

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.К. АММОСОВА»

На правах рукописи

ЗАХАРОВ Моисей Иванович

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ХРЕБТА ОРУЛГАН**

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук, доцент
Данилов Юрий Георгиевич

Якутск, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ	9
1.1. Мерзлотные ландшафты как структурная часть ландшафтной сферы Земли	9
1.2. Ключевые аспекты изучения пространственной организации мерзлотных ландшафтов горных территорий	16
1.3. Метод геоинформационного моделирования ландшафтов: принципиальные основы и новые подходы	24
1.4. Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРЕБТА ОРУЛГАН	33
2.1. Геологическое строение и рельеф	34
2.2. Климат и внутренние воды	37
2.3. Растительность и почвы	43
2.4. Ландшафтная структура	47
2.5. Мерзлотные ландшафты ключевых участков исследования	51
2.6. Выводы по главе 2	63
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ ХРЕБТА ОРУЛГАН	66
3.1. Методика геоинформационного моделирования и составления мерзлотно-ландшафтных карт	66
3.2. Ландшафтная структура района исследования на восточном склоне хребта Орулган	76
3.3. Анализ ландшафтной структуры Орулганской среднегорной провинции	86
3.4. Выводы по главе 3	104
ГЛАВА 4. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ХРЕБТА ОРУЛГАН	107
4.1. Региональные особенности пространственной организации по главным бассейнам хребта Орулган	107
4.2. Парадинамические бассейновые комплексы хребта Орулган	117
4.3. Выводы по главе 4	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Изучение пространственной организации ландшафтов имеет принципиальное значение для многих фундаментальных и прикладных задач географической науки. Сложность и разнообразие ландшафтных связей ярче всего проявляется в горах. Спецификой многих горных хребтов Сибири является залегания многолетнемерзлых пород (ММП). Природная среда в них представлена мерзлотными ландшафтами, для которых криогенез является одним из ведущих факторов функционирования и пространственной дифференциации ландшафтной структуры. Мерзлотные ландшафты горных территорий со сплошным распространением ММП практически не охвачены исследованиями пространственной организации. Но их необходимость возрастает в связи с долгосрочными планами устойчивого развития арктических территорий России.

Региональный характер таких исследований позволяет внедрять ландшафтно-ориентированный подход в управлении территориями, планировании промышленного освоения и учета природных ресурсов. Принципы государственного управления территориями с ММП должны быть основаны на полноте и достоверности информации о разнообразии, функционировании, пространственной структуре и динамике мерзлотных ландшафтов. Исследования особенностей структуры и функциональной целостности в пространственной организации мерзлотных ландшафтов необходимы в широком спектре природоохранных мероприятий. В связи с этим весьма актуален охват инвентаризационными мерзлотно-ландшафтными исследованиями обширных северных территорий и поиск эффективных механизмов внедрения результатов в современную практику природопользования. Особый научный интерес представляет изучение хребта Орулган – одной из самых труднодоступных и малоизученных частей Северо-Восточной Сибири.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и методологические аспекты исследования пространственной организации ландшафтов основаны на трудах Д.Л. Арманда, А.Г. Исаченко, А.А. Крауклиса, Ф.Н. Милькова, В.С. Михеева, В.А. Николаева, Ю.М. Семенова, Н.А. Солнцева, В.Б. Сочавы, В.С. Преображенского, Б.Б. Польшова и др. Мерзлотно-ландшафтными исследованиям посвящены работы И.Я. Баранова, Е.С. Мельникова, А.П. Тыртикова, В.А. Кудрявцева,

Н.Г. Москаленко, Д.С. Дроздова, Г.Г. Осадчей, А.Н. Федорова, Л.И. Зотова, Н.В. Тумель и др.

На территории Якутии проводятся мерзлотно-ландшафтные исследования по таксономической классификационной системе мерзлотных ландшафтов А.Н. Федорова, которая разработана на принципах морфологической структуры ландшафтов Ф.Н. Милькова. Мерзлотные ландшафты и их пространственная организация в горах Северо-Востока Сибири изучены в недостаточной степени. При этом особенности пространственной организации ландшафтов различных горных систем России и ближнего зарубежья рассматриваются в трудах Н.Л. Беручашвили, В.И. Булатова, Н.А. Гвоздецкого, Г.П. Миллера, Ю.М. Семенова, В.Т. Старожилова, Н.И. Михайлова, Т.И. Коноваловой, В.М. Плюснина, Ю.Г. Пузаченко, Д.В. Черных, В.Ю. Халатова и др.

Объект исследования – мерзлотные ландшафты хребта Орулган.

Предмет исследования – пространственная организация мерзлотных ландшафтов хребта Орулган.

Цель работы – выявить пространственную организацию мерзлотных ландшафтов хребта Орулган на разных таксономических уровнях.

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

- 1) изучить теоретико-методические аспекты изучения пространственной организации мерзлотных ландшафтов как структурной части ландшафтной сферы Земли;
- 2) выявить специфику и ведущие факторы формирования ландшафтной структуры хребта Орулган;
- 3) раскрыть основные свойства пространственной организации мерзлотных ландшафтов ключевых участков на восточном склоне хребта Орулган;
- 4) разработать методику геоинформационного моделирования для анализа типологической структуры мерзлотных ландшафтов разного таксономического уровня;
- 5) проанализировать региональные особенности ландшафтной структуры по главным бассейнам и парадинамическим бассейновым комплексам хребта Орулган.

Теоретической и методологической основой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых в области ландшафтоведения (Д.Л. Арманд, Н.Л. Беручашвили, В.И. Булатов, А.Г. Исаченко, Т.И. Коновалова, Э.Г. Коломыц, Л.М. Корытный, Ф.Н. Мильков, В.С. Михеев, Н.А. Солнцев, В.Б. Сочава, Ю.М. Семенов, Т.Т. Тайсаев, Д.В. Черных, А.Н. Федоров, А.К. Черкашин, В.Ю. Халатов и др.),

геокриологии и мерзлотоведения (Е.С. Мельников, А.П. Тыртыков, Н.Г. Москаленко, Д.С. Дроздов, Г.Г. Осадчая, Л.И. Зотова, Н.В. Тумель, М.Т. Jorgenson, G. Grosse и др.). Некоторые методологические аспекты изучения мерзлотных ландшафтов Якутии определены в работах В.В. Самсоновой, Я.И. Торговкина, А.А. Шестаковой, С.П. Варламова, С.В. Калиничевой.

Кроме того, в работе использованы методические разработки отечественных и зарубежных ученых по геоинформационному моделированию и комплексной обработке спутниковых изображений и геопространственных данных для картографирования ландшафтов и отдельных ее компонентов И.Н. Владимирова, А.А. Глотова, В.С. Михеева, В.А. Николаева, Ю.Г. Пузаченко, А.Н. Кренке мл., Е.А. Стыщенко, A.D. Weiss, J. Jenness, и др.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием методов комплексных физико-географических исследований, сравнительно-географического, картографического, математико-статистического и дистанционного методов, географического районирования и моделирования с использованием ГИС. При проведении вычислительных экспериментов в ГИС с материалами дистанционного зондирования Земли и геопространственными данными применялись инструменты и алгоритмы обработки в программно-аппаратных комплексах: QGIS с модулями Semi-Automatic Classification и Clustering by attributes, SAGA GIS, ILWIS GIS, TerrSet, GRASS GIS и облачная платформа Google Earth Engine.

Информационная база исследования. Основной базой и материалами исследования послужили: результаты комплексных физико-географических описаний, собранных в ходе маршрутных полевых исследований по ключевым участкам; Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) в масштабе 1:1 500 000 и тематические карты разного содержания (геологические, топографические, геоботанические, почвенные и т.п.); данные дистанционного зондирования Земли искусственных спутников Landsat 8 OLI/TIRS, Sentinel 2 и цифровые модели рельефа ASTER GDEM; геопространственные климатические данные WorldClim версии 3 и гидрологические данные по речным бассейнам HydroSHEDS; данные Copernicus Global Land Cover; статистические метеорологические справочники; сведения Государственного водного реестра.

При выполнении работы автор опирался на основные труды исследователей Северной Якутии и хребта Орулган: В.Н. Андреева, И.П. Атласова, Г.Д. Белякова, Ю.С. Бушканца, М.К. Гавриловой, А.А. Григорьева, Л.Г. Еловской, В.Н. Сакса, Р.Р. Софронова, Ю.Б. Скачкова, С.А. Стрелкова, Е.Г. Николина, Д.М. Колосова, В.Б. Куваева, Л.В. Тетерина, Б.А. Тихомирова, А.В. Шелудяковой, Б.А. Юрцева и др.

Научная новизна:

1) впервые выявлены ведущие факторы формирования современной ландшафтной структуры хребта Орулган. Установлено, что специфика пространственной организации мерзлотных ландшафтов хребта обусловлена неоднородностью геолого-геоморфологического строения и развитием криогенного микрорельефа;

2) разработана методика геоинформационного моделирования для диагностики критериев выделения типологических комплексов: типов ландшафтов, местностей и урочищ;

3) составлены мерзлотно-ландшафтные карты типов подурочищ ключевых участков описания фаций, типов урочищ и местностей района исследования на восточном склоне хребта и типов (подтипов) ландшафтов Орулганской среднегорной провинции;

4) на основе количественного и сравнительно-географического анализа ландшафтной структуры Орулганской среднегорной провинции проведено районирование, в котором обосновано выделение физико-географических подпровинций по главным бассейнам;

5) выделено 6 вариантов парадинамических бассейновых комплексов мерзлотных ландшафтов Орулганской среднегорной провинции, которые отражают хозяйственную значимость и функциональную целостность ландшафтов.

Практическая значимость. Данные о пространственной организации мерзлотных ландшафтов хребта Орулган и полученные картографические материалы применимы для планировочных и оптимизационных мероприятий на территории муниципальных районов (Эвено-Бытантайский национальный улус, Жиганский район) и ресурсного резервата «Орулган-Сис» для совершенствования системы природопользования, проектирования дорожной инфраструктуры, населенных пунктов и др.

Методика геоинформационного моделирования может быть использована для улучшения результатов мерзлотно-ландшафтных исследований.

Результаты исследования и методические разработки могут быть применены в преподавании учебных дисциплин «Аэрокосмические методы исследования»,

«Ландшафтоведение», «ГИС в природопользовании», «Дистанционное зондирование и обработка изображения» для студентов бакалавриата и магистратуры ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Специфика пространственной организации мерзлотных ландшафтов хребта Орулган обусловлена особенностями ландшафтообразования, где ведущим фактором является неравномерность интенсивности неотектонических движений. Сложность и разнообразие интразональных долинных ландшафтов определяется с развитием криогенных процессов.

2. Геоинформационное моделирование разновременных спутниковых оптических изображений и цифровой модели рельефа является рациональной методикой для выделения типологических комплексов мерзлотных ландшафтов и позволяют детализировать ландшафтную структуру.

3. Контрастность ландшафтной структуры, обусловленная геоморфологическими и климатическими особенностями хребта, позволяет в пределах Орулганской среднегорной провинции выделить 3 подпровинции и 6 вариантов парадинамических бассейновых комплексов.

Апробация. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах из перечня ВАК и 1 статья в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: Международной научной конференции «ГИС для цифрового развития. Применение ГИС и ДЗЗ в науке и управлении» (Якутск, 2019, 2021); Международном симпозиуме по землепользованию ILUS (Париж, 2019); VI и VII международных конференциях Geographic Information System Theory, Application and Management (GISTAM) (Прага, 2020; 2021); Международном симпозиуме International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS (Гонолулу, 2020); XI Всероссийской научно-практической конференции «Геоинформационное картографирование в регионах» (Воронеж, 2020). Отдельные аспекты работы обсуждались на научных семинарах лаборатории UMR 7300 ESPACE (Университет Экс-Марсель, Франция) в январе 2020 г. и мае 2021 г. Методика геоинформационного моделирования растительного покрова обсуждалась на заседании Якутского отделения Русского ботанического общества в декабре 2020 г. Основные положения и результаты

кандидатской диссертации рассматривались на заседании географического направления Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

Личный вклад автора. В работе использованы материалы описаний фаций полевых маршрутных наблюдений, собранные в ходе экспедиционных работ в период 2017-2019 гг.; разработана методика геоинформационного моделирования типов ландшафтов, местности и урочищ; созданы мерзлотно-ландшафтные карты района исследования в масштабе 1: 200 000 и предложено мерзлотно-ландшафтное районирование Орулганской среднегорной провинции. Автором произведены экспериментальные работы по обработке и классификации данных дистанционного зондирования и по кластерному анализу ландшафтно-морфологических показателей. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований совместно с соавторами.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием: научной литературы отечественных и зарубежных авторов; геопространственных данных опубликованных в научной литературе и в официальных источниках; большого объема разновременных данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа; тематических карт, а также репрезентативным выбором ключевых участков для проведения полевых маршрутных исследований.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и списка иллюстрированных материалов. Общий объем – 147 страниц. Текстовая часть рукописи включает 37 рисунков, 13 таблиц, списка литературы, состоящий из 187 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в подготовке диссертационной работы научному руководителю к.г.н Ю.Г. Данилову и научному консультанту профессору С. Гадалю, за всестороннюю поддержку к.г.н. Ж.Ф. Дегтевой, д.б.н. М.М. Черосову, к.б.н. Е.И. Троевой, а также всему коллективу географического направления Института естественных наук СВФУ и лаборатории UMR ESPACE CNRS. За финансовую помощь и возможность обучения в рамках двойного научного со-руководства выражаю благодарность стипендиальной программе им. В.И. Вернадского Посольства Франции в России.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

1.1. Мерзлотные ландшафты как структурная часть ландшафтной сферы Земли

Возникновение термина «мерзлотные ландшафты» неразрывно связано с развитием ландшафтного направления географической науки, начало которой было положено в середине XIX века как учения о природно-территориальных комплексах (ПТК). ПТК как объект исследования, представляет собой относительно однородное территориальное образование, где все природные компоненты находятся в тесной взаимосвязи и обуславливают друг друга. Становление этого понятия происходило в результате 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 начале XIX в. Термин «ландшафт» в отечественную географическую науку ввел Л.С. Берг (1930), он определил его как предмет изучения географии; им же были проведены первые работы по ландшафтному районированию в труде «Ландшафтно-географические зоны СССР». Бурное развитие теоретических и методических основ изучения ландшафтов в физической географии в Советском Союзе приходится на середину XX века, при этом надо отметить формирование нескольких устойчивых концепций об организационной структуре ландшафтов. Развитие самого понятия о ландшафте в XX веке емко сформулировал Е.Ю. Колбовский (2006), обозначив его как век «терминологической бури», отметив наличие множества трактовок и разночтений. Огромный вклад в развитие теоретических и методологических основ изучения ландшафтов этого периода привнесли труды Д.Л. Арманда, А.Г. Исаченко, А.А. Крауклиса, Ф.Н. Милькова, Э. Неефа, В.А. Николаева, В.С. Преображенского, Н.А. Солнцева, В.Б. Сочавы, А.И. Перельмана, Б.Б. Польшова и др. Заложенные ими теоретические представления о целостности и взаимообусловленности природной системы стали основанием для изучения роли мерзлотных условий в ландшафтах.

Мерзлотно-ландшафтные исследования начались с работ по изучению закономерностей распространения мерзлотных условий в различных таксономических уровнях ПТК. В первую очередь они выражаются в применении методов ландшафтной индикации для пространственной дифференциации конкретных мерзлотных условий. Для этого были определены ландшафты-индикаторы, по которым проводилось

геокриологическое картографирование [Мельников, 1966; Лазукова, 1967; Вейсман, 1974; Тыртиков, 1979; Дроздов, 2004 и др.]. С широким внедрением ландшафтных методов в геокриологию появились первые работы по классификации ПТК с таксономическими единицами, связанными с мерзлотными характеристиками, по которым были разработаны мерзлотно-ландшафтные карты. Так, первые ландшафтные карты с учетом мерзлотных условий были сделаны по территории Западной Сибири [Мельников, 1983; Козин, 1984] и Якутии [Федоров, 1989].

Анализ целого ряда теплофизических параметров ММП (*льдистость, температура пород, глубина активного слоя, криогенная текстура*) со свойствами природных компонентов ландшафтов, с такими как (*формы мезо- и микрорельефа, стратиграфо-генетический комплексы отложений, тепло- и влагообеспеченность, растительный покров и механический состав почв*) установили важную роль мерзлотных условий в литогенной основе ПТК [Дроздов, 2004]. Поэтому специфика таких ПТК определена наличием льда в литогенной основе и фазовыми переходами – при промерзании-протаивании [Федоров, 2020]. Структурная соподчиненность с другими параметрами ландшафтов позволила определить типологические и региональные комплексы, к которым приурочены конкретные мерзлотные условия. Были определены сочетания типов растительного покрова, мезорельефа и стратиграфо-генетического комплексов отложений, определяющие развитие основных криогенных процессов: *термокарста, термоэрозии, морозобойного растрескивания, пучения, термосуффозии* и др. [Brown, 2002; Зотова, 2018].

Мерзлотные ландшафты возникли в научной литературе как структурные единицы в рамках таксономических систем Ф.Н. Милькова, Н.А. Солнцева и А.Г. Исаченко [Козин, 1984; Федоров, 1989]. Определения сочетания немерзлотных и мерзлотных характеристик позволяют проводить пространственную дифференциацию состава и функциональных особенностей ПТК различного таксономического уровня. На этой основе развивается ландшафтно-ориентированный подход к изучению природной среды криолитозоны. По определению А.Н. Федорова, мерзлотные ландшафты – это *«относительно однородное природное образование, функционирующее под воздействием криогенеза, с определенными, закономерными только для него сочетаниями мерзлотных характеристик»* [Федоров, 1991]. Наряду с «мерзлотными ландшафтами» используются два схожих по смыслу термина «криогенные ландшафты» [Дроздов, 2004;

Москаленко, 2012 и др.] и «криогенные геосистемы криолитозоны» [Мельников и др., 2010; Хименков, 2013], которые иногда трактуются, по сути, как синонимы «мерзлотных ландшафтов», но термин «криогенные ландшафты» чаще используется для ПТК, индицируемых по криогенным формам рельефа и при доминирующей роли криогенеза в его формировании, например, термокарстовые котловины, полигональные тундры и булгуньяхи. В учении о геохимических ландшафтах используется термин «мерзлотные геохимические ландшафты», для определения ПТК с криогенным и биогенным циклами геохимической активности [Тайсаев, 1994].

