-осыпные процессы, криогенный крип. Подгольцовые кустарниковые заросли представляют третий пояс горных типов ландшафтов. Характерной чертой этих ландшафтов являются заросли кедрового стланика в сочетании с кустарниковыми березками и ольховником на привершинных участках горных хребтов, плоскогорий и возвышенных плато.

Вся территория провинции расположена в зоне повсеместной многолетней мерзлоты. Глубина промерзания горных пород варьируется от 400-700 м. Мерзлота в Северной Якутии относится к низкотемпературной [Еловская и др., 1979]. Температура ее поверхностного слоя варьирует в пределах от -5, до -10 С, а в Верхоянье достигает - 13 ° С. Низким залеганием

мерзлоты вызвано формирование различных форм микро- и нанорельефа, которое отражается как на распределении растительности, так и на структурной организации флоры отдельных территорий (Николин, 2005). Из мерзлотных явлений широко распространены термокарстовые процессы, приводящих к оползням, разрушению береговых линий водоемов, вызванное термоабразией (рис. 6), обводнению и заболачиванию территории.

Провинция находится в области резко континентального климата с предельно низкими температурами воздуха зимой и высокими летом [Гаврильева, 1981]. Современный климат северных и высокогорных регионов способствует существованию ММП, и, следовательно, функционированию мерзлотных ландшафтов [Федоров, 2020].

Растительность провинции, как и всего Верхоянского хребта и ее пространственная организация описана в трудах Куваева В.Б. и Николина Е.Г. По флористическому районирования Верхоянского хребта территория относится к Восточному Верхоянью [Николин, Троева 2011]. Адычи-Эльгинское плоскогорье характеризуется хорошо выраженной вертикальной поясностью. Характерной чертой этого типа поясности является господство кустарниковых сообществ в подгольцовом поясе и горных тундр - в гольцовом, с преобладанием обнажений горных пород в его верхней части. Почвы провинции относятся к двум почвенным районам: (1) горно-тундровая и горно-гольцовые, куда входят от тундровых подбур мелкоземных почв до примитивных почв с тонким мелкоземнистым слоем с высокой щебнистостью, (2) мерзлотные северотаежные тиксотропные и северотаежные оподзоленные и перегнойно-глеевые почвы лесного пояса. В долинах рек, на выровненных водоразделах встречаются подзолистые иллювиально- гумусовые щебнистые почвы [Десяткин и др. 2009]. Пояс древесной растительности характеризуется господством *Larix dahurica* ssp. *sajanderi*, который подразделяется на 2 подпояса - сомкнутой горной тайги, 40 редколесий и редиин на мерзлотных таежных глеевых дифференцированных и недифференцированных почвах, а также в северотаежных глеевых и болотных почвах; подгольцовый пояс с

господством кедровых странников на тундровых и таежных подбурных мерзлотных почвах; тундровый пояс с преобладанием тундр ерниковых, мохово-травяных, дриадовых на мелкоземах и глеевых почвах с маломощным перегнойным горизонтом; пояс гольцовых пустынь представлен эпилитно-лишайниковыми сообществами на каменных россыпях с участками с примитивной почвой. На склонах гор, в интервале высот от 900 (1000) м до 1200 (1300) м, начиная с окраины грядовой области, до водораздела хребта и чуть далее, незначительно проникая в плосковершинную область, из полога лиственничных лесов и редколесий вверх выдвигаются три вида кустарников - *Pinus pumila*, *Duschekia fruticosa* и *Betula middendorf*. В нижней части горных склонов, на высоте до 1000 - 1100 (в отдельных случаях до 1300) м н.ур. м. повсеместно распространен лесной пояс, представленный различными по увлажнению и видовому составу лесами, редколесьями и редидами из *Larix dahurica* subsp. *cajanderi* [Куваев, 2006].

Комплекс долинной растительности органично связан с расположенной на прилегающих склонах растительностью. Характерной чертой долинного комплекса растительности является экстразональное распространение в нем высокопродуктивных лесов, образованных из *Larix dahurica* subsp. *cajanderi*, *Picea obovata*, *Populus suaveolens*, *Chosenia arbutifolia* и др., которые на склоны гор практически не заходят, либо снижают там свои параметры.

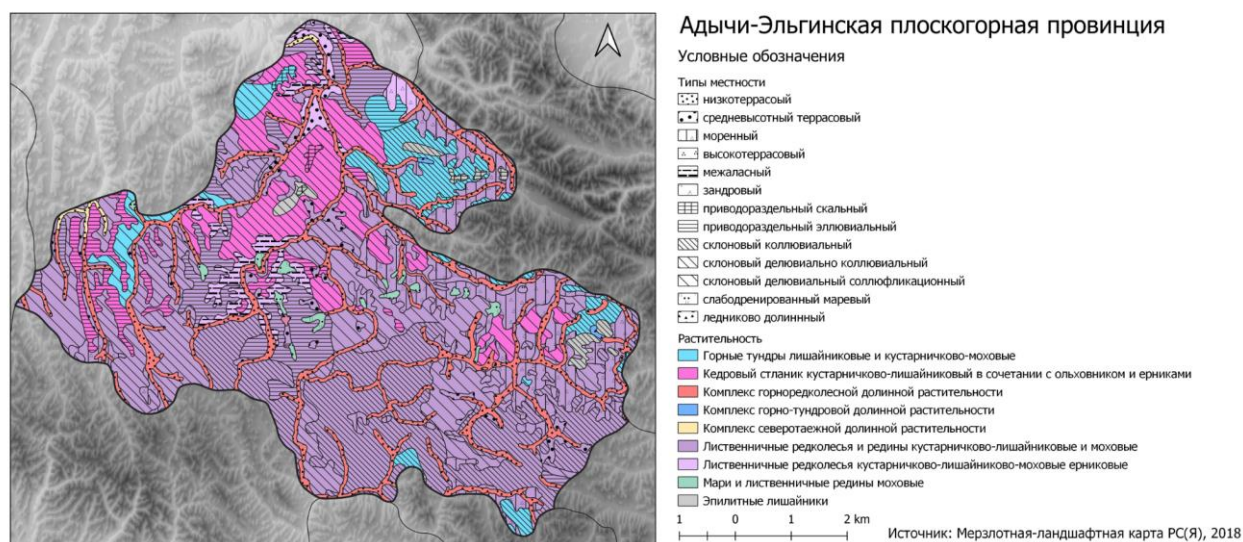


Рисунок 7. Мерзлотная ландшафтная карта Адычи-Эльгинской плоскогорной провинции [из Мерзлотно-ландшафтной карты...2018]

2.1.2. Природные условия Орулганской среднегорной провинции

Орулганская среднегорная провинция является самой возвышенной частью Верхоянской горной системы. Рельеф хребта Орулган характеризуется более выраженным альпийским рельефом, долины рек узкие, глубоко врезанные, V-образные. Склоны гор крутые, скалистые, слабо задернованные, покрыты обломочным валунником. Хребет сформировался в области мезозойской складчатости в начале позднемеловой эпохи и относится к области Верхоянского мегаантиклинория и в отличие от Адычи-Эльгинского плоскогорья территория относится к грядовой и узкодолинной области Верхоянской горной системы. Стратиграфическая структура хребта состоит из отложений от среднего до верхнего карбона и нижней перми, залегающих на меловых отложениях [Прокопьев и др, 1999]. Триасовые отложения также широко распространены на бассейне рек Яны (р. Бытантай, Тумара, Улахан Саккырыр и тд.). Образованы они однообразной толщиной песчаников, аргилитов и алевролитов с подчиненными разновидностями др. пород (битуминизированных известняков, зеленовато-серых туффитов, конгломератов, углисто-глинистых сланцев) и хорошей сохранностью

органических остатков преимущественно морского происхождения (иногда - с обломками минерализованной древесины) [Николин, 2011]

Климат провинции большей части относится к области резко континентального климата с предельно низкими температурами воздуха зимой и высокими летом. При этом северная часть испытывает сильное влияние воздушных масс Северного Ледовитого Океана и больше относится к влажному очень холодному климатическому поясу характеризующийся холодной зимой и коротким теплым летним периодом. По количеству осадком наблюдается сильные отличия для прилежащих территорий к бассейну Лены и бассейну Яны [Гаврильева, 1981].



Рисунок 8. Мерзлотно-ландшафтная карта Орулганской среднегорной провинции [из Мерзлотно-ландшафтной карты...2018]

Почвенно-растительный покров провинции можно описать по трудам Николина Е.Г., Перфильева В.И., Добрецова Л.А. и Софронова Р.Р. по описанию флоры Западного Верхоянья и ресурсного резервата “Орулган-Сис”. По флористическому районирования Верхоянского хребта территория

относится к Западному Верхоянью [Николин, Троева 2011]. Это наименее богатая в флористическом плане часть Верхоянского хребта.



Рисунок 9. Горное редколесье Орулганского среднегорной провинции (фото автора)

Почвенный покров провинции характеризуется преобладанием мелкоконтурных сочетаний и комплексов мерзлотных почв тундр и тайги, где выделяются тундровых подбурые почв на восточном макросклоне хребта и таежные глеевые торфянисто перегнойные на западной макросклоне. Для речных горных долин характерны заболоченные, лугово-болотные и торфянисто-перегнойные почвы [Еловская, 1989].

Растительность провинции в основном состоит их редкостойных лиственничных лесов [Андреев, 1989]. Древесный ярус представлены редколесьем и редианами из *Larix sibirica*. В кустарниках доминируют *Pinus pumila*, *Betula divaricata*, *B. exilis*, в ярусе кустарничков – *Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum* и *V. vitis-idaea* на глеево-мерзлотных (мерзлотных тиксотропных и мерзлотных оподзоленных) почвах. Мохово-лишайниковый

покров представлен сфагнами (*Sphagnum warnstorffii*, *S. fuscum* и др.), зелеными мхами и лишайниками (*Cladonia stellaris*, *C. arbuscula*, *C. rangiferina*, *Cetraria islandica*, *C. laevigata*, *C. cucullata*, *C. nivalis*, виды родов *Umbilicaria*, *Parmelia*, *Hypogimnia* и др.) [Николин, 2009], которые развиваются на подбурях и горно-гольцевых и горно-тундровых типичных почвах. Кроме того, на склонах южной экспозиции формируются степные сообщества. В долинных ландшафтах образуются небольшие по площади иванчайные луга, соседствующие с пойменными разнотравными лугами на кислых мерзлотных пойменных почвах. В растительности долинных комплексов преобладают ерниково-кустарниковые и лесных сообществ, в том числе тополево-чезониевые леса [Исаев и др, 2017].

2.2. Среднетаежные мерзлотные ландшафты Якутии и природные условия исследуемых участков

Таежные ландшафты образуют почти сплошную зону, простирающуюся через весь континент Евразии, составляя северную окраину умеренного географического пояса. Тайга наиболее типична для равнинных областей Якутии между 59° и 71° с.ш., ее протяженность по долготе достигает 1600 км. В средней тайге Якутии расположено 10 физико-географических провинций страны Средняя Сибирь, которые занимают 29 % территории республики. Из них 7 провинций сплошного распространения ММП, 2 прерывистого и 1 островного [Федоров, 2015]. В среднетаежном подтипе преобладают лиственничные леса, часто с примесью березы плосколистной, ели сибирской и сосны обыкновенной. Основными чертами биоты являются более высокий бонитет и большая сомкнутость крон по сравнению с северотаежной растительностью, появление примеси сосны обыкновенной, уменьшение роли лишайников в напочвенном покрове, появление чистых травяно-кустарничковых покровов. Среднетаежные ландшафты в биогидроклиматическом и мерзлотном отношениях в пределах Якутии весьма неоднородны. Их контрастность усугубляется и местными условиями, в особенности изменениями континентального климата. Засушливость в

отдельных районах определяет развитие степных элементов (Лено-Амгинское междуречье, долина р.Лены). Здесь особенно проявляется влияние мерзлотного фактора на дифференциацию ландшафтов, выражающееся в подразделении среднетаежного подтипа ландшафта на три рода ландшафтов: сплошные, прерывистые и островные многолетнемерзлых пород (ММП).

Для среднетаежных ландшафтов в сплошной криолитозоне преобладают малопродуктивные лиственничные леса в основном кустарничково-зеленомошные и травяно-кустарничковые. На прерывистых ММП представлены мерзлотные среднетаежные ландшафты с относительно продуктивными лиственничными лесами с примесью ели и сосны кустарничково-зеленомошными. На островной криолитозоне Южной Якутии ПТК представлены лиственнично-елово-кедровыми и пихтово-кедрово-еловыми лесами на плакорах. Напочвенный покров кустарничково-травянисто-зеленомошный.

В среднетаежных ландшафтах выделяют шесть зональных типов местности: плакорный, межаласный, склоновый, древнетеррасовый песчано-галечниковый, зандровый и моренный

Плакорный – включает в себя приводораздельные плоскоравнинные и пологоволнистые (с наклоном поверхности до 2-3°) достаточно дренированные междуречные приводораздельные пространства плато, где развиты элювиальные и элювиально-делювиальные отложения от 0,5 до 5 м. *Межаласный* тип местности, развит на высоких террасах крупных рек (Лены, Вилюя, Алдана, Амги, Анабара, Оленька и др.) и озерно-аллювиальных равнинах, характеризуется сильной льдистостью отложений. *Склоновый* – занимает наклонные (больше 2-3°) поверхности плато (приводораздельные склоны) и склоны долин рек, которые сложены коллювиальными, делювиально-коллювиальными, делювиально-солифлюкционными и др. отложениями с близким залеганием коренных пород, местами, выходящими на дневную поверхность. *Древнетеррасовый песчано-галечниковый* тип местности встречается в пределах древних

аллювиальных равнин, развитых высоких террасах крупных рек (Лены, Вилюя и др.). *Зандровый* тип местности развивается на пологоувалистых и плоских поверхностях водноледниковых равнин. *Моренный* тип местности развит на пологоволнистых, слегка холмистых ледниково-аккумулятивных и озерно-ледниковых равнинах, сложенных ледниковыми, водно- и озерно-ледниковыми отложениями [Федоров, 2015].

2.2.1. Природные условия Лена-Амгинской аласной провинция

Лено-Амгинская аласная провинция самая густонаселенная часть Республики Саха (Якутия) здесь расположена столица республики г. Якутск, а также семь густонаселенных сельскохозяйственных улусов и два городских округа (ГО): Мегино-Кангаласский, Намский, Усть-Алданский, Хангаласский, Чурапчинский, Амгинский, Таттинский улусы и ГО г. Якутск и ГО пос. Жатай. Данная провинция очень хорошо изучена. Изученность провинции определяется множеством публикаций и трудов, основанные на фактических материалах получены в множественных полевых работах [Каплина, 2009], [Николаев, 2011], [Варламов, 2002], [Sato et al., 2016] многолетних стационарных наблюдения на ключевых участках Нелегер, Улу, Спасская падь [Федоров и др., 2006] и тд.

Провинция целиком расположена в пределах Центрально-Якутской денудационно-аккумулятивной равнины и характеризуется преобладанием природных комплексов, подчиняющихся закономерностям широтно-зональной дифференциации. Территория расположена в двух крупных тектонических структура Сибирской платформы это Алданская антеклиза и Вилюйская синеклиза. В рельефе преобладает приводораздельные плоскоравнинные плато. Платформенный чехол образован карбонатными (доломиты, известняки, мергели и тд.) и терригенными отложениями (песчаники, пески). Из четвертичных пород преобладают делювиально-солифлюкционные и элювиальные толщи, на современных долинах крупных рек— аллювиальные и делювиально-коллювиальные [Карта четвертичных отложений ..., 2014].

На территории выделены плакорный, склоновый, приводораздельный слабодренированный, межаласный, низкотеррасовый и мелкодолинные типы местностей. Плакорный тип включает плоскоравнинные приводораздельные пространства. Склоновый тип — пологосклоновые пространства междуречных долин (Рис. 10).

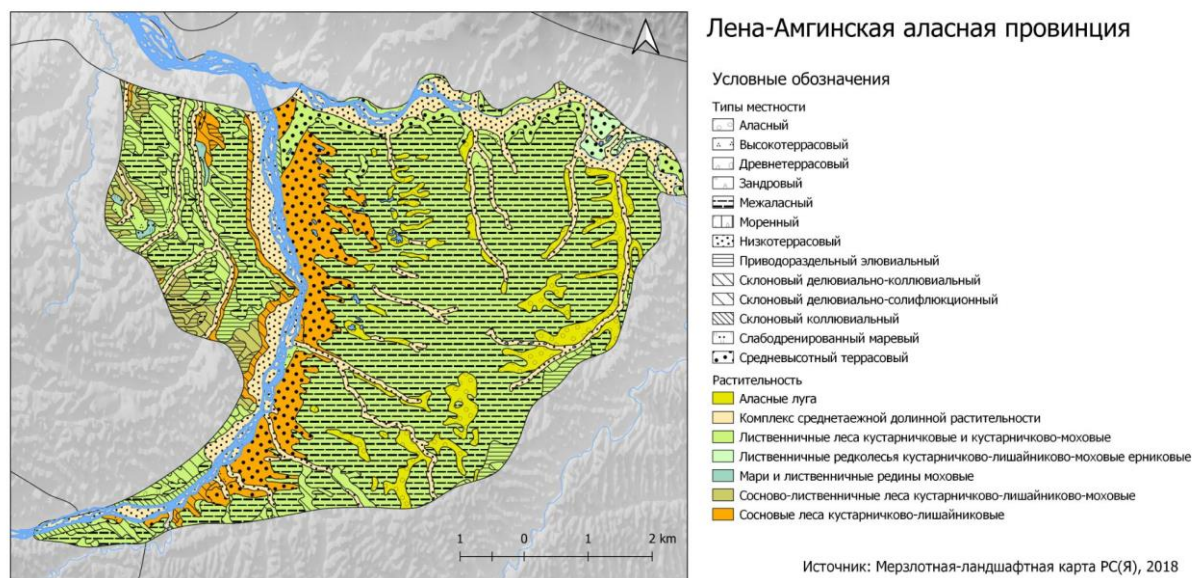


Рисунок 10. Мерзлотно-ландшафтная карта Лено-Амгинской аласной провинции

Многолетнемерзлые грунты характеризуются большой льдистостью. По всей провинции широко распространены древние термокарстовые котловины - аласы. Котловины имеют в плане разнообразные формы (округлые, вытянутые, серпообразные) и поперечные размеры от нескольких десятков до сотен метров. Глубина котловин не превышает 3 метров. В днищах многих аласов присутствуют многолетние бугры пучения (булгунняхы). Межаласное пространство покрываемая лесом при уничтожении лиственного покрова могут создать условия для современного развития термокарста.

Климат Лено-Амгинской провинции определяется положением территории в поясе умеренных широт, значительной удаленностью от океанов - континентальность. Континентальность является основной особенностью

климата характерной для всей Центральной Якутии, что характеризуется большими колебаниями годовых температур (более 100 градусов Цельсия), малым количеством выпадающих осадков (250-300 мм. в год) [Гаврильева, 1973]. Рельеф не имеет существенного влияния при формировании климата, поскольку поверхность весьма ровная. Отдельные понижения и возвышения обуславливают лишь микроклиматические особенности.

Почвенно-растительный покров Лено-Амгинской провинции представлен лиственничными и сосновыми лесами с примесью ели и ерников, развитие которых связано с мерзлотными почвами средней тайги (дерново-карбонатные, таежные типичные), в мелкодолинной и низкотеррасовой местности развиваются луговые, лугово-черноземные и дерново-луговые мерзлотные почвы с лиственничной и сосново-лиственничными лесами с участками. Растительность характеризуется преобладанием бруснично-травяных лиственничных лесов. Согласно схема лесорастительного районирования [Щербаков, 1975], территория провинции входит в состав Центрально-Якутского лесорастительного округа для которого характерна низкая лесистость. В составе лесного покрова доминирует лиственница (*Larix cajanderi*), участвуют сосна (*Pinus silvestris*) и береза (*Betula platyphylla*, *Betula alba*), реже ель сибирская (*Picea obovata*), тополь (*Populus suaveolens*), осина (*Populus tremula*) и древовидные ивы (*Salix* spp.). Ярус кустарников обычно отсутствует, произрастают лишь отдельные кусты шиповников (*Rosa acicularis*) и спирей средний (*Spiraea media*). Ярус кустарничков представлен брусникой (*Vaccinium vitis-idaea*), багульник (*Ledum palustre*). Травостой представлен ксерофильным разнотравием, осочками и хвощами. Лишайниковый покров тоже хорошо развит. Произрастает *Cetraria cucullata*, *Cladina rangiferina*. Лесной покров Лено-Амгинской провинции подвержен воздействиям лесных пожаров и имеет следы послепожарных модификаций. Лесные пожары и вырубki имеют значительную роль в динамике мерзлотных ландшафтов таежных зон. Типы растительных ассоциаций послепожарных сукцессионных стадий (гари молодые, рудеральная растительность) и

антропогенного воздействия (вырубки) были включены в классификационную схему мерзлотно-ландшафтного картографирования для Центральной Якутии [Шестакова, 2011]. Сукцессия растительности Центральной Якутии представлены двумя стадиями. Сукцессии до 20 лет представлены порослями березы и лиственницы без кустарничкового и травяного покрова. Для данной стадии характерна активация термокарстовых процессов. Вторая стадия от 20-50 лет связана с развитием травостоя и проростанием кустарничковой растительности [Шестакова 2015].

Луга в ландшафтном отношении относятся к суходольным плакорным, аласным, сырым заболоченным и долинным местам. Особенностью почвенно-растительного покрова провинции являются аласы - безлесные растительные комплексы в термокарстовых котловинах, часто с наличием озерных водоемов. Распределение растительности аласных лугов представляет собой концентрические пояса сообществ, сменяющие друг друга соответственно условиями увлажнения. Чаще всего выделяют 4 пояса: прибрежно-водный, избыточно увлажненный, среднего увлажнения и сухой комплексный пояс [Босиков, 1991].

Общие выводы по II главе

1. Горные мерзлотные ландшафты Севера-Востока Сибири характеризуются отсутствием горнотаежных ландшафтов. Северотаежные тип растительности ландшафтов характерен только для долинных комплексов. Так как горные системы в основном низкогорные и среднегорные преобладающим типом ландшафтов является горная тундра.
2. Исследуемые провинции полностью расположены в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Орулганская среднегорная провинция отличается сильно выраженной долготной секторальностью и контрастом двух макросклонов - западной и восточной. Адычи-Эльгинская плоскогорная провинция характеризуется хорошо выраженной высотной поясностью с выделением подгольцово-кустарникового пояса, который нивелируется при движении на север.
3. В обеих горных провинция широко распространены моренные, зандровые и ледниково-долинные флювиагляциальные и гляциальные отложения мезозойской группы. Четвертичные отложения на данной территории распространены мало и в основном приурочены к долинам рек. Для Лена-Амгинской аласной провинции наоборот в основном распространены четвертичные аллювиальные отложения и плакорные типы местности аккумулятивно-денудационной Центрально-Якутской равнины.
4. Для возможностей оценки пространственной структуры, в контексте выявления сложившейся классификации мерзлотных ландшафтов и его видимых индикаторов (растительности и местности) важно использовать сопоставимую или идентичную схему выделения при геоинформационном моделировании.

ГЛАВА III. ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ИЗУЧЕНИИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Целостное представление мерзлотных ландшафтов как сложного многокомпонентного объекта исследования требует синтеза разнокачественных знаний и научных представлений о структуре и развитии мерзлотных ландшафтов. Такие исследования связаны с большим количеством географической информации и привлечения методов геоинформатики и технологий дистанционного зондирования Земли. Процесс моделирования ландшафтов заключается в сборе и обработке данных и знаний различными методами в информационный комплекс, подход к данному процессу является одним из ведущих методологических направлений в геоинформационных и географических исследованиях [Истомина, 2006].

Геоинформационное моделирование является одним из наиболее современных методов изучения ландшафтных комплексов и основано на использовании высокопроизводительных компьютерных технологий, в том числе и методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Данное методологическое направление является широко применимым в современных исследованиях ландшафтов, как и в зарубежной науке [Paudel and Yuan, 2012], [Lary et al., 2009], так и в отечественной [Истомина, 2006], [Глотов, 2016].

3.1. Геоинформационное моделирование в изучении ландшафтов

Для начала нам нужно определиться с основными понятиями геоинформационного моделирования. *Геоинформатика* или *геоинформационные технологии* можно определить, как науку, технологию и производственную деятельность по научному обоснованию, проектированию, созданию, эксплуатации и использованию географических информационных систем (ГИС), по разработке геоинформационных технологий, по прикладным аспектам или приложению ГИС для практических или научных целей [Капралов и др., 2010]. ГИС (географическая информационная система)

определяется как - информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно координированных данных. Важное место в ГИС занимает инструментарий по обработке и анализу данных дистанционного зондирования Земли, как ведущего источника наполнения геоданных [Лурье, 2003].

Геоинформационное моделирование - метод, основанный на построении и использовании моделей пространственных объектов, их взаимосвязей и динамики процессов средствами ГИС [Журкин и др., 2012]. Данный метод относится к группе методов информационного моделирования. Описание пространственного объекта, например, природного комплекса или явления, в рамках геоинформационного моделирования производится путем составления аппаратного комплекса, то есть набора операций в ГИС среде, конечным результатом которых являются геоданные содержащие формализованное описание объектов, заложенных в теоретической основе моделирования. Его конечная цель – представление исследуемых частей объекта в совокупности и по отдельности. Вариаций геоинформационного моделирования много и аппаратный комплекс при этом адаптируется под каждый объект изучения. Они могут базироваться на различных наборах геоданных, в том числе исключительно на векторных и атрибутивных. В данном случае, когда речь идет о природных комплексах обеспечение сквозного исследования структурно-динамических показателей на значительных площадях обеспечивается данными дистанционного зондирования Земли с космоса. Информация со спутниковых снимков разного пространственного и спектрального разрешения позволяет развивать методы геоинформационного моделирования в локальном, региональном и глобальном уровнях. Количественные яркостные показатели в многоканальных снимках, отражают синтез свойств разных компонентов ландшафта, что позволяет получить от них данные для дифференциации и пространственной организации ландшафтов путем интерпретационного анализа. Поэтому понятие

геоинформационное моделирование ландшафтов неотделима от методов анализа и обработки данных дистанционного зондирования.

Имеющиеся в настоящее время системы дистанционного зондирования характеризуются различными параметрами съемочной аппаратуры и орбитами полета. Этим обусловлены области применения и масштабы картографирования полученных ими спутниковых снимков (Рулев и др. 2015). Снимки сверхвысокого разрешения, такие как Ресурс-П, QuickBird, SPOT-7, Ikonos, OrbView-3 имеют высокую детальность изображения и обеспечивают дешифрирование малоразмерных (от 1 метра) объектов. В ландшафтном картографировании такие снимки применимы при изучении отдельных ландшафтных объектов. Для дешифрирования с размерностями более 10 метров используются снимки искусственных спутников Земли Канопус-5 Landsat 1-8 и Sentinel-2. Для ландшафтных исследований снимки данных размерностей могут использоваться для составления среднемасштабных карт 1:500 000 до 1: 100 000. На них можно выделять типы ландшафтов, типы местности и типы урочищ. Важным составляющим этих снимков является периодичность съемки территории в 5-7 дней, что дает возможности по комплексному анализу разновременных изображений и по организации мониторинга динамических объектов и процессов. При этом следует отметить, что использование отечественных данных дистанционного зондирования сильно ограничено, во многом недоступна для исследователей. Поэтому исследования природных комплексов и почвенно-растительного покрова даже российских исследователей базируется на общедоступных зарубежных данных дистанционного зондирования.

Далее мы рассмотрим опыт по применению методов геоинформационного моделирования в изучении природных комплексов в отечественной науке.

Одним из пионерных работ в этом направлении является применение геоинформационное моделирование для картографирования ландшафтов Прибайкалья [Истомина, 2006]. Модель ландшафтных комплексов на уровне

фаций и групп фаций представлен через сегментирование космических снимков по определителю Якоби, где выделяются относительно однородные ареалы, которые классифицируются на типы фации по сочетанию растительного сообщества, вида почвы и элемента рельефа.

Комплексный геоинформационный анализ разновременных оптических и радиолокационных изображений для распознавания пойменных и болотных растительных сообществ, и моренных и грядово-волнистых форм рельефа на плоскогорье Укок была продемонстрирована в работе Т.В. Байкаловой. Определены хорошие возможности выделения участков леса с различными таксационными характеристиками при обработке разновременных радиолокационных снимков методом сегментации [Байкалова, 2002].