Термин «мерзлотные ландшафты» позволяет принимать во внимание функциональные и структурно-динамические особенности природных комплексов с многолетнемерзлыми породами, сохраняя преемственность теоретических и методологических основ развития понятия о ПТК (ландшафтах), заложенных классиками ландшафтоведения. Кроме того, «мерзлотность» ландшафтов подчеркивает низкий порог устойчивости при внешнем вмешательстве антропогенного и, безусловно, техногенного характера и с необходимостью принимать во внимание особые условия природопользования.

Вся совокупность ПТК формирует *ландшафтную сферу Земли* в рамках географической оболочки, где термодинамические, геохимические и биотические процессы соприкасаются [Мильков, 1970]. Согласно Ф.Н. Милькову, структурными элементами ландшафтнoй сферы являются типологические, региональные, парадинамические и парагенетические комплексы. В высшей категории дифференциации ландшафтнoй сферы Земли мерзлотные ландшафты составляют специфическую часть наземного отдела ландшафтов, распространенных по Евразии и Северной Америке. При этом В.И. Булатов предлагает наряду с остальными отделами ландшафтов, т.е. вариантов ландшафтнoй сферы Земли отдельно выделить мерзлотные, мотивируя это значительным распространением ММП [Булатов, 2015].

Зона распространения ММП, показанная на рис. 1, охватывает до 65% территории Российской Федерации, 25% площади суши Северного полушария и 17% всего земного шара [Gruber, 2012]. Поэтому физико-географические и ландшафтные исследования пространственно-временной организации, функционирования, эволюции, динамики и устойчивости в этой структурной части ландшафтнoй сферы Земли должны учитывать

криогенез литогенной основы в развитии биотических, геохимических и термодинамических процессов.

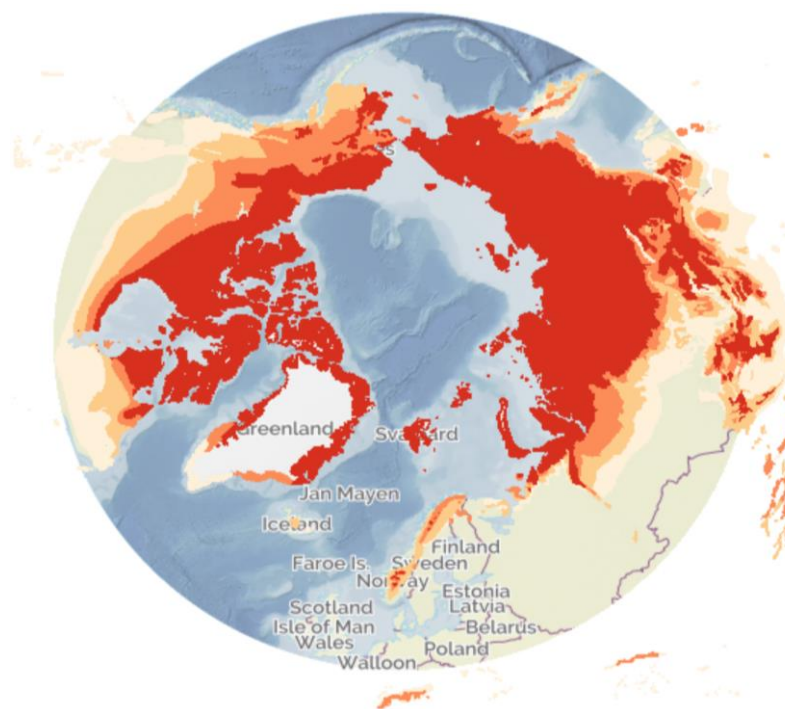


Рис. 1. Области распространения ММП в Северном полушарии
(URL: <https://geoportal.arctic-sdi.org/>)

Основа современной классификации мерзлотных ландшафтов, по которым проводятся исследования на территории Якутии, прежде всего Институтом мерзлотоведения СО РАН имени П.И. Мельникова, концептуально базируется на теоретических и методологических разработках ландшафтно-географической школы Ф.Н. Милькова и на его таксономической системе типологических и региональных комплексов ландшафтной сферы Земли.

Типологические комплексы являются главным объектом ландшафтных исследований. В них сильнее всего проявляются обменные связи и функциональная сопряженность биогеохимических процессов в пространстве и во времени. Ф.Н. Мильков предлагал выделять 5 рангов типологических комплексов: варианты ландшафтной сферы, классы ландшафтов, типы ландшафтов, типы местности, типы урочищ [Мильков, 1970]. Для мерзлотно-ландшафтного картографирования А.Н. Федоров (1991) ввел в таксономическую систему дополнительные типологические единицы дифференциации ландшафтов для областей распространения ММП и критерии их выделения, связанные с характеристиками ММП:

- *тип ландшафта* определяется по биогидроклиматическим критериям, таким как зональные и высотно-поясные биомы, т.е. соотношение увлажнения и тепла;

- *подтип ландшафта* дифференцирует типы ландшафтов по сочетаниям групп растительных ассоциаций по внутризональным особенностям соотношения тепла и влаги, например, северотаежный подтип таежного типа ландшафта;

- *род ландшафта* как промежуточная единица между подтипом ландшафтов и типом местности выделен по характеру распространения ММП (сплошное, прерывистое, островное распространение);

- *тип местности* определяется сочетанием мезорельефа со стратиграфо-генетическими комплексами отложений. Из мерзлотных характеристик типами местности определяются объемная льдистость и основные криогенные процессы.

В название типов (подтипов) ландшафтов и типов местности не добавляются мерзлотные характеристики, но при этом сочетание типов и подтипов ландшафтов и их растительности с типами местности позволяет дифференцировать мерзлотные условия, температуру пород и активный (сезонно-талый) слой [Федоров, 1991]. Далее идут типологические единицы, в описание которых добавлены мерзлотные характеристики:

- *подтип местности* выделяется по литологическим особенностям внутри типа местности. Выделение данного таксона необходимо для индикации криогенного строения многолетнемерзлых пород (объемная льдистость и криогенная текстура);

- *тип урочища* определяется по группе растительных ассоциаций, приуроченной к мезорельефу. При выделении урочищ для мерзлотных ландшафтов наряду с физиономическими чертами индикаторами выступают мощность сезонно-талого слоя и температура пород;

- *тип фации* как наименьшая элементарная единица ландшафтов определяется по растительной ассоциации, к которому приурочены конкретные значения мощности сезонно-талого слоя и температура пород.

Ранжирование и выделение типологических единиц является основополагающим элементом физико-географического районирования и дифференциации региональных комплексов. По преобладающим типам мерзлотных ландшафтов было проведено мерзлотно-ландшафтное районирование Якутской АССР [Федоров, 1991]. Особенностью мерзлотно-ландшафтного районирования, заменившей физико-географическое районирование на уровне провинций, является учет характера распространения ММП, по

сути рода ландшафта. Так, в трех физико-географических странах на территории Якутии (Забайкалье, Средняя Сибирь и Северо-Восточная Сибирь) были выделены 55 мерзлотно-ландшафтных провинций – крупных региональных комплексов с относительно однородным сочетанием типологических мерзлотных ландшафтов на уровне типов(подтипов) ландшафтов в условиях сплошного, прерывистого и островного залегания ММП. Например, среди среднетаежных провинций Средней Сибири выделяются все три типа распространения ММП, а для провинций Северо-Востока Сибири только сплошной тип. Последующее дробление провинции на районы должно отразить геологические (литологические варианты) и геоморфологические (морфоструктуры) особенности внутри провинций [Мильков, 1970]. В мерзлотно-ландшафтном картографировании категории «зоны» и «пояса» региональных комплексов, формирующиеся в условиях высотной поясности выделены в качестве типологических комплексов [Федоров, 1991].

Необходимость изучения динамических аспектов мерзлотных ландшафтов в условиях антропогенного воздействия и деградации мерзлоты привела к интеграции системных идей в организации и функционировании ландшафтов. Развитие системного подхода в отечественной науке связано с теорией геосистем В.Б. Сочавы. Термин «геосистема» был введен в научную литературу именно им и означает *«целое, состоящее из взаимосвязанных компонентов природы, подчиняющихся закономерностям, действующим в географической оболочке или ландшафтной сфере»* [Сочава, 1978]. Геосистемный подход дает широкие возможности использования новых для географической науки математико-статистического и дистанционного методов исследований, прежде всего для определения биотического (растительного) и абиотического (рельеф и горные породы) компонентов, и на их основе выявления «невидимые» внутренних свойств ландшафтов. Системный подход пронизывает основные принципы геокриологического картографирования [Мельников и др., 2010] и выделения индивидуальных свойств ММП – температуры, мощности сезонно-талого слоя, распространения криогенных процессов для мерзлотных ландшафтов [Shestakova et al., 2021]. Геохоры и серийные ландшафтные фации были выделены в работе А.А. Шестаковой (2011) на сочетании критериев выделения типологических комплексов разного уровня для анализа пространственной дифференциации динамических аспектов мерзлотных ландшафтов. Динамика определена стадиями

послепожарных сукцессий растительности и восстановления нарушенных участков с рудеральной растительностью, что становится основой выделения переходных мерзлотных ландшафтов. В переходных мерзлотных ландшафтах установлено, что температура пород повышается в среднем на 1 °С, что вызывает увеличение сезонно-талого слоя на 0,5-1 м в Центрально-Якутской среднетаежной равнине со сплошным распространением ММП.

Значительную роль в современном функционировании мерзлотных ландшафтов играют криогенные процессы. Развитие комплекса криогенных процессов приурочено к типам местности ввиду связи их возникновения со стратиграфо-генетическим типом отложений и характером рельефа. При этом интенсивность проявления криогенных процессов и пределы устойчивости мерзлотных ландшафтов носят региональный характер и определены формированием микроклиматов. [Jorgenson et al., 2010]. Особенно сильно «*региональность*» проявляется в горных сооружениях, которые являются также местами столкновения воздушных масс. Температурные показатели климатических условий определяют особенности тепловых потоков в грунте [Гаврилова, 1981]. Показатели связи мерзлых пород и климата позволили провести пространственную дифференциацию сезонно-талого слоя и характера распространения ММП по радиационному балансу, что стало важнейшим обобщением для мерзлотномьяландшафтного районирования и дифференциации родов ландшафтов. В таксономической системе ландшафтов связь «климат-мерзлота» подтверждает важность выделения региональных комплексов по климатическим особенностям как совокупности типологических комплексов на уровне родов ландшафтов.

Парадинамические и парагенетические комплексы мерзлотных ландшафтов в настоящее время мало изучены, при том, что в ландшафтной школе Ф.Н. Милькова (1966) особое место отдается парагенетическим комплексам речных долин, которые становятся объектами многих ландшафтных исследований [Козин, 1974; Глотов, 2013 и др.]. Изучение парадинамических комплексов имеет важное значение для познания пространственной организации ландшафтов выраженной в структуре пространственного размещения ландшафтов, в функциональной целостности, особенно в горных территориях [Черных, 2002]. Парадинамические комплексы или же геохоры и парциальные геосистемы по В.Б. Сочаве часто используются в рамках интерференции ландшафтной и бассейновой организации [Михно, 1969; Коротный, 1991; Халатов, 2004

и др.], а «парадинамизм» ландшафтов в рамках бассейновой организации имеет высокое практическое значение в регулировании природопользования [Хортон, 1948, Короткий, 2001; Бевз, 2005 и др.].

Таким образом, на основании вышесказанного можно отметить доминирующую роль ландшафтно-ориентированного подхода в изучении мерзлотных ландшафтов. Типологические комплексы в части ландшафтной сферы Земли, усложненной криогенезом литогенной основы, определяются основными ландшафтными критериями дифференциации природной среды. Но, безусловно, ММП играют ключевую роль в формировании ПТК, создавая криогенный микрорельеф, увеличивая разнообразие и неоднородность почвенно-растительного покрова, перераспределяя почвенную влагу и сортируя горные породы.

1.2. Ключевые аспекты изучения пространственной организации мерзлотных ландшафтов горных территорий

Организацию ландшафтов определяют к одной из актуальных вопросов структурного направления ландшафтоведения, который охватывает проблемы комплексности и причинно-следственных закономерностей ландшафтных связей, определяющих горизонтальные (морфологические) и вертикальные (межкомпонентные) структуры ландшафтной сферы Земли [Хорошев, 2016, 29 с.]. Изучению пространственной организации в настоящее время посвящено достаточно много работ, особенно по горным ландшафтам, где сложность организации ландшафтов проявляется особенно сильно [Семенов, 1990; Тайсаев, 1994; Чистяков, 2001; Халатов, 2004; Коновалова, 2009; Черных, 2012; Старожилов, 2013; Петренко, 2016; Кузавкова, 2019 и др.].

Синтез горизонтальных и вертикальных связей ландшафтов и отдельных компонентов определяет *функционирование* ландшафтов. Функционирование проявляется как результат неоднородности условий формирования и развития ландшафтов, которым обусловлен обмен энергией, вещества и информации [Мильков, 1985]. Продуктом и одновременно средой функционирования является *ландшафтная структура* [Солнцев, 2001]. Функционирование, как неотъемлемая часть пространственной организации ландшафтов, преимущественно, определяется количественными показателями свойств компонентов, для которых

Н.Л. Беручашвили (1990) ввел понятие *геомассы*. Например, функционирование может быть выражено в биопродуктивности по фитомассе, запасу древесины и другим параметрам внутреннего оборота органического вещества [Петренко, 2016]. Внутренние обороты органического вещества, также могут трактоваться, как радиальные потоки вещества, который наряду с латеральными потоками определяют функционирование в ландшафтной организации [Семенов, 1990].

Поэтому особенности распределения и миграции вещества лежит в основе понимания организации ландшафтов, которая выражена в таксономической классификации ландшафтов, как главного подхода к формализации понимания организации ландшафтов. Таксономическая классификация мерзлотных ландшафтов имеет иерархический характер, т.е. таксоны находятся в отношении соподчинения. Для горных территорий характерны гомологические ряды таксонов в зависимости от высотно-экспозиционных характеристик. Пространственная структура каждого таксономического уровня будет отличаться, в зависимости от дифференциации запасов вещества, которая является критерием выделения, при этом сама ландшафтная структура остается инвариантным на всех таксономических уровнях ее изучения. Иерархическая классификация задает структурную связь между одно- и разноуровневыми таксонами [Черкашин, 2021]. Поэтому пространственную организацию следует изучать на разных таксономических уровнях, определяя системный характер строения и функционирования ландшафтов. По утверждению, А.Н. Федоров (2020), как раз синергия системного подхода с морфологической классификацией позволяет устанавливать связи разноранговых типологических комплексов мерзлотных ландшафтов и применять их для индикации мерзлотных характеристик.

Многие исследователи устанавливают причинно-следственные связи между абиотическими и биотическими компонентами, так как эти связи создают внутренние факторы структуризации ландшафтов и наряду с организацией отдельно выделяют *самоорганизацию* ландшафтов [Арманд, 1988], которая обусловлена межкомпонентными связями и потоковыми переносами вещества и энергии в вертикально связанных ландшафтах [Коновалова, 2009]. Вопросы самоорганизации мерзлотных ландшафтов получили развитие в геохимических ландшафтах. Т.Т. Тайсаев (1994) обосновал связи зимнего криогенного и летнего биогенного циклов биологического круговорота вещества и химических элементов в самоорганизации мерзлотных геохимических ландшафтов.

Зимний цикл характеризуется затуханием биогенных процессов и аккумуляцией энергии, прежде всего, за счет формирования снежного покрова, как продукта криогенеза. Летний цикл связан с активацией биогенного круговорота за счет потребления продуктов криогенеза. Совместное участие криогенных и биогенных процессов в самоорганизации мерзлотных ландшафтов вводит объединяющее понятие «криобиогенез». Цикличность мерзлотного ландшафта ярко выражена на поведении представителей флоры и фауны. Многие животные, например, медведи, суслики, сурки накапливают за летнюю фазу энергетическое вещество, готовясь к зимней спячке [Тайсаев, 1994].

Из смежных наук, вопросы пространственной организации затрагиваются также при проведении флористических и геоботанических исследований для установления особенностей формирования и развития таксономической структуры флоры [Седельников, 2011]. Анализ пространственной организации таксонов и их зависимость от региональных переносов воздушных масс был проведен при флористическом районировании Верхоянского хребта, где рассматриваются высотные-поясные и субмеридиональные особенности горной системы в таксономическом разнообразии флоры [Николин, 2012].

Сущность любой организации определяет ее свойства, в котором выражаются общие, характерные и специфические черты организации. Свойства раскрывают особенности функционирования, пространственной структуры и взаимодействие с другими процессами. Нами выявлены несколько свойств по которым многие авторы посвятившие работы пространственной организации раскрывают ее сущность:

1. *Упорядоченность*. Под ней подразумевается определенное строгое расположение, соотношение, взаимосвязь и согласованность ландшафтов и компонентов в пространстве [Преображенский, 1986]. Для оценки степени упорядоченности ландшафтов используется показатель *энтропии* [Плюснин, 2000]. Через энтропийную меру и другие сложные ландшафтные индексы также определяют разнообразие ландшафтов [Пузаченко и др., 2002; Черных, 2001, Ганзей, 2014], из чего следует, что чем больше разнообразие ландшафтов, тем больше степень ее упорядоченности. Следует отметить, что показатель энтропии прямо зависит от объективности выделения ландшафтных контуров и от площади исследуемой территории.

2. *Целостность*. Характеризуется генетическим единством и соединяющими потоками вещества и влаги, т.е. функционированием ландшафтов. Целостность часто

рассматривается в рамках развития функционально-целостного подхода, в котором выделяют ландшафтные катены [Глазовская, 1964], парциальные структуры [Сочава, 1978], парадинамические и парагенетические комплексы [Милюков, 1972]. Таким образом, целостность определяется объединительными силами компонентов, при этом часто в качестве такой силы выступают водные потоки в речных бассейнах, в рамках которых выделяют бассейновую организацию ландшафтов [Корытный, 1991; 2017; Халатов, 2004].

3. *Контрастность*. Лучше всего выражена в горных ландшафтах. Контрастность в горах, прежде всего, определяется орографическими рубежами, сопряжением склонов и поверхностей выравнивания, различиями слагаемых горных пород и высотными барическими и температурными градиентами [Милюков, 1977]. Контрастность ландшафтной структуры определяется разнообразием составляющих ландшафтов, формой и площадями ландшафтных контуров, частотой смены типов ландшафтов, поэтому контрастность обуславливается тектоникой, геоморфологическим строением, распространением ММП и формированием различных мезо- и микроклиматических условий [Плюснин, 2000]. Контрастность распределения ландшафтов в горах может быть определена выделением доминантных, субдоминантных, редких и уникальных ландшафтов.

4. *Направленность*. Динамические элементы компонентов ландшафта зачастую имеют направленность усиления или накопления вещества и энергии. Как отдельное свойство практически не рассматривается, но при этом многие исследователи отмечают, что направленность прослеживается в вертикальных и горизонтальных ландшафтных связях. Например, горизонтальная направленность выражена в формировании градиента. Д.В. Черных отмечает, что в пределах Курайской котловины границы форм рельефа и различных отложений определяют и градиент высотных поясов, и дискретизацию катенарных закономерностей [Черных, 2011]. В горах направленность имеет склоновый и долинный характер, так, она проявляется в накоплении почвенного вещества по направлению вниз по склону и в историческом развитии облика пространственной организации ландшафтов, например, по движению долинных ледников [Плюснин, 2000].

Эти четыре свойства мы относим к основным при изучении пространственной организации ландшафтов. Свойства пространственной организации равноценны и взаимообусловлены.

Еще одним ключевым аспектом изучения пространственной организации является ландшафтообразование, как ретроспектива формирования современного облика ландшафтов. Организация обуславливает причинность образования ландшафтной строения(структуры) и функционирования [Семенов, 1990]. Сложные природные процессы, протекающие в единой геометрической структуре времени и пространства, рассматриваются отдельно, как пространственная и временная организация, исключительно для методического упрощения исследования. Но для понимания современной пространственной организации мы должны проанализировать основные рубежи ландшафтообразования, которые заключаются в переломных моментах, качественных сдвигах и т.п. имевших существенное значение в формировании современных ландшафтов. Поэтому наряду с пространственной структурой, часто рассматривается хроноструктура ландшафтов [Выркин, 2007]. Поэтому физико-географическая характеристика территории исследования дается для выделения разнокачественных ландшафтообразующих процессов (геолого-геоморфологических, почвообразования, развития фито- и зооценозов) и вычленения важнейших этапов эволюционного развития ландшафта и их отражения в особенностях пространственной организации.

Следует отметить, что изучение особенностей пространственной организации ландшафтов через выявление структурно-функциональных связей типологических комплексов и формализации организации ландшафтов является обобщающим этапом мерзлотно-ландшафтных исследований, идущим последовательно после общей ландшафтной индикации, ландшафтного картографирования, построения ландшафтных гипсометрических профилей и выявления частных взаимосвязей отдельных компонентов от свойств ММП [Федоров, 2020].

Изучения пространственной организации должна включать несколько взаимосвязанных уровня исследования со смежными, но вполне самостоятельными методиками. Локальный уровень исследования в основном базируется на полевых эмпирических материалах. Метод получения эмпирических данных о пространственной организации мерзлотных ландшафтов для настоящего исследования основан на комплексном физико-географическом описании ПТК [Жучкова и Раковская, 2004]. Полевые исследования включают заложение и описание почвенных разрезов, геоботаническое описание растительных ассоциаций, микро- и мезорельеф, вид

хозяйственного использования, описание криогенных процессов. Морфологическая структура ландшафтов лучше всего устанавливается посредством ландшафтного профилирования, где абсолютные отметки высот получены посредством отметок на GPS-навигаторе и уточнены по топографическим картам в масштабе 1:200 000 или по цифровым моделям рельефа. На ландшафтном профиле хорошо отражаются закономерности формирования и распространения ландшафтов в зависимости от рельефа, литологического состава пород и других компонентов. Пространственная дифференциация и систематизация эмпирических данных устанавливают параметры ландшафтного картографирования путем экстраполяции и ландшафтных обобщений. Пространственная организация ландшафтов на этом уровне выражается через типологическую структуру, определяемую на уровне фаций и урочищ. Результаты работ отражаются в крупномасштабных мерзлотно-ландшафтных картах.

Ландшафтная индикация становится главным методическим приемом мерзлотно-ландшафтных исследований и картографирования на уровне типов местности и типов урочищ. Здесь целесообразно раскрыть понятие «ландшафтная индикация». Ландшафтная индикация возникла в трудах С.В. Викторова как прикладное направление ландшафтоведения [Викторов, 1962]. Индикация — это выявление индикаторов, «видимых» распознаваемых свойств компонентов ПТК на местности и при дешифрировании [Обуховский, 2008]. Индикация использует физиономические параметры ландшафтов для интерпретации деципиентных (невидимых) свойств ландшафтов для формирования целостного представления о ПТК. Всего выделяется четыре группы индикаторов и их сочетаний: орофизиономические, фитофизиономические, гидрофизиономические, педофизиономические [Марцинкевич и др., 1986]. Орофизиономические индикаторы связаны с использованием форм рельефа, например, мезорельеф используется при определении типов местности. Фитофизиономические индикаторы – это картируемые геоботанические единицы (классы и группы растительных ассоциаций). Гидрофизиономические индикаторы определяют ландшафты по наличию водных объектов – речной сети, озер или болот. Синтез или сочетание физиономичностей формирует комплексный индикатор компонентов ландшафта [Обуховский, 2008].

В мерзлотно-ландшафтных исследованиях ландшафтная индикация играет ключевую роль в определении мерзлотных свойств, при этом надо отметить, что

практически не используются почвенные индикаторы. Почвы намеренно игнорируются в классификационной схеме мерзлотных ландшафтов, ввиду неопределенности типологической классификации почв и их фактической зависимости от уже используемых критериев сочетания рельефа и растительности. На уровне фаций и подурочищ, выделение ландшафтных контуров производится полевыми методами, в том числе и с помощью описания почвенных профилей, тогда тип почв и гранулометрический состав необходимо указать.

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 др. Для территории Якутии основополагающим картографическим трудом является Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР в масштабе 1:1 500 000, составленная А.Н. Федоровым и др. (1989), последняя, обновленная версия которой была опубликована в 2018 г. (рис. 2). В ней отражены результаты трудов сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН по изучению криолитозоны начиная с 60-х гг. XX в. Данный труд стал первым обобщением по мерзлотным ландшафтам Якутии, в нем систематизированы обширные материалы по компонентам природной среды, прежде всего растительность, климат и рельеф. Были установлены основные принципы организации и пространственной дифференциации мерзлотных ландшафтов Якутии с использованием свойств многолетнемерзлых пород, как одного из основных критериев их выделения. Карта отображает 145 типов мерзлотных ландшафтов, полученных при наложении 20 типов местности и 26 типов растительности [Федоров и др, 2018].

После определения типологических комплексов могут быть проведено районирование исследуемой территории, на основе полученной пространственной структуры, региональных особенностей ландшафтообразования и т.п. Горные хребты по определению становятся местом столкновения различных биоклиматических условий, поэтому внутри горной страны или провинции неизбежно формируются региональные комплексы с различными условиями соотношения тепла и влаги. В задачу исследования пространственной организации хребта входит обозначение этих отличий.

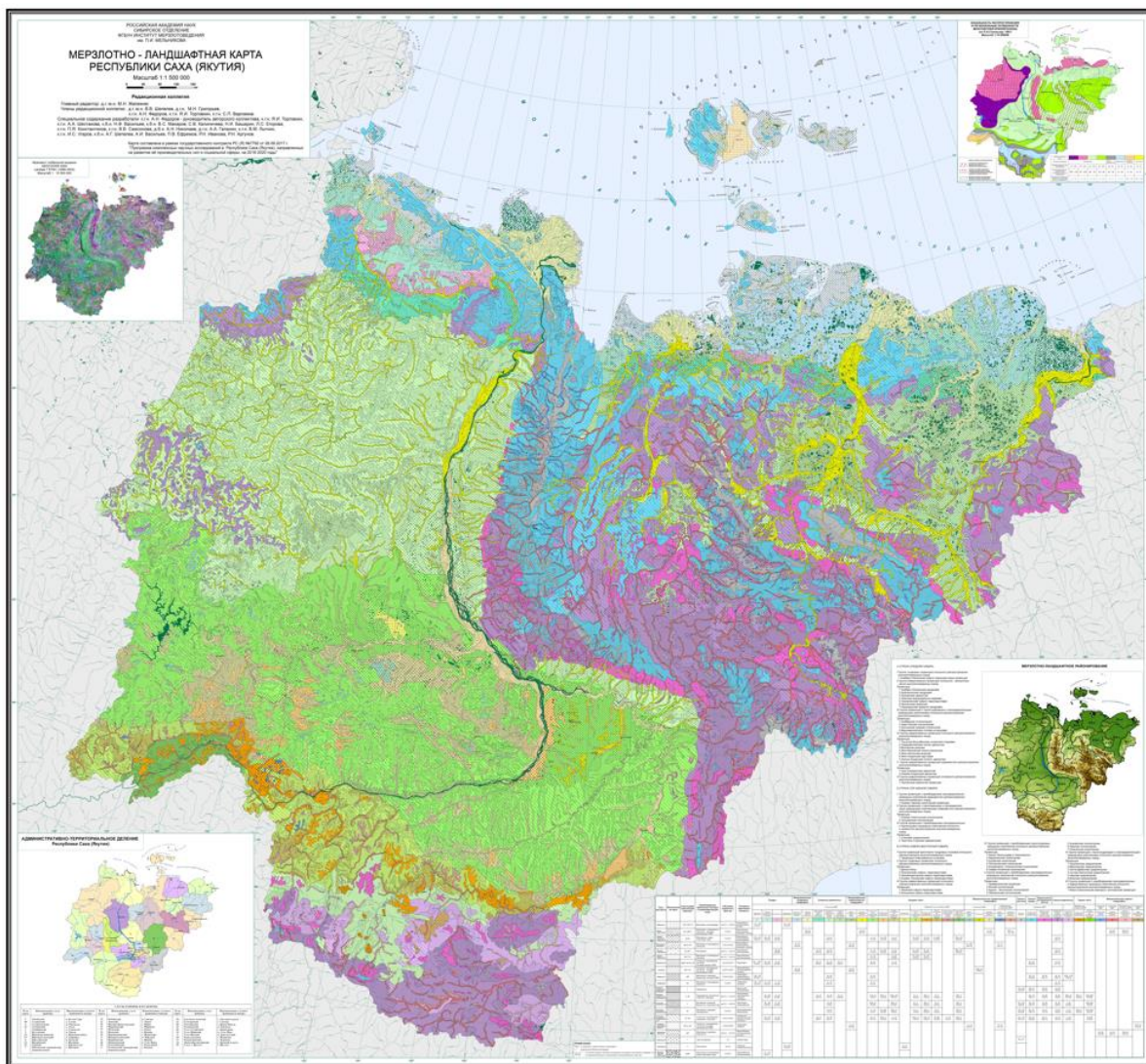


Рис. 2. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) (в масштабе 1:1 500 000) [Федоров и др., 2018] (URL: <https://mpi.ysn.ru/images/mlk20182.pdf>)

В данном аспекте наиболее подходящим мы считаем определение бассейновой структуры организации ландшафтов и водосборных бассейнов как силы объединения или же организации ландшафтов общими потоками энергии и твердого вещества [Корытный, 2017]. Синтез ландшафтных и бассейновых структур раскрывается в парадинамических системах горных мерзлотных ландшафтов.

Таким образом, комплексное понимание пространственной организации мерзлотных ландшафтов может быть достигнуто при многомасштабном анализе особенностей ландшафтной структуры, по которому проводится анализ основных свойств организации, функционирования и разнообразия и определение ведущих факторов, определяющих пространственную дифференциацию ландшафтов и мерзлотных условий. Поэтому основой изучения пространственной организации является

детальное моделирования пространственной структуры мерзлотных ландшафтов на разных таксономических уровнях.

1.3. Метод геоинформационного моделирования ландшафтов: принципиальные основы и новые подходы

В настоящее время достижения современной науки в области интерпретации данных дистанционного зондирования Земли, а также накопление массива архивных и оперативных данных спутникового мониторинга позволяют существенно увеличить детальность и пространственно-временной охват ландшафтных исследований. Необходимость применения математико-статистических и сравнительно-географических методов анализа ландшафтов требует минимизировать потери точности при генерализации карт. Поэтому данные работы во многом переходят с области картографии на метод комплексного информационного моделирования на основе различных наборов пространственных данных.

Целостное представление мерзлотных ландшафтов как сложных многокомпонентных объектов исследования требует синтеза разнокачественных знаний и научных представлений о структуре и динамике мерзлотных ландшафтов. Такие исследования связаны с большим количеством географической информации и привлечением методов геоинформатики и технологий дистанционного зондирования Земли. Проведение исследований с применением различных наборов пространственных данных могут в значительной мере улучшить понимание организации мерзлотных ландшафтов и пространственной дифференциации мерзлотных характеристик в горных территориях и, по-новому, оценить их хозяйственное значение, устойчивость к вариативности климата и антропогенным воздействиям техногенного характера. Примечательными являются работы по моделированию мерзлотных ландшафтов зарубежных ученых. Так, канадские авторы предлагают рассматривать мерзлотные ландшафты в виде многоуровневой концептуальной модели, содержащей информацию (данные) от растительности до инфраструктуры [Warwick et al., 2019]. Горные мерзлотные ландшафты Цинхай-Тибетского нагорья были смоделированы с помощью набора данных MODIS по вегетационным спектральным индексам, температуре поверхности и цифровой модели рельефа. Для повышения точности выделения биомов и растительного покрова использовался временной ряд вегетационных индексов, что

показало свою эффективность в дифференциации типов растительного покрова по фотосинтетической активности доминирующих типов сообществ. Так, по выявленным пяти типам растительности в мерзлотных участках нагорья определены мощности сезонного протаивания ММП [Wang et al., 2016].

Одним из основных сведений, которое мы можем получить с помощью ландшафтного картографирования, являются особенности пространственной организации, выраженной в ландшафтной структуре и локальных особенностях географических закономерностях распределения ландшафтообразующих компонентов. 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. *Геоинформационное моделирование* – метод, основанный на построении и использовании моделей пространственных объектов, их взаимосвязей и динамики процессов средствами ГИС [Журкин и др., 2012]. Данное методологическое направление является широко применимым в современных исследованиях ландшафтов, как и в зарубежной науке [Paudel and Yuan, 2012; Chignell et al., 2018 и др.], так и в отечественной [Владимиров, 2004; Истомина, 2006; Фролов, 2011; Кренке, 2011; Глотов, 2013 и др.].

Описание пространственного объекта, например, природного комплекса или явления, в рамках геоинформационного моделирования производится путем составления аппаратного комплекса, т.е. 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 [Геоинформатика ..., 2008]. Когда речь идет о природных комплексах, сквозное

исследование 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 [Глотов, 2011]. Поэтому понятие «геоинформационное моделирование» ландшафтов неотделимо 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 м) объектов. В ландшафтном картографировании такие снимки применимы при изучении отдельных ландшафтных объектов или процессов. Для дешифрирования с размерностями более 10 м используются многозональные (мультиспектральные) данные отечественной серии искусственных спутников Земли Канопус-В, разработка АО «Корпорация ВНИИЭМ» (действует с 2012 г.), зарубежные данные с серии спутников программы Landsat Геологической службы США и НАСА (действует с 1972 г., Landsat 9 был запущен в сентябре 2021 г.), а также Sentinel 2 MSI (действует с 2015 г.) программы Коперник Европейского космического агентства. Для ландшафтных исследований снимки данных размерностей чаще всего используются для среднемасштабных карт от 1: 500 000 до 1: 100 000. Важной составляющей 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.

Пионерными работами в этом направлении являются геоинформационное моделирование для картографирования ландшафтов Прибайкалья [Владимиров, 2004; Истомина, 2006]. Были обозначены интеграционные возможности ГИС для инвентаризации ландшафтов и накопления геопространственных данных для

математико-статистического моделирования, прогнозирования динамики и изменчивости, что было успешно продемонстрировано на примере таежных геосистем [Владимиров, 2004]. Модель ландшафтных комплексов на уровне фаций и групп фаций представлена через сегментирование космических снимков по определителю Якоби, где выделяются относительно однородные ареалы, которые подразделяются на типы фации по сочетанию растительного сообщества, вида почвы и элемента рельефа [Истомина, 2006]. 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 (2002). Определены хорошие возможности выделения участков леса с различными таксационными характеристиками при обработке разновременных радиолокационных снимков методом сегментации.

Труды Ю.Г. Пузаченко и А.Н. Кренке мл. указывают, что переход к количественной оценке геосистем связан с развитием методов обработки многозональных спутниковых снимков, однако сами многозональные снимки или радиолокационные снимки могут описать только отдельные элементы функционирования ландшафтов. Для более полного представления пространственных взаимосвязей и дифференциации ландшафтов более приемлемым является метод совместного анализа спутниковых изображений, цифровой модели рельефа, набора оцифрованных тематических карт, полевых измерений [Пузаченко, 2002; Кренке, 2011]. При этом авторы используют довольно оригинальную методику корреляции переменных, рассчитанных по совместному анализу многозональных снимков и цифровой модели рельефа для факторов формирования растительного и почвенного покрова, для корректировки пространственной дифференциации тематических карт, не внося существенных изменений в легенду карты [Кренке, 2011].