В работе Глотов А.А. впервые для отечественной науки были изложены основные положения геоинформационного моделирования ландшафтов и обосновано их применение на примере парагенетических долинно-речных ландшафтах Воронежской области. Так геоинформационное моделирование ландшафта представляет собой комплекс, состоящий из субсистем (компонентов ландшафтов и их функциональных взаимосвязей) представленных количественными данными, такими как цифровые модели рельефа, растительности, климата и тд. В его работе важное значение уделяется разработке ГИС база геоданных ландшафтов, включающую таблицу по внутренней комплексной и компонентной структуре, ландшафтно-геофизическими параметрами, изученными с использованием дешифрирования данных многозональной космической съемки (Landsat, DMC, RapidEye), цифровых моделей рельефа и полевого картографирования [Глотов, 2013]. Геоинформационное моделирование позволило провести анализ ландшафтной структуры долинно-речных ландшафтов на уровне типов местности. Динамическая часть геоинформационного моделирования основана на разновременных многозональных космических снимках. По ним выявлены основные процессы трансформации долинно-речных ландшафтов Воронежской области и их количественные характеристики. Поэтому данную

работу можно считать, основополагающей в применении геоинформационного моделирования в рамках таксономической системы Ф.Н. Милькова.

В зарубежной научной литературе мы чаще встречаем понятие ГИС моделирование (GIS modeling). Исследования в основном связаны с выявление динамических явлений в ландшафтах, классификация которой упрощена до биофизических классифицируемых единицах подстилающей поверхности Земли.

Обобщая обзор опыта, надо отметить, что работ по геоинформационному моделированию природных комплексов в отечественной науке достаточно мало. Что связано прежде всего сложностями адаптации классификационной схемы ПТК к выделяемым пространственным объектам с помощью геоинформационного моделирования.

Методологические основы геоинформационного моделирования ландшафтов базируются на методических разработках в области ландшафтного картографирования и в значительной мере его расширяют. Так одним из главных параметров любого моделирования является достоверность полученных данных. В ландшафтном картографировании, достоверность обеспечивается комплексным использованием разновременных данных дистанционного зондирования Земли, массивом материалов наземных обследований территории, наличием развитой концепции представления и анализа разнородных геопространственных данных и разработанных на их основе алгоритмов, и программ обработки информации, ГИС программных продуктов обработки и картографирования результатов [Коновалова и др. 2005]. Применение информационных моделей при изучении природных комплексов выводит подходы применения геоинформационных технологий за рамки картографии [Глотов, 2013]. Таким образом, моделирование позволяет применять в изучении природных комплексов методы прикладной информатики и математической статистики. Развивая данный тезис, мы можем констатировать, что, в настоящее время, в изучении ландшафтов

широко внедряются подходы интеллектуализации ГИС с применением алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, включающая нейронные сети и другие методы глубокого обучения, что обеспечивается накоплением и возможностями получения массивных данных дистанционного зондирования и развитием программно-аппаратного комплекса их ускоренной обработки.

При этом тут можно выделить два направления развития: (1) первое направление связано с улучшением точности выделения классификационных единиц, общепринятых в мировой науке упрощенной схемы классов (био)физического покрова земной поверхности. Разработаны множества баз данных (глобальных и региональных) по данной классификационной схеме. Например, Global Land Cover-SHARE (GLC-SHARE) глобальная база данных о земном покрове с пространственным разрешением 30 угловых секунд. В нем выделены 11 классов покрова земной поверхности [Di Gregorio and Jansen, 2000]. С тех пор проведены множества исследований связанные с улучшением точности выделения классов земной поверхности для различных сенсоров и природных зон. Так, в статье по классификации земельного покрова бореальных таежных ландшафтов Швеции сравниваются точность классификации по 4 разным алгоритмам машинного обучения по разновременным снимкам Sentinel 2 [Abdi, 2020]. Данный подход позволяет классификатору снизить неоднородность природной среды и проводить исследования динамических явлений в нем. Динамика изменений этих классов (land cover change) позволяет получить сведения о скорости и размерах протекания ландшафтных денудационных, эрозионных, эволюционных процессов. (2) второе направление связано с разработкой методики картографирования комплексных ландшафтных объектов и типологических единиц. Данное направление развития подразумевает интеграцию экспертных знаний с предметной области исследуемого объекта. Часто методы применения знаний (knowledge-driven approach) используются при выделении определенных видов растительности. Выделение типов растительности и

видов растений усложняется из-за их спектрального сходства с другими сообществами в гетерогенной растительности (фитоценохора) при параметрических классификациях [Gao, 2004].

Машинное обучение (ML) в общих чертах можно рассматривать как класс искусственного интеллекта, которая занимается проектированием, разработкой и применением алгоритмов и методов, которые позволяют компьютерам учиться на данных. Машинное обучение тесно связано со статистикой (особенно непараметрической и вычислительной статистикой) и теоретической информатикой. С середины двадцатого века машинное обучение превратилось из имитации простого нейрона и искусственных нейронных сетей в прочную междисциплинарную область фундаментальных и прикладных исследований, оказывающих важное влияние на многие темы: распознавание образов, биокомпьютеры, распознавание речи, финансовые приложения, анализ и моделирование многомерных гео- и пространственно-временных данных окружающей среды и т. д. [Kanevski. M. et al, 2009].

В географии алгоритмы машинного обучения имеют широкое применение, благодаря возможностям классификационной обработки изображений и при моделировании природных процессов, например, при геоинформационном прогнозном моделировании рисков лесных пожаров по космическим снимкам в корреляции с антропогенным, климатическим и топографическим факторами [Janies and Gadal, 2020]. Разработка алгоритмов машинного обучения открывает интересную перспективу для дальнейшего изучения того, как классификаторы работают в неоднородной природной среде. Помимо выбора подходящего набора данных дистанционного зондирования, выбор метода классификации также не менее важен для успешного картирования [Sothe et al., 2017]. Наиболее часто используемые алгоритмы машинного обучения в классификации неоднородного земного покрова (land cover) включают дерево решений (Decision Tree), сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network), случайный лес (Random

Forest) и машину опорных векторов (Support Vector Machine), максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) и другие.

В исследовании ландшафтов машинное обучение часто используется в изучении почвенно-растительного покрова. Особенно много исследований, связанных с изучением сельскохозяйственных ландшафтов. Использование временного ряда снимков для картографирования растительности и особенно для распознавания типов сельскохозяйственных культур стремительно начал развиваться с появлением новых сенсоров высокого пространственного разрешения для свободного доступа, таковым является Sentinel 2. Например, Debella-Gilo и Gjertsen использовали временной ряд снимков Sentinel 2 для распознавания зерновых, кормовых и неиспользуемых сельскохозяйственных культур с применением алгоритма глубокого обучения (deep learning) сверточные нейронные сети (convolutional neural network) [Debella-Gilo et Gjertsen, 2021]

Метод использования многозональных космических снимков для картографирования растительности ландшафтов также широко используется в отечественной науке. Стыценко Е.А. разработала метод автоматизированного дешифрирования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных зональных космических изображений. Работа основана на вариации фотосинтетической активности растений на спектрально-отражательных характеристиках в зависимости от фазы вегетации. Так на основе шести разносезонных (январь, март, май, июль, август, сентябрь) снимков Landsat 8 OLI (пространственное разрешение 30 м) на территорию Кольчугинского района Владимирской области 2014 года было выделено 7 классов древесной растительности, 3 класса сельскохозяйственных земель и 3 типа нерастительного покрова [Стыценко, 2018]. В глобальных масштабах Институт космических исследований РАН ведет картографирование растительности по разносезонным снимкам при составлении карт растительности России в масштабе 1:5 000 000 на основе многолетних архивов

данных спектрорадиометра MODIS (пространственное разрешение 250, 500, 1000 м в разных спектральных каналах) [Барталев, 2015].

Вышеупомянутые исследования были сосредоточены на классификации разновременных изображений на уровне пикселей. Увеличивающееся пространственное разрешение доступных космических датчиков, включая датчик Multispectral Imager (MSI), установленный на Sentinel-2 [Petitjean et al. 2012], создаёт возможность применения объектно-ориентированного анализа изображений (OBIA) для улучшения результатов классификации из многозональных данных. OBIA - это итеративный метод, который начинается с сегментации спутниковых изображений на однородные и смежные сегменты изображения (также называемые объектами изображения) [Blaschke, 2010]. Затем полученные объекты изображений назначаются целевым классам с использованием контролируемых или неконтролируемых алгоритмов классификации. [Lebourgeois et al. 2017] использовали OBIA для составления карт мелких приусадебных хозяйств на Мадагаскаре, используя изображения Pléiades (пространственное разрешение 0,5 м) для определения границ сельскохозяйственных полей. Затем поля были дополнительно классифицированы с использованием коэффициентов отражения и спектральных индексов, вычисленных из Sentinel-2 (искусственно созданные изображения из изображений SPOT-5 и изображений Landsat 8 OLI / TIRS) и из вспомогательной информации на основе цифровой модели рельефа (DEM), такой как высота или уклон. др. (2016) использовали данные Sentinel-2 и Landsat 8 с одной датой для классификации сегментов теплиц по изображениям WorldView-2. (2013) описали подход, основанный на разновременных объектах, для картирования зерновых культур по снимкам Landsat SLC-offETM + (без использования схем заполнения пробелов); они пришли к выводу, что этот подход позволил точно классифицировать культуры, частично находящиеся в пределах пробелов в данных, и избежать эффекта соли и перца, характерного для пиксельного подхода, который обычно приводит к смешанным классификациям сельскохозяйственных

культур на полях. [Castillejo-González et al., 2009] показали, что объектный анализ превосходит пиксельный анализ для картирования пахотных земель, в котором используются изображения QuickBird. [Matton et al., 2015] и [Ли и др. 2015] также сообщили о преимуществах использования объектных методов для классификации различных типов сельскохозяйственных культур по временным рядам SPOT-Landsat 8 и данным Landsat-MODIS соответственно.

Тепловые инфракрасные изображения также используются для исследования ММП с помощью различных спутниковых данных, таких как данные TM / ETM / TIRS спутников Landsat, данные MODIS спутников Terra / Aqua и данные Aster спутников Terra [Корниенко, 2007]. Калиничева С.В. предложила метод использования температуры поверхности земли (LST) по тепловым инфракрасным каналам со спутниковых изображений Landsat-5 и Landsat 7, в качестве параметра картирования наряду с обычно используемыми параметрами идентификации рельефа и растительности. Метод был применен для различения мерзлых и немерзлых участков в прерывистой вечной мерзлоте на склонах Эльконских гор и Олекмо-Чарской возвышенности на Южной Якутии [Калиничева, 2019]. Медведков А.А. использует анализ тепловых снимков при корреляции зависимости температуры поверхности и запасами фитомассы, что позволяет определять мерзлотные и немерзлотные ландшафты [Медведков, 2016].

Еще одним направлением интеллектуализации ГИС является внедрение методов онтологии. В последние десятилетия мы стали свидетелями быстрого развития географической онтологий, а именно расширений онтологий в геоинформатике. Онтология играет существенную роль в создании ГИС, так как она позволяет устанавливать соответствия и взаимосвязи среди различных типов геоданных — пространственных сущностей и отношений. Использование онтологий будет способствовать улучшению функционирования информационных систем благодаря тому, что удастся избежать проблем, вызванных противоречиями между онтологиями, неявно внедренными в ГИС [Дулин и др. 2007].

Онтологический подход также развивается в технологиях дистанционного зондирования. Онтология применяется в рамках развития когнитивного подхода для классификации изображений, который ставится вместо общепринятого индуктивного подхода, который основан на обучении массива данных [Arvor et al, 2019]. Объект и локализация являются онтологическими фундаментальными базовыми элементами концепции географического пространства и базовой конструкцией географических знаний. Они также являются семантическими базовыми компонентами географических представлений в картографии, дистанционном зондировании и географической информационной системе (ГИС) [Gadal, 2012].

Поэтому в перспективе развития наших исследований мы видим развитие онтологического подхода к пониманию мерзлотных ландшафтов и его комплексного представления, и формализации причинно-следственных связей многофакторной сущности ландшафта. Геоинформационное моделирование мерзлотных ландшафтов дает нам базовые знания об объектах, представляющих концепцию мерзлотного ландшафта. Также типологические единицы и категории их определения через обработку изображений (растительные ассоциации и мезорельеф) создают собственную семантическую сеть

3.2. Использование цифровых моделей рельефа для распознавания ландшафтов

Цифровую модель рельефа (ЦМР) как правило представляют с помощью растровой модели данных как функцию абсолютной высоты местности от плановых координат [Хромых и др., 2009]. Подобное представление позволяет с использованием методов функционального анализа и дифференциальной геометрии получать производные морфометрические показатели, которые раскрывают рельеф как компонент ландшафта с различных позиций: величина уклона, экспозиция, топографический индекс влажности и т.д. В мерзлотно-ландшафтных исследованиях часто используются растровые модели рельефа, в том числе и сверхвысокого разрешения

полученные с беспилотных летательных аппаратов [Gagarin et al., 2020], [Башарин, 2020]. Например, ортотрансформированные фотографии и цифровые модели местности с пространственным разрешением 4,0 см и 8,0 см соответственно были применены для распознавания полигональных текстур на заброшенных пахотных землях. Различия в размерах полигонов для заброшенных пахотных земель и вышедших из употребления аэродромов и их динамика позволили авторам выявить различия в распределении клиньев льда и развитии термокарста [Siato, 2018].

Геоморфометрия (geomorphometry, digital terrain analysis, количественная геоморфология) - научное направление, специализирующееся на анализе ЦМР и вычислении на их основе специализированных показателей, определенным образом характеризующих исследуемое пространство. В настоящее время программные продукты ГИС способны провести множество производных геоморфометрических операций с ЦМР (Terrian Analysis) для выявления различных параметров земной поверхности в том числе и форм рельефа. Единицы рельефа использовались в качестве основных вспомогательных характеристик при картировании растительного покрова, почв, генетической структуры отложений, закономерностей распределения снежного покрова и ландшафтной экологии. Такие термины, как гребень, впадина и подножье, используются во многих легендах карт для определения основных единиц местности. Возвращаясь к критериям выделения типов местности и урочищ, то их принято выделять на основе рельефа и литологических особенностей материнской породы, то есть стратиграфо-генетической структуре отложений в сочетании с геоморфологической структурой [Федоров, 1989]. Стратиграфо-генетические комплексы обуславливают генетическое сходство типов местности, например, аллювиальные отложения характерны для низкотеррасовых, мелкодолинных, песчано-грядовых средневысотных террасах, горнодолинных и древнетеррасовых песчано-галечных типах местности. Месторасположение в рамках организации рельефа можно определить с помощью ГИС

геоморфологических операций. При этом мы не можем ограничиться только автоматическими типами обработки, так как формы рельефа является одним из критериев определения типов местности, такие типы местности как межбалочные могут быть определены ПТК развитые на высоких аллювиальных террасах вместе с балочными термокарстовыми мерзлотными комплексами. Зандровые определяются по наличию флювиогляциальных отложений, хорошо различимых в текстуре спутниковых снимков. По текстуре на спутниковых снимках можно также различить моренные типы местности.

ЦМР и производные наборы данных (уклон, аспект, пересеченность, водосборный бассейн и теневой рельеф) использовались исследователями для геоморфологических и геоморфометрических ландшафтных исследований [Самсонов, 2011]. Обработка данных дистанционного зондирования и ЦМР в зарубежной научной литературе получило название классификация форм рельефа (Landform classification). Фактически, равнины, холмы, горы и долины, которые можно наблюдать во многих масштабах и имеющих определяющее значение для ландшафтной индикации, являются примерами типов рельефа. Для определения типа рельефа используются такие параметры, как длина, ширина и высота, а также статистическая частота основных геоморфных атрибутов или пересеченность местности. При моделировании форм рельефа с ЦМР одним из применяемых методов является использование индекса топографического положения.

Индекс топографического положения (ТРІ) - это разница между высотой в ячейке и средней высотой в окрестности, окружающей эту ячейку.

$$TPI = E - \sum_{n-1} E_m/n$$

Алгоритм ТРІ сравнивает высоту (E) каждой ячейки в DEM со средней высотой (E_m) определенной окрестности вокруг ячейки (n - количество ячеек). Положительные значения указывают на то, что ячейка выше своих соседей, а отрицательные значения указывают на то, что ячейка ниже. Значения ТРІ, близкие к нулю, являются либо плоскими участками (где наклон близок к нулю), либо областями постоянного наклона (где наклон точки значительно

больше нуля). ТРІ представляет собой упрощение индекса положения форм рельефа [Weiss, 2001]. Значения ТРІ предоставляют простые и действенные средства для классификации форм рельефа по морфологическим классам [Jenness, 2005].

ТРІ с большим размером	ТРІ > 1	Верховья возвышенности	Плоская вершина	Вершина гор
	1 > ТРІ > -1	Мелкая долина	Равнины	Середина склона горы
	ТРІ > -1	Глубокая речная долина	U-образная долина	Подножье склона горы
	ТРІ > 1	1 > ТРІ > -1	ТРІ > -1	
	ТРІ с малым размером			

Рисунок 11. Схема классификации основных форм рельефа с использованием индекса топографической позиции [Weiss, 2001]

Значения ТРІ, рассчитанные из двух размеров соседства, предоставляют больше информации об общей форме рельефа, чем значения ТРІ из одного района, и поэтому более сложные особенности ландшафта могут быть идентифицированы путем объединения сеток ТРІ, созданных в разных масштабах. Точка на ландшафте с отрицательным значением ТРІ для малого района и положительным значением ТРІ для большого района, вероятно, представляет собой небольшую долину на вершине большого холма. Такой объект с полным основанием можно классифицировать как нагорный дренаж. И наоборот, точка с положительным значением ТРІ для малых окрестностей и отрицательным значением ТРІ для больших окрестностей, вероятно, представляет собой небольшой холм или гребень в более крупной долине (Рис. 11). Значения ТРІ использовались также для классификации форм рельефа по

положению уклона. Эта классификация основана на том, насколько амплитудными являются значения ТРІ, и на наклоне в каждой точке. Логично, что высокие значения ТРІ будут обнаружены около вершин холмов, а низкие значения ТРІ будут обнаружены на дне долин. Значения ТРІ, близкие к 0, могут быть найдены либо на ровной поверхности, либо где-то на середине уклона, и значения уклона используются для различения этих двух возможностей. Пороговое значение ТРІ, равное ± 1 , использовалось для определения вершин холмов и низов долин, где значение стандартного отклонения рассчитывалось из всех значений высоты. Порог наклона $\pm 8^\circ$ использовался для различения плоских участков и участков среднего уклона.

Размеры ТРІ определяется путем проведения анализа соседства (Neighborhood analysis). Алгоритм использует двухразмерный подход путем подбора квадратичного многочлена к заданному размеру окна с использованием наименьших квадратов [Jenness, 2005]. С помощью данного алгоритма можно выявить склоновые и равнинные участки территории исследований. Дополнительные топографические показатели, такие как отклонения высоты, уклона или аспекта в пределах окрестностей, могут помочь выделить различные типы форм рельефа.

Для классификации форм рельефа при ландшафтных исследованиях могут быть использованы цифровые модели рельефа с пространственным разрешением от 30 до 5 метров. На территорию Республики Саха (Якутия) в данном диапазоне пространственных разрешений могут быть использованы несколько различных источников цифровых моделей рельефа, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет.

Во многих исследованиях мерзлотных ландшафтов Центральной и Южной Якутии применяются данные Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). SRTM - это совместный проект Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) и Национального агентства изображений и картографии (NIMA) Министерства обороны США. Миссия была разработана с использованием однопроходного

радиолокационного интерферометра для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) земной поверхности между 60 градусами северной широты и 56 градусами южной широты. После завершения матрица высот будет иметь интервал между пикселями 30 м и точность по вертикали около 15 м [Farr, 2000].

Для арктических циркумполярных территорий в 2018 году был разработан проект создания цифровых моделей рельефа высокого разрешения Arctic DEM. ArcticDEM охватывает всю территорию суши к северу от 60° северной широты. Кроме того, в зону покрытия входит вся территория Гренландии, полностью штат Аляска и полуостров Камчатка. Общая мозаика Arctic DEM включает 2488 тайловых файлов с разрешением 2 метра (распределенных в виде 9 228 субтайловых файлов). Версии мозаики также доступны в более низких пространственных разрешениях на 10, 32, 100, 500 метров и 1 километр для разномаштабных картографических целей (Porter и др. 2018). Данные Arctic DEM доступны на геопортале Университета Миннесоты на сервере компании ESRI.

Для наших исследований и геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов Республики Саха (Якутия) на уровне типов местности и типов урочищ мы нашли наиболее приемлемым данные Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM). Продукт цифровая модель рельефа ASTER GDEM является совместной разработкой Министерства экономики, торговли и промышленности Японии и Национального агентства по авиации и космонавтике США (NASA). ASTER GDEM последней версии 3 поддерживает формат GeoTIFF и ту же сетку, и структуру листов, что и в предыдущих версиях, с 30-метровым пространственным разрешением. Цифровая модель рельефа находится на свободном доступе для скачивания на геопортале NASA.

3.3. Методика геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов

Предложенная нами система теоретических и практических положений геоинформационного моделирования ландшафта ставит проблему представления мерзлотных ландшафтов в геоинформационной среде. При этом под объектом исследования геоинформационного моделирования понимается ландшафт (ПТК), предметом - особенности представления и анализа структурно-динамической организации ландшафта средствами ГИС. К числу основных методических задач геоинформационного моделирования ландшафта нами отнесены следующие положения:

- разработка и реализация теоретической модели ландшафта в среде ГИС (концептуальная ландшафтная модель данных) - подразумевается набор теоретических положений моделирования структуры, динамики, межкомпонентных взаимосвязей;
- формирование прикладных ландшафтных моделей данных, характеризующих особенности пространственной структуры ПТК для определенных целей исследования;
- разработка технологических схем реализации ГИС методов обработки данных для создания моделей мерзлотных ландшафтов.

При геоинформационном моделировании на основе различных данных мы можем получить модели компонентов ландшафта. Подобные модели используются для изучения особенностей и анализа отдельных компонентов ландшафта, и являются составными частями при моделировании самого ландшафтного комплекса.

Исходя из этого мы предлагаем концептуальную модель изучения ландшафтов через геоинформационное моделирование для изучения пространственной структуры мерзлотных ландшафтов Якутии (Рис. 12).



Рисунок 12. Концептуальная модель изучения пространственной структуры мерзлотных ландшафтов по геоинформационному моделированию

Концептуальная модель состоит из трех этапов. Теоретическая и методическая база позволяет выделить объекты моделирования, в нашем случае типологические единицы мерзлотных ландшафтов и критерии выделения. Мы опираемся на критериях выделения типов(подтипов) ландшафтов, типов местности и типов урочищ мерзлотных ландшафтов при картографировании с использование ГИС технологий [Шестакова, 2006], при геоинформационном моделировании данная методика имеет незначительные изменения (Таблица 1) на уровне подтипов ландшафта, где выделение долинных комплексов необходимо использовать особенности макрорельефа.

Критерии выделения ландшафтов при геоинформационном моделировании

Типологические комплексы	Растительность	Рельеф	Стратиграфогенетические комплексы	Пример
Тип (подтип) ландшафта	Биом - Сочетание групп растительных ассоциаций	Макрорельеф		Горные редколесья (лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые)
Тип местности		Мезо- и микрорельеф	Генетический тип отложений	Склоны средней крутизны и пологие склоны делювиально-коллювиальные
Тип урочища	Группы ассоциаций	Микро- и мезорельеф	Генетический тип отложений	Лиственничные редколесья брусничные зеленомошно-лишайниковые на делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов

Далее анализируя опыт использования ГИС-анализа и методов дистанционного зондирования формируется аппаратный комплекс геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов. Для распознавания критериев выделения мерзлотных ландшафтов (макро- мезо-, микрорельеф и группы растительных ассоциаций и их сочетание) наиболее оптимальным является использование попиксельной классификации временного ряда мультиспектральных оптических изображений с применением фенологического подхода к распознаванию различных типов растительности, классификации форм рельефа с использованием ТРІ. При этом важно отметить, что в зависимости от сложности ландшафтной структуры территории, например, наличием аласных ландшафтов или множества сельскохозяйственных полей в технологической схеме реализации геоинформационного моделирования могут быть внесены дополнительные

стадии обработки, например, объектно-ориентированная классификация (Рис. 13).

Данный подход к моделированию позволяет синтезировать методы классификации объектов (классов) земной поверхности, которые тесно связаны с характеристиками данных (в основном спектральным, пространственным, радиометрическим и временным разрешением) с типологическими единицами мерзлотных ландшафтов.

Таблица 2

Характеристики каналов Landsat 8 OLI и Sentinel 2

Каналы	Landsat 8 OLI			Sentinel 2		
	Спектральный диапазон	Длины волн, нм	Разрешение, м	Спектральный диапазон	Длины волн, нм	Разрешение, м
1	Синий	433 – 453	30	Синий	419-465	60
2	Синий	450 – 515	30	Синий	458-523	10
3	Зеленый	630 – 680	30	Зеленый	543-578	10
4	Красный	630 – 680	30	Красный	650-680	10
5	БИК	845 – 885	30	Красный крайний	698-713	20
6	КБИК 1	560 – 660	30	Красный крайний	733-748	20
7	КБИК 2	100 – 300	30	Красный крайний	773-793	20
8	Панхром	500 – 680	15	БИК	785-899	10
8А				БИК узкий	855-875	20
11				КБИК	1565-1655	20
12				КБИК	2100-2280	20

В проведенных нами исследования были использованы спутниковые снимки серии Landsat 8 OLI и Sentinel 2, характеристики которых приведены в таблице 2 и данные цифровой модели рельефа ASTER GDEM.

Landsat является самой продолжительной программой спутникового дистанционного зондирования Земли. Периодичность съемки последнего из

серии спутников Landsat 8 OLI/TIRS 1 раз в 16 суток, сцена размером 185 км x 185 км, в 16 битах, с 11 спектральными полосами. Снимки доступны на геопортале Геологической службы США.

Мультиспектральные оптические спутники Sentinel-2 А и В программы дистанционного зондирования Земли Европейского Союза под названием Copernicus собирают данные по всему земному шару в 13 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 10 до 60 м [Gatti et al.,2013]. Они повторяют процесс построения изображений каждые 5 дней на экваторе и еще реже - к полюсам. Снимки доступны на геопортале Геологической службы США и на геопортале программы Коперник Европейского космического агентства.

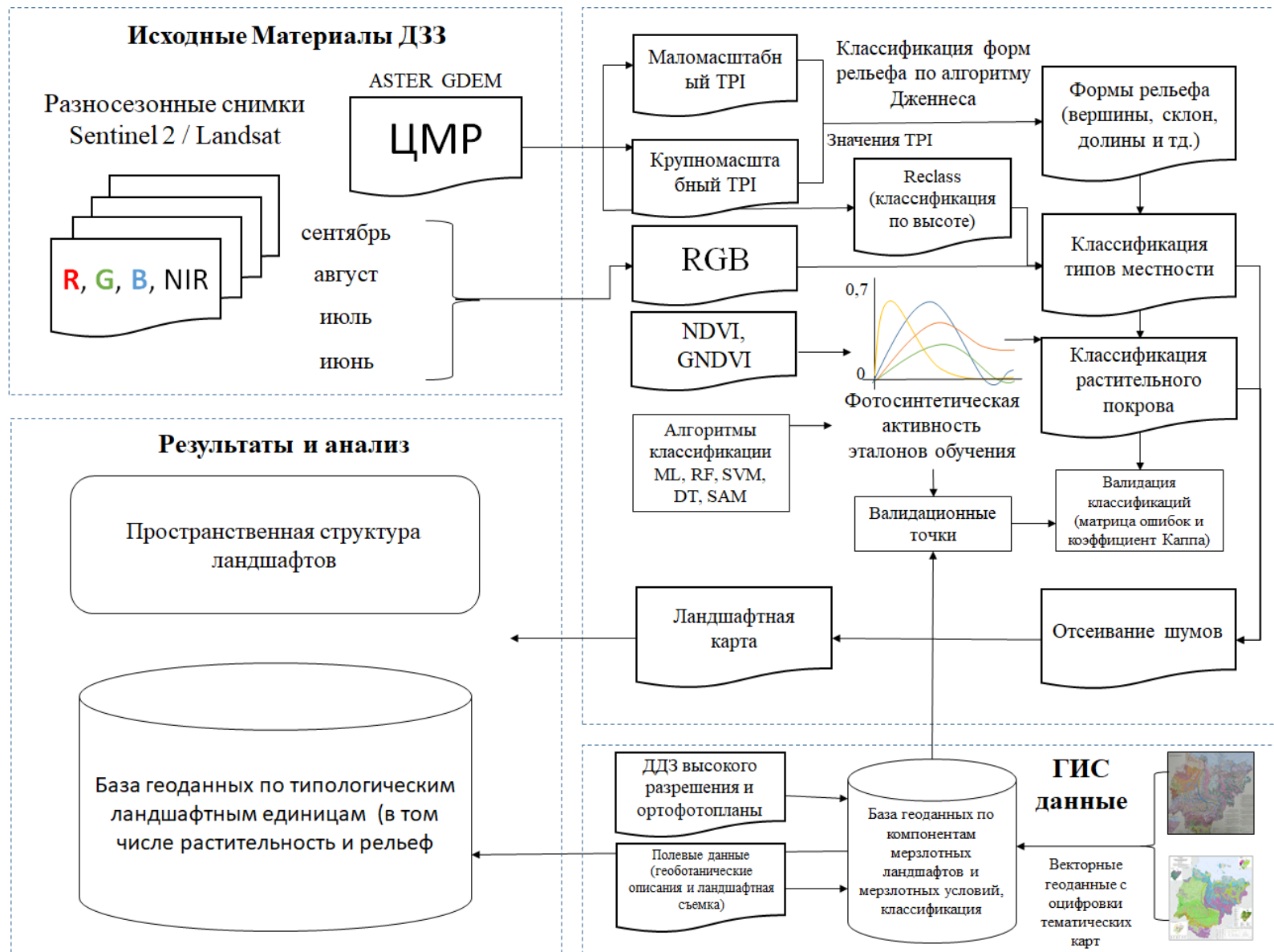


Рисунок 13. Общая схема геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов Якутии

Эти виды дистанционного зондирования подходит для картографирования ландшафта в масштабе от 1: 500 000 до 1: 100 000. Эти локальные масштабы предназначены для выявления на картах пространственной организации ландшафта в масштабах типов местности и типов урочищ. В то же время мы следуем критериям выбора типов местности и типов урочищ, используемых при картографировании мерзлотных ландшафтов. Типы местности распознаются по соотношению стратиграфически-генетической структуры и геоморфологической структуры территории. В типах ландшафта критериями распознавания являются классы ассоциаций растительности (единицы растительности).