В работе А.А. Глотова (2013) были изложены основные положения геоинформационного моделирования ландшафтов и обосновано их применение на примере парагенетических долинно-речных ландшафтов Воронежской области. Так, геоинформационное моделирование ландшафта представляет собой комплекс, состоящий из subsystem (компонентов ландшафтов и их функциональных взаимосвязей), представленных количественными данными, такими, как цифровые модели рельефа, растительности, климата и т.д. В работе важное значение уделяется разработке ГИС базы

геоданных ландшафтов, включающую таблицу по внутренней комплексной и компонентной структуре, по ландшафтно-геофизическими параметрами, изученными с использованием дешифрирования данных многозональной космической съемки (Landsat, DMC, RapidEye), цифровых моделей рельефа и полевого картографирования. 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 [Глотов, 2013].

Обобщая обзор опыта, надо отметить, что работ по геоинформационному моделированию природных комплексов в отечественной науке немного, что связано, прежде всего со сложностями адаптации классификационной схемы ПТК к выделяемым пространственным объектам с помощью геоинформационного моделирования. При этом достаточно много работ по изучению динамических аспектов ПТК, связанных с широкими возможностями дистанционного метода, прежде всего это разновременные спутниковые изображения.

Методологические основы геоинформационного моделирования ландшафтов базируются на методических разработках в области ландшафтного картографирования и в значительной мере его расширяют. В настоящее время в изучение 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. Связанное с улучшением точности выделения классификационных единиц и общепринятых в мировой науке упрощенной схемы классов (био) физического покрова земной поверхности. Разработаны множество 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 ней выделены 11 классов покрова земной поверхности [Di Gregorio and

Jansen, 2000]. С тех пор проведено множество исследований, связанных 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. Связанное с разработкой методики картографирования комплексных ландшафтных объектов и типологических единиц. Данное направление развития подразумевает интеграцию экспертных знаний с предметной области исследуемого объекта. Часто такой подход, как применение знаний (knowledge-driven approach), используется при выделении определенных видов растительности. Выделение типов растительности и видов растений усложняется из-за их спектрального сходства с другими сообществами в гетерогенной растительности при параметрических классификациях [Gao, 2004]. 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 [Janiec and Gadal, 2020]. Разработка алгоритмов машинного обучения открывает интересную перспективу для дальнейшего изучения того, как классификаторы работают в неоднородной природной среде. Особенно много исследований, связанных с изучением сельскохозяйственных ландшафтов. Использование временного ряда снимков для картографирования растительности и особенно для распознавания типов сельскохозяйственных культур стремительно начало развиваться с появлением новых сенсоров высокого пространственного разрешения для свободного доступа, таковым, в частности, является Sentinel 2. Например, Debella-Gilo и Gjertsen (2021) использовали временной ряд снимков Sentinel 2 для распознавания зерновых, кормовых и неиспользуемых сельскохозяйственных культур с применением алгоритма глубокого обучения (deep learning), сверточных нейронных сетей (convolutional neural network).

Метод использования многозональных космических снимков для картографирования растительности ландшафтов также широко применяется в отечественной науке. Так, Е.А. Стыщенко (2018) разработала метод автоматизированного дешифрирования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных многозональных космических изображений. Работа основана на вариации фотосинтетической активности растений на спектрально-отражательных характеристиках в зависимости от фазы вегетации. И на основе 6 разносезонных (январь, март, май, июль, август, сентябрь) снимков Landsat 8 OLI (пространственное разрешение 30 м) на территорию Кольчугинского района Владимирской области в 2014 г. было выделено 7 классов древесной растительности, 3 класса сельскохозяйственных земель и 3 типа нерастительного покрова [Стыщенко, 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].

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]. М.Т. Jorgenson подчеркивает расширяющиеся возможности датчиков, новых методов обработки изображений и многомерного анализа. Расширенный публичный доступ к данным и все более длинные архивы изображений позволяют по-новому взглянуть на многолетнюю динамику мерзлотных ландшафтов [Grosse, 2016].

Пространственная дифференциация мерзлотных ландшафтов определяется через наложение слоев растительности и рельефа, составленное по оцифровке аэрофотоснимков, топографических карт, оцифровки старых бумажных геокриологических карт и космических снимков путем оверлейного ГИС анализа [Торговкин, 2005]. С.В. Калиничева (2019) предложила метод использования радиационной температуры поверхности (LST) по тепловым инфракрасным каналам со спутниковых изображений Landsat 5 и Landsat 7, в качестве параметра картирования, наряду с обычно используемыми параметрами идентификации, рельеф и растительность.

Метод был применен для различения мерзлых и немерзлых участков склонов Эльконских гор и Олекмо-Чарской возвышенности на Южной Якутии. А.А. Медведков (2016) использует анализ тепловых снимков при корреляции зависимости температуры поверхности и запасов фитомассы, что позволяет определять мерзлотные и немерзлотные ландшафты. Цифровые модели рельефа и производные наборы данных (уклон, аспект, пересеченность, водосборный бассейн и теневой рельеф) использовались исследователями для геоморфологических ландшафтных исследований [Самсонов, 2011]. В мерзлотно-ландшафтных исследованиях часто используются цифровые модели рельефа, в том числе и сверхвысокого разрешения, полученные с беспилотных летательных аппаратов. 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 [Башарин, 2020].

Совместная обработка данных дистанционного зондирования и ЦМР в зарубежной научной литературе получила название «классификация форм рельефа» (Landform classification) [Mokarram et al., 2015]. Фактически равнины, холмы, горы и долины, которые можно наблюдать во многих масштабах и которые имеют 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. Во многих исследованиях мерзлотных ландшафтов Центральной и Южной Якутии применяются данные Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 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; Spijker, 2013].

1.4. Выводы по главе 1

1. Изучение мерзлотных ландшафтов Якутии основано на теоретических и методологических принципах таксономической классификации ландшафтов Ф.Н. Милькова, получившей расширение классификации типологических и региональных комплексов за счет внедрения мерзлотного содержания.

2. Мерзлотно-ландшафтное картографирование базируется на применении методов ландшафтной индикации. Индикационный метод выводит на первый план морфологические характеристики ландшафтов (индикаторы) – растительность и рельеф. Сочетание индикаторов (критериев выделения) разноуровневых типологических комплексов позволяет выявлять параметры ММП и функциональные особенности мерзлотных ландшафтов.

3. Ключевыми аспектами изучения пространственной организации ландшафтов являются свойства, которые раскрывают сложность ландшафтной структуры и особенности функционирования. Основными свойствами являются *целостность, направленность, упорядоченность и контрастность*.

4. Ландшафтная структура, результат сложного взаимодействия вертикальных (межкомпонентных) и горизонтальных (латеральных) связей. Свойства пространственной организации обусловлены особенностями ландшафтообразования, функционирования и пространственной дифференциации.

5. Для комплексного понимания пространственной организации мерзлотных ландшафтов целесообразно проводить разноуровневое мерзлотно-ландшафтное исследование, определяя вертикально соподчиненные формы пространственной организации мерзлотных ландшафтов.

6. В исследовании пространственной организации ландшафтов чаще всего результатом соотношения и совместного анализа региональных и типологических комплексов ландшафтной структуры становится выделение хронологических сочетаний ландшафтов, например, парадинамических комплексов, как форм пространственной организации ландшафтов.

7. Методика геоинформационного моделирования позволяет детализировать и улучшать объективность ландшафтной структуры. Ядром геоинформационного моделирования являются данные разновременных многозональных спутниковых снимков и цифровая модель рельефа, синтез и обработка которых дают возможность проведения ландшафтной индикации и картографирования.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ХРЕБТА ОРУЛГАН

Горные территории занимают около 60% всей территории Якутии. Хребет Орулган, протянувшийся в субмеридиональном направлении вдоль течения р.Лена, занимает наиболее возвышенную северо-западную часть Верхоянской горной системы (рис. 3). Протяженность хребта в широтном направлении – 270 км, в долготном – до 400 км. Площадь горной системы достигает 83 тыс. км. Водораздельная линия хребта, отделяющая бассейны рек Лена, Омолуй и Яна, расположена на высоте 1300-1700, в отдельных случаях – до 2000 м.

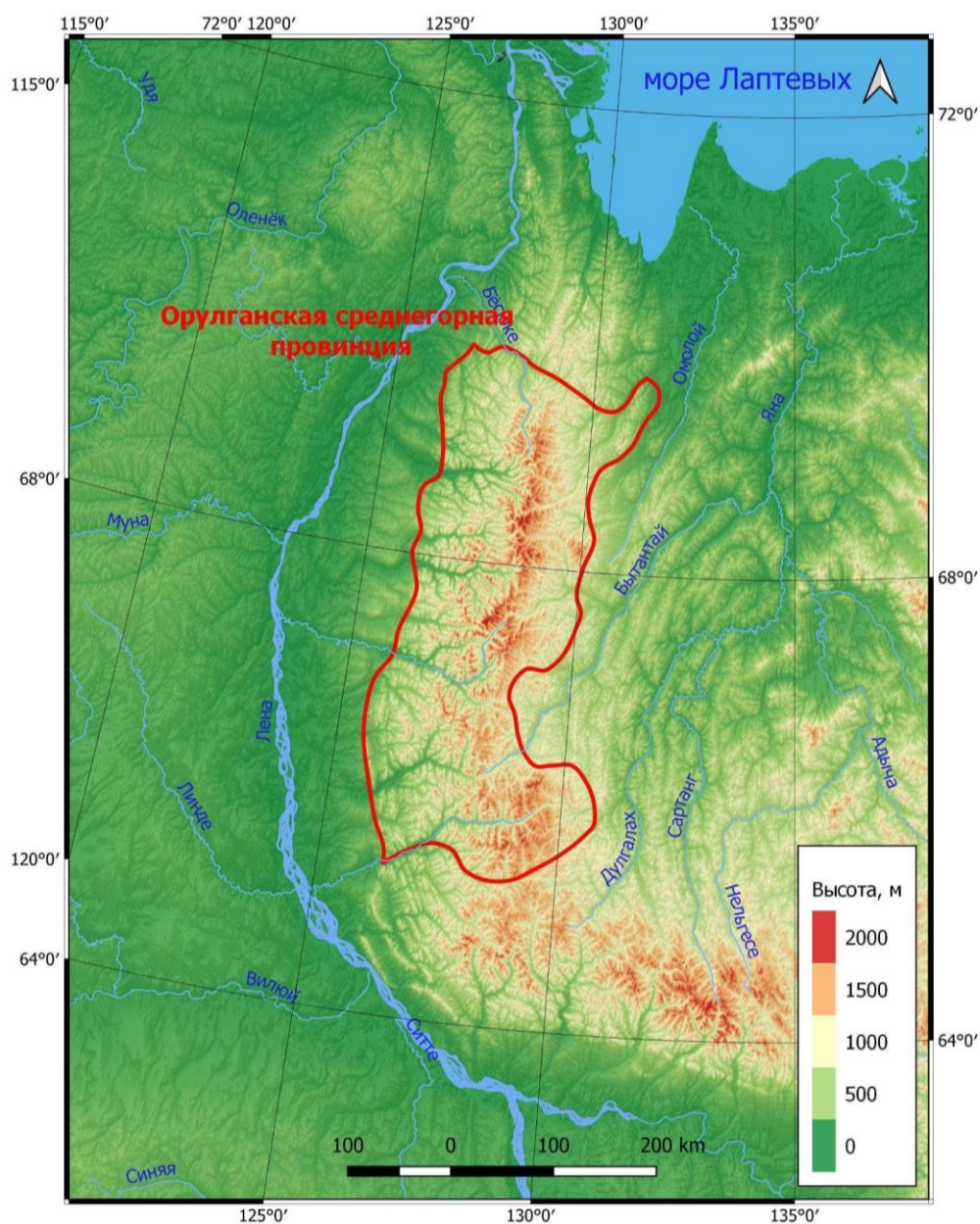


Рис. 3. Физико-географическое положение хребта Орулган (составлено автором)

Ландшафтообразование определяется процессами развития различных его компонентов и сложными процессами их взаимодействия. Современная ландшафтная структура познается, в том числе и в характеристике ее эволюционных свойств [Николаев, 2006]. Исходя из этого, мы ставим задачу дать комплексную физико-географическую характеристику и выявить основные переломные моменты, качественные сдвиги и рубежи в ландшафтообразовании хребта Орулган.

2.1. Геологическое строение и рельеф

Образование Орулганского хребта как горной системы Северо-Востока Сибири связано с мезозойской складчатостью. Горное сооружение сформировалось в начале поздне меловой эпохи и относится к области Верхоянского мегаантиклинория. В состав геоморфологического цикла развития хребта входят эпохи интенсивных тектонических движений и эпохи относительного тектонического покоя с выравниванием рельефа. Так, после продолжительной стадии пенепленизации в палеогене, к раннему неогену горный рельеф был почти полностью денудирован. Возрождение горного рельефа связано с новейшими тектоническими движениями неогена и четвертичного периода. Тектонические поднятия начались в миоценовую эпоху неогена, когда эпейрогенические поднятия высоко приподняли разрушенные Верхоянские горы, в том числе хребет Орулган.

Важной особенностью в развитие рельефа хребта является неравномерность интенсивности неотектонических движений. Орулганский антиклинорий имеет более крутое западное крыло по сравнению с восточным. Это говорит о том, что западное крыло испытывало большое поднятие и значительно опережало в этом восточное, вследствие чего на восточной части хребта сохранились поверхности выравнивания [Наумов, 1962].

Четвертичный период в Северной Якутии характеризуется чередованием ледниковых и межледниковых веков, что приводило к изменению климата, растительного покрова и условий обитания животного мира [Сакс, 1953]. Следы древнего и самаровского оледенений раннего плейстоцена, зырянского и сартанского оледенений позднего плейстоцена [Колосов, 1947] обусловлены почти отвесные склоны, корытообразные поперечные ледниковые долины рек, троговые продольные долины, ледниковые цирки и озера на перевалах. При этом отмечается, что отчетливые следы раннеплейстоценовых покровных оледенений приурочены к древним долинам крупных

горных рек. Зырянское и сартанское оледенения имели наибольшее значение в рельефообразовании хребта, они активно провели экзарцию и аккумуляцию моренных и водно-ледниковых отложений [Стрелков, 1965]. Хребет расчленен поперечными широкими (до 3-4 км) ледниковыми долинами, которые обрываются к узкому холмисто-увалистому предгорью [Григорьев, 1927]. Днища многих долин на 1000-1200 и ниже среднего уровня ближайших гор. При выходе рек в предгорья они прорезают горные цепи высотой 800-900 м. Склоны долин крупных рек чаще вогнутые, днище ровное и плоское. Древние речные сети были заложены на поверхности выравнивания в середине плиоцена. Восточный склон хребта сохраняет фрагменты древней речной сети р. Омолой, расположенной к востоку от современной ее долины. Верховья древней долины также приурочены к левобережью р. Бытантай. В пределах древней долины расположены низовья притоков р. Бытантай, они приурочены к молодой тектонической Бытантайской впадине, которая также продолжается в пределах Омолойского грабена [Баранова, 1962].

В зоне главного водораздела хребта мелкие ледниковые формы вовсе уничтожены эрозией и выветриванием; сохранились лишь наиболее крупные формы, свидетельствующие об оледенении, это обработанные ледниками долины с морённым рельефом в средних и нижних участках, обширные перевальные поля со сглаженными холмами, крупные кары. Зона главного водораздела на большом протяжении в южной части Орулгана по характеру рельефа скорее напоминает высокое (около 1700-2000 м) плато, к западу от которого располагается широкая зона высокогорного (до 2300 м) рельефа с альпийскими формами. На востоке плато незаметно снижается, переходя в очень пологий склон. В долине притоков главных рек, выше их устьев, часто встречаются ригельные участки [Беляков, 1958].

Высокогорный рельеф характерен для большинства склонов Орулгана, особенно его южной части, например, в бассейне р. Джарджан, а также для северной части Джарджанской цепи и восточного склона гор – в верхних течениях р. Сеймчан, Атлан, Тумара. Вершины здесь достигают абсолютной высоты 1600-1800 м, а относительной – 400-500 м. Здесь нередко встречаются кары, трогообразные долины с шириной днищ 0,5-2,0 км (например, долины р. Хадырындя, Имтянда, Нёнендю, Сакында). В долинах встречаются моренные холмы высотой 10-15 м; пойменные и надпойменные террасы располагаются на высотах 3 и 5 м, местами до 20 м [Северная Якутия ..., 1960].

В зоне среднегорного рельефа различаются гребневидный и крутосклонный типы. Первый обычен в неширокой полосе, окаймляющей область плоскосклонного высокогорья. В этой полосе с абсолютными высотами 900-1400 м (относительные 500-800 м) трогообразные долины рек имеют ширину 1-3 км. В зоне с таким рельефом много каньонов, нередки перехваты рек, изредка встречаются озовые гряды длиной до 0,5 км и высотой до 30 м; террасы на высотах 3-5 м, реже 10-15 м; здесь часто образуются грунтовые наледи. Ниже абсолютными (500-900 м), относительными (400-500 м) высотами, располагается пояс, характеризующийся среднегорным крутосклонным рельефом (в глубоких троговых долинах с моренно-холмистым рельефом). Древние террасы (местами до одиннадцати) встречаются на высотах 130-150 м [Северная Якутия ..., 1960].

В местах с низкогорным увалистым рельефом (абсолютные высоты 200-500 м, относительные 200-300 м) на отдельных участках встречаются аккумулятивные ледниковые формы. Это озерно-холмистые равнины (абсолютные высоты 50-200 м); относи аккумулятивный рельеф развит в долинах рек. Вдоль крупных рек ширина полос с аккумулятивным рельефом достигает 10-15 км. Это озерно-холмистые равнины (абсолютные высоты 50-200 м): относительные высоты холмов, гряд и редких останцов не более 80-100 м. Озерно-холмистые равнины вдоль края предгорья сливаются с Ленской низменностью. Восточный склон Орулганских гор менее глубоко (до 400-500 м) расчленен эрозией и сохранил следы денудации, на многих участках поверхность почти плоская или слабо волнистая. Число террас, образовавшихся в результате оледенения и неоднократных поднятий территории, достигает семи, с высотами над урезами воды от нескольких до 150 м [Северная Якутия ..., 1960].