Так как для классификации нам потребуется значения запасов биомассы исходные снимки были обработаны для получения вегетационного индекса NDVI (The Normalized Difference Vegetation Index).

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR - ближний инфракрасный канал, RED - красный канал

NDVI - один из наиболее часто используемых вегетационных индексов для изучения фенологии растительности [Yan and Roy, 2014]. Данный спектральный индекс уменьшает спектральный шум, вызванный определенными условиями освещения, топографическими вариациями или тенями от облаков.

$$GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN),$$

где NIR - ближний инфракрасный канал, GREEN - зеленый канал

GNDVI - зеленый нормированный разностный вегетационный индекс. Он похож на NDVI, за исключением того, что вместо красного спектра он измеряет зеленый спектр в диапазоне от 0,54 до 0,57 мкм. Это показатель фотосинтетической активности растительного покрова; его чаще всего используют для оценки содержания влаги и концентрации азота в листьях растений по спектральным данным, не имеющим крайнего красного канала. По сравнению с индексом NDVI он более чувствителен к концентрации хлорофилла. Он используется нами для оценки слабо сомкнутой и

несформировавшейся растительности, например, лишайниковой тундровой или эпилитно-лишайниковой.

В предыдущих исследованиях [Gadal et al, 2020], [Zakharov, 2021] мы основывали анализ на реклассификации серии многокомпонентных земных покровов для распознавания ассоциации растительности. Разработанный подход геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов является более совершенной методикой пригодной для картографирования типов урочищ. Так как данная методика повышает уровень автоматизации распознавания типов растительности.

Не менее важным является выбор программно-аппаратного комплекса ГИС. Программное обеспечение ГИС содержит системные и прикладные функции и инструменты, необходимые для хранения, анализа и визуализации пространственной информации:

QGIS - настольный ГИС продукт. Главным достоинством QGIS является возможность его бесплатного использования. При этом для обработки снимков и работы с цифровыми моделями рельефа необходимо установить дополнительные модули. Так, для обработки изображений и классификации был применен модуль Semi-Automatic Classification. Данный модуль имеет инструменты обработки и анализа изображений спутниковых снимков серии Landsat, ASTER, Sentinel и др. В него встроены попиксельные классификаторы:

Minimum Distance - алгоритм минимального расстояния вычисляет евклидово расстояние между спектральными сигнатурами пикселей изображения и обучающими спектральными сигнатурами [Congedo, 2014].

Maximum Likelihood - Алгоритм вычисляет распределения вероятностей для классов, связанных с теоремой Байеса, оценивая, принадлежит ли пиксель классу. В частности, предполагается, что распределения вероятностей для классов имеют форму многомерных нормальных моделей. Чтобы использовать этот алгоритм, для каждой области обучения требуется

достаточное количество пикселей, позволяющее вычислить ковариационную матрицу [Congedo, 2020].

Spectral Angle Mapper - Отображение спектрального угла вычисляет спектральный угол между спектральными сигнатурами пикселей изображения и обучающими спектральными сигнатурами [Congedo, 2020].

GRASS GIS программное обеспечение с открытым исходным кодом для построения геоинформационных систем. В нашем случае мы использовали его для проведения операций анализа соседства и зональной статистики (Zonal Statistics).

ИWIS GIS - ГИС комплекс, функционал которого предназначен для обработки растровых данных. ГИС используется нами для процедуры изменения пространственных разрешений каналов через инструмент Resample. Данная процедура является очень важным при мультисенсорном подходе к геоинформационному моделированию мерзлотных ландшафтов для совместной обработки снимков с разных сенсоров с разными пространственными разрешениями.

Orfeo Toolbox - ГИС продукт, синхронизированный для работы с QGIS. В отличие от предыдущих ГИС имеет обширный инструментарий реализации объектно-ориентированной классификации снимков. А также в Orfeo Toolbox имеются множества алгоритмов машинного обучения такие как метод опорных векторов, случайны лес, дерево решений, а также алгоритмы глубокого обучения сверточные нейронные сети. Orfeo Toolbox обладает исключительно богатым набором классификаторов. Алгоритмы машинного обучения и глубокого обучения могут быть использованы для реализации объектного анализа изображений.

Support Vector Machine - алгоритм машинного обучения основан на теории статистического обучения и направлены на определение местоположения границ принятия решений, обеспечивающих оптимальное разделение классов [Varnik, 1995]. В случае задачи распознавания образов с двумя классами, в которой классы линейно разделяются, SVM выбирает из

бесконечного числа линейных границ решения t_u , которая минимизирует ошибку обобщения. Таким образом, выбранная граница принятия решения будет такой, которая оставляет наибольший запас между двумя классами, где запас определяется как сумма расстояний до гиперплоскости от ближайших точек двух классов [Varnik, 1995]. Эту проблему увеличения маржи можно решить с помощью стандартных методов оптимизации квадратичного программирования (QP). Точки данных, которые находятся ближе всего к гиперплоскости, используются для измерения запаса; следовательно, эти точки данных называются «опорными векторами». Следовательно, количество опорных векторов невелико [Varnik, 1995].

Random Forest - классификатор случайного леса, состоит из случайно выбранных функций или комбинации функций в каждом узле для выращивания дерева. Любые примеры (пиксели) классифицируются путем взятия самого популярного проголосованного класса из всех древовидных предсказателей в лесу [Breiman, 1999].

SAGA GIS - настольный ГИС, разработанный для работы с геоморфологическими и геологическими данными, поэтому содержит богатый инструментарий обработки ЦМР. SAGA также является ПО с открытым исходным кодом. Являясь гибридной ГИС, SAGA поддерживает векторную и растровую модели данных, с акцентом на анализ растров. В наших исследованиях мы пользуемся инструментами геоморфометрического анализа ЦМР и в том числе классификацию форм рельефа по индексу топографической позиции.

TerrSet - представляет собой интегрированную геопространственную программную систему для мониторинга и моделирования земной системы. Система TerrSet включает инструменты IDRISI GIS Analysis и IDRISI Image Processing, а также ряд вертикальных приложений. TerrSet предлагает самый обширный набор геопространственных инструментов. Инструменты TerrSet использованы для проведения процедур предобработки снимков и анализа текстуры при выделении моренных ландшафтов

Вышеупомянутые программно-аппаратные комплексы ГИС были использованы для геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов для ключевых участков исследований. При этом тенденция развития технологий дистанционного зондирования Земли связанное с накоплением огромного массива архивных и оперативных данных мониторинга земной поверхности ведет к применению мощнейших суперкомпьютеров и облачных платформ обработки больших данных дистанционного зондирования. Это позволяет проводить комплексную обработку петабайтов спутниковых данных на для значительных площадей, например, для региональных природных комплексов (районы, провинции). Платформы облачных вычислений - это эффективные способы хранения, доступа и анализа наборов данных на очень мощных серверах, которые виртуализируют суперкомпьютеры для пользователя [Amani et al, 2020]. Эти системы предоставляют клиентам инфраструктуру, платформу, услуги хранения и программные пакеты различными способами [Tamiminia et al, 2020]. Одним из таких платформ является Google Earth Engine (GEE). GEE - платформа облачных вычислений, запущенная Google в 2010 году. GEE использует вычислительную инфраструктуру Google и доступные наборы данных дистанционного зондирования с открытым доступом. GEE - самая популярная платформа для обработки больших геоданных, облегчающая процесс обработки изображений, предоставляя пользователям бесплатный доступ к многочисленным наборам данных дистанционного зондирования, собранных в виде коллекций, по которым можно сделать запрос по различным фильтрам, например, фильтр облачности, даты и территории (Рис. 12,13).

```

// 1-июнь=152-182; июль=183-213; август=214-244; сентябрь=245-274;
var collectionJUNE = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")
  .filterBounds(roi)
  .filter(ee.Filter.dayOfYear(160, 179))
  .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 9))
print('Least cloudy image JUNE:', collectionJUNE);
var L8JUNE = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA")
  .filter(ee.Filter.dayOfYear(160, 179))
  .filter(ee.Filter.lt("CLOUD_COVER", 7.5))
  .filterBounds(roi)
  .map(maskLandsatclouds)
  .select(L8bands)

```

Рисунок 14. Фрагмент скрипта запроса снимков Sentinel 2 и Landsat 8 на территорию исследования с фильтрами по летним месяцам и облачности

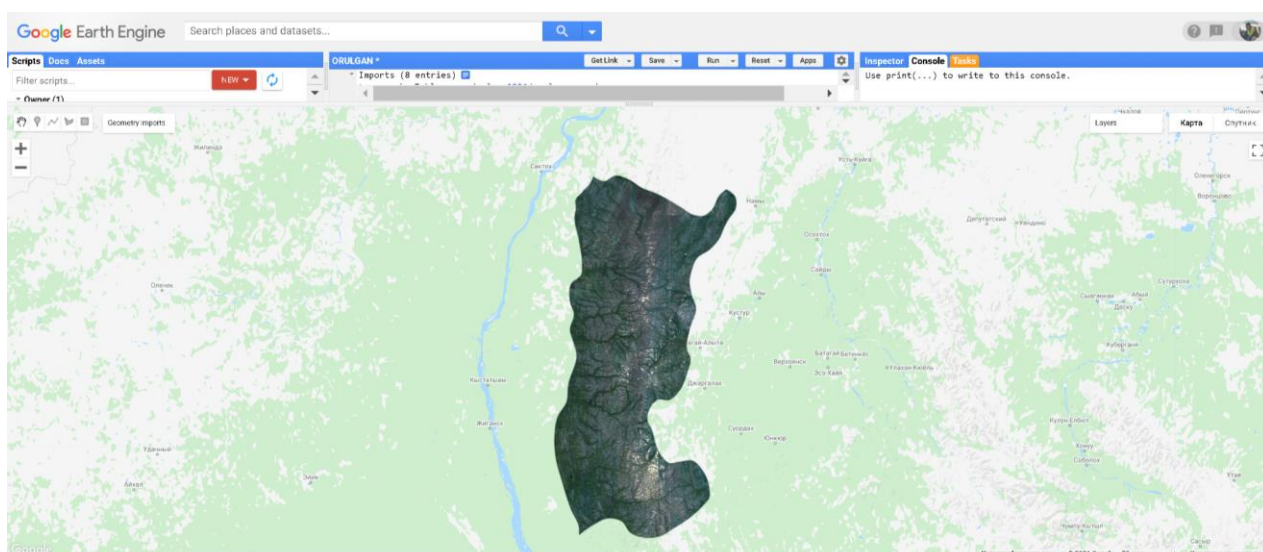


Рисунок 15. Мозаика композитов каналов 2,3,4 за август спутниковых снимков Sentinel 2 на платформе Google Earth Engine.

Облачные вычислительные платформы, как GEE, становятся основным инструментом анализа почвенно-растительного покрова на региональном уровне исследований. Например, с помощью набора данных Sentinel 2 на платформе GEE проведено картографирование распространения *Spartina alterniflora* по побережью Южного Китая. На основе фенологического индекса PVI и NDVI авторами предложены контролируемые и неконтролируемые методы определения пороговых значений индексов для выделения *Spartina alterniflora* [Xu et al, 2020]. Платформа активно используется для мониторинга и картографирования лесных массивов [M. Campos-Taberner et al., 2018],

[Jahromi et al, 2020] и сельскохозяйственных угодий [Liu et al., 2020]. GEE был использован для картографирования растительного покрова окрестностей г. Норильск на основе снимков Sentinel 2 за вегетационный период с 2015-2020 и цифровая модель рельефа ArcticDEM [Тутубалина и др. 2020]. Также рассмотрена динамика растительности по анализу созданных карт растительности по периодам с 1982 - 2020 гг. Данным методом является довольно эффективным для выявления структурно-динамической организации видового состава растительности. 5-летний период позволяет накопить достаточное количество данных дистанционного зондирования Земли для арктических территорий в континентальном климате.

Распространение больших геоданных и недавний прогресс в облачных вычислениях и услугах обработки больших данных меняют будущее методов дистанционного зондирования. В этом отношении GEE эффективно прокладывает путь исследователям, ученым и разработчикам, чтобы они могли легко извлекать ценную информацию из больших наборов данных дистанционного зондирования без использования традиционных методов анализа данных. Огромный массив наборов данных дистанционного зондирования, доступных с GEE, помогает исследователям решать широкий диапазон проблем от глобального до локального уровня с применением анализа больших геоданных, такие как изменение климата, картографирование почвенно-растительного покрова на больших территориях и мониторинг ландшафта в течение нескольких десятилетий.

Вся совокупность методов геоинформационного моделирования ландшафтов образует ГИС модели в виде растровых и векторных данных отражающие свойства компонентов мерзлотных ландшафтов.

Общие выводы по III главе

1. При геоинформационном моделировании мерзлотных ландшафтов используются критерии выделения, принятые в ландшафтном картографировании
2. Использование алгоритма классификации форм рельефа по двухразмерным индексам топографической позиции позволяют выделить основные склоновые и долинные типы местности
3. При эколого-доминантном подходе в выделении типов растительности целесообразным является использование фенологического подхода к попиксельной классификации временного ряда спектральных индексов растительности по оптическим спутниковым изображениям. Данный подход позволяет выделять группы растительных ассоциаций по фенологическим особенностям доминирующих сообществ.
4. Метод ОВИА позволяет через сегментацию изображения выделить аласные и сельскохозяйственные ландшафты. Также дополнительные сведения как текстура, высота позволяет увеличить дифференциацию типов местности и определить генетический тип отложений
5. Облачные платформы и накопленные ДДЗ позволяют проводить анализ пространственной структуру типов(подтипов) ландшафтов региональных ПТК

ГЛАВА IV. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА И ЛАНДШАФТНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ГОРНЫХ И СРЕДНЕТАЕЖНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЯКУТИИ

4.1. Пространственная структура горных мерзлотных ландшафтов по ключевым участкам

Изучение пространственной структуры мерзлотных ландшафтов Адычи-Эльгинской плоскогорной провинции осуществлено в пределах ключевого участка в бассейне реки Адыча (Участок 1), расположенного в Верхоянской муниципальном улусе, окрестности с. Лазо. Ключевой участок исследования имеет размер 60x80 км и расположен между $66^{\circ} 26' - 65^{\circ} 53'$ северной широты и $136^{\circ} 27' - 138^{\circ} 13'$ восточной долготы. Общая площадь исследуемого участка - 4800 кв.км (Рис. 16).

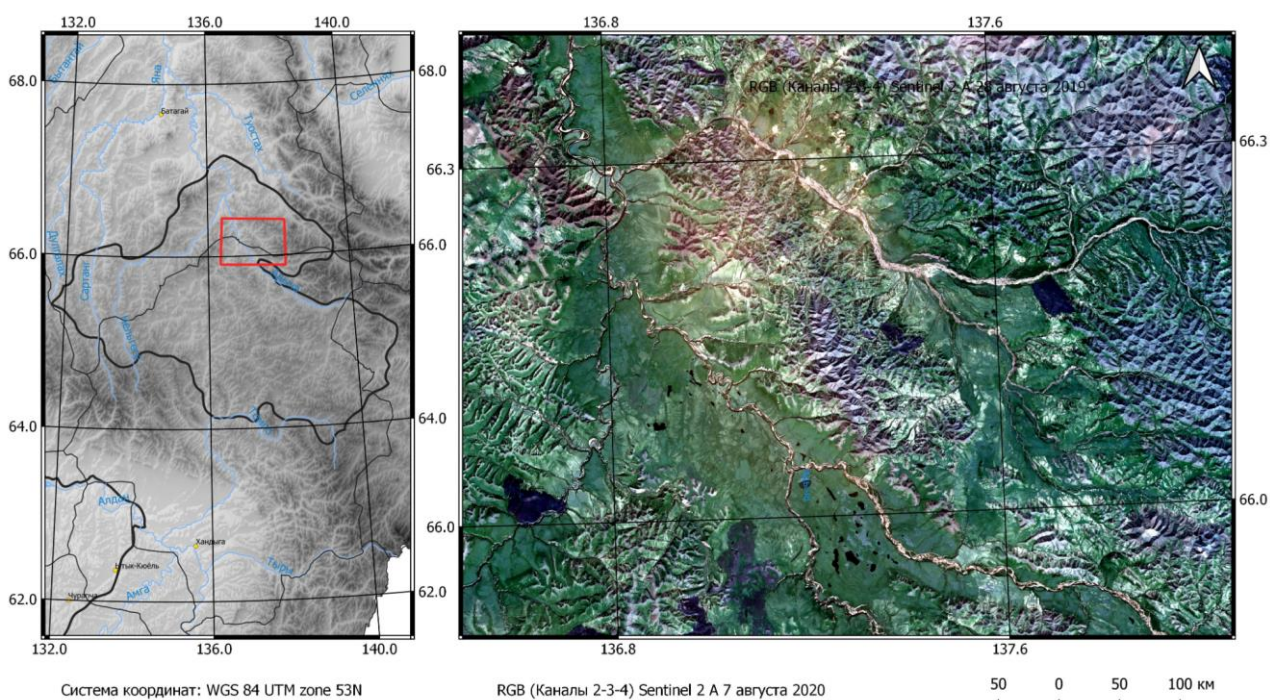


Рисунок 16 Ключевой участок бассейн р. Адыча (Участок 1)

В ландшафтной структуре участка представлены пять типов ландшафтов (горные пустыни, горные тундры, горные редколесья, подгольцово-кустарниковые заросли, интразональные горные) девять типов

местности: приводораздельный-скальный, приводораздельный-элювиальный, склоновый-коллювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный, средневысотный террасовый, низкотеррасовый, ледниково-долинный, моренный, зандровые и межлассный. В пределах территории исследования протекает три реки Адыча(главный приток р. Яна), Нельгесе и Дербеке.

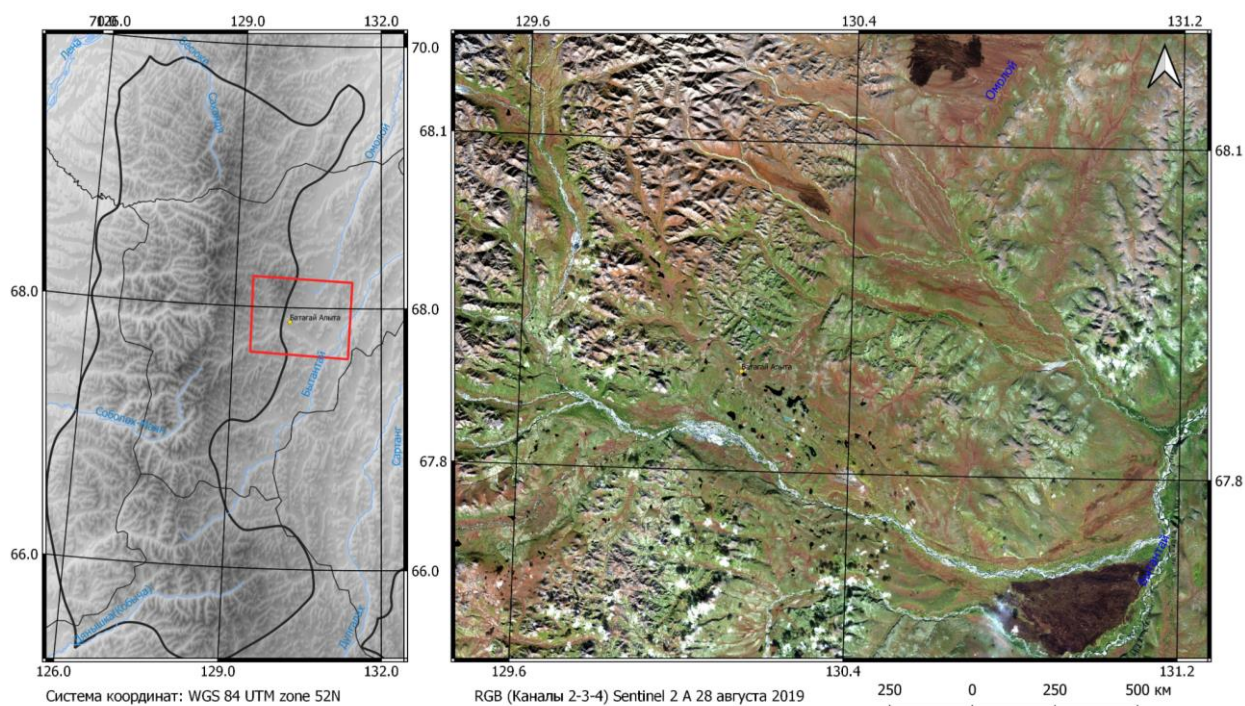


Рисунок 17. Ключевой участок бассейн р. Бытантай (Участок 2)

Исследование пространственной структуры Орулганской среднегорной провинции осуществлен в примере ключевого участка в бассейне реки Бытантай и его притоков Улахан-Саккырыр, Аччыгый-Саккырыр, Тумара (Участок 2), расположенного в Эвено-Бытантайском национальном муниципальном улусе. Ключевой участок имеет размер 60x100 км и расположен между $68^{\circ} 24,1'$ - $67^{\circ} 34,3'$ северной широты и $129^{\circ} 14,5'$ - $131^{\circ} 32'$ восточной долготы. Общая площадь исследуемого участка - 6000 кв.км. В ее пределах расположен центр улуса поселок Батагай Алыта. Он выбран по представленности типов ландшафтов. Согласно Мерзлотно-ландшафтной карте там выделяется пять типов ландшафтов: горная пустыня, горная тундра, горное редколесье и интразональные северотаежные и горные. Типы

местности представлены - приводораздельный-скальный, приводораздельный-элювиальный, склоновый-коллювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный, средневысотный террасовый, низкотеррасовый, ледниково-долинный, моренные и зандровые.

Согласно методике, описанной в предыдущей главе (см. Глава 3) нами было проведено геоинформационное моделирование пространственной структуры мерзлотных ландшафтов на уровне урочищ - группы растительных ассоциаций и мезорельеф. Мы выбрали временные ряды изображений с нулевым или близким к нулю (<10%) облачным покрытием, сделанные в период с июня по сентябрь.

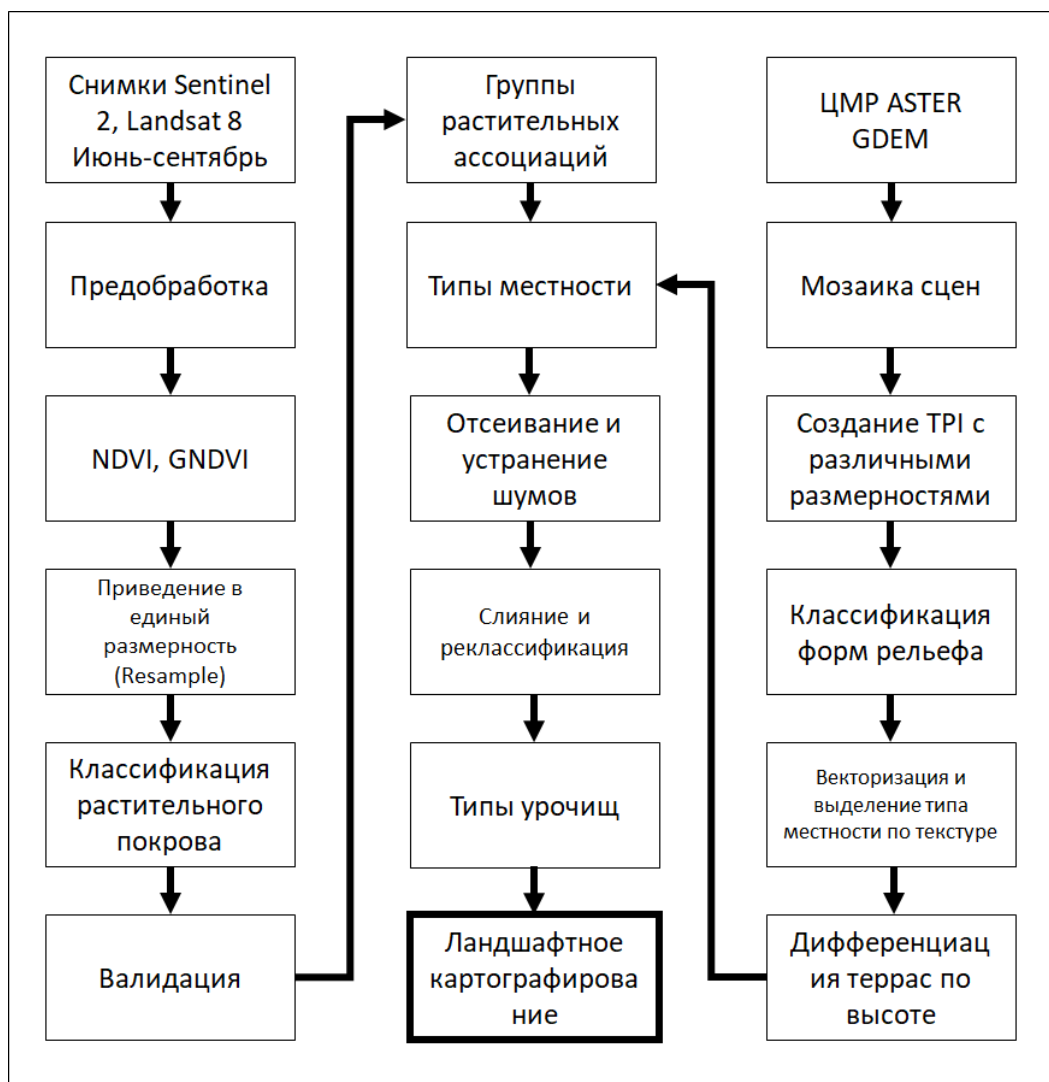


Рисунок 18. Технологическая схема геоинформационного моделирования для картографирования урочищ Участка 1 и 2.

Технологическая схема геоинформационного моделирования (Рис. 18) состоит из трех последовательных фаз: (1) первая фаза посвящена предобработке данных дистанционного зондирования Земли для улучшения входных данных моделирования. Набор снимков проходит процедуру радиометрической калибровки и атмосферной коррекции по данным DOS1. Далее для спутниковых снимков были рассчитаны NDVI и GNDVI. Для удаления шумов и сглаживание поверхности ЦМР были использованы инструменты GRASS GIS r.neighbors в режиме average. Инструмент r.neighbors - делает значение каждой категории ячеек функцией значений категорий, присвоенных ячейкам вокруг нее, и сохраняет новые значения ячеек в выходном слое растровой карты с размерностью 39. Также для изображений Sentinel 2 произведения операция изменения пространственного разрешения по снимкам Landsat (30м.) через инструмент Resample. (2) Фаза состоит в реализации классификации данных с применением алгоритмов машинного обучения (классификаторы). Были апробированы несколько классификаторов в контролируемом режиме - максимального правдоподобия (ML), минимальной дистанции (ML), Spectral Angle Mapper (SAM), метод опорных векторов (SVM).

Мы сгенерировали тренировочные точки с применением инструмента создания случайных точек по участкам и классифицировали их с помощью визуальной интерпретации на основе экспертных знаний с специалистами в области геоботаники территории с использованием снимков высокого разрешения Google Планета Земля и информации о типах растительного покрова с Атласа сельского хозяйства ЯАССР. Кроме тренировочных данных таким же способом определяются валидационные данные (validation data).

Всего для Участка 1 создано 350 тренировочных данных и 500 валидационных точек, случайно распределенных на классифицируемых изображениях. Всего для Участка 1 определены 7 групп растительных ассоциаций (Рис. 21): *лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые, лиственничные редины сфагновые с торфяными*

болотами, кедровый стланик и лиственничные редколесья кустарничково-лишайниковые, ивовые и ольховниковые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов, кустарниковые и лишайниковые горные тундры, эпилитные лишайники и речной галечник.