Развитие рельефа хребта в голоцене связано с проявлениями мерзлотных, делювиальных, солифлюкционных и гравитационных процессов в условиях повсеместно действующего медленного поднятия. В долинах главных рек наблюдаются конусы выноса, морённые холмы и гряды. Пойменные и надпойменные террасы имеют высоты 3-5 м, реже 10 м [Стрелков, 1965].

Стратиграфическая структура хребта состоит из морских, прибрежно-морских, дельтовых отложений от среднего до верхнего карбона и нижней перми, залегающих на меловых отложениях [Беляков, 1958]. Триасовые отложения также широко распространены в бассейне рек Яны (Бытантай, Тумара, Улахан Саккырыр и тд.).

Образованы они однообразной толщиной песчаников, аргилитов и алевролитов с подчиненными разновидностями других пород (битуминизированных известняков, зеленовато-серых туффитов, конгломератов, углисто-глинистых сланцев) и хорошей сохранностью органических остатков преимущественно морского происхождения (иногда с обломками минерализованной древесины). Горные породы преимущественно аллювиального происхождения, состоят из песка и супесей с галькой и окатанных валунами песчаников и алевролитов. Иногда галечники перекрыты лессовидными ноздреватыми суглинками. Наиболее обычны верхнечетвертичные образования в виде аллювиальных, озерно-аллювиальных ледниковых и водно-ледниковых отложений. Среди супесей и суглинков присутствуют жильные льды, встречаются прослои торфа, остатки древесины и пресноводной фауны [Северная Якутия..., 1960].

2.2. Климат и внутренние воды

Климатогенный фактор является одним из ведущих в формировании современного облика хребта Орулган. Начало формирования многолетнемерзлых пород на севере Якутии, связывают с похолоданием климата в конце плиоценовой эпохи неогена и древним покровным оледенением раннего плейстоцена, считается, что с тех пор мерзлые породы теряли мощность в периоды потепления, но до полного исчезновения не доходили [Северная Якутия...1960]. Колебаниями климатических условий в плейстоценовую эпоху четвертичного периода обусловлено чередование ледниковых и межледниковых веков [Сакс, 1953]. С оледенением связано формирование углубленных широких корытообразных долин, цирков, морен и кар. Аккумуляция на поверхностях выравнивания и пологих участках горных долин моренных и водно-ледниковых отложений, сформировали обширные зандровые равнины и моренные гряды. В голоцене происходит постепенное потепление и увлажнение климата, который привел к деградации мерзлоты и активным термоэрозионным и термоденудационным процессам, по формированию криогенных форм рельефа [Федоров, 2020].

Современный климат хребта Орулган определяется господством Сибирского антициклона и близостью холодных арктических морей Северного Ледовитого океана. Антициклон почти полностью господствует с осени до весны, редкие проникновения циклонических воздушных масс приходятся на летний период. Антициклон формирует резко-континентальный климат с крайне низкими значениями температур в зимнее время с

очень высоким атмосферным давлением, а лето прохладное и сухое. Дифференциация и сочетание современного мезо- и микроклиматов хребта обусловлены сильной расчленённостью и субмеридиональным расположением. В течение года вся Северная Якутия получает от 70 до 80 ккал/кв. см суммарной солнечной радиации [Гаврилова, 1981]. Количество суммарной солнечной радиации убывает к северу, но за Северным полярным кругом в мае количество солнечной радиации увеличивается, что обусловлено длительными полярными днями, максимальными значениями рассеянной радиации. Из-за почти 9 месяцев снежного покрова значения альбедо очень высокие, особенно осенью и зимой, когда снежный покров отражает максимальное количество солнечных лучей. С ноября по май отражается от 80 до 86% солнечной радиации [Калитин, 1940].

В целом Якутия относится к регионам, подверженным тенденциям климатических изменений. По данным Ю.Б. Скачкова приращивание среднегодовой температуры воздуха в самых близких к хребту метеорологических станциях за период 1965-2015 гг. на западном склоне в низовьях р. Лена достигало в Джарджане – 1,8 °С, Жиганске – 1,8 °С, Кюсюре – 1,6 °С, и на восточном склоне Верхоянска – 2,1 °С [Скачков, 2016]. Изменения климата территорий восточного склона хребта сопоставимы со значениями в Центральной Якутии, но отсутствие метеорологических станций, непосредственно в самом хребте затрудняет оценку.

Для определения климатических условий хребта использовались наборы глобальных климатических данных WorldClim [Hijmans et al., 2005] с пространственным разрешением 30 угловых секунд, что соответствует примерно 1 кв.км. Данные WorldClim довольно часто используются в ландшафтных исследованиях и картографировании [Кренке, 2013 и др.]. Переменные получены на основе интерполяции многолетних измерений (1950-2000 гг.) среднемесячных температур по метеостанциям и осадков с поправкой на рельеф. Для анализа соотношения тепла и влаги мы использовали набор данных, рассчитанных как отношение среднегодовой суммы осадков к потенциальной эвапотранспирации [Trabucco and Zomer, 2018] (рис. 4).

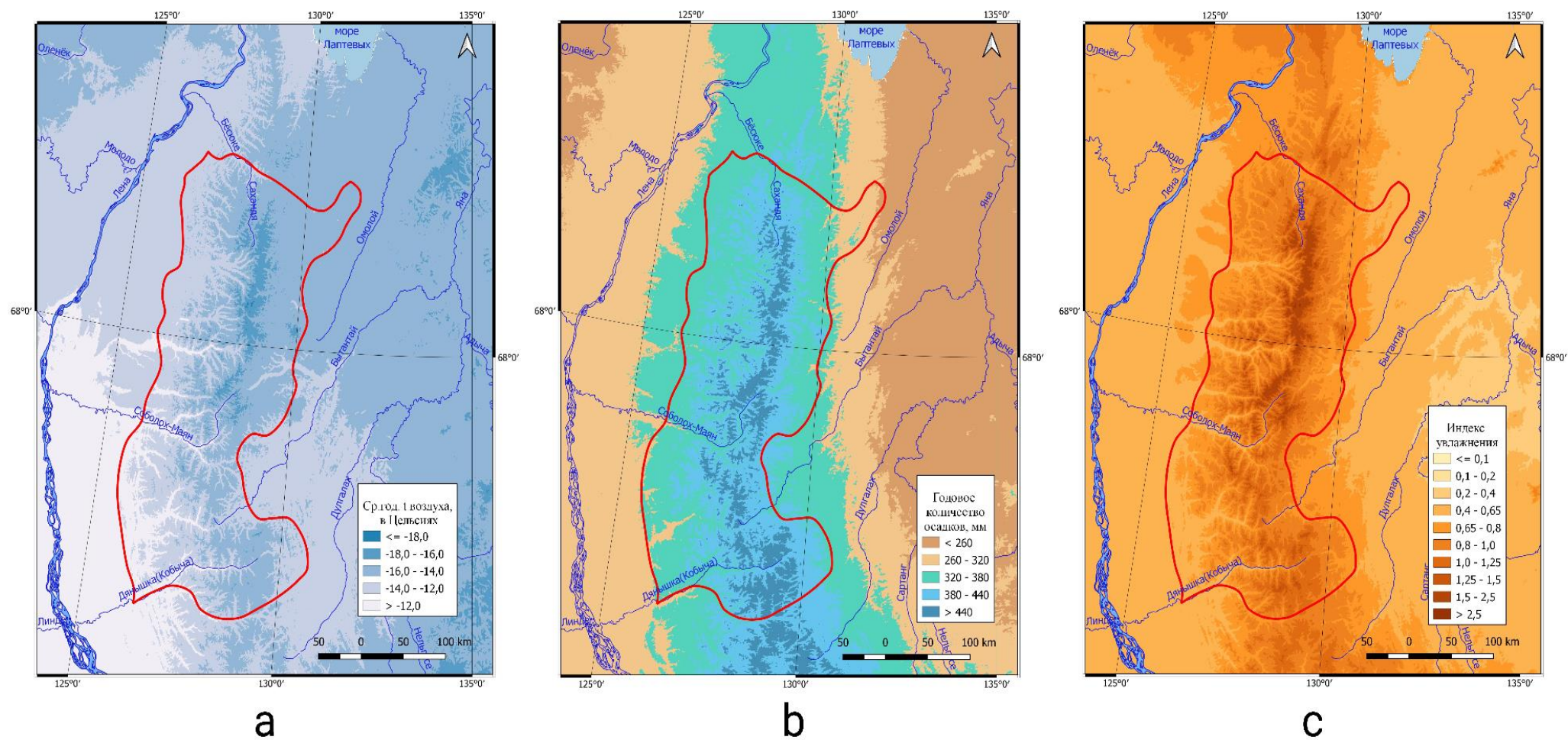


Рис. 4. Климатические показатели хребта Орулган: а) среднегодовая температура воздуха °С по данным WorldClim V3; б) годовое количество осадков, мм. в) индекс засушливости по данным Global Aridity Index Database [Trabucco and Zomer, 2018].

По климатическому районированию Б.П. Алисова (1956), хребет примыкает к субарктическому сибирскому и умеренному восточносибирскому поясам. Орулганские горы препятствуют проникновению воздушных потоков в межгорные понижения и выходу с гор холодного и сухого воздуха. Менее увлажненными становятся межгорные котловины и восточный склон хребта.

Присутствует выраженный высотный температурный градиент, преимущественно относительно высокая температура характерна для понижений в южной части западного склона хребта, а низкая для северных высокогорий хребта. Среднегодовая температура варьируется от -18 °С в вершинах до -12 °С в днищах долин юго-западной части. В восточный склон теплый воздух проникает через притоки р. Бынтай. Контрастность тепловых ресурсов значительна при переходе с высотных типов ландшафтов в северную тайгу (рис. 4, а). Согласно справочным данным, продолжительность безморозного периода варьируется от 40 на севере до 90 в центральной и южной частях хребта [Научно-прикладной справочник по климату СССР ..., 1989].

Температурный режим можем проследить по трем метеостанциям (табл. 1), расположенным в низовьях хребта: Батагай-Алыта (абсолютная высота – 486 м, восточный склон), Собопол (абсолютная высота – 184 м, западный склон), Джарджан (абсолютная высота – 50 м, западный склон). Показатели сильно различаются ввиду расположения на разных высотах, но при этом очевидно, что западная часть получает больше тепла и влаги. Ввиду особенностей рельефа речных долин западного склона, проникновение теплых потоков по узким врезанным долинам довольно значительно, нежели на восточной части.

Таблица 1

Климатические показатели по метеостанциям*

Метеостанция	Среднего д. t воздуха (°С)	Среднего д. миним. t воздуха (°С)	Среднего д. максим. t воздуха (°С)	Сумма среднесут. t выше 0 (°С)	Сумма среднесут. t выше 10 (°С)	Годовое количество осадков, (мм)
Батагай-Алыта	-14,7	-20,8	-8,4	980	632	192
Собопол	-11,3	-16,2	-6,3	1463	1158	402
Джарджан	-12,3	-16,4	-7,6	1260	950	337

*[Научно-прикладной справочник по климату СССР ..., 1989]

Увлажнение хребта в целом увеличивается с высотой (рис. 4 б, с). Западный склон хребта, к которому относятся возвышенные участки, значительно более увлажнен, чем восточный; долины рек притоков Лены классифицируются как увлажненные (пороговое значение выше 0,65), тогда как восточный склон относится к классу полузасушливых территорий (пороговое значение ниже 0,65). Индекс увлажнения в тундровой зоне в 1,5-2 раза выше, чем в тайге; с ним связана потенциальная испарительная способность почвенно-растительного покрова. Годовое количество осадков варьируется от 200 до 400 мм. Количество осадков увеличивается с высотой, меньше всего осадков приходится на бассейн р. Омолой (до 150 мм). Малое количество осадков компенсируется низким испарением почвенной влаги и низкими значениями температур, поэтому данная часть хребта не сильно контрастирует по увлажненности.

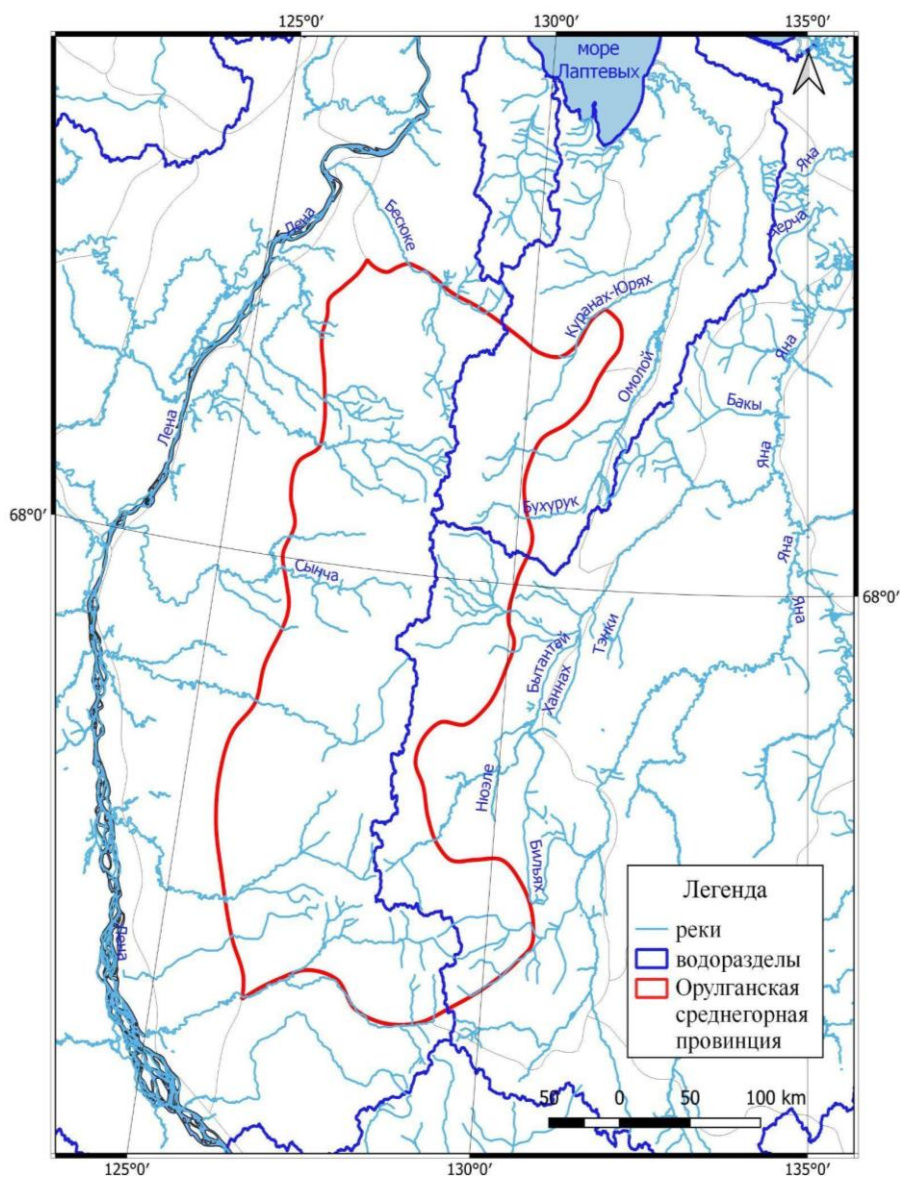


Рис. 5. Внутренние воды. Данные по водоразделам HydroSHEDS (составлено автором)

Внутренние воды хребта Орулган представлены водосборными бассейнами трех рек моря Лаптевых – Лены, Омоя и Яны (рис. 5). Основные притоки Лены: Соболох-Маян (длина – 411 км, высота истока – 2000 м), Джарджан (длина – 297 км, высота истока – 1600 м), Бесюкэ (длина – 152 км, высота истока – 1000 м), Юндюлюн (длина – 404 км, высота истока – 1200 м) и др. Основные притоки Яны: Бынтай с притоками (длина – 586 км, высота истока – 1200 м), притоки р. Дулгалах (длина – 507 км, высота истока – 1100 м) [Государственный водный реестр ...].

Реки отличаются сезонной неравномерностью стока: маловодье в зимний период, весеннее половодье и довольно частые дождевые половодья летом. Сток рек резко уменьшается осенью. Зимой у многих рек сток отсутствует вследствие промерзания до дна. Основными источниками питания рек являются талые воды, поступающие в реку как весной, так и в течение лета при таянии снега и дождей в июле и августе. Некоторую роль в питании играют ледники и наледи, особенно в засушливые июнь и июль.

Питание рек за счет мерзлотных вод незначительно, но с ним связано формирование типичных для северо-востока Якутии наледей. Продолжительность промерзания от 7-8 месяцев. В долинах крупных рек Лена и Яна и на склонах к ним климатические условия мягче, чем на водоразделах, а почвы хорошо дренированные. Эти условия способствуют более северному и высокогорному распространению северотаежной растительности по долинам рек с более высоким бонитетом лесов, особенно по долинам притоков Лены [Щербаков, 1975].

Хребет не изобилует озерами, большая часть озер расположена в моренных и зандровых равнинах и обусловлены нарушением моренные и каровые озера, в них термических условий мерзлых грунтов и таянием заключенного льда (рис. 6). Реже встречаются в долинах крупных рек много озер стариц и пойменных озер.

Современное оледенение приурочено к главному водоразделу хребта в высотных интервалах 1500-2250 м на севере и 1520-2280 м на юге, всего было отмечено наличие 54 ледников с площадью 20 кв. км. [Васьковский, 1955]. Отмечается активное, до 30%, вытаявание ледников [Ананичева и Кренке, 2013].



Рис. 6. Термокарстовое озеро Булгунняхтах в горно-ледниковой долине (фото автора).

2.3. Растительность и почвы

Рассмотренные нами орографические и геологические особенности и климатические условия хребта сказываются на растительности, что особенно заметно на изменениях сообществ, в которых господствуют древесные жизненные формы. Постепенно к северу снижается высота и сомкнутость лесного полога, и высотный уровень распространения на горных склонах, и, наконец, большинство из них полностью выпадают. Растительность провинции в основном состоит из редкостойных лиственничных лесов [Андреев и др., 1987].

Согласно схеме геоботанического районирования Якутии, хребет относится к подзоне северотаежных лесов с преобладанием горных лесов; высокогорья преимущественно покрыты горными тундрами и каменистыми пустынями. Высотная граница лиственницы проходит на высоте до 1600 м над уровнем моря. В горах Верхоянья 25 редких эндемичных видов (*Gorodkovia jacutica*, *Senecio jacuticus* и др.) [Шелудякова, 1948].

По флористическому районированию Верхоянского хребта территория относится к Западнему Верхоянью [Николин и Троева, 2011], она наименее богата во флористическом плане.

Древесный ярус представлен лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi*), сомкнутого северотаежного типа и горные редкостойные и редины (рис. 7). Среди кустарников доминируют кедровый стланик (*Pinus pumila*), карликовая береза (*Betula divaricata*, *B. exilis*, *B. middendorffii*), ольховник (*Duschekia fruticosa*), которые формируют экотонные сообщества между лесом и тундрой. В ярусе кустарничков – багульник (*Ledum palustre*), голубика и брусника (*Vaccinium uliginosum* и *V. vitis-idaea*). Мохово-лишайниковый покров представлен сфагнумом (*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.). В долинных ландшафтах образуются небольшие по площади иванчайные луга, соседствующие с пойменными разнотравными лугами (рис. 8). В растительности долинных комплексов преобладают ивовые сообщества (*Salix alaxensis*, *S. boganidensis*, *S. hastata*, *S. jenseensis* и др.) и мелколиственные тополевые (*Populus suaveolens*, *P. tremula*) и чозениевые (*Chosenia arbutifolia*) леса, которые на склоны гор практически не заходят [Николин, 2009; Куваев, 1985; Исаев, 2010]. Поймы рек, дренированные низкие террасы представлены луговыми сообществами (*Alopecurus alpinus* ssp. *borealis*, *Deschampsia brevifolia*, *Polygonum ellipticum*, *Sanguisorba polygama*, *Pachypleurum alpinum* и др.) [Тихомиров, 1955].

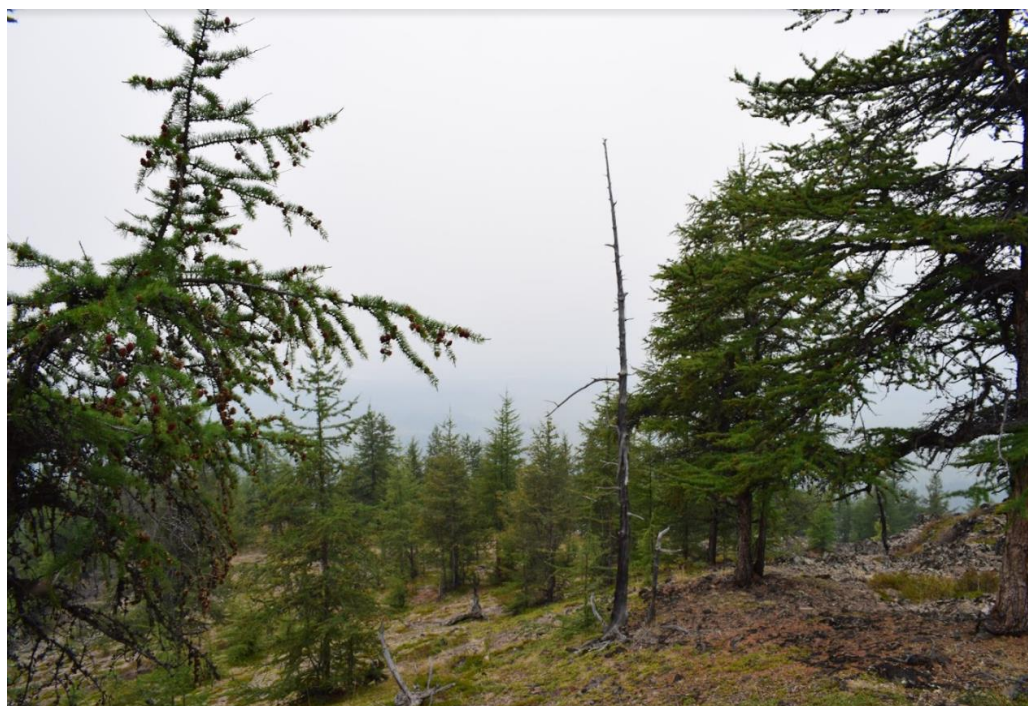


Рис. 7. Горное лиственничное редколесье хребта Орулган (фото автора)



Рис. 8. Тополевый иванчайно-разнотравный лес (фото автора).

Тундровая растительность представлена у подножья склонов и на вершинах кустарничково-разнотравно-моховыми и лишайниковыми сообществами (*Cassiope ericoides*, *C. tetragona*, *Salix berberifolia*, *S. polaris*, *Ledum decumbens* *Kobresia myosuroides*, *Ranunculus nivalis* и др). В переувлажненных низинноболотных тундрах (рис. 9), размещающихся в западинах и в долинах речек, преобладают пушицевые (*Dryas punctata*, *Eriophorum vaginatum*), пушицево-осоковые (с *Carex starts*, *C. rariflora*, *C. chordorrhiza*, *C. rotundata*), и осоково-дюпонциевые (с *Durontia psilosantha*), сфагново-осоковые тундры (*Hierochloe pauciflora*, *Comarum palustre* и др.) [Тихомиров, 1955; Николин, 2011]. Эпилитно-лишайниковые сообщества, представленные господствуют в каменных горных пустынях, также на курумах и обнажениях горных пород.

На почвообразование и формирование гидротермического режима почв огромное влияние оказывают многолетнемерзлые породы, которые имеют сплошной характер распространения по хребту Орулган. Мощность деятельного слоя почв зависит от сезонноталого слоя мерзлых пород, который колеблется от 0,2 м в тундре и до 1,5 м в северной тайге. Спецификой слагающих отложений является широкое распространение ледяных жил, образующее полигонально-решетчатую текстуру поверхности. Сезонная мерзлота способствует переувлажнению и оглеению почв. Криогенные процессы также являются ведущей силой почвообразования. Тиксотропные превращения зажатого

надмерзлотного слоя приводят к образованию пучений и бугоркового микрорельефа, что особенно сильно проявляется при маломощном защитном растительном покрове. Морозобойное растрескивание является одним из основных криогенных процессов, образующих микрорельеф тундр, ледниковых долин и северной тайги. Мерзлотные почвы впервые картографированы в 1978 г. тогда на территории хребта Орулган было выделено 6 контуров комплекса типов, подтипов почв [Еловская и др., 1979]. Согласно почвенно-географическому районированию, хребет расположен в Верхоянской горно-гольцово-тундрово-таежной провинции подзоны северной тайги, где основными почвами являются горно-тундровые подбуры, таежные торфянистые, глеевые и глеевато торфянисто-перегнойные почвы.



Рис. 9. Пушицево-осоковая болотная тундра (фото автора).

Для хребта характерны мелкоконтурные сочетания мерзлотных северотаежных и горно-гольцовых и горно-тундровых почв: горногольцовые почвы приурочены к каменистым пустыням с эпилитно-лишайниковыми сообществами. Горнотундровые почвы хребта делятся на два типа по условиям дренажа. В условиях хорошего дренажа развиваются мерзлотные мелкоземные подбуры. Содержание дисперсного органического вещества в осадочных породах, слагающих хребет, увеличивает содержание гумуса в нижней части почвенного профиля мерзлотных подбуров [Коссовская и др., 1960]. При этом гумус не накапливается ввиду их механического выноса вниз по склону, где на слабодренлируемых участках и пологих склонах формируются горно-тундровые глеевые

почвы. Данный тип почв характерен для плоских нагорных террас, столовых вершин и шлейфов, где выделяются горно-тундровые подбуры в условиях хорошего дренажа и таежные глеевые торфянисто-перегнойные мерзлотные почвы. Для речных горных долин характерны заболоченные, лугово-болотные и торфянисто-перегнойные почвы, которые идут в комплексе с северотаежными оподзоленными (тиксотропными) щебнистыми почвами. Северотаежные оподзоленные сильнощебнистые почвы образуются под моховыми листовенничными редколесьями. Северотаежные типичные почвы развиваются на суглинистых моренных и флювиогляциальных отложениях в комплексе с мерзлотными болотными почвами на слабодренированных участках. Такие почвы более характерны для западной части хребта по долинам притоков р. Лена и в низких террасах р. Бытантай. Чем севернее, тем почва становится более оглеенной, сменяя северотаежные типичные на глеевые мерзлотные почвы, которые сочетаются с тундровыми глеевыми и низинными болотными мерзлотными почвами. Северотаежные глеевые и глееватые мерзлотные почвы обычно образуются под листовенничными кустарничково-моховыми редколесьями в комплексе с торфянисто-перегнойно-глеевыми и болотными мерзлотными почвами [Еловская, 1989]. Одной из важных специфических особенностей северотаежных почв является повсеместная тиксопропность, обусловленная глубокими и сильными промерзаниями переувлажненных почв, и продолжительное мерзлое состояние [Зольников, 1965].

2.4. Ландшафтная структура

На территории хребта Орулган и отсутствуют работы по крупномасштабному и среднемасштабному мерзлотно-ландшафтному картографированию. Главный источник, по которому мы можем судить о ландшафтной структуре хребта, это Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) в масштабе 1:1 500 000. Согласно мерзлотно-ландшафтному районированию территория хребта Орулган относится к Орулганской среднегорной провинции со сплошным распространением ММП и преобладанием горнотундровых и горноредколесных типологических комплексов [Федоров, 1989]. В Орулганской среднегорной провинции выделяется 7 типов ландшафтов: горная пустыня, горная тундра, подгольцово-кустарниковые заросли, горное редколесье, тайга (северная тайга), интразональный северотаежный и интразональный горный. Горные типы ландшафтов дифференцируются по

климатическим параметрам, подчиняясь широтной зональности и высотной поясности распределения тепла и влаги [Федоров и др., 1989] (табл. 2).

Таблица 2

Основные характеристики зональных типов мерзлотных ландшафтов хребта

Орулган*

Тип (подтип) ландшафта	Сумма ср. суг. t выше 10 (°C)	Кол-во дней выше 0 (°C)	Среднегодовой t воздуха (°C)	Ср. t января воздуха (°C)	Ср. t июля воздуха (°C)	Фитомасса ц/га
Горная пустыня	-	90-100	-13,5...-14,5	-30...-30,5	2,5...4,5	<50
Горная тундра	-	90-105	-12	-28...-29	6,5...9,5	около 70
Подгольцово-кустарниковые заросли	450-700	110-125	-12...-14	-31...-37,5	11...13	330-720
Горное редколесье	560-1100	115-140	-11,5...-17	-36...-50	12...15,5	около 1000
Тайга (северная тайга)	650-1200	120-140	-11...-17	-37,5...-50	12...16	400-1000

*по данным [Федоров и др., 1991]

Для каждого типа ландшафта определены характерные единицы растительности, дифференцированные по эколого-фитоценолотическому подходу на сочетания групп растительных ассоциаций. Всего в провинции выделено 9 сочетаний групп растительных ассоциаций (рис. 10). Преимущественно распространены горные тундры лишайниковые и кустарничково-моховые (52,5%), затем идут эпилитные лишайники горных пустынь (17,2%), лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые ерниковые (10,5%), комплексы горноредколесной растительности (8,1%), комплексы горнотундровой растительности (4,4%) кедровый стланик кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховниками и ерниками подгольцово-кустарниковых зарослей (4,1%), лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые (1,9), комплекс северотаежной растительности (1,2%) и менее 1% занимают мари и лиственничные редины моховые. Больше половины территории провинции приходится на горнотундровые мерзлотные ландшафты. Горноредколесными и северотаежными ландшафтами покрыто меньше 35% территории провинции.



Рис. 10. Мерзлотно-ландшафтная карта Орулганской среднегорной провинции
[Мерзлотно-ландшафтная карта..., 2018]

Интразональные мерзлотные ландшафты образуются в долинах рек, где растительность представлена обособленными группами гомогенных фитоценозов (лиственничные, тополевые леса, чозениевые и ивовые сообщества) на островах, и в высокой пойме рек с песчаными аллювиальными отложениями (рис. 11). В интразональных ландшафтах в тундре и северной тайге характерно повышение температуры грунтов. Мощность сезонноталого слоя в интразональных северотаежных ландшафтах может достигать 1,8 м [Самсонова и др., 2019]. Для горных редколесий характерны температурные инверсии, когда склоны, прилегающие к речным долинам, имеют более суровые мерзлотные условия, чем участки, расположенные выше по склону.

На территории провинции выделено 11 типов местности: зандровый, ледниково-долинный, ледниковый, межаласный, моренный, низкотеррасовый, приводораздельный скальный, приводораздельный элювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный, делювиально-солифлюкционный, склоновый коллювиальный [Мерзлотно-ландшафтная карта ..., 2018]. Типы местности в основном связаны с геолого-геоморфологическими и криолитологическими особенностями мерзлотных ландшафтов. Провинция практически целиком состоит из склоновых коллювиальных (39,3%),

делювиально-коллювиальных (20,3%) и приводораздельно-скальных привершинных участков хребта (11,7%) типов местности, что отражает альпийский характер рельефа мезозойской складчатости.



Рис. 11. Комплекс долинной горноредколесной растительности р. Тумара. Абсолютная высота 689 м (Фото автора)

Ледниковые и водно-ледниковые отложения формируют моренные (6,4%) и зандровые (1,1%) типы местности, в основном, на восточном склоне хребта. На пологих склонах делювиального смыва и солифлюкции выделяется склоновый делювиально-солифлюкционный (6,6%) тип местности. Низкотеррасовый тип местности (7,8) приурочен к долинам крупных притоков Бытантая (р. Улахан-Саккырыр, Аччыгый-Саккырыр, Хобол) и притоков Лены в предгорьях хребта (р. Соболах-Маян, Ундюлюнг, Дянышка). Большинство рек и речек хребта образуют ледниково-долинный (6,0%) тип местности. Межаласный тип местности указывает на участки со льдистыми отложениями и жилами [Каплина, 2006], которые относятся к высоким террасам горных рек; их присутствие в провинции незначительно (0,4%), как ледникового (0,05%) типа местности с глетчерными льдами современного оледенения.

Мощность криолитозоны хребта, как и всей горной страны, до 400-700 м, что значительно ниже, чем в платформенных территориях Западной и Центральной Якутии. Возрастание мощности, вместе с понижением температуры пород является проявлением высотной поясности при увеличении высоты местности [Федоров, 1989].

Сочетание растительности и типов местности позволяет дифференцировать мерзлотные характеристики, прежде всего льдистость, криогенные процессы, сезонно-талый слой [Васильев, 1982]. Например, в низкотеррасовых типах местности среднельдистыми являются комплексы горноредколесной растительности, сильнольдистыми комплексы северотаежной растительности. В северотаежных ландшафтах на делювиально-коллювиальном склоне температура грунта составляет от -6 до -7 °С, мощность СТС 0,6-0,8 м, в горных тундрах до 9,5°С, мощность СТС 0,4-0,8 м, в лиственничных редколесьях температура грунта варьируется от -4 до -6 °С, мощность СТС 0,6-1,2 м.

2.5. Мерзлотные ландшафты ключевых участков исследования

Для достижения цели исследования пространственной организации мерзлотных ландшафтов хребта Орулган важным является выявление особенностей формирования ландшафтной структуры на самых маленьких таксономических единицах. Такие исследования ставят задачу проведения крупномасштабного ландшафтного картографирования исследованных маршрутными (полевыми) методами участков [Жучкова и Раковская, 2004]. Решение данной задачи дает понимание своеобразия пространственного размещения ландшафтов и становится опорным пунктом изучения пространственной организации в более высоких таксономических единицах. Хребет Орулган является одним из самых труднодоступных мест Республики Саха (Якутия), выезды в летний период затруднены частыми паводками в горных реках при выпадении дождей. На основе физико-географической характеристики хребта Орулган и в рамках доступности района исследования нами определены репрезентативные ключевые участки, где проведены работы по описанию фаций. Ключевые участки исследования и полевых комплексных описаний типологических комплексов определены на восточной части хребта в окрестностях поселка Батагай-Алыта, где проведены полевые работы в осенний, (сентябрь 2018 г) и летний (июль-август 2019) периоды. В оба сезона пройдено два маршрута в низовьях р. Бытантай, озера Булгунняхтах и в месте слияния реки Оспех и Тумара (рис. 12).

Проведенные полевые маршрутные работы позволили охватить практически весь спектр типологических комплексов восточной части хребта от северотаежных комплексов в низовьях р.Бытантай до горнопустынных и горнотундровых комплексов на

верховьях реки Оспех. Во время полевых работ и маршрутных наблюдений были собраны данные по ландшафтной структуре высотной поясности, определены основные виды природопользования в различных типологических комплексах и зафиксированы проявления рельефообразующих (криогенных) процессов.