Для Участка 2 создано 387 тренировочных данных и 550 валидационных точек. Всего для этого участка исследования выделены 7 групп растительных ассоциаций (Рис. 22): *лиственничные редколесья кустарничково-зеленомошно-лишайниковые, лиственничные редколесья лишайниковые, лиственничные редины сфагновые с торфяными болотами, ивовые и ольховниковые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов, кустарниковые и лишайниковые горные тундры, дриадовые горные тундры и эпилитные лишайники и речной галечник.*

Таблица 3

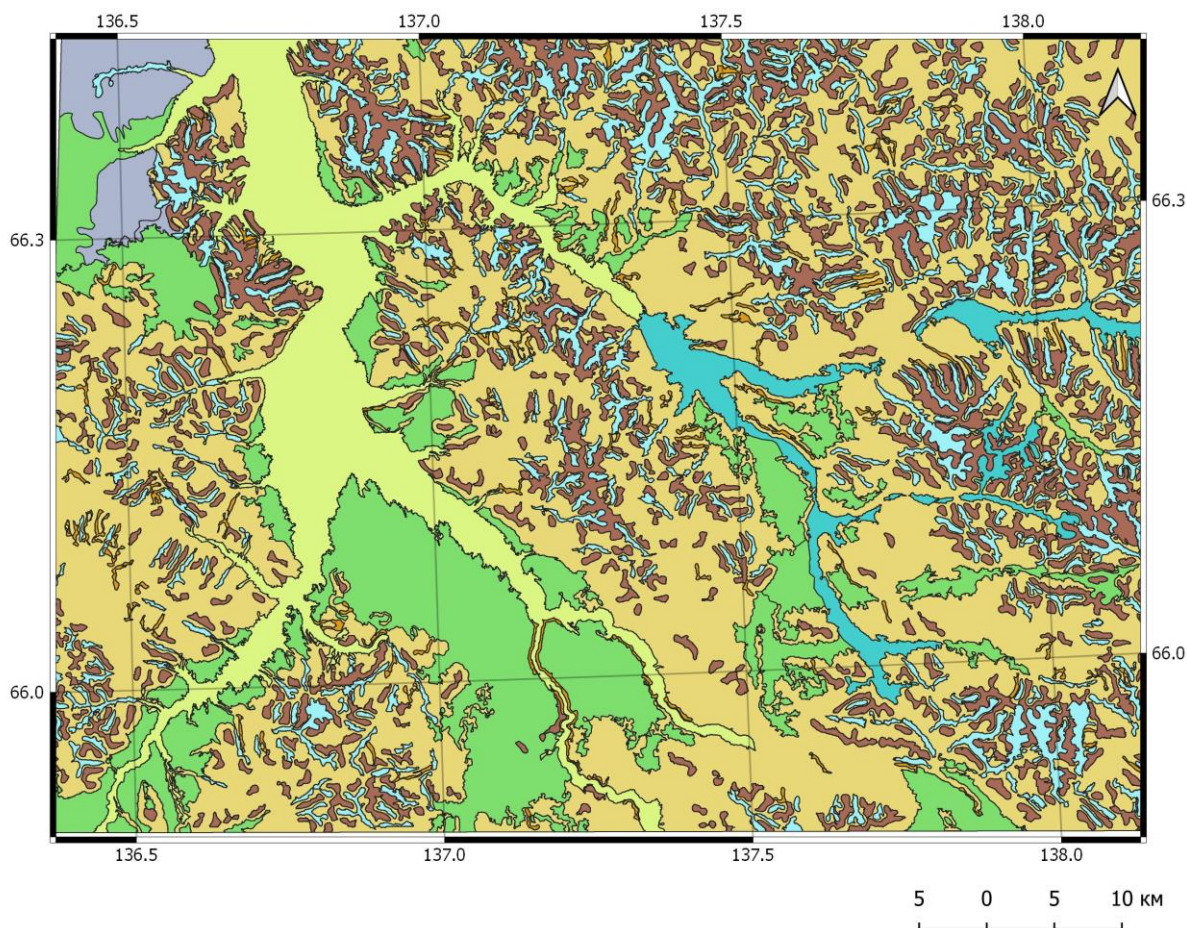
Результаты классификации растительного покрова по различным алгоритмам машинного обучения для Участка 1 и 2

Ключевые участки	Количество тренировочных точек	Количество валидационных точек	Алгоритм обучения	Общая точность (overall accuracy), %
Участок 1 (7 классов)	350	500	SVM	83,2
			ML	75,4
			MD	42,1
			SAM	71,9
Участок 2 (7 классов)	387	550	SVM	81,2
			ML	72,7
			MD	56,4
			SAM	23,4

Результаты дешифрирования по различным алгоритмам классификации представлена на таблице 3. В этот набор входят: оригинальные зональные изображения — B, G, R, NIR; спектральные вегетационные индексы — NDVI и GNDVI. Наиболее лучший результат достигнут при параметрическом классификаторе по алгоритму SVM для обоих участков (Таблица 3).

Тип местности определялся в двух этапах первый из которых классификация форм рельефа по индексу топографической позиции. TPI в размерах 500 и 2500 м показали наиболее удовлетворительный результат. Склоновые типы местности определены по результатам классификации: склоновый коллювиальный (крутые склоны), склоновый делювиально-коллювиальный (пологие склоны и подножия крутых склонов) приводораздельные-эллювиальные (средневысотные пологие вершины) и приводораздельные-скальные (горные пики). V образные долины относятся к ледниково-долинному типу местности. Для долинных типов местности требуется ранжирование по высоте, данная процедура сильно зависит от визуальной оценки дешифровщика. Такой принцип разделения пойменных долинных ландшафтов ранее также был применен [Глотов, 2011]. Мы разделили на две категории низкотеррасовые (<500 м) и горно-долинный (>500 метров).

Среднетеррасовый высотный вариант является группой типов местности выделение которых производится путем векторизации слоя сравнительного анализа с цветовым композитом каналов видимого спектра (RGB): зандровый (волнистая флювиогляциальная равнина), моренный (пологоволнистая ледниково- аккумулятивная равнина) (Рис. 19).



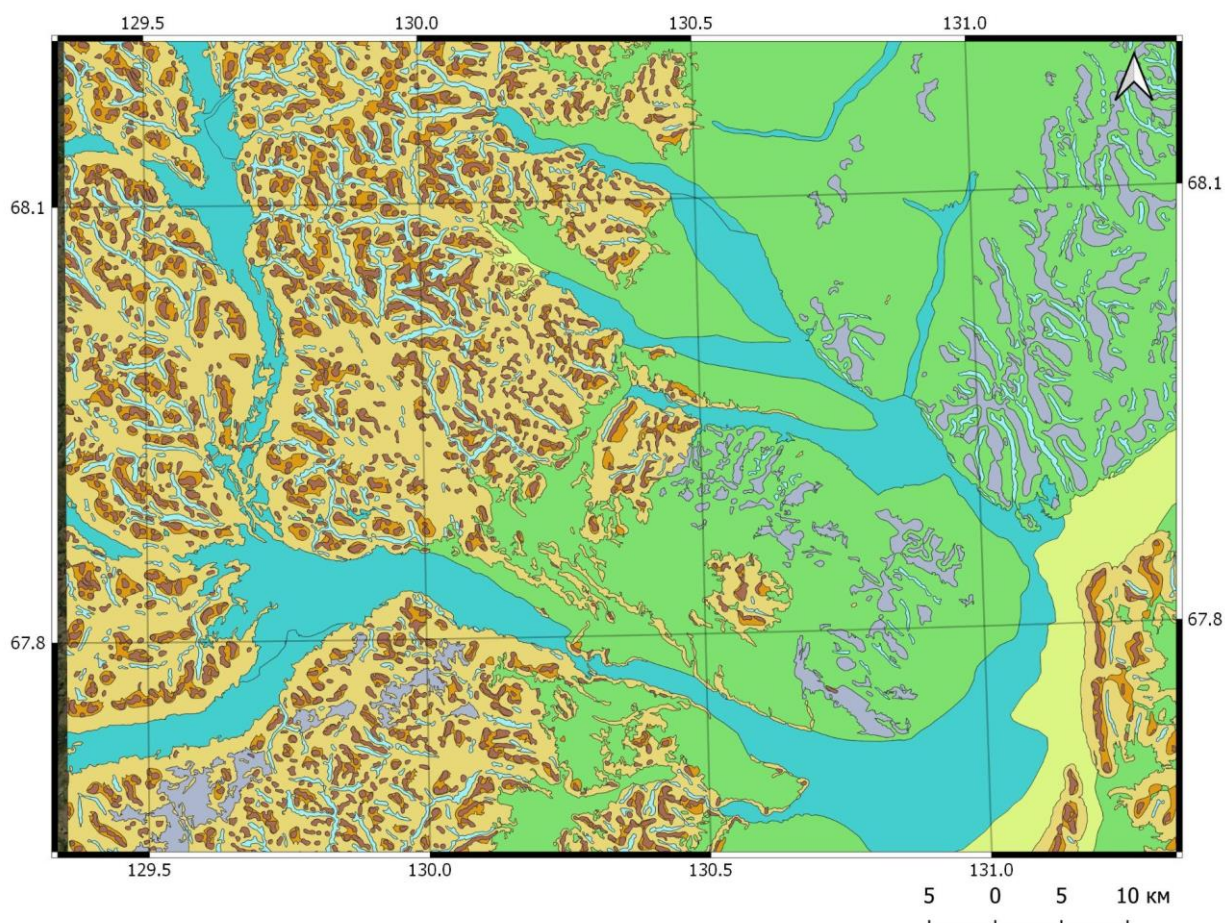
Типы местности

- Горно-привершинные элювиальные и скальные элювиально-делювиальные
- Крутые склоны хребтов и речных долин коллювиальные
- Склоны средней крутизны и пологие склоны делювиально-коллювиальные
- Зандровые пологонаклоненные равнины флювиогляциальные
- Моренные холмисто увалистые и ледниково-аккумулятивные равнины гляциальные
- Низкотеррасовые аллювиально-флювиогляциальные
- Горно-долинные аллювиальные
- Днища малых рек аллювиальные и троговых долин гляциальные

Рисунок 19. Типы местности ключевого участка бассейна р. Адыча
(составлена автором)

Типы местности, полученные по геоморфометрическому ГИС-анализу выявил значительную дифференциацию склоновых типов местности (Рис. 19, 20). При этом расчет склоновых типов местности по данной методике является наиболее точной, так как базируется исключительно на рассчитываемых показателях (крутизна склона и индекс топографической позиции). Выделение

моренных и зандровых является весьма условным, так как контуры данных типов местности выведены при визуальном анализе текстуры по RGB спутниковым изображениям.



Типы местности

- Горно-привершинные эллювиальные и скальные эллювиально-делювиальные
- Крутые склоны хребтов и речных долин коллювиальные
- Склоны средней крутизны и пологие склоны делювиально-коллювиальные
- Зандровые пологонаклоненные равнины флювиагляциальные
- Моренные холмисто увалистые и ледниково-аккумулятивные равнины гляциальные
- Низкотеррасовые аллювиально-флювиагляциальные
- Горно-долинные аллювиальные
- Днища малых рек аллювиальные и троговых долин гляциальные

Рисунок 20. Типы местности ключевого участка бассейна р. Бытантай
(составлена автором)

Наиболее распространенным типом местности являются склоны средней крутизны, пологие склоны и подножия крутых склонов с делювиально-коллювиальными отложениями. Участок 1 характеризуется

сильной расчлененностью горного хребта и наличием множества узких V-образных троговых долин с гляциальными отложениями. Участок 2 характеризуется субмеридиональным характером смены типов местности горносклоновые типы местности сменяются моренно-зандровыми равнинами вплоть до низкотеррасовой долинной местности с аллювиальными отложениями.

Растительный покров характеризуется отсутствием вечнозеленого древесного яруса и преобладанием редкостойных лиственничных лесов для обоих участков. Лиственничные редколесья в зависимости от состава нижних ярусов имеет существенные отличия в биомассе (выраженной в значении NDVI) (Рис. 21, 22). Наибольшими значениями NDVI характеризуются две группы растительных ассоциаций - кедровый стланик в сочетании с лиственничным редколесьем кустарничково-лишайниковым на склонах и долинные иловые и ольховниковые сообщества с участками лиственничных, чозениевых и тополевых лесов. Выделение группы ассоциаций с кедровым стлаником для первого участка позволяет выделять урочища, относящиеся к типу ландшафтов подгольцово-кустарниковых зарослей. Наибольшую зеленую массу среди горноредколесных ландшафтов имеют лиственничные редколесья ерниковые, кустарничково зеленомошно-лишайниковые. Зеленую массу дольше всех сохраняют лиственничные редины сфагновые и пушицевые торфяные болота. Существенные отличия в значениях NDVI и GNDVI позволяет нам отделить кустарничковые и лишайниковые тундры от эпилитно-лишайникового покрова каменистых пустынь. Дриадовые тундры моренно-зандровых равнин находятся близко к лиственничным редколесьям лишайниковым по биомассе. Горные тундры кустарничковые и лишайниковые находятся в диапазоне значений NDVI 0.3 -0.4. Эпилитные лишайники и речной галечник находятся в диапазоне значений NDVI 0.2 - 0.1. При этом горные тундры и эпилитных лишайников участка 1 имеют более высокие значения биомассы, что можно объяснить более южным расположением провинции и плоскогорностью провинции.

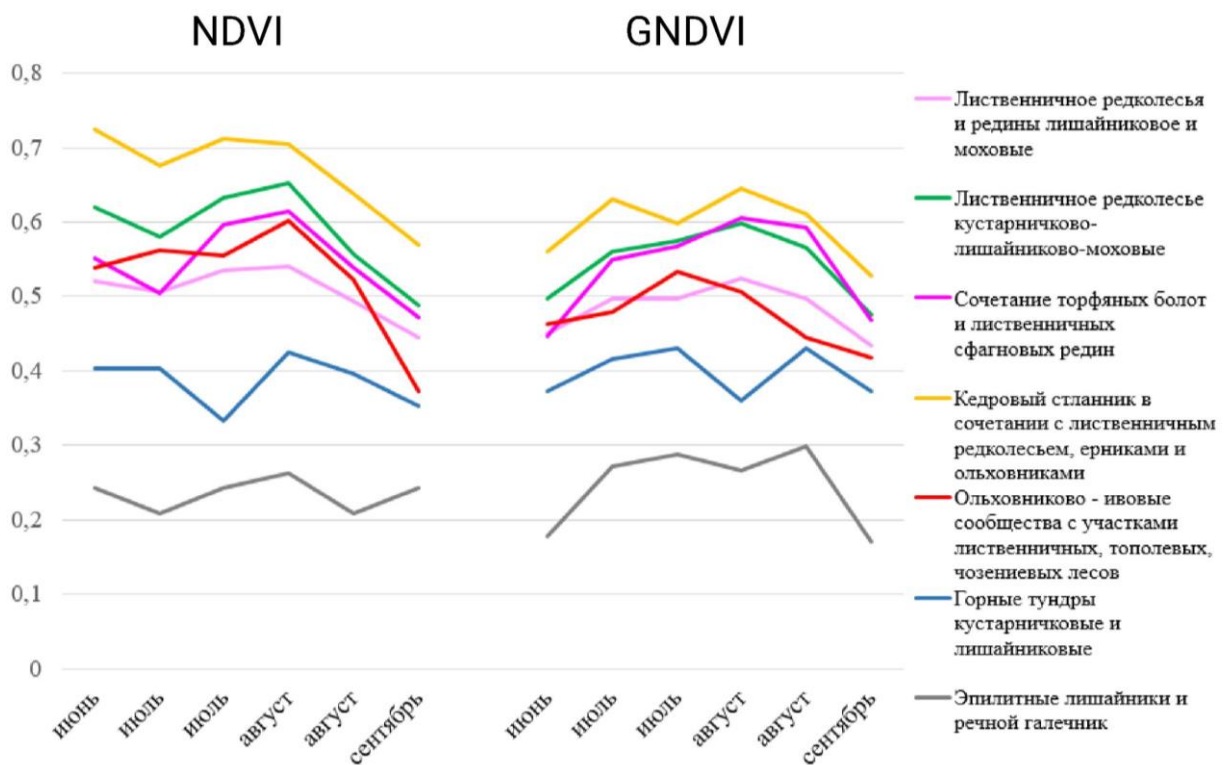


Рисунок 21 Значения NDVI и GNDVI групп растительных ассоциаций
Участка 1

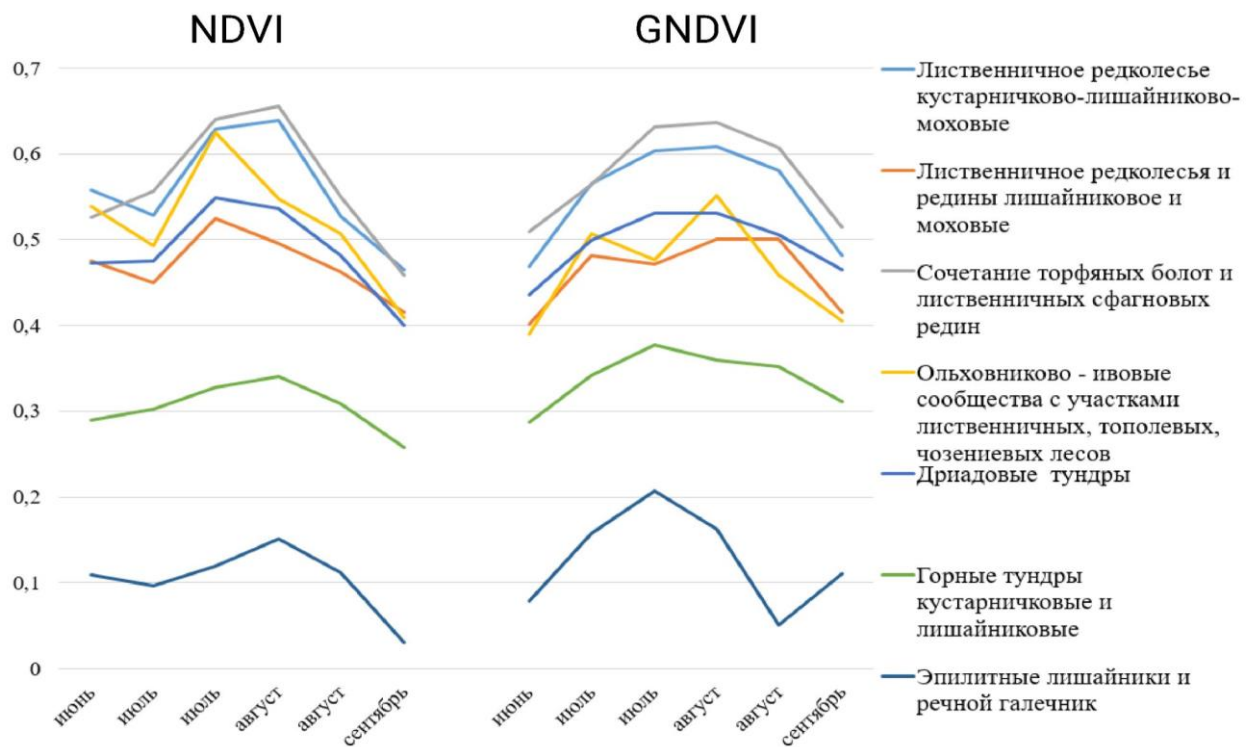


Рисунок 22 Значения NDVI и GNDVI групп растительных ассоциаций
Участка 2

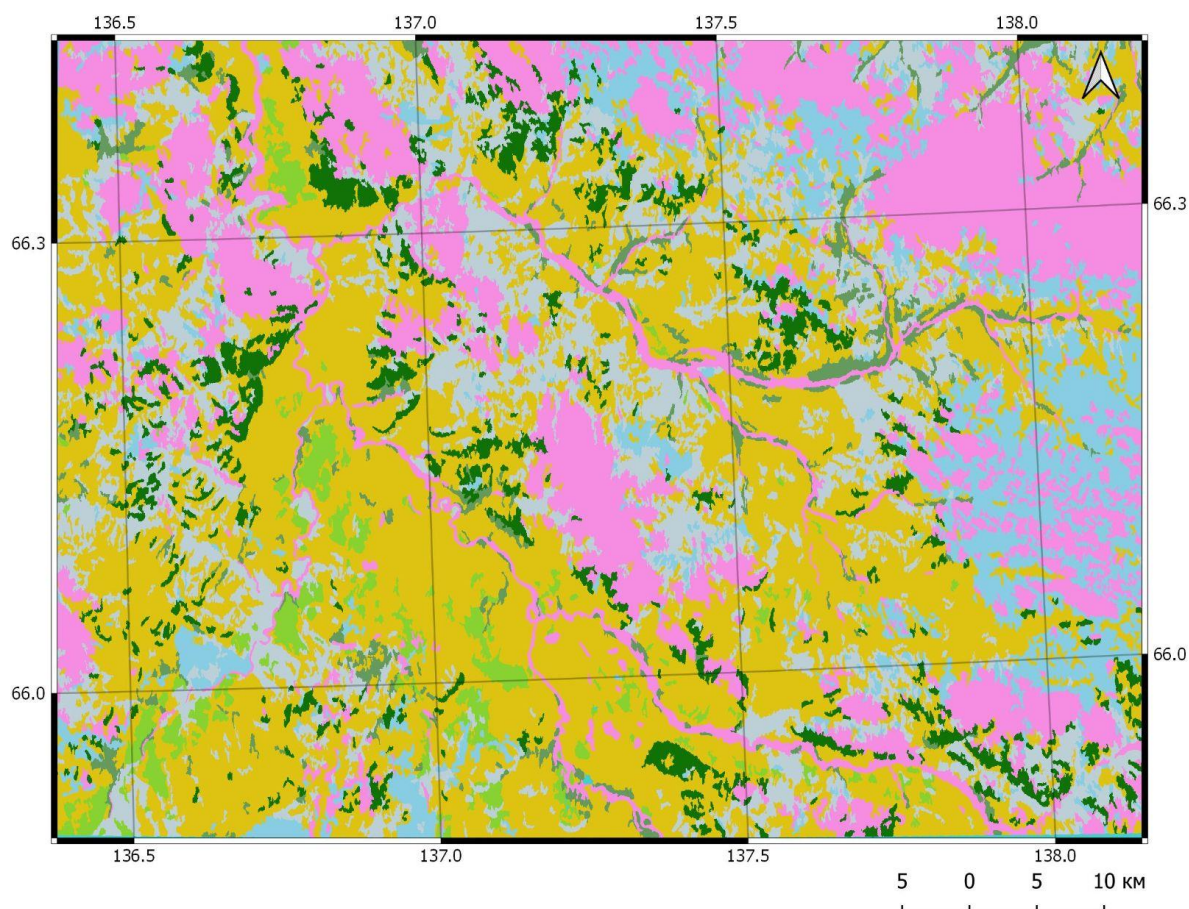
Долинные комплексы, представленные ивово-ольховниковыми кустарниковыми сообществами с участками лиственничных, чозениевых и тополевых лесов отличаются тем, что сильнее остальных групп растительных ассоциаций теряют зеленую массу к концу вегетационного периода. Это объясняется фенологическими особенностями ольховников и ивняков и тополя конец цветения которых приходится раньше, чем у лиственничного леса (Рис.23). Данный процесс выражается низкими значениями NDVI в сентябре и ростом значения GNDVI в этот же период времени, так как второй индекс увеличивается при деградации зеленой массы растительного покрова.



Рисунок 23. Долина р. Бытантай в начале сентября (фото автора)

Из типов растительности горноредколесных мерзлотных ландшафтов значительную долю для обоих участков занимает лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые распространенные преимущественно по склоновым типам местности (Рис. 24, 25). На задровых равнинах большими участками распространены лиственничные редколесья лишайниковые. Лиственничные редины зеленомошно-сфагновые с болотными лугами также занимают задровые моренные равнины. Троговые долины заняты комплексами горно-тундровой растительности, выделение которых возможно при оверлейном анализе типов местности и групп

растительных ассоциаций. На стадии классификации эпилитные лишайники не могут быть корректно отделены от галечника на руслах рек.



Группы растительных ассоциаций








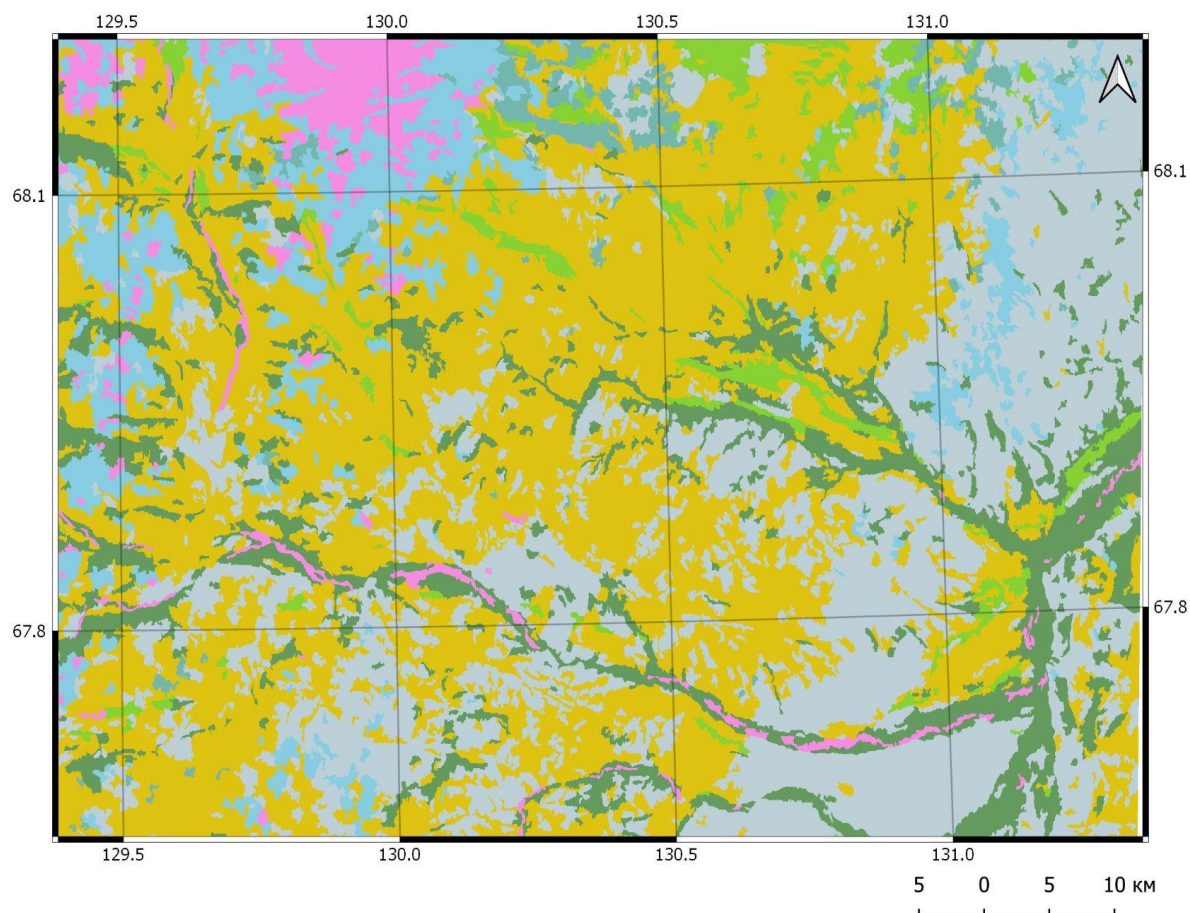
-  Лиственничные редколесья лишайниковые
-  Лиственничные редколесья кустарничково-зеленомошно-лишайниковый
-  Лиственничные редины сфагновые в сочетании с болотами
-  Кедровый стланник с лиственничным редколесьем кустарничково-лишайниковым
-  Ивовые и ольховниковые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов
-  Кустарниковые и лишайниковые горные тундры
-  Эпилитные лишайники

Рисунок 24. Группы растительных ассоциаций ключевого участка бассейна р.Адыча (Участок 1) (составлена автором)



Группы растительных ассоциаций

- Лиственничные редколесья лишайниковые
- Лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые
- Лиственничные редины сфагновые с торфяными болотами
- Ивовые и ольховниковые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов
- Кустарниковые и лишайниковые горные тундры
- Дриадовые горные тундры
- Эпилитные лишайники и речной галечник

Рисунок 25. Группы растительных ассоциаций бассейна р. Бытантай
(Участок 2) (составлена автором)

Для выделения типов урочищ растровые значения типов местности и групп растительных ассоциаций суммируются по следующему выражению:

$$У = 100 * М + ГА,$$

Где У – тип урочища, М – тип местности и ГА – группа ассоциаций. Используя реклассификацию полученного слитого растра выведены 17 типов урочищ для Участка 1 и 20 типов урочищ Участка 2.

Анализ ландшафтного разнообразия основан на количественном и качественном анализе пространственной структуры ландшафтов с использованием полученных результатов карт типов местности и урочищ. Представление о ландшафтном разнообразии изучаемых ключевых участков, с точки зрения количества типологических единиц и их площади дает таблица 3 и 4.

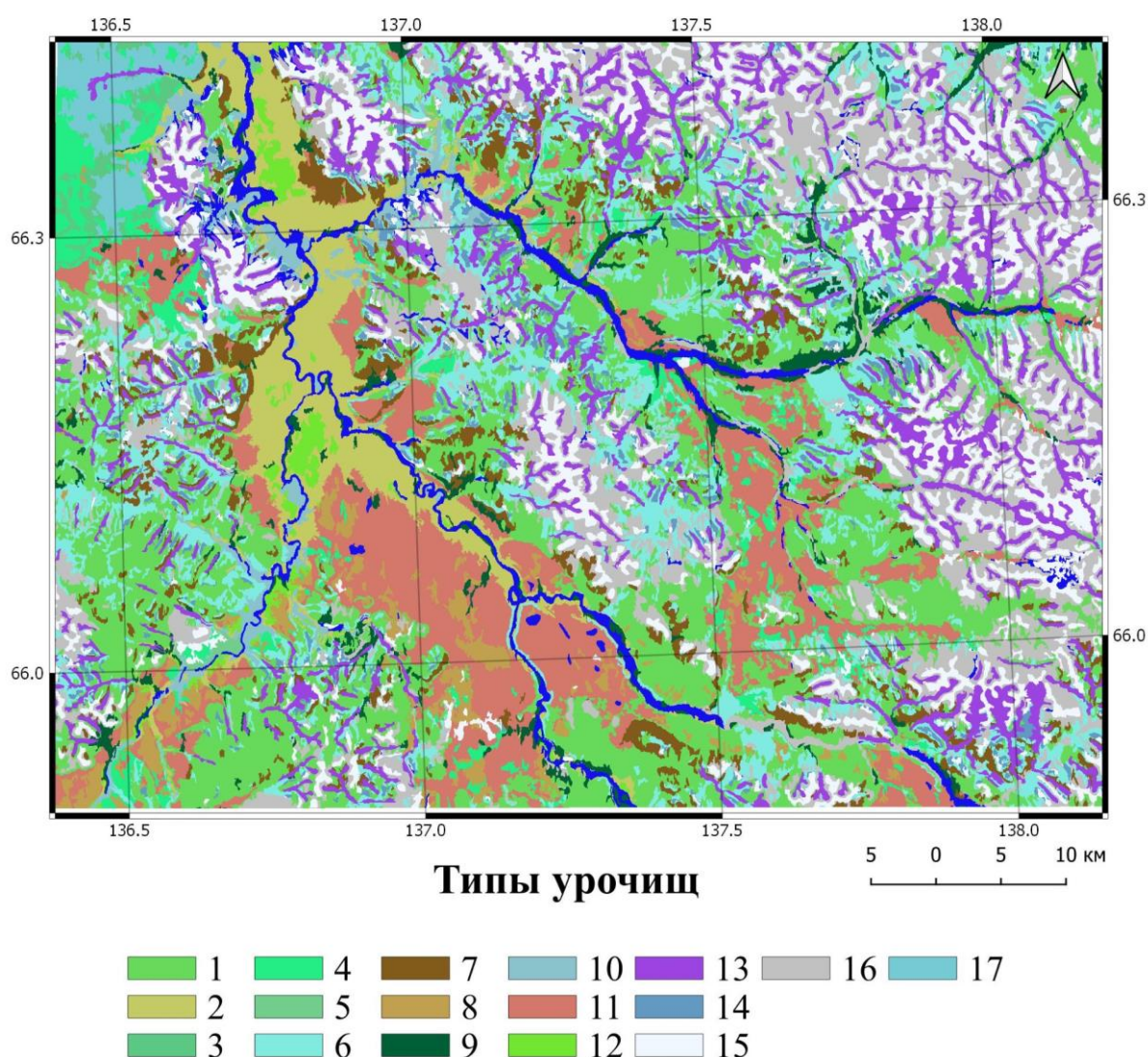








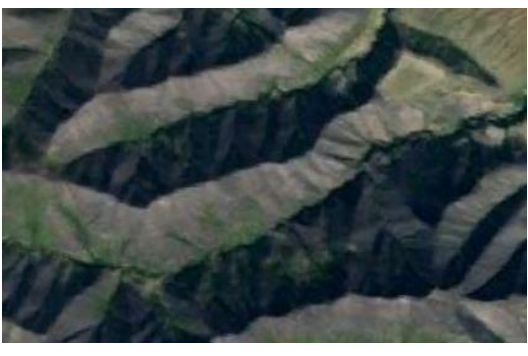

Рисунок 26. Типы урочищ ключевого участка бассейна р.Адыча (Участок 1)
(составлена автором)

Типы урочищ ключевого участка Адычи-Эльгинской плоскогорной
провинции

№	Типы урочищ	Площадь, кв.км.	Фрагмент урочища на RGB спутникового снимка
Горные редколесья			
1	Лиственничные редколесья кустарничково-зеленомошно-лишайниковые на делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов и подножий крутых склонов	1002,4	
2	Лиственничные редколесья кустарничково-зеленомошно-лишайниковые зандровых равнин	231,7	
3	Лиственничные редколесья и редины лишайниковые моренных равнин	27,3	
4	Лиственничные редколесья лишайниковые на флювиогляциальных отложениях зандровых равнин	118,9	

5	Лиственничные редколесья лишайниковые делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов и подножий крутых склонов	6,3	
6	Кедровый стланик в сочетании с лиственничным редколесьем лишайниковым и кустарничковые на коллювиальных отложениях крутых склонов	519,9	
7	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником лишайниковые и кустарничковые делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов	200,8	
8	Лиственничные редины зеленомошные сфагновые с болотами на флювиогляциальных отложениях зандровых равнин	96,2	
Интразональные горные ландшафты			
9	Лиственничные леса и ольховниково-ивовые кустарниковые сообщества с участием чозениевых и тополевых лесов, ерников на аллювиальных галечных отложениях горных речных долин	116,3	

10	Лиственничные редколесья лишайниковые аллювиальных отложений низких террас	65,6	
11	Лиственничные редколесья и редины кустарничковые зеленомошные с ерниками низких террас	482,9	
12	Лиственничные редины зеленомошно сфагновые с болотами на аллювиальных отложениях речных долин и низких террас	38,5	
Интразональные тундровые ландшафты			
13	Комплекс горнотундровой растительности (заболоченные пушицево-зеленомошные тундры с участками ерников) гляциальных отложений днищ троговых долин	483,9	
Горные тундры			

14	Лишайниковые тундры с зарослями кустарничков на делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов	94,7	
Горные тундры и пустыни			
15	Эпилитные лишайники на приводораздельных каменных пустынях	482,5	
16	Эпилитные лишайники на коллювиальных отложениях крутых склонов и курумов	707,3	
17	Эпилитные лишайники на моренных отложениях	65,9	

На территории ключевого участка в Адыче-Эльгинском плоскогорье определены 17 урочищ по пяти типам ландшафтов (Таблица 4).

Для ключевых участков характерно распределение ландшафтов в соответствии с высотно-поясными закономерностями, в том числе пояс подгольцовых кустарниковых зарослей на исследуемых участках.

Горноредколесные ландшафты занимают значительную площадь и представлены 8 типами урочищ. Лиственничные редколесья брусничные зеленомошно-лишайниковые на делювиально-коллювиальных отложениях, приуроченные к пологим склонам и речным террасам наиболее распространённый тип урочищ. На водосборных понижениях переувлажненных зандровых равнин и в речных долинах образуется урочища лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые и лишайниковые с рединами. Кроме того, в некоторых участках с формирований условий избыточного увлажнения и недостаточного дренажа процессы заболачивания приводят к формированию - лиственничных редины зеленомошно-сфагновых с торфяными болотами. Кроме того, в зандровых равнинах имеет место быть развитие термокарстовых процессов, о чем свидетельствуют озера и аласы, выделение которых в отдельные картируемые урочища для данного ключевого участка является довольно затруднительным.

Интразональные долинные ландшафты распределены по двум типам горные и тундровые долинные. Тундровые долинные комплексы занимают в основном днища троговых долин и высокогорные мелкодолинные участки. Низкотеррасовые долинные комплексы с ивово-ольховниковыми сообществами с участками лиственничных, чозениевых тополевых лесов.

В моренных типах местности наблюдается развитие двух типов урочищ эпилитных лишайников и лиственничные редколесья, и редины лишайниковые для Участка 1 и лишайниковых горных тундр для Участка 2.

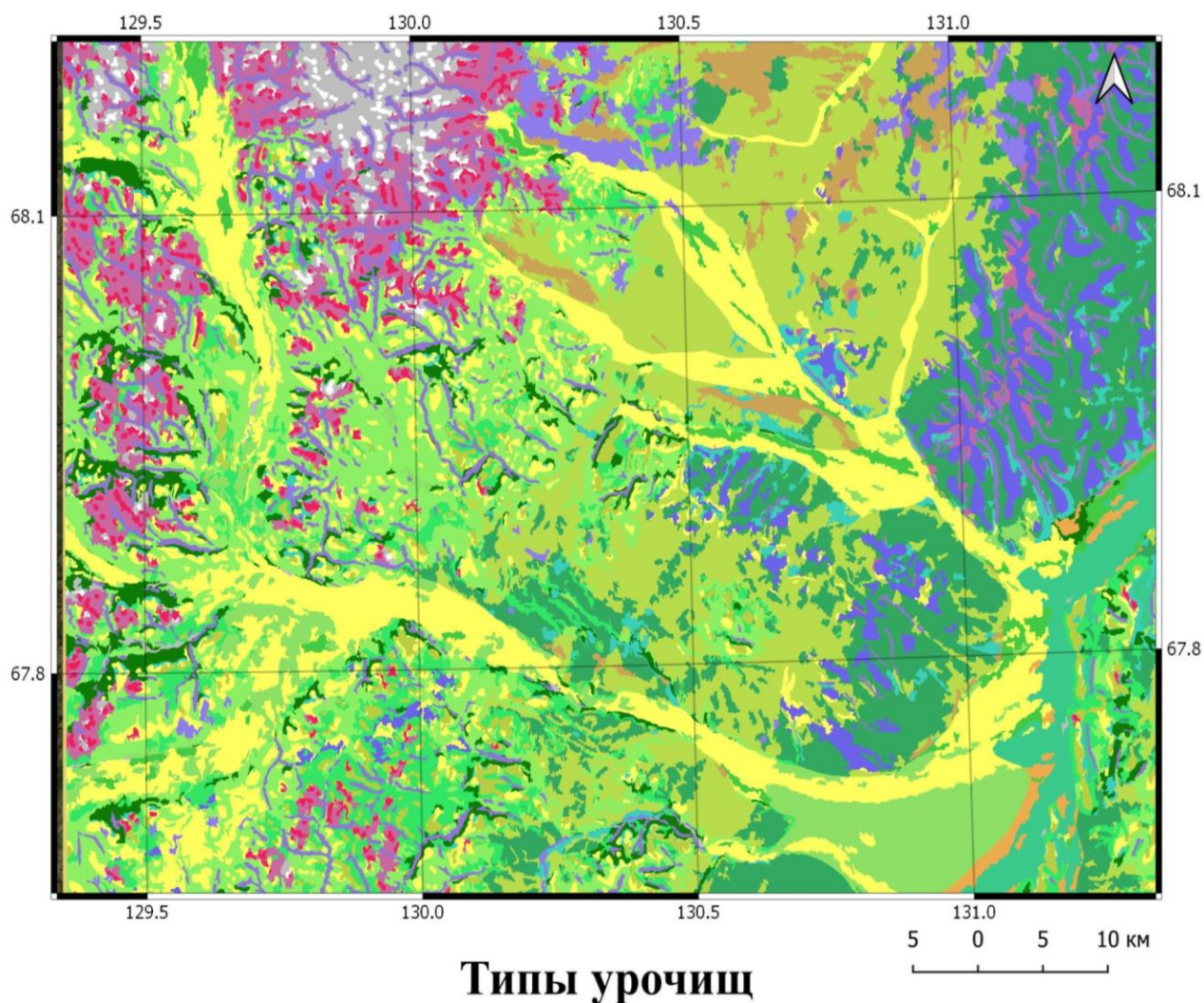

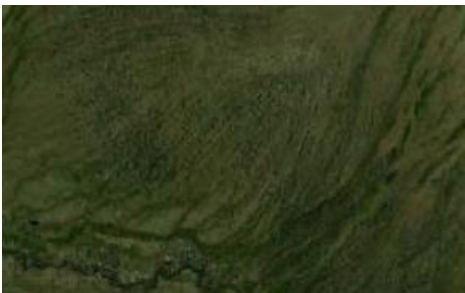







Рисунок 27. Типы урочищ ключевого участка бассейн р.Бытантай (Участок 2)
(составлена автором)






Характерными особенностями пространственной структуры Участка 2 являются незначительная степень развития долинных горнотундровых ландшафтов и долинных растительных сообществ в пределах низкотеррасовых и горно-долинных аллювиальных типах местности, а также высокая доля лиственных редколесий, в пределах склонового и зандрового типов местности. В пределах склоновых типа местности преобладают склоны северо-западной и юго-восточной экспозиции для второго участка.

Типы урочищ ключевого участка Орулганской среднегорной
провинции

№	Типы урочищ	Площадь, кв.км.	Фрагмент урочища на RGB спутникового снимка
Горные редколесья			
1	Лиственничные редколесья зеленомошно-лишайниковые на делювиально- коллювиальных отложениях пологих склонов и подножий крутых склонов	798,0	
2	Лиственничные редколесья кустарничково- зеленомошно-лишайниковые зандровых равнин	802,6	
3	Лиственничные редколесья кустарничково- зеленомошно-лишайниковые на делювиально- коллювиальных отложениях пологих склонов и подножий крутых склонов	112,0	
4	Лиственничные редколесья кустарничково- зеленомошно-лишайниковые на делювиально- коллювиальных отложениях пологих склонов и подножий крутых склонов	697,9	

5	Лиственничные редколесья лишайниковые делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов	298,3	
6	Лиственничные редины зеленомошные сфагновые с болотами на флювиогляциальных отложениях зандровых равнин	212,4	
7	Лиственничные редколесья и редины кустарничково зеленомошные с ерниками на флювиогляциальных отложениях зандровых равнин	118,7	
8	Лиственничные редколесья кустарничково-зеленомошно-лишайниковые на коллювиальных отложениях крутых склонов	167,9	
Интразональные горные ландшафты			
9	Лиственничные леса и ольховниково-ивовые кустарниковые сообщества с участием чозениевых и тополевых лесов, ерников на аллювиальных галечных отложениях горных речных долин	791,5	

10	Лиственничные редколесья лишайниковые аллювиальных отложений низких террас	29,3	
11	Лиственничные редины и ерниковые редколесья зеленомошные сфагновые с болотами на аллювиальных отложениях речных долин	66,4	
12	Лиственничные леса и ольховниково-ивовые кустарниковые сообщества с участием чозениевых и тополевых лесов, ерников на аллювиальных галечных отложениях низких террас	118,7	
Интразональные горно-тундровые ландшафты			
13	Комплекс горнотундровой растительности (заболоченные пушицево-зеленомошные тундры с участками ерников) гляциальных отложений днищ троговых долин	271,1	
Горные тундры и горные пустыни			
14	Лишайниковые тундры с зарослями кустарничков на приводораздельных элливиальных отложениях горных вершин	96,8	

15	Лишайниковые тундры с зарослями кустарничков на делювиально-коллювиальных отложениях пологих склонов	294,8	
16	Лишайниковые тундры с зарослями кустарничков на моренных гляциальных отложениях	198,3	
17	Дриадовые тундры на флювиогляциальных отложениях заандровых равнин	107,1	
18	Эпилитные лишайники на приводораздельных каменных пустынях	34,9	
19	Эпилитные лишайники на коллювиальных отложениях крутых склонов и курумов	130,9	

4.2. Особенности пространственной структуры и ландшафтное разнообразие Орулганской среднегорной провинции

Для всей Орулганской среднегорной провинции нами составлена карта растительности на основе анализа временного ряда снимков Landsat 8 и Sentinel 2. Так как территория провинции огромная и количество снимков для обработки очень трудоемкий и затратный, как по времени, так и по мощности обрабатывающей станции. Процесс обработки произведен в облачной платформе GEE. Всего в базе данных Google на территории исследования хранится 2888 наборов Sentinel 2 и 1249 наборов Landsat 8 OLI за указанный вегетационный период.

Таблица 6

Количество спутниковых данных на Орулганскую среднегорную провинцию

месяц	Sentinel 2 все снимки	Landsat 8 все снимки	Sentinel 2 безоблачные и непокрытые снегом снимки	Landsat 8 безоблачные и непокрытые снегом снимки
вторая половина июня	610	293	124	48
июль	909	423	138	68
август	921	368	210	75
первая половина сентября	448	165	78	32
ИТОГО	2888	1249	550	223

Так как мы выделяем типы(подтипы) ландшафтов технологическая схема геоинформационного моделирования приспособлена для определения сочетаний групп растительных ассоциаций. Долинные комплексы определяются с помощью морфологическая ГИС анализа ЦМР по выделению

двух типов макрорельефа - горносклоновый и долинно-равнинный с помощью вычисления крутизны склона.

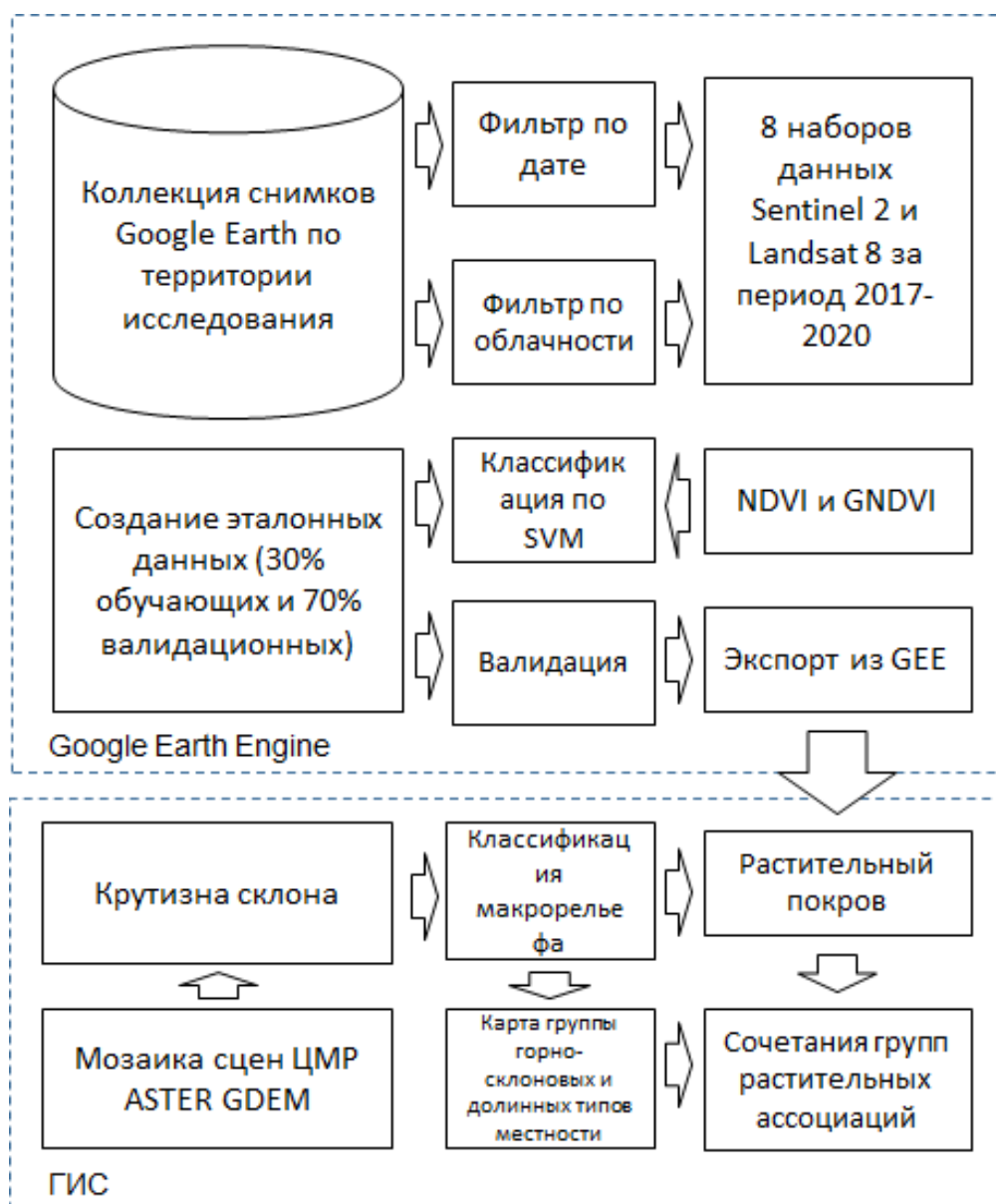


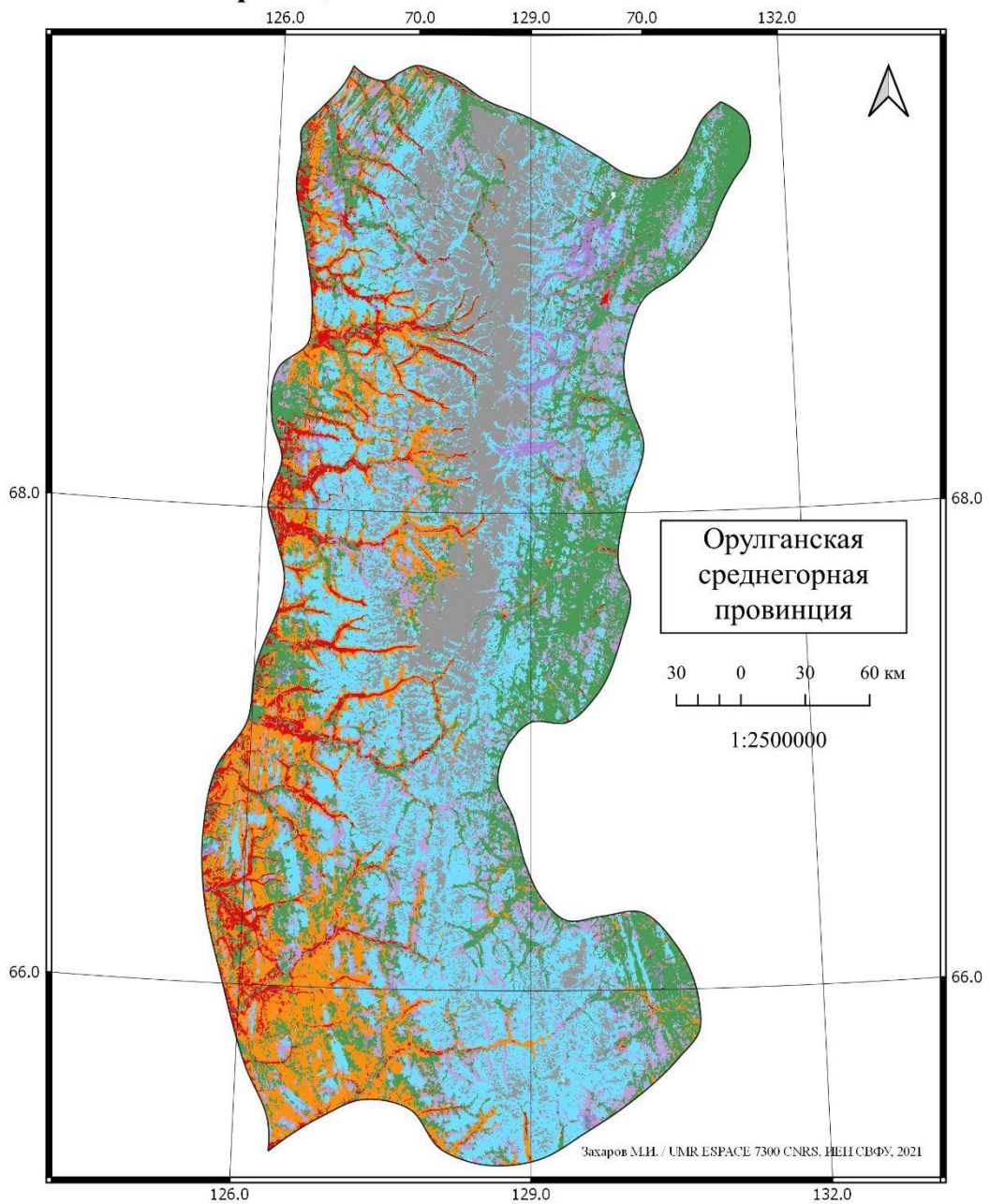
Рисунок 28. Вариация геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов региональных комплексов(провинций)
(составлена автором)

Вслед за мерзлотно-ландшафтной картой мы выделяем тоже 9 сочетаний групп растительных ассоциаций при этом используя подход геоинформационного моделирования из двух этапов. Первый этап состоит из попиксельной классификации и выделения 7 классов растительного покрова. Выделенные классы отражают типы растительного покрова по их

спектрально-отражательной характеристике и не выделяют комплексные и сильно гетерогенированные объекты, как интразональные долинные комплексы, где по сути мы видим сочетание речного галечника и воды, который имеет схожие характеристики с эпилитно лишайниковыми каменистыми пустынями и высокопродуктивных ольховниково-ивовых кустарниковых сообществ с участками лиственничных лесов и тополовых лесов для северотаежных и горноредколесных ландшафтов. Горно-тундровые долинные комплексы — это узкие полосы кустарничково-лишайниковой растительности на днище троговых долин.

Для выделения долинных комплексов нами использована мозаика ЦМР ASTER GDEM. Используя инструмент расчета склона, мы классифицировали ЦМР на территорию провинции на два класса: долинно-равнинные и склоновые горные. Долинно-равнинный класс объединяет слабо наклоненные, эрозионно-денудационные, холмисто увалистые поверхности. В него объединены несколько типов местности: низкотеррасовые, маршевые, слабодренированные в какой-то мере зандровые и моренные типы местности. Далее мы проанализировали долинно-равнинные участки и выделили в нем три дополнительных класса (горнотундровые, горноредколесные и северотаежные) по визуальному анализу типов и биопродуктивности растительного покрова. Благодаря этому разделению мы можем переклассифицировать результат обработки снимков и добавить интразональные долинные комплексы, ограниченные значением крутизны склона в 15° . Данное значение является оптимальным для проведения границы долинных участков, так как чаще всего прохождении данной отметки по результатам классификации начинаются изменения растительного покрова. В научной литературе по выделенным долинным типам местности по обработке ЦМР нет единого мнения по крутизне склона для определения границ, [Tagil and Jenness, 2008] использует 6° , а [Spijker, 2013] значение крутизны для классификации форм рельефа определили от $15-45^\circ$ в зависимости от пространственного разрешения ЦМР.