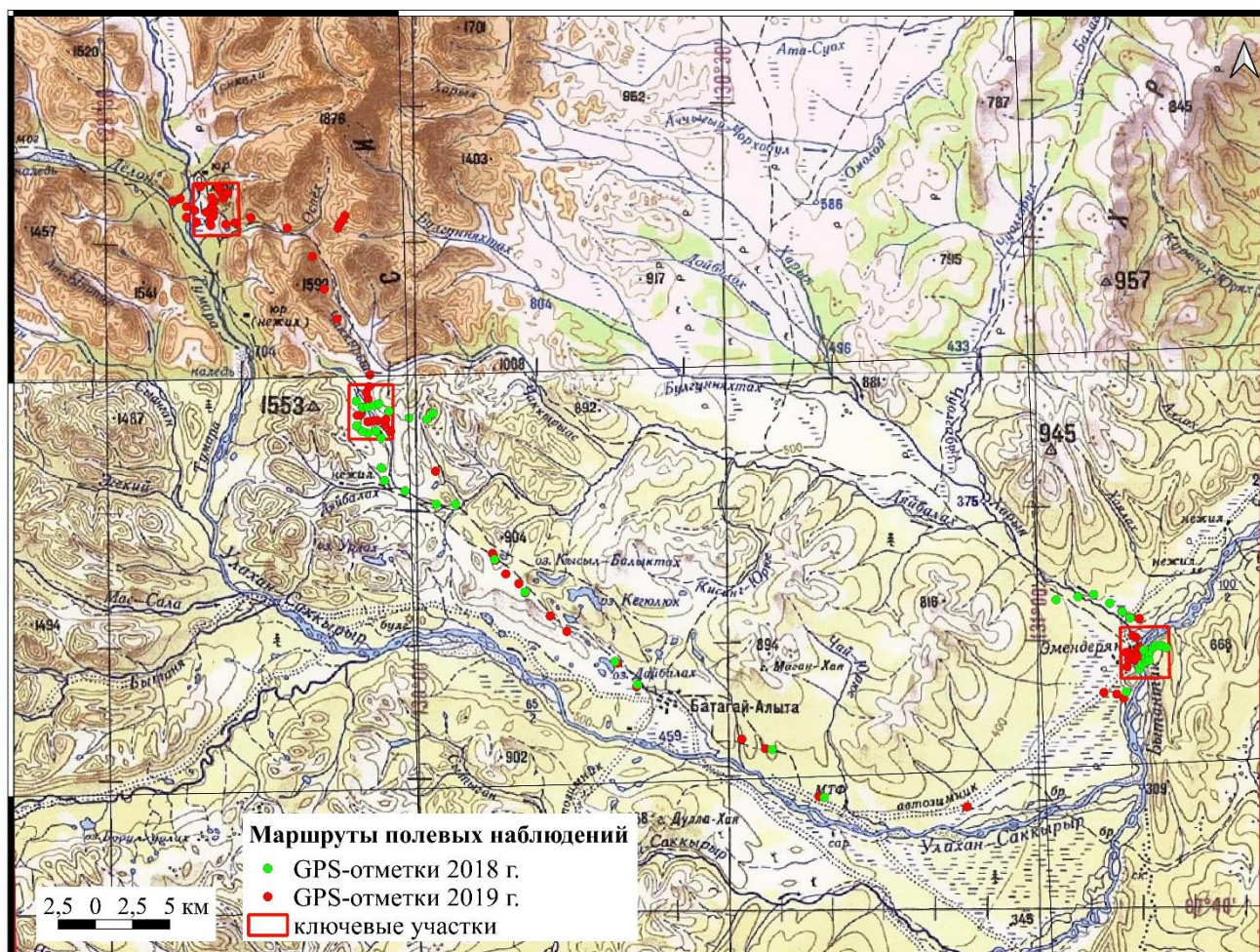


Рис. 12. Карта-схема маршрутов полевых наблюдений района исследования и размещение ключевых участков описания фаций (составлено автором)

Три ключевых участка расположены в горно-ледниковой долине у озера Булгунняхтах, в устьях малых рек Тумара и Оспех и в низовьях р. Бытантай. Выбранные участки затрагивают наиболее разнообразную часть хребта предгорья восточного склона от северотаежных комплексов р. Бытантай до ледниково-долинных и горнотундровых участков на высоте от 700 до 1400 м. Учитывались крутизна и экспозиция склонов, абсолютная высоты по данным GPS-навигатора Garmin Ertex10. При планировании маршрутов использовались космические снимки, топографическая основа в масштабе 1:200 000. Ключевые участки анализа ландшафтной структуры имеют одинаковый размер 3х6,5 км, в них проводились описания фаций. На предварительном этапе подготовки

построены первичные контуры на карта-схеме, по которым были описаны фации (бланк описания включает характеристику рельефа (мезо и микрорельеф), растительные сообщества(фитоценозы) и почвенный профиль (механический состав и тип почвы). Особый упор делался на проявление функциональных связей между смежными фациями (проявление криогенных процессов, переносов в почве). Дальнейшие обработка и уточнение проводились в камеральных условиях. Контуры и собранные полевые данные по фациям были интегрированы в ГИС. Проведены сравнительные работы по анализу различных картографических источников.

Для уточнения предварительных контуров были использованы данные цифровой модели рельефа ASTER GDEM и визуальное дешифрирование по снимкам высокого разрешения CNES геосервиса Яндекс.Карты и Maxar Technologies геосервиса Google Maps, по снимкам на панхроматическом канале спутника «Канопус-В», а также по данным аэрофотосъемок, проведенных нами на квадрокоптере Phantom 3 Advanced. Картографический анализ различных свойств природных компонентов на модельных участках проводился по различным тематическим картам [Мерзлотно-ландшафтная карта ..., 2018; Карта температуры грунтов ..., льдистости поверхностных отложений..., мощности деятельного слоя..., распространения криогенных процессов ..., 2019; Атлас сельского хозяйства ..., 1989; Карта четвертичных образований ..., 2014; Геокриологическая карта СССР, 1996].

Ландшафтные наблюдения и описания фаций по маршруту от поселка Батагай-Алыта по ледниковым долинам малых рек Дьайбалах, Булгунняхтах, Чаккырыас и Оспех позволяют судить о некоторых особенностях пространственного размещения растительности горного редколесья тундры в различных типах местности. Так, склоны долин, которые покрыты горным редколесьем, постепенно с высотой теряют густоту, переходя на нижние части склонов, уступая место кустарничково-мохово-лишайниковой тундре переходей в эпилитно-лишайниковые каменистые пустыни в основных склонах восточной и северо-восточной экспозиции и в мохово-лишайниковые тундры в более плосковершинных склонах западной экспозиции. Растительный покров низинных болот горно-ледниковых долин довольно разнообразен по мере увеличения абсолютных меток и степени увлажненности долины. Для пологих и широких долин характерны разнотравно-злаковые заболоченные луга с повсеместным развитием многолетнего криогенного пучения, который формирует кочковатый и иногда бугорковый

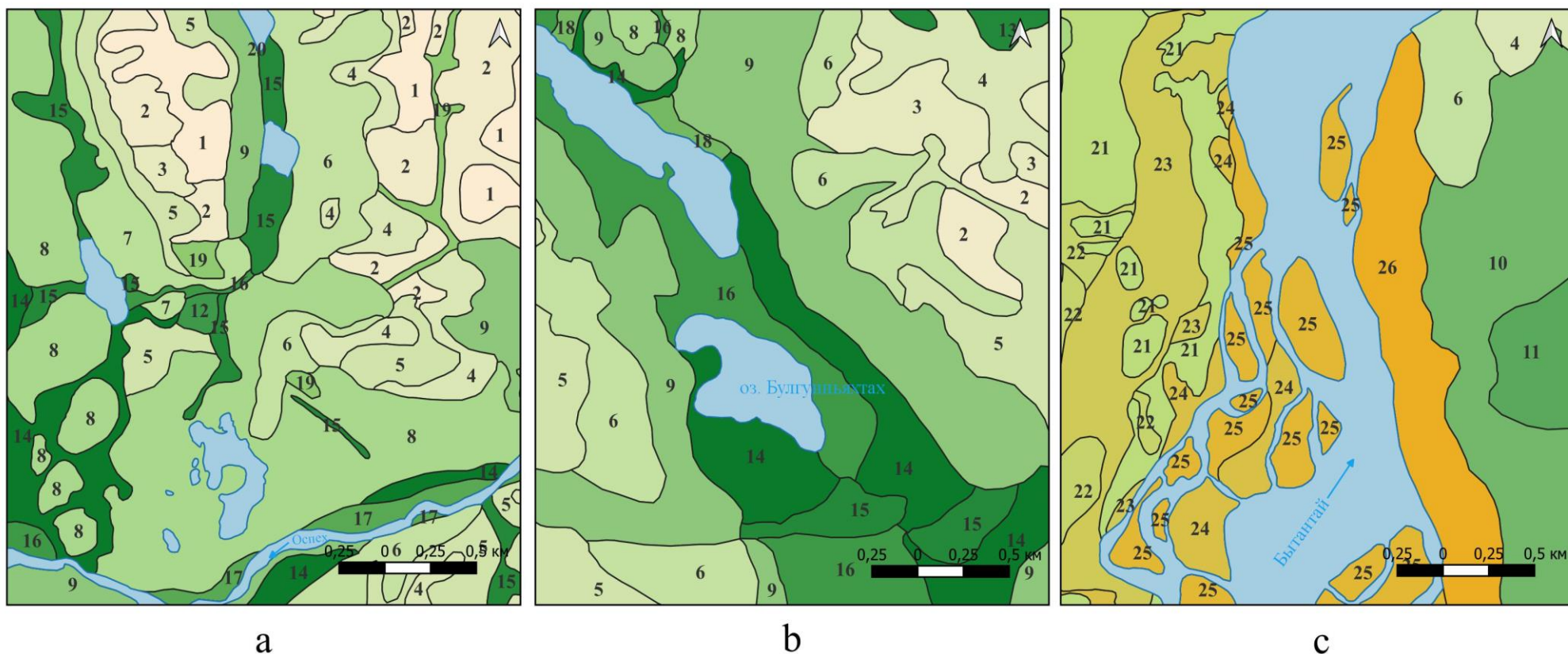
микрорельеф. В узких долинах заметно перераспределение почвенной влаги между приустьевыми и приозерными участками и на полигонально-трещиновато-бугристых участках с увлажненными разнотравно-моховыми понижениями и кустарничково-лишайниковыми буграми. Ерники с осоково-вейниково-хвощовыми травяным ярусом характерны для приустьевых участков. В высокогорных участках с горнотундровыми склонами выделяются два типа долинной растительности: на днищах троговых V-образных долин с минимальным разнотравно-моховыми и разнотравно-злаковыми тундрами, которые также поднимаются, по склонам переходя в горные пустыни и более широкие днища с типичной осоковой и мохово-лишайниковой тундрой, которые также имеют продолжение по склонам, часто доходя до привершинных участков.

Маршрут в низовья р. Бытантай определяет переход от горного редколесья в северные редколесья. По данному маршруту высотная поясность практически не проявляется и склоны и привершинные участки покрыты лиственничными бруснично-багульниковыми редколесьями и лиственничными лишайниковыми редколесьями в привершинных участках. Долины и межгорные котловины заняты разнотравно-злаковыми болотами и заболоченными лугами с формированием термокарстовых озер. В местах сужения, где малые реки имеют постоянный сток с формированием аллювиальных отложений, появляются ивовые сообщества, реже ольховники и чозения. Долина р. Бытантай представлена двумя надпойменными террасами и поймой, занятой ивняками в сочетании с осоково-хвощовыми лугами на пойменных аллювиальных песках. Низкая терраса преимущественно покрыта заболоченными лугами и болотами с торфянистыми и торфяными болотными почвами. На небольших по площади, более возвышенных участках растет ерник, на более обширных участках террасы растут лиственничники голубично-багульниковые в сочетании с ерниками. На средней террасе преобладают лиственничные бруснично-багульниковые и моховые редколесья. Правый склон обрывист, более пологие участки покрыты лиственничным лесом с небольшими участками подгольцово-кустарниковых зарослей из кедрового стланика и ольховника. Далее идет продолжение зандровой водно-ледниковой равнины с лиственничным лишайниковым редколесьем.

Ландшафтное картографирование ключевых участков решено было сделать на уровне типов подурочищ – групп фаций, объединенных одним элементом рельефа, который часто используется для создания крупномасштабных ландшафтных карт при

интеграции материалов в ГИС [Михеев, 1996]. Подурочище не входит в таксономическую классификацию А.Н. Федорова, но при этом выделение подурочищ целесообразно для горных территорий, где геоморфологическое строение является сложным. На основании полевых данных по литологическому составу пород мы можем характеризовать приурочить показатели объемной льдистости [Дроздов, 2004] согласно характеристикам типов местности (слабольшедистые – до 0,2 ед.; среднелёдистые – 0,2-0,4 ед.; сильнелёдистые – 0,4-0,6 и местами до 0,8 ед.) данные взяты с легенды мерзлотно-ландшафтной карты [Федоров, 2020]. Типологическая структура горно-долинных комплексов имеет набор типов местности: приводораздельный-скальный или элювиальный, склоновый коллювиальный и делювиально-коллювиальный, и ледниково-долинный.

По результатам проведенных работ по уточнению контуров, анализу рельефа и тематических карт, 63 описаний фаций была составлена легенда карты ключевых участков, где выделены 26 типов подурочищ, 6 типов ландшафтов (рис. 13). Легенда карты включает сведения о группе растительных ассоциаций далее идет описание криогенного микрорельефа (при его наличии), мезорельефа, и преобладающего типа стратиграфо-генетических комплексов четвертичных отложений, и типа почвы, согласно классификации Е.Г. Еловской (1979) для почв Северной Якутии, и объемная льдистость, привязанная к мезорельефу и растительности, согласно Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия).



Легенда

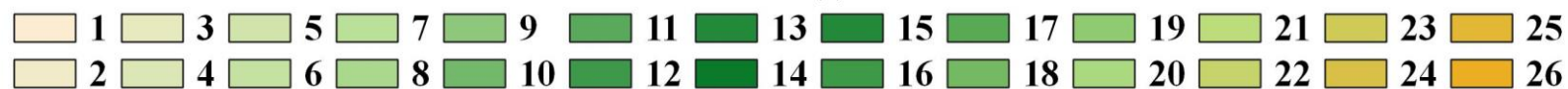


Рис. 13. Подурочища ключевых участков на восточном склоне хребта Орулган: а) р.Оспех; б) оз. Булгунняхтах; в) р. Бытантай (составлено автором).

Легенда к картам ключевых участков представлена в табл. 3.

Типы подурочищ ключевых участков на восточном склоне хребта Орулган

№ на карте	Типы подурочищ	Криогенные процессы
Горные пустыни		
1	Эпилитно-лишайниковые каменистые пустыни средневысотных элювиальных слабодистых водоразделов и моренных холмов с горно-гольцовой почвой	Криогенное выветривание
Горные тундры		
2	Кустарничково-лишайниковые тундры крутых коллювиальных слабодистых склонов с мерзлотными горно-тундровыми подбурами и горно-гольцовыми почвами	Криогенное выветривание, криогенный крип
3	Кустарничково-лишайниковые тундры в сочетании с дриадово-разнотравной тундрой крутых коллювиальных и пологих делювиально-коллювиальных слабодистых склонов с мерзлотными горно-тундровыми подбурами	Криогенное выветривание, криогенный крип
4	Кустарничково-лишайниково-моховые тундры низковысотных элювиальных слабодистых водоразделов и моренных холмов с мерзлотными горно-тундровыми подбурами	Криогенное крип, термоэрозия
5	Кустарничково-дриадовая и разнотравно-злаковая тундра с участием ерников холмисто-грядовых среднелдистых морен с мерзлотной горно-тундровой глеевой почвой	Морозобойное растрескивание
Горные редколесья и редины		
6	Лиственничные кустарничково-зеленомошные редколесья коллювиальных слабодистых склонов (преимущественно западной экспозиции) с мерзлотными подбурами	Морозобойное растрескивание
7	Лиственничные зеленомошные и кустарничково-зеленомошные редколесья делювиально-коллювиальных среднелдистых склонов средней крутизны с мерзлотными подбурами	Морозная сортировка, термокарст, термоэрозия, пучение
8	Лиственничные кустарничково-лишайниковые и зеленомошные редколесья с участием разнотравно-злаковых лугов пологих делювиальных сильнольдистых склонов с мерзлотной северотаежной оподзоленной глееватой почвой	Солифлюкция, морозная сортировка, пучение
9	Лиственничные лишайниковые редколесья и кустарничково-зеленомошные редины в сочетании с ерниками пологих делювиальных сильнольдистых склонов с мерзлотной северотаежно-глеевой	Термокарст, пучение
10	Лиственничные зеленомошно-лишайниковые редколесья и редины зандровых среднелдистых равнин с мерзлотной северотаежной типичной (тиксотропной) почвой	Морозобойное растрескивание, пучение

№ на карте	Типы подурочищ	Криогенные процессы
11	Лиственничные кустарничково-лишайниковые и зеленомошные редколесья в сочетании с кедровым стлаником задровых среднелистных равнин с мерзлотной северотаежной типичной(тиксотропной) почвой	Морозная сортировка, термокарст, термоэрозия, пучение
12	Азональные эпилитно-лишайниковые сообщества в комплексе с кустарничково-лишайниковой тундрой в слабодлистных курумах	Криогенное выветривание, криогенный крип
Интразональные горные ландшафты		
13	Лиственничные травяные редколесья в сочетании с ивовыми сообществами на увалистой слабодлистной высокой пойме с мерзлотной северотаежной дерновой почвой	Пучение
14	Осоково-пушицевые болота на слабодренированных среднелистных участках с мерзлотными торфянисто-болотными почвами	морозобойное растрескивание, пучение
15	Злаково-осоковые болота ледниковых среднелистных горных долин с мерзлотной торфянисто-болотной почвой	морозобойное растрескивание, термокарст, пучение
16	Осоково-пушицевые болота и кустарничково-лишайниковые редины бугристо-полигональных ледниковых среднелистных горных долин с мерзлотной торфянисто-болотной почвой	морозобойное растрескивание, термокарст
17	Злаково-осоковые бугристые болота сильнолистных низких террас с мерзлотной торфянисто-болотной почвой	морозобойное растрескивание, пучение
18	Кустарничково-моховые и сфагновые болота бугристых участков ледниковых среднелистных горных долин с мерзлотной торфяной болотной почвой и мерзлотными сапропелями	Пучение
19	Злаково-разнотравный луг с участием дриадово-мохово-лишайниковой тундрой слабодлистных днищ троговых долин с мерзлотной горно-тундровой глееватой почвой	Пучение, термоэрозия
Интразональные северотаежные ландшафты		
20	Лиственничные кустарничково-лишайниковые редколесья в сочетании с ерниками слабодлистной бугристо-западной средневысотной террасы с мерзлотной северотаежной оподзоленной почвой	морозобойное растрескивание, термосуффозия
21	Лиственничные кустарничково-лишайниковые леса сильнолистных увалисто-бугристых низких террас с мерзлотной северотаежной дерново-лесной почвой	морозобойное растрескивание, термосуффозия