Растительный покров по классификации снимков










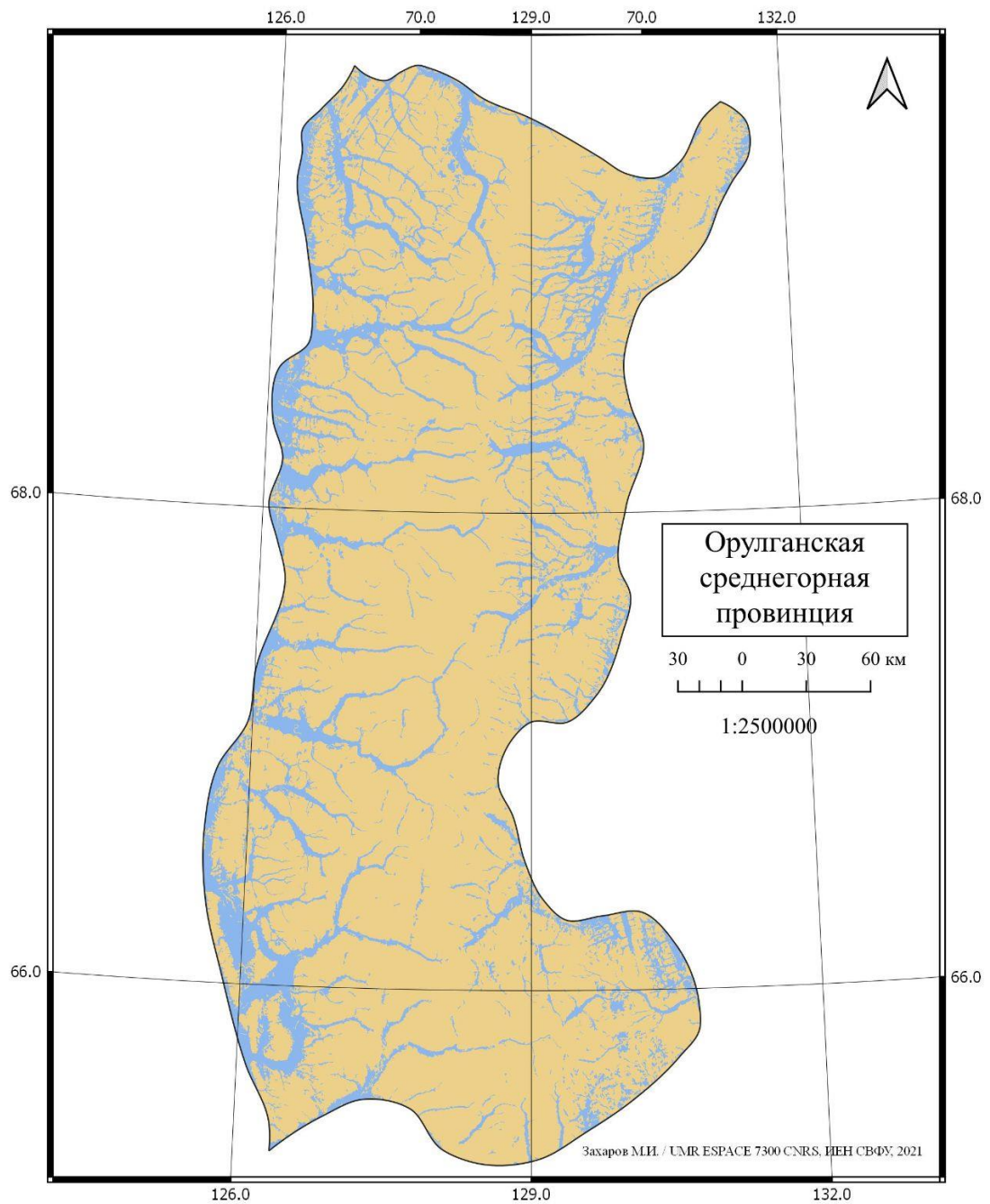
Условные обозначения	
	Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые
	Лиственничные редколесья и редины лишайниковые и моховые
	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховниками и ерниками
	Ольховниково-ивовые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов
	Сочетание болот и лиственничных сфагновых редин
	Горные тундры лишайниковые и кустарничковые
	Эпилитно-лишайниковые сообщества и речной галечник

Рисунок 29. Растительный покров по классификации снимков в GEE
(составлена автором)

Классификация рельефа по склону





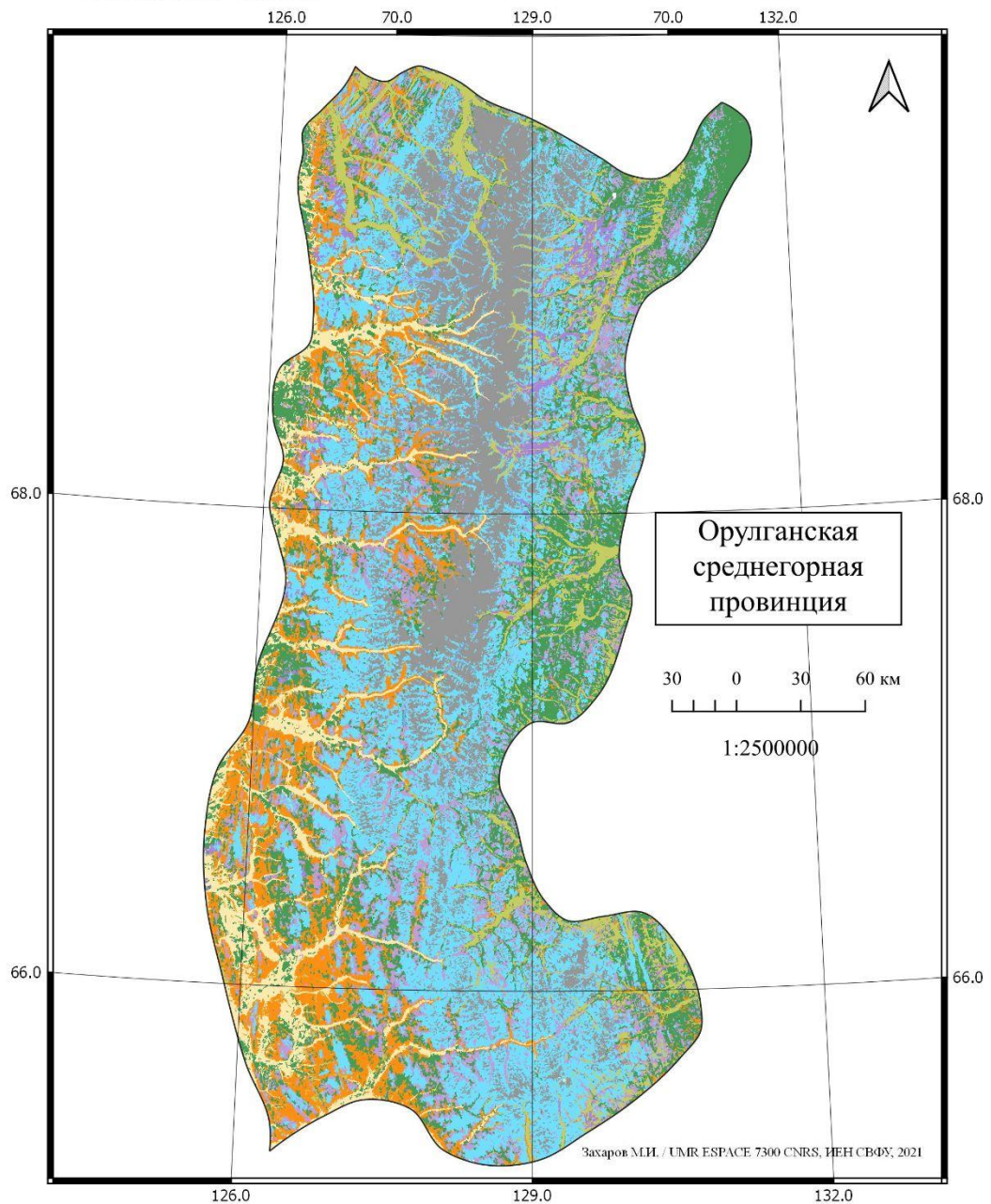
Условное обозначение	
	Долинные, зандровые, моренные равнинные и слабонаклоненные типы местности
	Склоновые типы местности

Рисунок 30. Классификация рельефа по склону (составлена автором)

Растительность



Условные обозначения










-  Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые
-  Лиственничные редколесья с кедровым стлаником кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховниками и ерниками
-  Лиственничные редколесья и редины лишайниковые и моховые
-  Сочетание болот и лиственничных сфагновых редины
-  Горные тундры лишайниковые и кустарничковые
-  Сообщества эпилитных лишайников
-  Комплекс северотаежной долинной растительности
-  Комплекс горноредколесной долинной растительности
-  Комплекс горно-тундровой долинной растительности

Рисунок 31. Растительность Орулганской среднегорной провинции
(составлена автором)

По результатам проведенного ГИС моделирования растительности, следуя по классификационной схеме Мерзлотно-ландшафтной карты. Мы определили 9 картируемых геоботанических единиц, которые можно отнести к сочетанию групп растительных ассоциаций (Рис 14). В Мерзлотно-ландшафтной карте в этой провинции не выделяли мари и лиственничные редины моховые. При ГИС моделировании хорошо выделились сочетание пушицевых, дриадовых болот и лиственничных сфагновых реди, которых можно включить в состав класса - “Мари и лиственничные редины моховые”. ГИС моделирование не позволили отчетливо выделить подгольцовый пояс, где господствует кедровый стланик, так как он часто смешиваются с лиственничными редколесьями. Данный факт также отмечает Николин Е.Г. который подвергает сомнению выделение подгольцово-кустарникового пояса в Западном Верхоянье. Подгольцово-кустарниковый пояс более выражен в Центральном и Восточном Верхоянье [Николин, 2011]. В нашем случае мы определили картируемую единицу как - Лиственничные редколесья с кедровым стлаником кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховниками и ерникам. Сочетание группы растительных ассоциаций характерен для склонов южной экспозиции, где возвышенная часть состоит из зарослей кедровых стлаников с постепенным увеличением сомкнутости лиственничников при понижении с переходом к долинным комплексом с ольховником и ерниками. Карта хорошо отражает широтное распределение растительности, где при переходе с севера на юг увеличиваются площади, занимаемые редкостойными лиственничными лесами. Долготная секторность выражена четком разделении двух макросклонов - восточной и западной. Западный макросклон более подвержен отепляющему воздействию реки Лена и теплых воздушных масс с Центральной части Якутии. Восточный макросклон испытывает значительный недостаток в теплых воздушных масса и более подвержен проникновению холодных воздушных масс с Северно-Ледовитого океана.

Эпилитно-лишайниковые сообщества каменистых пустынь (включая и не занятые растительностью обнажения горных пород) характерны для горно-привершинных участков горных хребтов доля которых увеличивается с юга на север. Хребты в южной части провинции в значительной мере покрыты горными лишайниковыми и кустарничково-моховыми тундрами. В целом анализ полученной карты свидетельствует и подтверждает общую широтную закономерность снижения в направлении на север долевого участия лесного и подгольцово-кустарникового пояса и увеличения в противовес территорий покрытых горно-тундровой растительности и сообществами эпилитных лишайников.

Для выделения долинных комплексов мы намеренно игнорировали высотную дифференциацию, чтобы лучше выразить интразональность данных ландшафтных комплексов и обозначить значение парагенетических и парадинамических связей. Также по результатам классификации мы можем ответить относительно отсутствие контрастности в растительном покрове при их глубокой врезанности в горных хребет. Например, горная река Нёлон приток реки Лены, берущий начало на хребте Орулган (Рис. 15), данная река на всем своем протяжении сохраняет ольховниково-ивовые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов.



Рисунок 32. Долина реки Нёлон снимок Sentinel 2 за начало августа RGB в естественных цветах

Соотношение площадей выделенных сочетаний групп растительных ассоциаций по Мерзлотно-ландшафтной карте и по проведенному ГИС моделированию

Растительность на Мерзлотно-ландшафтной карте 1:1 500 000		Карта растительности по результату ГИС моделирования	
Сочетание групп растительных ассоциаций	Площадь кв.км.	Сочетание групп растительных ассоциаций	Площадь кв.км.
Горные тундры лишайниковые и кустарничково-моховые	43,571.2	Горные тундры лишайниковые и кустарничково-моховые	22,107.0
Кедровый стланик кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховником и ерниками	3411.9	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховниками и ерниками	9327.6
Лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые	1570.4	Лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые	8399.2
Лиственничные редколесья и кустарничково-лишайниково-моховые ерниковые	8723.3	Лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые	14,901.3
Мари и лиственничные редины моховые	не выделено	Сочетание болот и лиственничных сфагновых редин	1754.9
Эпилитные лишайники	14,307.5	Сообщества эпилитных лишайников	13,395.1
Комплекс северотаежной долинной растительности	1023.3	Комплекс северотаежной долинной растительности	5542.5
Комплекс горноредколесной долинной растительности	6684.8	Комплекс горноредколесной долинной растительности	5850.1
Комплекс горно-тундровой долинной растительности	3670.6	Комплекс горно-тундровой долинной растительности	678.3

Анализ пространственной структуры растительности выявил преобладание горнотундровых и горнопустынных растительных сообществ в Орулганской среднегорной провинции, но в целом их доля резко снизилась с 70% в мерзлотно-ландшафтной карте до 43%. При этом доля северных горных лиственничных редколесий увеличилось с 16,5% до 42%. То есть соотношение между горнотундровыми и горноредколесными практически 1:1 (Рис. 33). Данный факт также подкрепляет целесообразность определения провинции к группе с горнотундровыми и горноредколесными природными комплексами сплошного распространения многолетнемерзлых пород по мерзлотно-ландшафтному районированию. При этом надо отметить выявление значительно больших площадей и значимости северотаежной и горноредколесной растительности в пространственной структуре ландшафтов провинции, в особенности долинных комплексах и склонах западного макросклона.

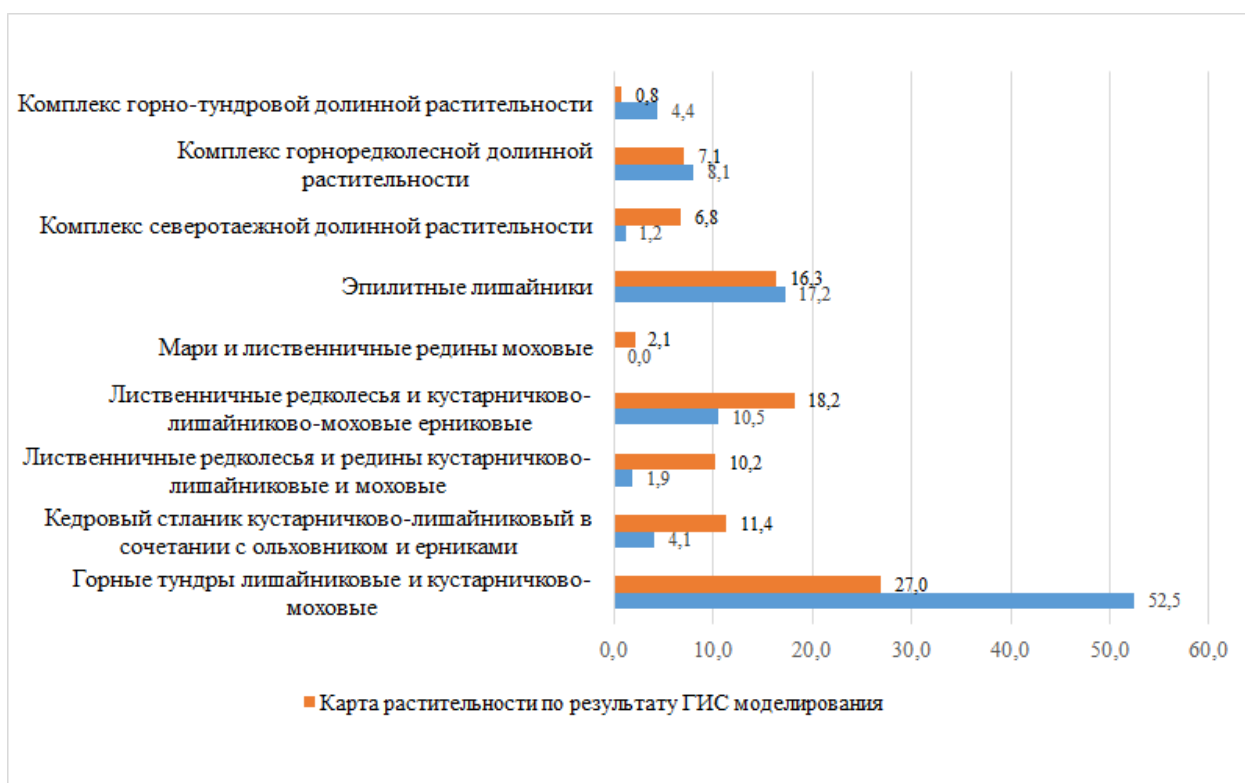


Рисунок 33. Доли подтипов ландшафтов Орулганской среднегорной провинции

4.3. Пространственная структура среднетаежных мерзлотных ландшафтов на примере ключевого участка в Лено-Амгинской аласной провинции

Изучение пространственной структуры мерзлотных ландшафтов Лено-Амгинской аласной провинции осуществлено в пределах ключевого участка в окрестностях села Намцы (Участок 3), расположенного долине Эркээни Средней лены в Намском муниципальном улусе. Ключевой участок исследования имеет размер 23x37 км и расположен между 62 ° 45 ' - 62 ° 20' северной широты и 129 ° 15 ' - 130 ° 00' восточной долготы. Общая площадь исследуемого участка - 872 кв.км (Рис. 34).

Среднетаежные равнинные ландшафты Центральной Якутии отличается практически отсутствием высотной поясности. Разнообразие ландшафтов территории исследования сформировано благодаря реликтовым экосистемам на коренном берегу, термокарстовым процессам и повышенным антропогенным воздействием [Сосина и Захарова, 2009].

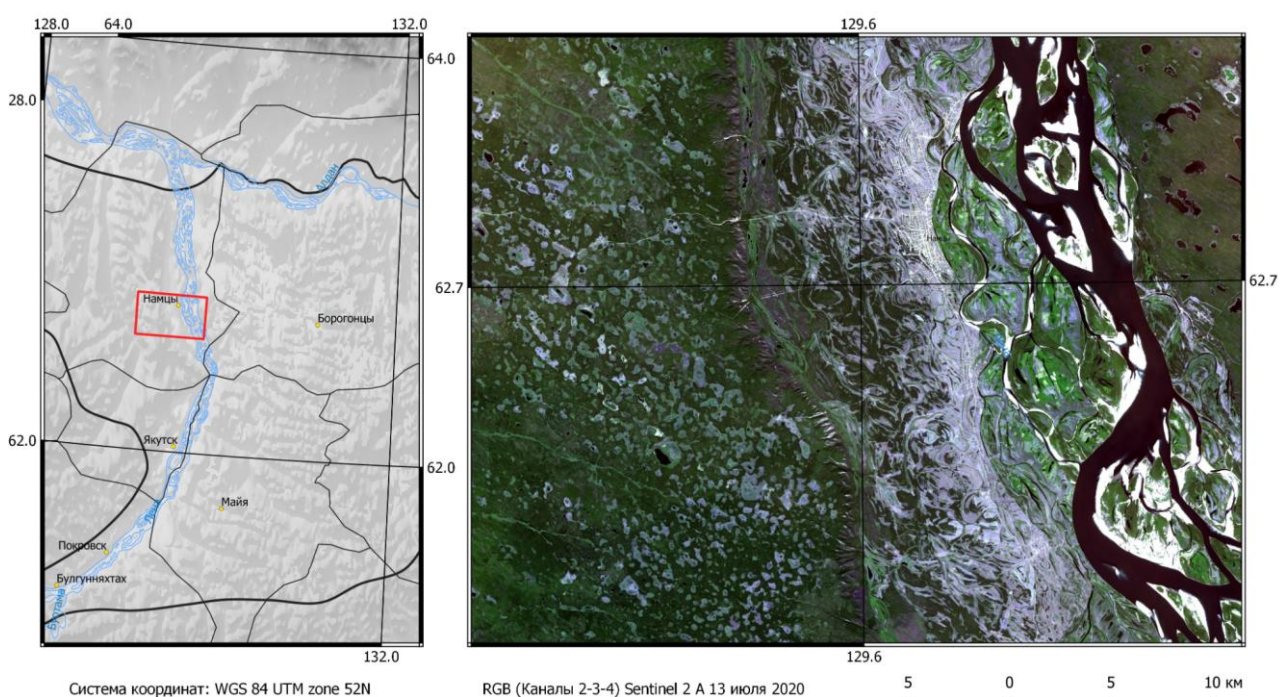


Рисунок 34. Ключевой участок Хамагатта в Лено-Амгинской аласной провинции (составлено автором)

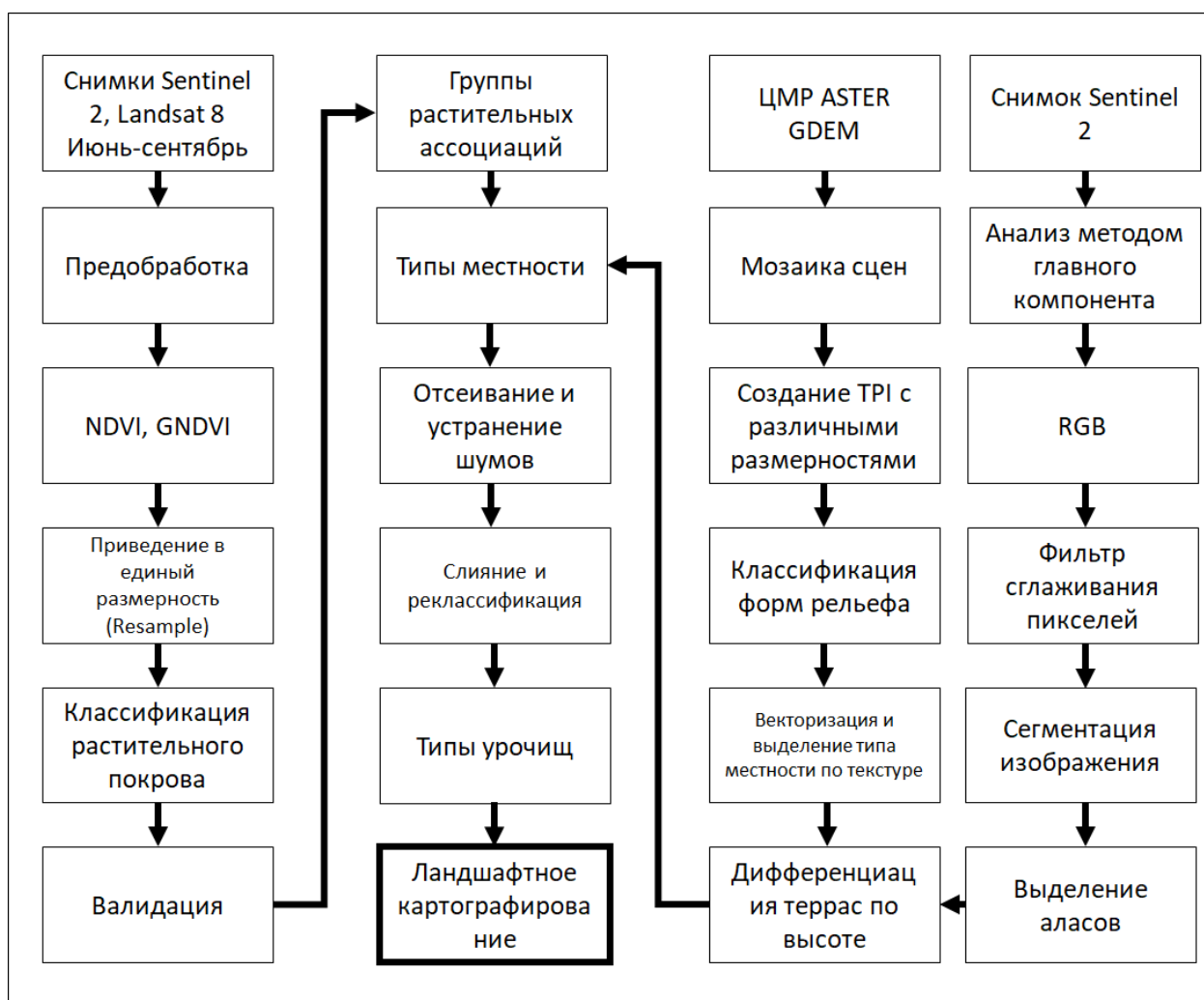


Рисунок 35. Технологическая схема геоинформационного моделирования для картографирования урочищ Участка 3

Технологическая схема геоинформационного моделирования для среднетаежных ландшафтов, усложненных аласными комплексами и сельскохозяйственными угодьями, отличается необходимостью использования объектно-ориентированной классификации на основе сегментации изображения (Рис. 35).

Широкое распространение аласных комплексов на водоразделах является отличительной чертой данной провинции для процесса геоинформационного моделирования. Аласные комплексы образуют два уникальных типа местности: аласный и межаласный [Федоров, 1989]. В Растительности выделяется аласные луга на уровне сочетаний групп

растительных ассоциаций. В пойменной части Средней Лены выделяют три вида лугов: настоящие, остепненные и болотистые [Кононов, 1971].

Обнаружение, идентификация и извлечение аласов и сельскохозяйственных полей по их морфологическим характеристикам хорошо подходят для объектно-ориентированных алгоритмов классификации машинного обучения ОБИА [Maragos, 1989]. Распознавание ОБИА, увы, состоит из четырех этапов: (а) уменьшение размерности с помощью алгоритма анализа главных компонентов и линейная комбинация исходных полос, которая содержит 91-95% спектральной информации в первых трех компонентах (рис. 35 а). (б) Сглаживающая фильтрация, применяемая для подавления шума и статистической гомогенизации. Этот метод фильтрации связывает с каждым пикселем изображения ближайшую локальную моду в распределении плотности объединенной области (рис. 35 б) [Comaniciu and Meer, 1999, 2002]. (с) Сегментация изображения с помощью непараметрического и итеративного метода кластеризации Large Scale MeanShift [Michel et al, 2015]. Сегментация создает помеченное изображение с мозаичной обработкой, где соседние пиксели, расстояние по диапазону которых ниже радиуса диапазона и, возможно, пространственное расстояние ниже пространственного радиуса, объединяются в одно и то же значение раstra (рис. 35 с). Наиболее полное извлечение аласов получается при следующих параметрах: пространственный радиус - 50; радиус действия - 25; Минимальный размер сегмента - 10. Основные геометрические параметры, отличающие днища термокарстовых котловин, касаются их формы: аласы имеет форму, близкую к окружности, не имеет четких углов и не отличается удлинением в отличие от сельскохозяйственных полей или вырубок.

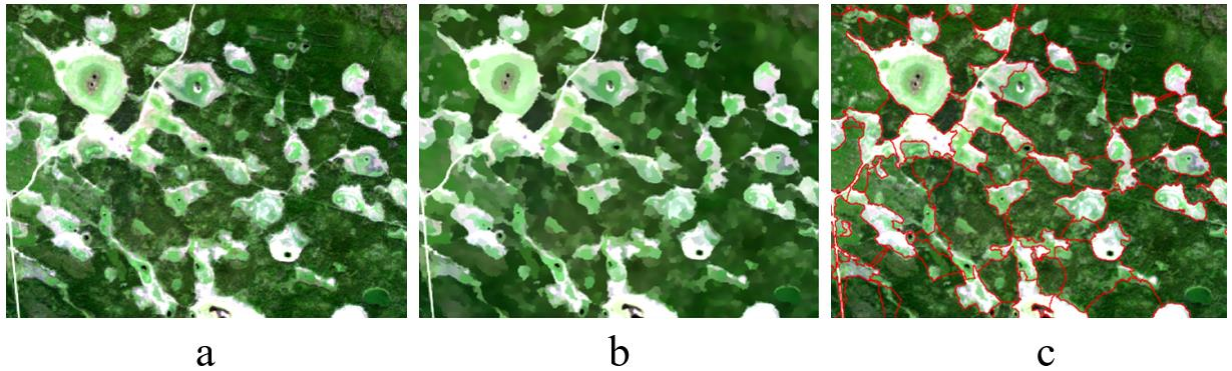
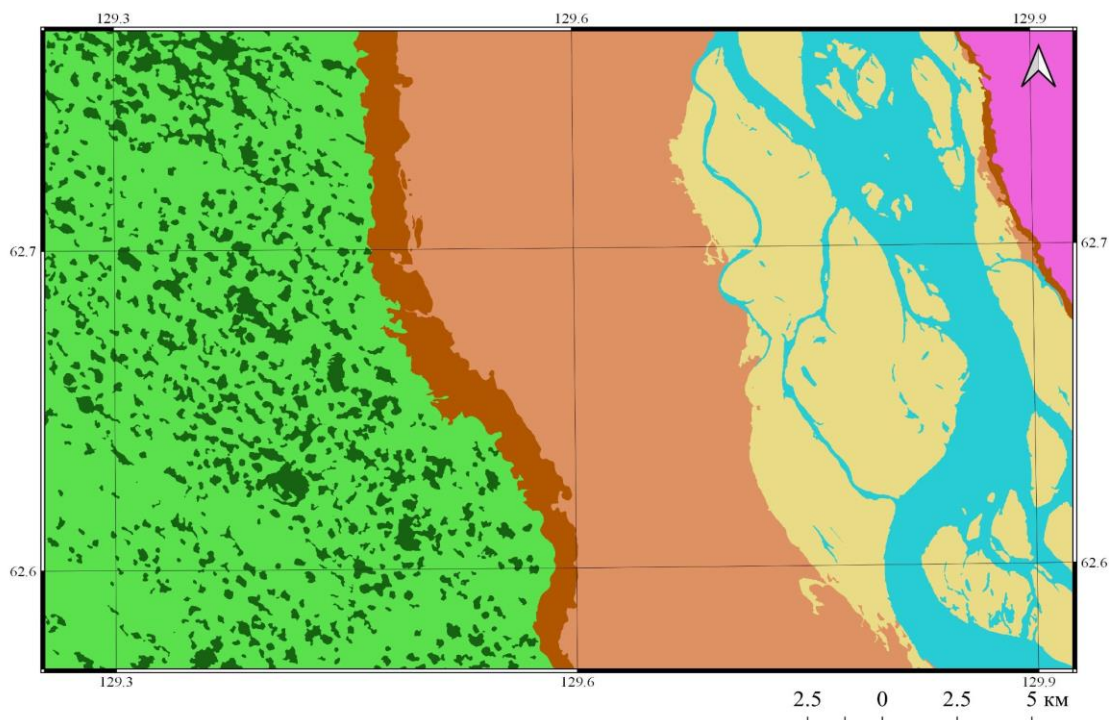


Рисунок 35. Распознавание объектов из изображений а) Исходное изображение Sentinel 2; б) применение фильтра сглаживания пикселей; в) сегментация изображения

Далее по уже предложенной методике использования индекса топографической позиции выделено два типа рельефа равнинные и склоновые (склон коренного берега р. Лена). По высоте определены три типа местности – пойменный (ниже 70 м.), низкотеррасовый (70-80 м.), приводораздельный межаласный и аласный (выше 200) (Рис. 26).

В структуре типов местности ключевого участка приводораздельные с межаласными и аласными типами местности занимают – 370,7 кв.км (42,4 %), склоновые, приуроченные к склонам коренного берега – 33,4 кв.км (3,8 %), низкотеррасовые, приуроченные к долине Энциэли – 184,8 кв.км (21,2 %) и пойменные – 143, 2 кв.км (16,3 %) остальная часть покрыта руслом р.Лена. В пределах пойменного и приводораздельного типов местности не выделяются высотные варианты.

Аласный тип местности занимает 139,3 кв.км. (15,9 %) территории ключевого участка. Средний размер аласов 2,4 кв.км и представляют собой неглубокие термокарстовые котловины глубиной до 2 -3 метров. Для детального анализа состояния аласных комплексов необходимо выделить несколько урочищ в зависимости от типов аласных лугов.



Тип местности

- пойменный аллювиальный
- низкотеррасовый аллювиальный
- средневысотный террасовый элювиальный
- склоновый делювиально-коллювиальный и делювиально-солифлюкционный
- межлассный озерно-аллювиальный
- аласный термокарстовый

Рисунок 36. Типы местности ключевого участка Хамагатта
(составлена автором)

Несмотря на значительно меньший размер ключевого участка, чем две предыдущих. Исследуемая территория характеризуется высоким разнообразием лесных, степных и луговых сообществ.

В результате классификации по предложенному методу составлена карта растительности с выделением 9 групп растительных ассоциаций. Использованы образцы безоблачных изображений за июнь, июль, август и сентябрь 2018-2020 г. В результате применения 4 алгоритмов машинного обучения, наиболее лучший результат был достигнут при применении алгоритма Spectral Angle Mapper (Таблица 8).

Результаты классификации растительного покрова по различным алгоритмам машинного обучения Участок 3

Ключевые участки	Количество тренировочных точек	Количество валидационных точек	Алгоритм обучения	Общая точность (overall accuracy), %
Участок 2 (11 классов)	120	350	SVM	44,7
			ML	26,0
			MD	70,2
			SAM	79,4

Фенологические особенности характеризовались средними значениями NDVI и GNDVI, наблюдаемыми во всех выборках для каждого класса. На рисунке 37 показаны спектральные профили групп растительных ассоциаций в вегетационный период. По профилю мы можем увидеть четкое разделение степных ассоциаций, которым характерны низкие значения биомассы. Пойменные луга характеризуется резкими перепадами значений NDVI в летний период, то свидетельствует о использовании их в качестве сенокосных угодий (перепад совпадает с периодом кошения травы – июль). Аласные и долинные луга резко теряют биомассу к сентябрю, что может быть связано с пиком выпаса скота. Лиственничные леса в целом имеют более высокую биомассу, чем склоновые сосновые леса, при том что последние держат биомассу почти на одном уровне. Наиболее большие перепады значений NDVI и GNDVI характерен для кустарниковых сообществ поймы и речных островов.

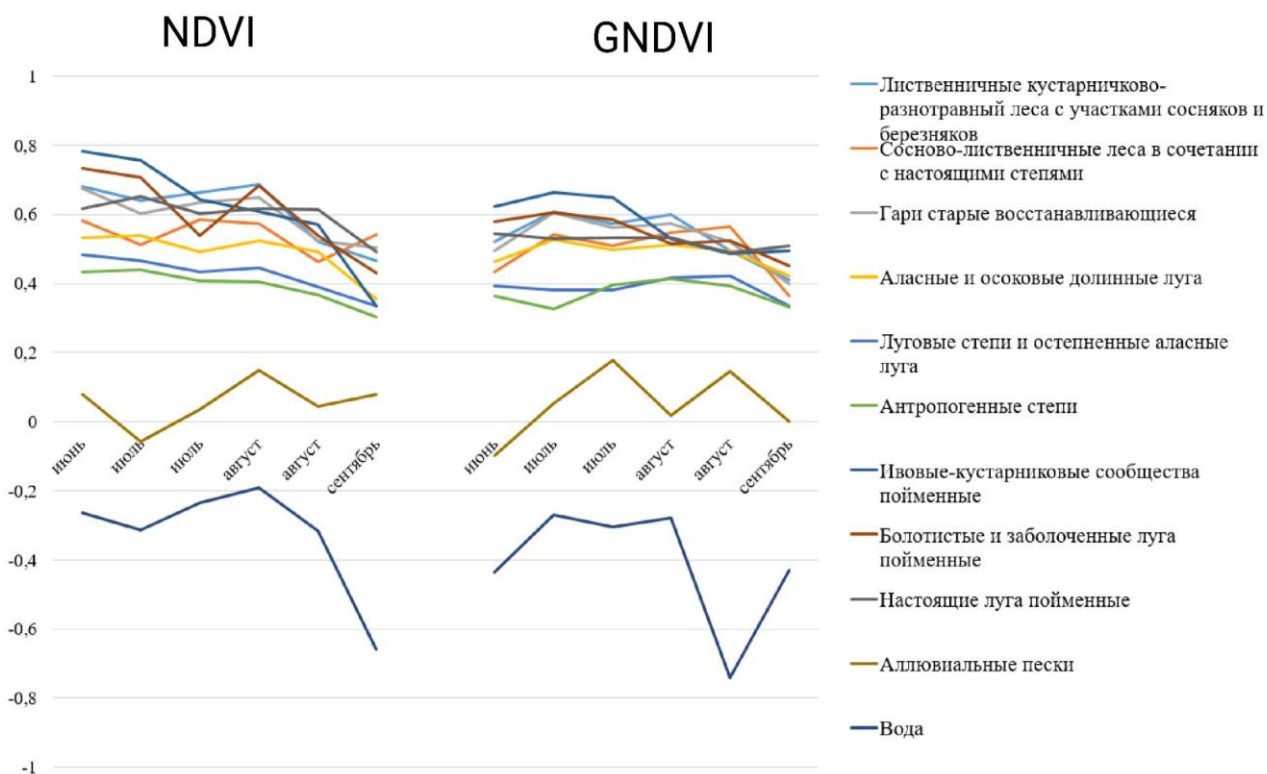
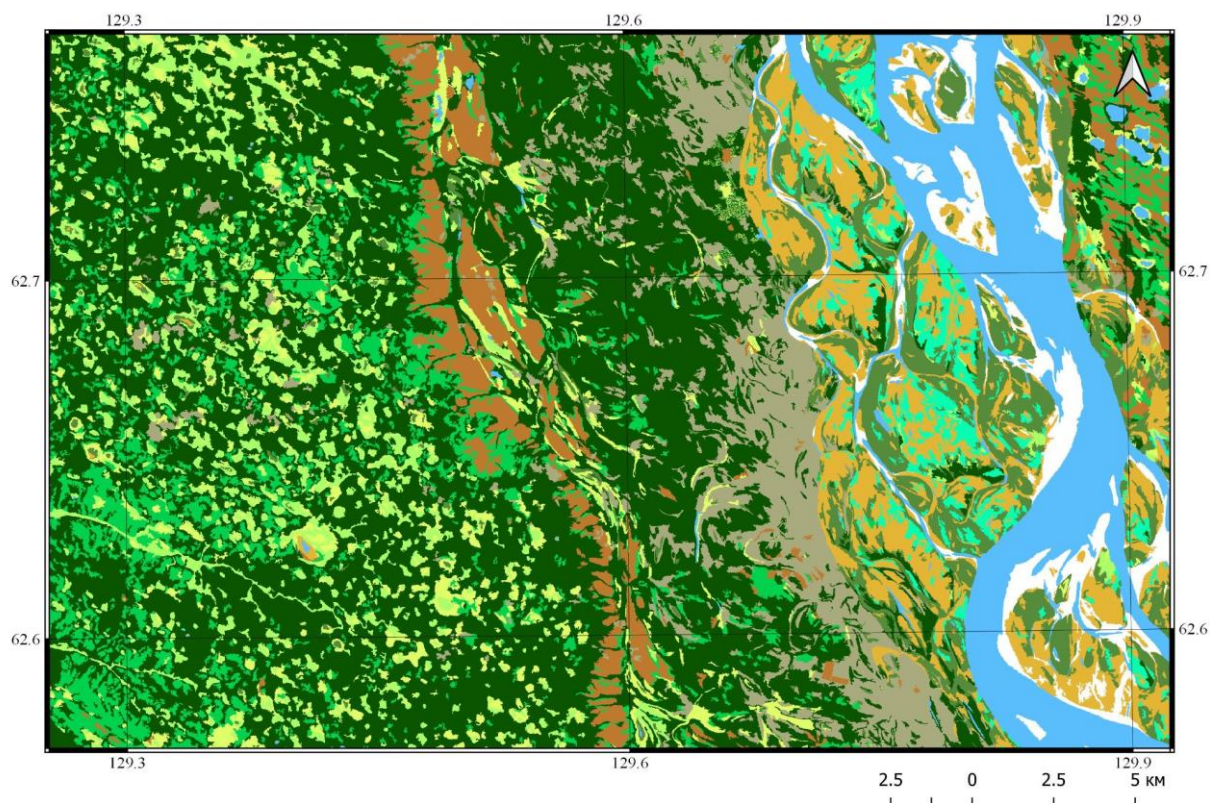


Рисунок 37. Значения NDVI и GNDVI групп растительных ассоциаций
Участка 3

Лесные сообщества представлены преимущественно лиственницей с примесью сосны и березы с выделением послепожарных сукцессии. Выделяется два типа сукцессий – старые восстанавливающийся гари (20-50 лет) и новые гари (до 20 лет) [Шестакова, 2011]. На хорошо дренированных склонах коренного берега (быраанах) хорошо выделяются сосновые леса (*Pinus sylvestris*) лес с участками степной растительности и остепненных лугов. На этапе классификации нельзя разделить лиственничные леса по надпойменным террасам. Также на этапе классификации снимков сложно различить аласные луга на водоразделе от долинных лугов. В пойменной части и на островах Лены хорошо выделяются два типа лугов по степени увлажненности - менее увлажненную можно отнести к настоящим лугам, другую к болотистым, приуроченные к локальным понижениям и озерам-старицам (Рис. 38).

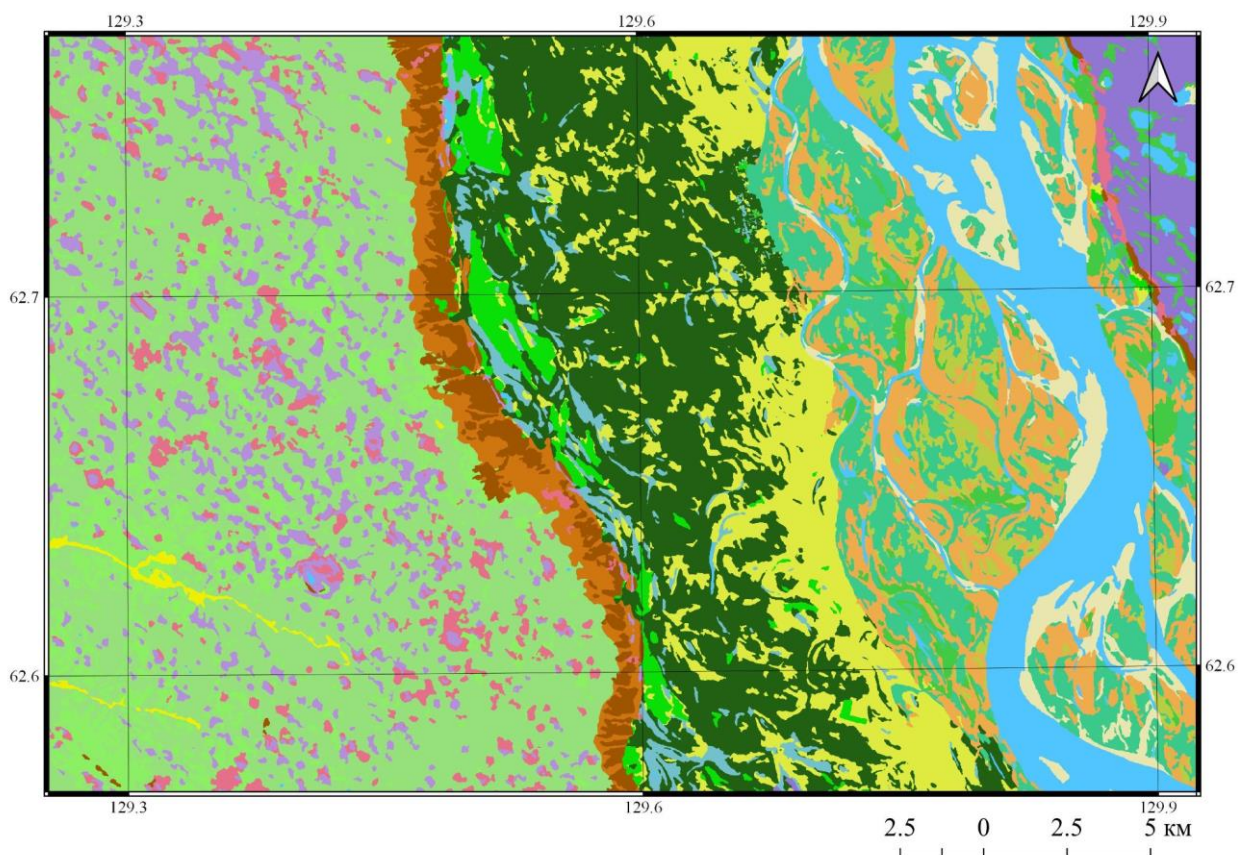


Группы растительных ассоциаций

- | | |
|--|--|
| ■ Гари старые восстанавливающиеся | ■ Луговые степи и остепненные аласные луга |
| ■ Лиственничные кустарничково-разнотравный леса с участками сосняков и березняков | ■ Антропогенные степи |
| ■ Сосновые леса в сочетании с опустыненными степями | ■ Ивовые-кустарниковые сообщества пойменные |
| ■ Аласные и осоковые долинные луга | ■ Настоящие луга пойменные |
| | ■ Болотистые и заболоченные луга пойменные |

Рисунок 38. Группы растительных ассоциаций ключевого участка Хамагатга

Анализ ландшафтного разнообразия по типам урочищ показывает однородность территории исследования. Выделение урочищ связаны с террасами р.Лена. Всего выделено 14 урочищ в пределах зональных среднетаежных и интразональных среднетаежных и пойменных мерзлотных ландшафтах. Наиболее разнообразие характерна для надпойменных террас р. Лена., где выделено 6 типов лесных, луговых и степных урочищ. Межаласные пространства покрыты лиственничными кустарничково-разнотравными лесами, что можно сказать является его коренным состоянием. Это наиболее динамичные урочища, определяемые послепожарными сукцессиями, сильность льдистостью отложений [Федоров, 2020] вырубками и развитием термоденудационных процессов.



Типы урочищ

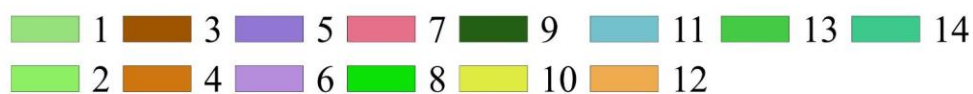

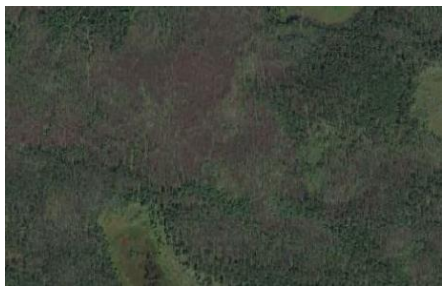









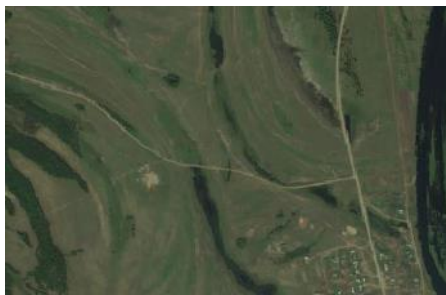

Рисунок 39. Типы урочищ ключевого участка долина Эрхээни (Участок 3)
(составлена автором)

Ландшафты на территории Участка 3 подвергаются существенным антропогенным нагрузкам, что, безусловно, отражается и в пространственной структуре урочищ. Практически 12% территории занимают степные ландшафты, сформировавшиеся при повышенной антропогенной нагрузке, выраженных также в перевыпасе скота.

На пойме и островах реки Лена значительные участки заняты настоящими и мезофитными лугами используемые в качестве сенокосных угодий. Аласные луга используются как пастбища скота в летнее время, ввиду удаленности от населенных пунктов.

Типы урочищ ключевого участка Лено-Амгинской аласной провинции

№	Тип урочища	Площадь, кв.км	Фрагмент урочища на RGB спутникового снимка
Среднетаежные ландшафты			
1	Лиственничные кустарничковые-разнотравные леса межаласные на элювиально-делювиальных отложениях плоскоравнинных высокой террасы р.Лена	223,0	
2	Гари старые восстанавливающийся (березово-лиственничные тонкоствольные леса) межаласные на элювиально-делювиальных отложениях плоскоравнинных высокой террасы р.Лена	45,6	
3	Сосново-лиственничные леса в сочетании с настоящими степями на склоновых делювиально - коллювиальных и делювиально-солифлюкционных отложениях склонов коренного берега р. Лена	17,0	
4	Лиственничные кустарничковые-разнотравные леса на склоновых делювиально - коллювиальных и делювиально-солифлюкционных отложениях склонов коренного берега р. Лена	14,0	
5	Лиственнично-сосновые кустарничково-лишайниковые леса с примесью ели на элювиальных отложениях средневысотных террас	36,9	

Интразональные среднетаежные ландшафты			
6	Аласные настоящие и заболоченные луга на термокарстовых отложениях днищ аласных котловин	43,1	
7	Аласные остепненные луга и антропогенные степи на термокарстовых отложениях днищ аласных котловин	25,0	
8	Сосновые леса в сочетании с настоящими степями на аллювиальных отложениях надпойменной террасы р.Лена	17,9	
9	Лиственничные и сосново-лиственничные кустарничково-лишайниковые леса на аллювиальных отложениях надпойменной террасы р.Лена	117,4	
10	Антропогенные деградированные степи на аллювиальных отложениях надпойменной террасы р.Лена	61,7	
11	Заболоченные и осоковые долинные луга на аллювиальных отложениях надпойменной террасы р.Лена	13,6	

Интразональные пойменные ландшафты			
12	Ивовые-кустарниковые сообщества на аллювиальных пойменных отложениях островов р.Лена	55,9	
13	Настоящие луга на аллювиальных пойменных отложениях островов р.Лена	14,7	
14	Болотистые и заболоченные луга на аллювиальных пойменных отложениях островов р.Лена	66,0	

Геоинформационное моделирование позволяет выделить картируемые типы урочищ и более точно определить количественные показатели значимых в хозяйственной деятельности человека аласных луговых комплексов и пойменных лугов островов р.Лена.

Динамика ландшафтов территории может быть изучена с помощью классификации земельного покрова по разновременным снимкам при котором могут быть определены темпы аккумулятивно-эрозионных процессов в островах и пойме реки (Приложение А). В динамике аласов отмечается наличие процессов циклического обводнения термокарстовых озер, определенных по моделированию аласных ландшафтов [Gadal et al., 2020].

Общие выводы по IV главе

1. Руководствуясь общей схемой геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов, в зависимости от типологического уровня ландшафтов и сложности критериев выделения для горных и среднетаежных мерзлотных ландшафтов создаются вариации моделирования

2. Использование геоморфометрического ГИС-анализа по индексу топографической позиции и сегментации спутникового изображения позволили более точно определить особенности пространственной структуры типов местности по ключевым участкам. Установлено, что классификация форм рельефа определяет значительную расчлененность горно-склоновых типов местности.

3. Для ключевых участков горных мерзлотных ландшафтов определены 7 групп растительных ассоциаций. Для ключевого участка в среднетаежном мерзлотном ландшафте определены 9 групп растительных ассоциаций.

4. Анализ ландшафтного разнообразия осуществлено по пространственной структуре урочищ. Определено всего 22 типа урочищ для Участка 1 и 2 в горных зональных и интразональных мерзлотных ландшафтах. 14 урочищ мерзлотных ландшафтов для Участка 3.

5. Анализ пространственной структуры Орулганской среднегорной провинции по геоинформационному моделированию позволил выявить несколько особенностей провинции:

- интразональные долинные мерзлотные ландшафты провинции сильно зависят от макросклона основного хребта;

- в зональных мерзлотных ландшафтах практически равные долевые значения в структуре имеют горнотундровые и горноредколесные ландшафты, в отличие от Мерзлотно-ландшафтной карты, где определяется преобладание горных тундр

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных результатов проведенного исследования можно выделить несколько основных положений.

1) При изучении пространственной структуры мерзлотных ландшафтов Якутии целесообразно использовать комплексное геоинформационное моделирование. Методологической основой геоинформационного моделирования являются мерзлотно-ландшафтная классификация, схема и критерии выделения типологических комплексов базируется на сочетании растительности, рельефа и стратиграфо-генетический комплекса.

2) В результате изучения опыта и различных подходов, алгоритмов применения данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа разработана адаптированная схема геоинформационного моделирования пространственной структуры мерзлотных ландшафтов на уровне типов(подтипов) ландшафтов, типов местности и урочищ.

3) Определены критерии геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов. Так для выделения групп растительных ассоциаций и их сочетаний использованы особенности динамики биомассы в вегетационный период на основе спектральных индексов NDVI и GNDVI. Анализ временного ряда показателей выявил хорошие возможности дифференциации редкостойных лиственничных лесов в зависимости от характеристик нижних ярусов. Морфологический ГИС анализ цифровой модели рельефа для выделения типов местности базируется на определении индекса топографической позиции в двух размерностях, что позволяет выявить основные геоморфологические формы рельефа. Использование сегментации изображения позволяет дополнить дифференциацию зандровыми, моренными и аласными типами местности.

4) Составлены ландшафтные карты урочищ по трем ключевым участкам с выделением зональных и интразональных комплексов. Установлено высокое ландшафтное разнообразие и сложность пространственной структуры горных

мерзлотных ландшафтов. Определено 22 типа урочищ для горных и 14 типов урочищ для среднетаежных мерзлотных ландшафтов, в том числе ранее не выделяемые 3 типа урочищ интразональных пойменных ландшафтов.

5) С использованием облачной платформы Google Earth Engine и накопленных данных дистанционного зондирования получены более точные сведения по пространственной структуре Орулганской среднегорной провинции на уровне типов(подтипов) ландшафтов. Выявлено значительное более высокое доленое участие в ландшафтном разнообразии провинции горноредколесных ландшафтов 42%. Интразональные среднетаежные ландшафты приурочены к долинам рек западного макросклона хребта. В поясе горных пустынь и горных тундр в южной части преобладают горные тундры кустарничково-лишайниковые, в северной части более распространены сообщества эпилитных лишайников.

Необходимо отметить, что использование методов геоинформационного моделирования позволило значительно увеличить детальность выделения мерзлотных ландшафтов, что дает возможности для использования разработок в различных отраслях хозяйственной деятельности человека, в особенности, сельское хозяйство, лесное хозяйство, ландшафтно-экологический мониторинг земельных, лесных и водных ресурсов. Работа вносит вклад в развитие научного подхода геоинформационного моделирования ландшафтов с следующих аспектах: 1) совершенствование концептуальной ландшафтной модели данных; 2) внедрение алгоритмов машинного обучения, искусственного интеллекта и интеллектуализация ГИС при ландшафтных исследованиях. Дальнейшее развитие работы мы видим в изучении эволюционных процессов и особенностей структурно-динамической пространственной организации мерзлотных ландшафтов. Рассмотрение данного аспекта должно привести к логическому завершению работы и защите диссертационной работы на соискание степени кандидата наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аммосова Е. В., Черосов М. М., Николин Е. Г. К опыту анализа карты растительного покрова Верхоянской горной системы (Северо-Восток России) с применением ГИС технологий // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. СПб, 2011. С. 334-337.
- Андреев, В.Н. Карта растительности / В. Н. Андреев [и др.] // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР [под ред. И.А. Матвеева]. – М.: ГУГК, 1989. – С. 42-43.
- Арманд А. Д. Информационные модели природных комплексов / А. Д. Арманд. – М.: Наука, 1975. – 126 с.
- Арманд Д.Л. Наука о ландшафте / Д.Л. Арманд. - Москва: Мысль, 1975.-287 с.
- Байкалова, Т.В. Геоинформационные технологии анализа многовременных космических радарных и оптических изображений для распознавания геоморфологических объектов и растительных сообществ: дис. ... канд. геогр. наук. - Барнаул, 2002. - 130 с.
- Барталев, С.А. Егоров В.А., Жарко В.О. Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221
- Барталев, С.А. Карта растительности России. Масштаба 1:5 000 000 / [С.А. Барталев и др.]. Институт космических исследований РАН и Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. – М., 2014.
- Башарин Н.И., Егорова Л.С., Васильев Н.Ф., Федоров Н.А., Федоров А.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов для оценки активизации термокарста. Вестник СВФУ. Серия “Науки о Земле” № 3 (19) 2020. С. 36-44.
- Берг, Лев Семенович (1876-1950). Ландшафтно-географические зоны СССР / Л. С. Берг. - Ленинград: Ин-т растениеводства, 1930 - 401 с.

- Берлянт, А.М. Геоинформационное картирование / А.М. Берлянт. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 67 с.
- Босиков, Н.П. Эволюция аласов Центральной Якутии. Н. П. Босиков, отв. ред. канд. геогр. наук М. С. Иванов, Акад. наук СССР, Сиб. отделение, Ин-т мерзлотоведения - Якутск:1991 - 136 с.
- Вейсман, Л.И. Исследование криогенных процессов методом ландшафтных индикаторов и вопросы их дешифрирования (на примере севера Западной Сибири): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 1977. – 20 с.
- Гаврилова, М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах / М. К. Гаврилова. – Новосибирск: Наука,1981. – 112 с.
- Гвоздецкий, Н.А. О типологическом понимании ландшафта / Н.А. Гвоздецкий // Вестник МГУ. Сер. биол., почв., геол., географии. – 1958. – № 4. – С. 165–173.
- Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1: 2 500 000; [гл. ред. Э.Д. Ершов]. – Винница, 1996. – 16 л.
- Глотов А.А. Геоинформационное моделирование эволюции долинно-речных ландшафтов Воронежской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Воронеж, 2013. – 24 с.
- Граве, Н.А. Место и направление геокриологических исследований в проблеме охраны Среды и рационального природопользования в области вечной мерзлоты / Н.А. Граве // Устойчивость поверхности к техногенным воздействиям в области вечной мерзлоты. – Якутск, 1980. – С. 6–12.
- Григорьев А.А. Космическая индикация ландшафтов Земли. Л., 1975.
- Данилов, Ю.Г. Ландшафты Якутии / Ю.Г. Данилов, А.Н. Федоров, Ж.Ф. Дегтева и др. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2016. – 127 с.
- Дегтева Ж.Ф. Пространственная организация этнокультурных ландшафтов Якутии:дис. ... канд. геогр. наук. - Смоленск, 217. - 190 с.

- Десяткин Р.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах-аласах криолитозоны: автореф. дис. ... доктора биол. наук. - Улан-Удэ, 2006. - 43 с.
- Десяткин, Р.В., Оконешникова, М.В., Десяткин, А.Р. Почвы Якутии. – Якутск: Бичик, 2009. – 64 с.
- Дулин, С.К., Духин, С.В., Поповидченко, В.Г. О многоуровневой онтологии геоданных, Системы и средства информ., 2007, выпуск 17, 337–354
- Еловская, Л.Г. Почвенная карта / Л.Г. Еловская, Е.И. Тетерина, Е.М. Наумов // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР [под ред. И.А. Матвеева]. – М.: ГУГК, 1989. – С. 30-31.
- Железняк, М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы / М.Н. Железняк. – Новосибирск, 2005. – 228 с.
- Журкин, И.Г., Грузинов, В.С., Чабан, Л.Н. Геоинформационное моделирование и картографирование природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий. Учебное пособие для подготовки магистров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование» – М.: МИИГАиК, 2012 г. - 67 с.
- Идрисова Р.А. Ландшафты Чеченской Республики. Пространственная структура и особенности селитебной нагрузки. автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Нальчик, 2009. – 23 с.
- Исаев А. П. Характеристика растительного покрова бассейна р. Эндыбал (Центральное Верхоянье) // Геоботанические и ресурсоведческие исследования в Арктике. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2010. С. 140-149.
- Исаченко, А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А. Г. Исаченко. – М.: Высшая школа, 1991. – 366 с.
- Истомина Е.А. Геоинформационное моделирование и картографирование ландшафтных комплексов Прибайкалья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Барнаул, 2006. – 24 с.
- Калиничева, С.В. Методика выявления мерзлых и талых пород с использованием тепловых космических снимков в горных районах

- Южной Якутии: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.08 / Калиничева Светлана Вячеславовна. – Якутск, 2019. – 20 с.
- Каплина, Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии / Т.Н. Каплина // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 4. – С. 3–17.
- Капралов Е., Кошкарев А., Тикунов В., Лурье И., Семин В., Серапинас Б., Сидоренко В., Симонов А. Геоинформатика. В 2 книгах. — Москва: Academia, 2010.
- Карта четвертичных образований территории Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000; [ред.: О.В. Петров и др.]. – ВСЕГЕИ, 2014 http://neotec.ginras.ru/neomaps/M025_Russia_2014_Quatern-depos.jpg
- Коновалова Т.И. Научные основы геосистемного картографирования. Серия «Науки о Земле», 2019. Т. 29. С. 85–100
- Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П., Владимиров И.Н. и др. Ландшафтно-интерпретационное картографирование - Новосибирск: Наука, 2005. с. 424
- Кононов К.Е. Пойменные луга Средней Лены. – Якутск Якутское кн. изд-во, 1971. – 126 с
- Корниенко С.Г. Особенности применения теплового метода для изучения и мониторинга мерзлых грунтов. Бурение и Нефть. 2007, 7–8, 72–75.
- Куваев В.Б. Флора субарктических гор Евразии и высотное распределение ее видов. Москва: Т-во научных изданий КМК.2006. 378-424 с.
- Лазукова, Г. Г. Использование растительности в качестве индикаторов мерзлотных условий / Г. Г. Лазукова // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1967. – № 4. – С. 54–58.
- Лурье И.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / И.К. Лурье, А.Г. Косиков. Под ред. А.М. Берлянта. - Москва: Научный мир, 2003. - 168 с.
- Марцинкевич Г.И., Клицунова Н.К., Мотузко А.Н. Основы ландшафтоведения. Мн., 1986.

- Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2016;22(1):380-384.
- Мельников, Е.С. Научные основы и методы региональных инженерно-геологических исследований равнин криолитозоны (на примере Западной Сибири) / Е.С. Мельников: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. – М., 1985. – 44.
- Мельников, Е.С. Систематизация природно-территориальных комплексов / Е.С. Мельников // Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. – Новосибирск: Наука, 1983. – С.36-57.
- Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л. Фонды ИМЗ.
- Москаленко Н.Г. Изменение криогенных ландшафтов Северной тайги Западной Сибири в условиях изменяющегося климата и техногенеза. Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 38–42
- Николаев А.Н. Дендрохронологический анализ природных процессов в криолитозоне: на примере Центральной Якутии: автореф. дис. ... доктора биол. наук. - Якутск, 2011. - 43 с.
- Николаев В.А. Ландшафтоведение / В.А. Николаев. - Москва: Издательство Московского университета, 2000 - 93 с.
- Николин Е. Г. Конспект флоры ресурсного резервата Орулган-Сис. // Флора и растительность криолитозоны. 4.2. Якутск, 2005. С. 78-94.
- Николин Е. Г., Троева Е.И. Карта ботанического районирования Верхоянского хребта // Матер. Всероссийской конф.: Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. СПб, 2011. С. 379 - 381.
- Николин Е.Г. Флора Верхоянского хребта и ее пространственная организация: дис. ... доктора биолог. наук. - Якутск, 2012. - 590 с.

- Обуховский Ю.М. Ландшафтная индикация. Учебное пособие. – Минск, 2008
-299 с.
- Перфильева В. И., Добрецова Л. А. Краткий очерк растительности восточного склона Орулганского хребта / Ботанические материалы по Якутии. Якутск, 1975. С. 21-37.
- Попов А. И., Розенбаум Г. Э., Тумель Н. В. Криолитология. М.: Издательство МГУ, 1985
- Раковская Э. М. Физическая география России: в 2 т.: учебник для студ. учреждений высш. пед. проф. образования. — М.: Издательский центр «Академия», 2013. — 512 с.
- Ривкин, Ф.М. Геоинформационное моделирование условий возведения трубопроводных магистралей в криолитозоне: автореф. дис. ...докт. геол.- минерал. наук / Ин-т криосферы Земли СО РАН. – Тюмень, 2005. – 51 с.
- Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов - Волгоград: ВНИАЛМИ, 2015 - 150 с.
- Салищев К. А. Общенаучные понятия и методы в развитии картографии // Географическая картография. Взгляд в будущее. М. : Изд. Моск. ун-та, 1986. С. 19–28.
- Самсонов Т. Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. 2011 Publisher: LAP Lambert Academic Publishing Saarbrucken
- Самсонова, В.В. Криоландшафтное картографирование лесопокрываемых территорий Якутии на основе дистанционных материалов: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Якутск, 1999. – 20 с.
- Скрябин, П.Н. Термический режим нарушенных ландшафтов Центральной Якутии / П.Н. Скрябин, С.П. Варламов // Криосфера Земли. – 2013. – Т. 17. – № 3. – С. 44-49.

- Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов / В.Н. Солнцев. -Москва: Мысль, 1981. -240 с.
- Софронов Р. Р. Краткий очерк флоры ресурсного резервата «Орулган-Сис» (Эвено-Бытантайский улус Республики Саха (Якутия) // Матер. Всероссийской конф.: Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века. Ч. 4. Сравнительная флористика, урбанофлора. Петрозаводск, 2008 б. сс. 110-111.
- Сочава В. Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3–86.
- Сочава В. Б. Структурно-динамическое ландшафтоведение и географические проблемы будущего // Докл. Института геогр. Сибири и Дал. Востока. 1967. Вып. 16. С. 18–31.
- Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах / В.Б. Сочава. – Новосибирск: Наука, 1978. – 318 с.
- Стыщенко Е.А. Разработка методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных зональных космических изображений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2018. – 24 с.
- Торговкин Я.И. Ландшафтная индикация и картографирование мерзлотных условий бассейна р. Лены: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Якутск, 2005. – 24 с.
- Троева Е. И., Черосов М. М. Экологические подходы к корректировке карты растительности Якутии с использованием компьютерных технологий // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. Материалы всероссийской научной конференции с международным участием. СПб., 2011. Т. 1. С. 427–429.
- Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Зимин М.В., Кравцова В.И., Михайлов Н.В., Железный О.М. Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine. Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция “Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли с космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)” 2020

Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов: дис. ... доктора геогр. наук. - Якутск, 2020. - 308 с.

Федоров А.Н., Максимов Т.Х., Гаврильев П.П. и др. “Спасская падь”: Комплексное исследование мерзлотных ландшафтов - Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2006 - 210 с.

Федоров, А.Н. Изменения температуры воздуха приземного слоя в Республике Саха (Якутия)” / А.Н. Федоров, А.Н. Свинобоев // Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2000. – С. 68-75.

Федоров, А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования / А.Н. Федоров. – Якутск, 1991. – 140 с.

Хромых, В.В., Хромых, О.В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. - 178 с.

Черных Д.В. Классификация долинных ландшафтов для ландшафтной карты Русского Алтая. Известия Алтайского государственного университета, 2011.

Черных Д.В. Пространственная организация горных ландшафтов (на примере Алтая): дис. ... канд. геогр. наук. - Барнаул, 2001. - 150 с.

Шац, М.М. Опыт ландшафтно-мерзлотного картографирования Южной Якутии / М.М. Шац, И.В. Дорофеев, А.Н. Федоров// Природные условия осваиваемых регионов Сибири. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1987.

Шестакова А.А. Сукцессии растительности в картографировании мерзлотных ландшафтов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 180 стр.

Шестакова, А.А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере Приленского плато): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Якутск, 2011. – 20 с.

- Экология аласных экосистем Д.Д. Саввинов и [др.]. – Якутск, 2002. – 68 с.
- Abdi, A. M. 2019. “Land Cover and Land Use Classification Performance of Machine Learning Algorithms in a Boreal Landscape Using Sentinel-2 Data.” *GIScience & Remote Sensing* 55 (1): 1-20. doi:10.1080/15481603.2019.1650447.
- Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S. A., Kakooei M., Moghimi A., Mirmazloumi M., Moghaddam M., Mahdavi S., Ghahremanloo Masoud, Parsian S., Wu Q., and Brisco B. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, Vol. 13, 2020
- Arvor, D.; Belgiu, M.; Falomir, Z.; Mougenot, I.; Durieux, L. Ontologies to interpret remote sensing images: Why do we need them? *GISci. Remote Sens.* 2019, 56, 911–939.
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M. S. O. P., Dubreuil, V., Durieux, L., 2011. Classification of MODIS EVI time-series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (22), pp. 7847-7871.
- Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 65, Issue 1, January 2010, Pages 2-16
- Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., and E.S. Melnikov. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Version 2. (National Snow and Ice Data Center, 2002).
- Comaniciu, D., and Meer, P. 2002. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(5), pp. 603-619.
- Congedo, L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, 2020. - DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25480.65286/1>

- Couclelis H., *People Manipulate Objects (but Cultivate Fields): Beyond the Raster-Vector Debate in GIS // Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space / Eds. A. Frank, I. Campari, U. Formentini. — Berlin: Springer-Verlag, 1992. — P. 65–77.*
- Couclelis, H. 2010. “Ontologies of Geographic Information.” *International Journal of Geographical Information Science* 24 (12): 1785–1809. doi:10.1080/13658816.2010.484392
- Debella-Gilo, M.; Gjertsen, A.K. Mapping Seasonal Agricultural Land Use Types Using Deep Learning on Sentinel-2 Image Time Series. *Remote Sens.* 2021, 13, 289. <https://doi.org/10.3390/rs13020289>
- Di Gregorio, A., and Jansen, L.J.M. Environment and Natural Resources Service, GCP/RAF/287/ITA Africover - East Africa Project and Soil Resources, Management and Conservation Service. 179 pages, 28 figures, 3 tables and including CD-ROM. FAO, Rome. 2000.
- Farr, T. G., and Kobrick M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data, *Eos Trans. AGU*, 2000, 81, 583– 585.
- Fedorov, A.N.; Vasilyev, N.F.; Torgovkin, Y.I.; Shestakova, A.A.; Varlamov, S.P.; Zheleznyak, M.N.; Shepelev, V.V.; Konstantinov, P.Y.; Kalinicheva, S.S.; Basharin, N.I.; Makarov, V.S.; Ugarov, I.S.; Efremov, P.V.; Argunov, R.N.; Egorova, L.S.; Samsonova, V.V.; Shepelev, A.G.; Vasiliev, A.I.; Ivanova, R.N.; Galanin, A.A.; Lytkin, V.M.; Kuzmin, G.P.; Kunitsky, V.V. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1.500.000. *Geosciences* 2018, 8, 465. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120465>
- Gadal S. Geographic Space Ontology, Locus-Object, and Spatial Data Representation Semantic Theory. Tomaz Podobnikar, Marjan Čeh *Universal Ontology of Geographic Space: Semantic Enrichment for Spatial Data*, IGI Global, pp.28-52, 2012, 9786-1-4666-032-27-1.
- Gadal S., Zakharov M., Kamičaitytė J., Danilov Y. Alas Landscape Modeling by Remote Sensing Image Analysis and Geographic Ontology: Study Case of

- Central Yakutia (Russia). 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2020), INSTICC, Apr 2020, Online streaming, Czech Republic. pp.112-118
- Gadal, S. Geographic Space Ontology, Locus Object, and Spatial Data Representation Semantic Theory. Universal Ontology of Geographic Space: Semantic Enrichment for Spatial Data, IGI Global, 2012. pp.28-52, 9786-1-4666-032-27-1.
- Gagarin, L.; Wu, Q.; Melnikov, A.; Volgusheva, N.; Tananaev, N.; Jin, H.; Zhang, Z.; Zhizhin, V. Morphometric Analysis of Groundwater Icings: Intercomparison of Estimation Techniques. *Remote Sens.* 2020, 12, 692. <https://doi.org/10.3390/rs12040692>
- Gao, J., Chen, H., Zhang, Y., Zha, Y. Knowledge-Based Approaches to Accurate Mapping of Mangroves from Satellite Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Number 11 / November 2004, pp. 1241-1248(8)
- Gatti, A.; Bertolini, A. Sentinel-2 Products Specification Document. 2013. [Электронный ресурс] Режим доступ: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Products-Specification-Document>
- Grosse G. Remote Sensing of Permafrost Landscape Dynamics in Arctic Lowlands International Workshop on Remote Sensing of Permafrost at the Chinese University of Hongkong, Hongkong, 4 November 2016 - 5 November 2016
- Gruber, T. R. 1995. "Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing?" *International Journal of Human-Computer Studies* 43 (5–6): 907–928. doi:10.1006/ijhc.1995.1081.
- Jahromi M.N., Jahromi M.N., Zolghadr-Asli B., Pourghasemi H.R., Alavipanah S.K. Google Earth Engine and Its Application in Forest Sciences. *Spatial Modeling in Forest Resources Management* cc. 629-649
- Jenness, J., 2005. Topographic position index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x. Jenness Enterprises. <http://www.jennessent.com>.

- Jorgenson M.T., Grosse G. Remote Sensing of Landscape Change in Permafrost Regions, *Permafrost & Periglacial Processes*, 2016
- Kalinicheva, S.V.; Fedorov, A.N.; Zhelezniak, M.N. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery. *Geosciences* 2019, 9, 4. <https://doi.org/10.3390/geosciences9010004>
- Kalinicheva, S.V.; Fedorov, A.N.; Zhelezniak, M.N. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery. *Geosciences* 2019, 9, 4.
- Kanevski M, Foresti L, Kaiser C, Pozdnoukhov A, Timonin V, Tuia D (2009) Machine learning models for geospatial data. *Handbook of theoretical and quantitative geography*. University of Lausanne, Lausanne, pp 175–227
- Maragos, P. 1989 A representation theory for morphological image and signal processing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11.6 pp. 586–599.
- Matthew Horridge. A Practical Guide To Building OWL Ontologies Using Protégé 4 and CO-ODE Tools Edition 1.3. Technical report, Stanford, 2011.
- Michel, J., Youssefi, D., & Grizonnet, M. (2015). Stable mean-shift algorithm and its application to the segmentation of arbitrarily large remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2), pp. 952-964.
- Mokarram M, Sathyamoorthy D. A review of landform classification methods. *Spat. Inf. Res.* (2018) 26(6):647–660 <https://doi.org/10.1007/s41324-018-0209-8>
- Mokarram, M., Roshan, G. & Negahban, S. Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2015
- Petitjean F., Inglada J., Gancarski P. Satellite Image Time Series Analysis Under Time Warping *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (Volume: 50, Issue: 8, Aug. 2012)
- Porter C., Morin P. Howat I. и др. 2018, "ArcticDEM", <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, Harvard Dataverse

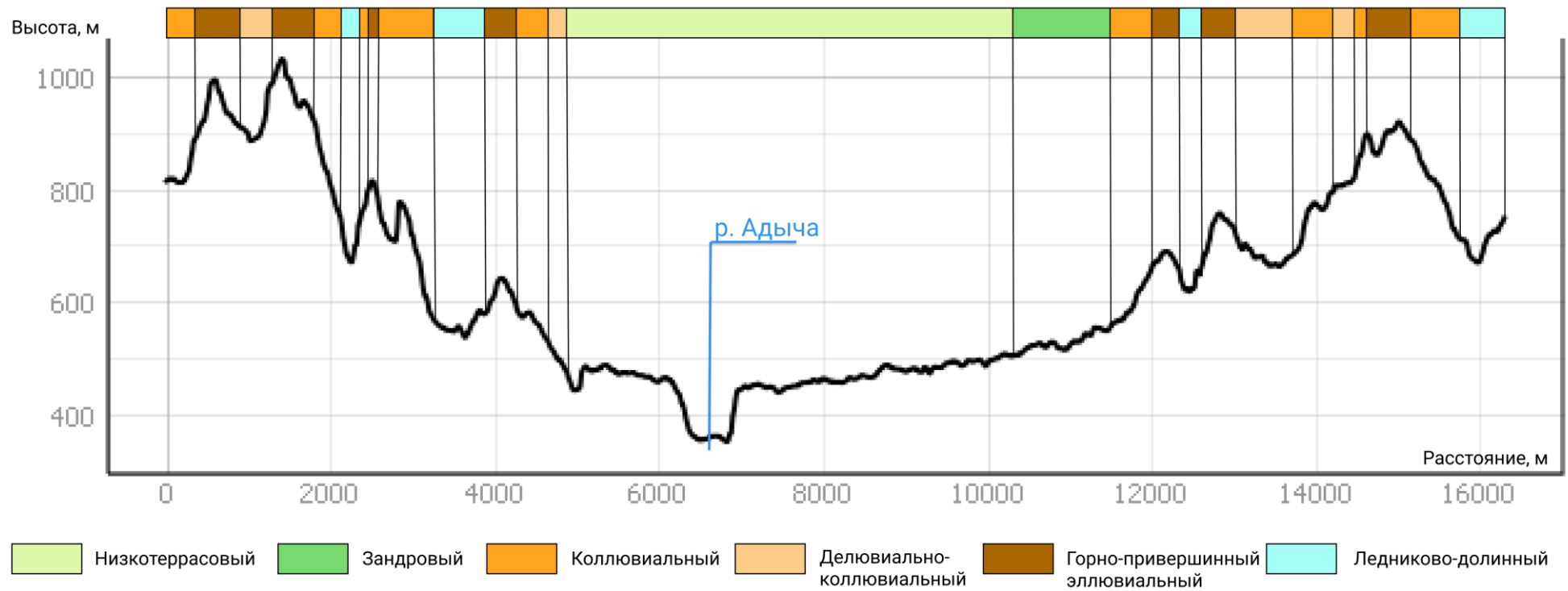
- Prokopiev A., Fridofski V., Deikunenko A. Some Aspects of the Teetronics of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt (Northeast Asia) and the Structural Setting of the Dyandi Gold Ore Cluster. *Polarforschung* 69, 169 - 176, 1999
- Saito H., Iijima Y., Basharin N.I., Fedorov A.N. and Kunitsky V.V. Thermokarst Development Detected from High-Definition Topographic Data in Central Yakutia // *Remote Sens.* 2018, 10(10), 1579; doi: 10.3390/rs10101579.
- Sato H., Kobayashi H., Iwahana G., Ohta T. 2016. Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. *Ecology and Evolution*, 6(16), 5690-5704. doi: 10.1002/ece3.2285
- Smith B., Mark D. *Ontology and Geographic Kinds // Int. Symposium on Spatial Data Handling.* — Vancouver: BC, 1998.
- Spijker, V. *Morphological Landscape-classifications of the Front Range of the Rocky Mountains near Boulder, Colorado.* Wageningen University and Research Centre. Thesis Report GIRS-2013-23. 2013 - 84 pp.
- Tagil S. Jenness J. *GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje*, 2008. Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8: 910-921.
- Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L., Adeli S., and Brisco B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.*, vol. 164, pp. 152–170, Jun. 2020.
- UNEP. *Policy Implications of Warming Permafrost.* Report. Kevin Schaefer et al. 2012
- Vapnik, V.N., *The Nature of Statistical Learning Theory* (New York: Springer-Verlag).1995
- Warwick F. Vincent, Mickaël Lemay, and Michel Allard. Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach. *Arctic Science*. 3(2): 39-64. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0027>
- Weiss, A., 2001. Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

- Westermann, S.; Ostby, T.; Gisnas, K.; Schuler, T.; Etzelmuller, B. A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data. *Cryosphere*
- Xu R., Zhao S., and Ke Y. A Simple Phenology-Based Vegetation Index for Mapping Invasive *Spartina Alterniflora* Using Google Earth Engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020 DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3038648
- Yan L., Roy D.P. Automated crop field extraction from multi-temporal Web Enabled Landsat Data. *Remote Sensing of Environment* Volume 144, 25 March 2014, Pages 42-64
- Zakharov M., Gadal S., Danilov Y., Kamičaitytė J. Mapping Siberian Arctic Mountain Permafrost Landscapes by Machine Learning Multi-Sensors Remote Sensing: Example of Adycha River Valley. 7th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2021), INSTICC, Apr 2021, Online streaming, Czech Republic. pp.125-133.

ПРИЛОЖЕНИЯ

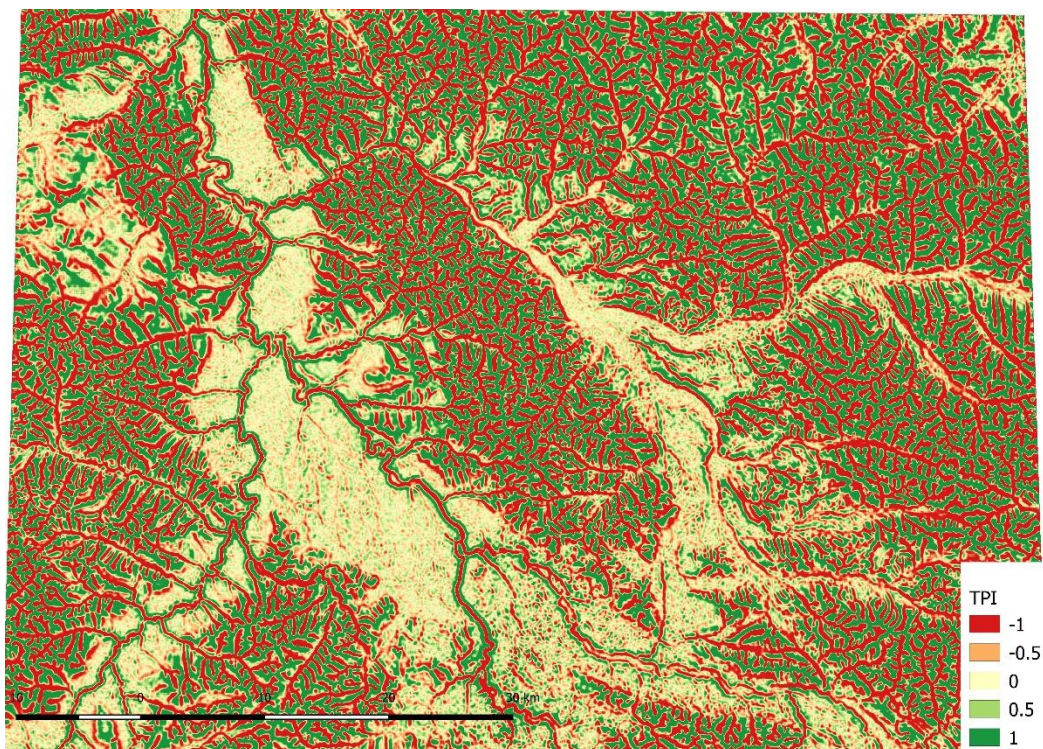
Приложение А

Гипсометрический профиль типов местности ключевого участка бассейна р.Адыча

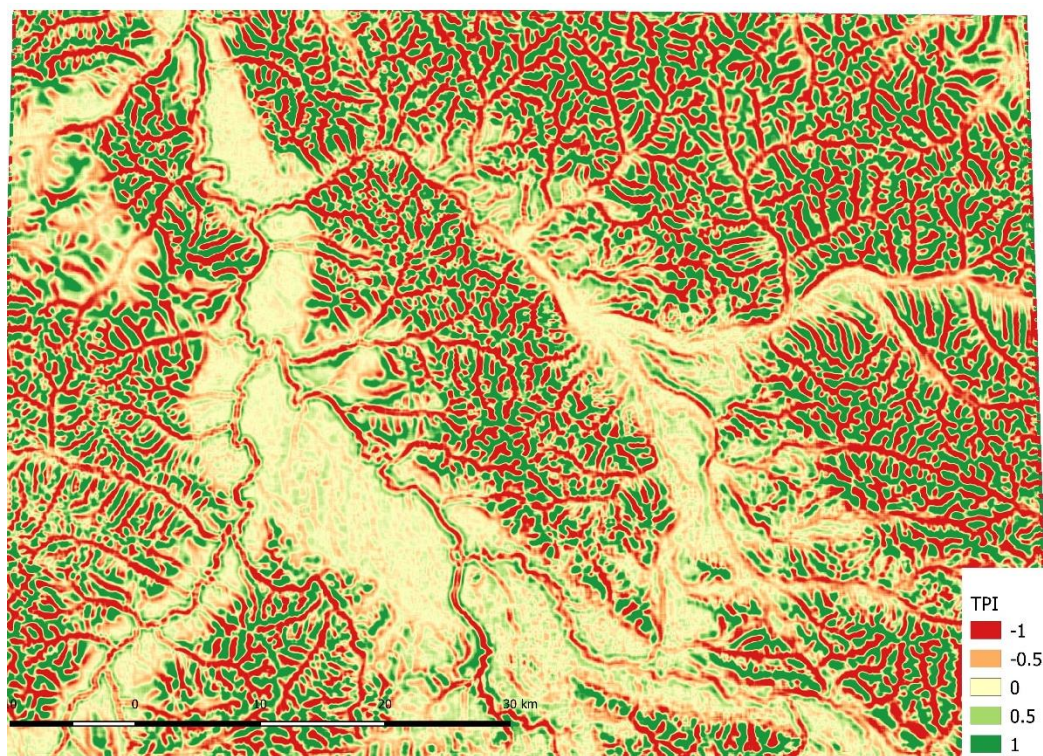


Приложение Б

Индекс топографической позиции Участка 1



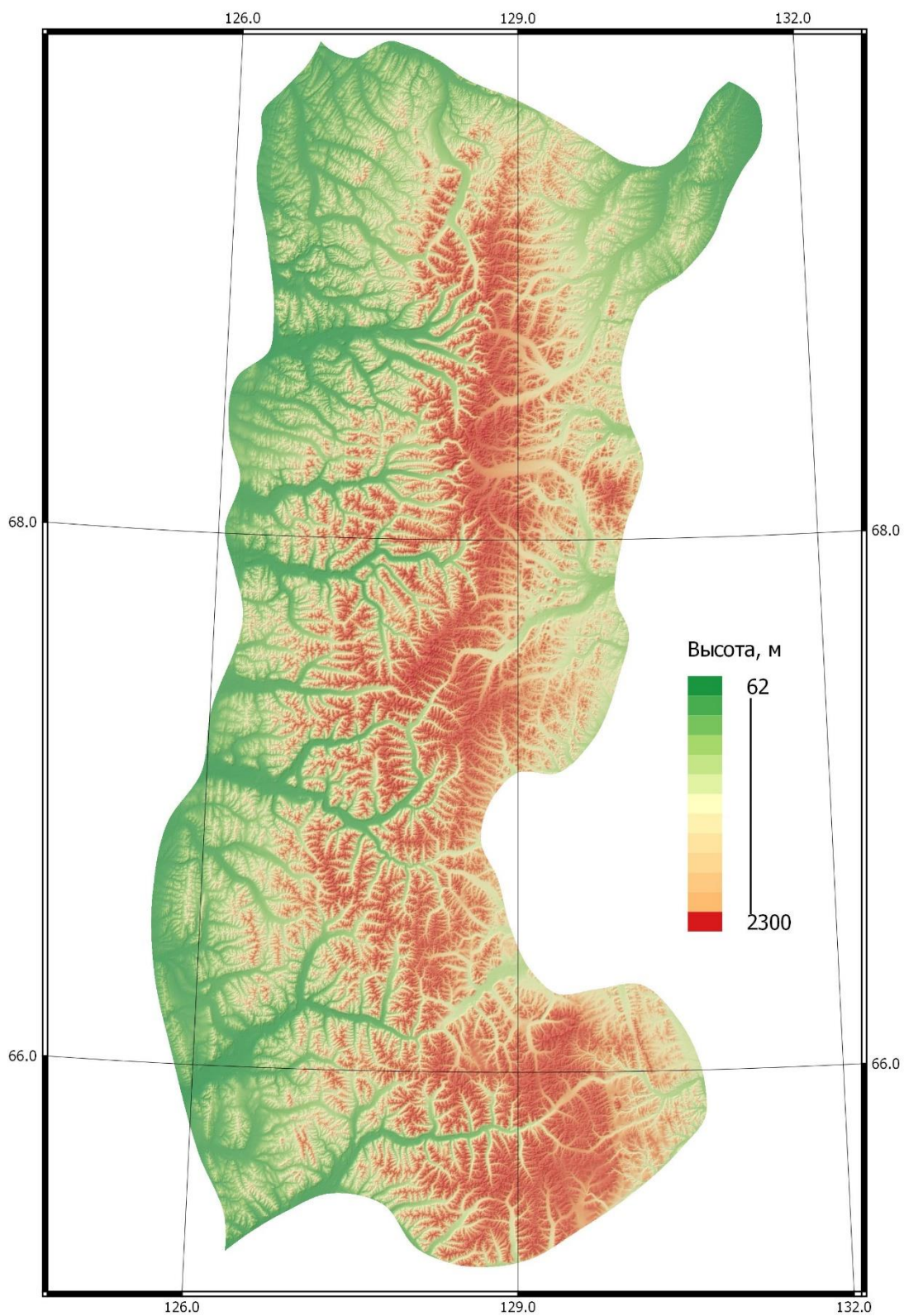
Индекс топографической позиции с размером 500



Индекс топографической позиции с размером 2500

Приложение В

Цифровая модель рельефа Орулганской среднегорной провинции



Приложение С

Динамика речной эрозии с 1999-2019 ключевого участка 3 по спутниковым снимкам Landsat 5 TM и Landsat 8 [Захаров, Гадаль, 2021]