№ на карте	Типы подурочищ	Криогенные процессы
22	Злаково-осоковые заболоченные луга в сочетании с ерниками и ивняками бугристо-западных сильнольдистых низких террас с мерзлотной торфянисто-болотной почвой	Термокарст, пучение
23	Осоково-пушицевые и сфагновые болота полигонально-бугристо-западных сильнольдистых низких террас с мерзлотной торфяно-болотной почвой	Термокарст, пучение
24	Лиственничные леса в комплексе с разнотравными лугами увалистой слабольдистой поймы с мерзлотной дерново-глеевой почвой	морозобойное растрескивание
25	Тополево-чозениево-лиственничные леса в комплексе с ивовыми сообществами и хвощово-вейниковыми лугами увалисто-лощинной слабольдистой поймы с мерзлотной пойменной дерновой и аллювиальной почвами	морозобойное растрескивание, термосуффозия
26	Эпилитно-лишайниковые сообщества в комплексе с лиственничными лишайниковыми редколесьями в сочетании с кедровым стлаником обрывистых склонов крупных рек с мерзлотными подбурами	Криогенный крип, морозная сортировка

На всех полевых маршрутах нижние части склонов, приуроченных к ледниковым горным долинам, заняты лиственничными редколесьями, переходящими в горную кустарниковую тундру. Фации лиственничных редколесий приурочены к наименее увлажненным участкам крутых и пологих склонов. В крутых склонах лиственничные редколесья идут вместе с подгольцовыми кустарниковыми зарослями (*Juniperus sibirica*, *Pinus pumila*) на коллювиальные отложения со слабовыраженными криогенными процессами, такими, как, криогенное выветривание. В пространственной организации склонов ледниковых долин прослеживается поясная упорядоченность, внутренняя контрастность связана с накоплением влаги в локальных понижениях криогенного и флювиального происхождения. На пологих склонах с делювиально-коллювиальными отложениями лиственничные редколесья покрыты ерниковыми и бруснично-багульниковыми, реже голубично-бруснично-багульниковыми сообществами. Лиственница невысокая, около 2-2,5 м, с тонким стволом, на крутых склонах более угнетенная. Здесь активно идут процессы мерзлотного пучения, создавая бугристо-западный рельеф, где бугорки заняты кустарничками и лишайниками, а в западинах растут зеленые мхи и багульник. Ниже по склону нижние ярусы редколесья сменяются с кустарничковых на более влаголюбивые разнотравно-злаковые сообщества здесь проявляются мелкобугристые пучения на открытых участках, ерниковое покрытие увеличивается, создавая на некоторых участках фон (рис. 14).



Рис. 14. Проявление высотной поясности на склонах горно-ледниковой долины с разнотравным заболоченным лугом (фото автора)

Далее вниз идут подурочища аккумулятивных днищ горных долин. Активность криогенного фактора увеличивается вместе с увлажнением почвы, криогенные процессы активно участвуют в миграционных процессах химических элементов почвы. В мерзлотных почвах активно идет процесс оглеения, на возвышенных элементах микрорельефа почва оподзолена, но при этом повсеместно испытывает криотурбацию [Петрова, 1974]. Днища горных долин формируют наиболее плодородные мерзлотные торфянисто-глеевые и болотные почвы, куда дополнительно стекают минеральные вещества со склонов вместе с делювиальным наносом. На низинных участках в результате действия термокарста и морозобойного растрескивания формируется бугристо-полигональный термокарстовый рельеф, где на возвышениях образуются типичную кустарничково-лишайниковая тундра, в впадинах же формируются фации осоково-вейниковых заболоченных тундр, которые постепенно переходят на группу фаций низинных болот, приуроченных к приозерным и прирусловым участкам, где криогенные процессы особо не проявляются. Почвы в них переувлажненные с большим содержанием торфа, поэтому поясная упорядоченность, характерная для склонов, сменяется спорадическими фациями заболоченных лугов с бугристо-полигональным микрорельефом и фациями болот с бугорковым микрорельефом. Пространственная

дифференциация по поперечному геоморфологическому строению показано на примере ландшафтного профиля участка оз. Булгунняхтах на рис.15.



Рис. 15. Ландшафтный профиль участка оз. Булгунняхтах (составлено автором)

Лиственничные лишайниковые редколесья получили широкое распространение по зандровым равнинам, чему также способствует морозобойное растрескивание, высушивая почву и концентрируя почвенную влагу в трещинах, где формируется бруснично-багульниково-моховый покров. Для зандровых равнин характерны контраст и упорядоченность вдоль вектора склона, образованные водно-ледниковыми потоками и чередованием лиственничных лишайниковых редколесий и лиственничных кустарничкового моховых и моховых редколесий. Зандровые равнины с водно-ледниковыми отложениями в низких террасах р. Бытантай сменяются заболоченными лугами и торфянистыми болотами с ивняками, карликовой березой, голубикой и княженикой на возвышенных участках и буграх пучения. Северотаежные группы фаций формируются в условиях поймы первой надпойменной террасы р.Бытантай с густыми лиственничными лесами, ивовыми зарослями в комплексе с вейниково-хвощовым лугом на песчаных аллювиальных мерзлотных пойменных почвах. Фации обособленные, различия ярко выражены и часто речные острова представлены одной обширной фацией. На высокой пойме устья притока Харгья на севере модельного участка р.Бытантай формировались тополево-чозениевые роци со слабльдистыми мерзлотными северотаежными дерновыми почвами. Вполне возможно, что тополевая роца, сформированная в устье р. Харгья, которая берет начало в слабонаклоненных участках и примыкает к р. Омолой является реликтом омолойской флоры палеогена. В пойменных лесах криогенные процессы практически неактивны, из-за чего микрорельеф не выражен. Коренной берег р. Бытантай имеет очень крутой скалистый склон, где на привершинных

сухих фациях лиственничных лишайниковых редколесий произрастают кедровый стланик, можжевельник и папоротниковые (*Dryopteris fragrans*). Далее на восток идет продолжение фаций лиственничных лишайниковых редколесий задровых равнин.

Горные редколесья приурочены к склоновым типам местности, реже на водоразделах и в долине. В долинах, переувлажнённых с активным развитием криогенного микрорельефа, происходит перераспределение почвенной влаги с развитием низинных болот (рис. 14). На склонах криогенные процессы проявляются слабо, но на пологих склонах с рединами морозобойное растрескивание приводит к образованию полигонально-трещиноватого микрорельефа, где лиственничные редколесья и редины сочетаются с разнотравными лугами.

Анализируя современную ландшафтную структуру типологических комплексов в модельных участках, можно проследить парадинамическую систему долинно-речной и склоново-водораздельной, объединенных сильными функциональными связями сопредельных типологических комплексов [Мильков, 1966]. Функциональная целостность в горных ландшафтах проявляется вдоль вектора склона [Черных, 2012]. Прежде всего это видно в поверхностном стоке, пересортировке отложений, переносе влаги по склонам, которая также определяет формирование криогенных процессов. Установлено, что основными факторами организации мерзлотных ландшафтов на уровне подурочищ являются гидротермические условия, обусловленные распределением влаги. Экспозиционные отличия проявляются только в разнице высот аналогичных поясных подурочищ. Микрорельеф формируется при доминирующей роли криогенных процессов, проявление которых усиливается при спуске со склонов в долину, чему способствует гравитационный перенос почвенной влаги и высотный температурный градиент. В ледниковых горных долинах отсутствует древесный ярус, на невысоких (до 700 м над уровнем моря) участках присутствует мелкий ивняк, примыкающий к руслам течений.

Обобщая полученные результаты, следует отметить, что в хребте Орулган прослеживается формирование функционально-целостной единицы в рамках определенных участков речного водосборного бассейна. Пространственная организация мерзлотных ландшафтов усложняется чередованием типов местности эрозионно-тектонического, эрозионно-аккумулятивного и ледниково-аккумулятивного происхождения, который исходит из географического развития территории. Криогенный микрорельеф выступает в качестве ведущего фактора пространственной организации на

уровне подурочищ и фаций, определяя упорядоченность и контрастность мерзлотных ландшафтов

2.6. Выводы по главе 2

1. Изучение современной физико-географической характеристики позволяет нам проследить основные рубежи ландшафтообразования хребта Орулган, которые обусловлены динамической системой эндогенных, экзогенных геолого-геоморфологических процессов рельефообразования и колебаниями климатических условий. В таблице 4 нами отмечены основные рубежи ландшафтообразования, определившие современный облик и пространственную организацию мерзлотных ландшафтов исследуемого хребта. Орулганские горы относятся к так называемым «возрожденным» в результате неотектонических движений, начиная с миоценовой эпохи неогенового периода. Безусловно, в формирование современных ландшафтов, большую роль сыграли ландшафтообразующие процессы голоцена и позднего плейстоцена, связанные с мощными горно-долинными оледенениями и климатическим оптимумом голоцена.

Таблица 4

Основные рубежи ландшафтообразования хребта Орулган*

Периоды и эпохи формирования современных ландшафтов	Ландшафтообразующие процессы			Особенности ландшафтообразование хребта Орулган
	Эндогенные процессы (Тектонические движения)	Экзогенные процессы (Колебания климатических условий)	Экзогенные процессы (Морфодинамические процессы)	
Позднемеловая эпоха (100 – 66 млн. лет)	Заключительная фаза мезозойского орогенеза.	В ландшафтообразовании значения не имели.	В ландшафтообразовании значения не имели.	Формирование горно-складчатого сооружения.
Палеогеновый период (66 – 23 млн. лет)	Ослабления проявления тектонических движений.	В ландшафтообразовании значения не имели.	Денудационно-аккумулятивное выравнивание	Пенеplanation рельефа, накопление отложений и формирование поверхностей выравнивания.
Миоценовая эпоха неогенового периода (23 – 5 млн. лет)	Оживления неотектонических движений (сводное поднятие).	В ландшафтообразовании значения не имели.	Флювиальные процессы (речная эрозия).	Начало возрождения горного рельефа хребта, формирование продольных долин рек.

Периоды и эпохи формирования современных ландшафтов	Ландшафтообразующие процессы			Особенности ландшафтообразования хребта Орулган
	Эндогенные процессы (Тектонические движения)	Экзогенные процессы (Колебания климатических условий)	Экзогенные процессы (Морфодинамические процессы)	
Плиоценовая эпоха неогенового периода (5 – 2,5 млн. лет)	Продолжение неотектонических движений (сводное поднятие).	Похолодания климата.	Флювиальные процессы (речная эрозия).	Начало развития тундровых (кустарниково-моховых) ландшафтов, господство лесной (северотаежной) растительности.
Ранняя и средняя плейстоценовая эпохи четвертичного периода (2,5 – 0,12 млн. лет)	Продолжение неотектонических движений (сводное поднятие)..	Чередование оледенений покровного и горно-долинного типа (древнего и самаровского)	Ледниковая обработка и экзарация, образование поперечных троговых долин.	Формирование МПП. И Распространение разнотравно-злаковых тундр и редкостойных лиственничных лесов.
Позднеплейстоценовая эпоха четвертичного периода (120 тыс. – 12 тыс. лет)	Увеличение неравномерности неотектонических движений западного и восточного крыла.	Чередование оледенений (зырянский и сартанский). Мощное горно-долинное оледенение западного склона хребта.	Ледниковая обработка и интенсивная экзарация, углубление троговых и ледниковых долин, аккумуляция моренных и водно-ледниковых отложений на остатках поверхностей выравнивания.	Окончательное становления альпинотипного рельефа хребта. Формирование моренных и зандровых типов местности, преимущественно, на восточном склоне. Максимальное распространение тундровых ландшафтов.
Голоценовая эпоха четвертичного периода (12 тыс. лет – по наст. время)	Современные тектонические движения	Постепенное потепление и увлажнение климата. Климатический оптимум голоцена и последовавшие за ним похолодание.	Развитие склоновых (денудационных) и криогенных процессов. Продолжение речной эрозии.	Формирование современных мерзлотных форм рельефа, вызванной деградацией мерзлоты в климатическом оптимуме. Широкое распространение северотаежных ландшафтов и развитие речных террас.

- Составлено автором по данным: [Атласов, 1938; Колосов, 1947; Сакс, 1953; Стрелков, 1965; Гитерман, 1985; Андреев, 1987; Velichko et al., 1997; Федоров, 2020]

2. Почвенно-растительный покров представлен преобладанием горных дриадовых и кустарничково-лишайниковых тундр на мерзлотных тундровых подбурях. Под редкостойными лиственничными лесами по склонам формируются комплексы северотаяжных мерзлотных почв с ярко выраженной тиксотропностью. По долинам и межгорным котловинам формируются заболоченные луга и болотные тундры с пушицево-осоково-вейниковой и разнотравно-злаковой растительностью на торфянисто-болотных мерзлотных почвах с сильным оглеением.

3. Проведение крупномасштабного картографирования на уровне подурочищ, где могут быть выделены дополнительные мерзлотные характеристики, приуроченные к типам фаций и типам урочищ (объемная льдистость, температура пород и мощность СТС, позволяет определить сильные структурно-функциональные связи в рамках водосборного бассейна, где происходит перераспределение почвенной влаги и формирование выраженного криогенного микрорельефа в зависимости от геолого-геоморфологического строения. Типы подурочищ наиболее ярко отражают контрастность восточного склона хребта, участок устья р. Оспех горы начинает приобретать типичный для хребта альпийский рельеф со скальными водоразделами и троговыми и ледниковыми долинами с каровыми озерами. Озеро Булгунняхтах также расположено в ледниковой корытообразной долине, где водоразделы представлены плоскими вершинами конечных морен. Прослеживается пространственная дифференциация, связанная, прежде всего, с уровнем увлажнения на различных участках горных склонов и днищ, где морозобойное растрескивание и пучение создают бугристо-полигональный микрорельеф. В долинах и на слабодренированных участках низкой террасы выражено формируются криогенные формы микрорельефа с развитием болот и заболоченных лугов. На склонах со значительным уклоном криогенные процессы проявляются слабо, но на пологих склонах с рединами морозобойное растрескивание приводит к образованию полигонально-трещиноватого микрорельефа, где лиственничные редколесья и редины сочетаются с разнотравными лугами.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ ХРЕБТА ОРУЛГАН

3.1. Методика геоинформационного моделирования и составления мерзлотно-ландшафтных карт

Для изучения ландшафтной структуры типологических комплексов на уровне типов урочищ, местностей и классов ландшафтов проводится средне- и мелкомасштабное ландшафтное картографирование [Николаев, 1978] от 1:100 000 до 1:2 000 000 и более. Методическая база ландшафтного картографирования и анализа пространственной организации ландшафтов постоянно совершенствуется различными вариациями применения возможностей ГИС и моделирования в ландшафтной индикации на основе применения алгоритмов машинного обучения и иных технологий построения искусственного интеллекта [Истомина, 2006; Глотов, 2011; Кренке, 2011 и др.]. Система теоретических и практических положений геоинформационного моделирования ландшафта, рассмотренная нами в подглаве 1.3., ставит проблему представления мерзлотных ландшафтов в геоинформационной среде и адаптации моделирования под выявление типологических комплексов мерзлотно-ландшафтного картографирования. Переменные моделирования должны соответствовать критериям выделения мерзлотных ландшафтов. К числу основных методических задач геоинформационного моделирования ландшафта нами отнесены следующие положения:

- разработка и реализация концептуальной модели ландшафта в ГИС среде (концептуальная модель данных) – подразумевается набор теоретических положений моделирования структуры и межкомпонентных взаимосвязей на основе которой определяется набор геопространственных и спутниковых данных;
- формирование прикладных ландшафтных моделей данных, характеризующих особенности ландшафтной структуры типологических комплексов;
- разработка технологических схем реализации ГИС методов обработки пространственных данных для создания моделей мерзлотных ландшафтов и их картографирования.

Теоретическая и методическая база позволяет определить концептуальную модель мерзлотных ландшафтов в ГИС среде, в нашем случае это критерии выделения типов ландшафта, типа местности и типа урочища. Данные критерии были определены для ГИС картографирования, где применялись оверлейные операции между векторными данными рельефа, генетическим комплексом отложений и растительным покровом

[Федоров, 2020; Шестакова, 2015] (табл. 5). Ландшафтно-индикационный подход позволяет на основе выделения двух физиономических индикаторов рельефа и растительности, а также стратиграфо-генетических комплексов отложений определять мерзлотные ландшафты, и, используя разноуровневые сочетания добавлять мерзлотное содержание, что конечно, является результатом анализа и обработки огромного массива полевых данных в различных ландшафтах Якутии.

Таблица 5

Критерии выделения ландшафтов при геоинформационном моделировании*

Типологические комплексы	Растительность	Рельеф	Стратиграфо-генетические комплексы	Пример
Тип (подтип) ландшафта	Сочетание групп растительных ассоциаций	Макрорельеф		Горные редколесья
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 (с температурой пород 2,6...-2,9 °С, мощностью СТС 1,2-1,5 м)

* критерии выделения мерзлотных ландшафтов согласно [Шестакова, 2006; Федоров, 2020;]

Таким образом, разработка методики геоинформационного моделирования требует создания технологической рабочей схемы получения двух переменных – растительности (группы растительных ассоциаций) и рельефа.

Группы растительных ассоциаций не являются типичным объектом классификации изображений и дифференциации при картографировании на основе данных дистанционного зондирования. Отбор растительных ассоциаций осуществляется на принципах доминантного подхода в геоботанической классификации растительности, где группы ассоциации выступают как часть топологического ряда фитоценомеров (территориальный однородный ареал растительности) [Сочава, 1978]. Ассоциации

классифицируются в первую очередь на основе видового состава и диагностических видов (т.е. видов растений, по которым мы можем отличить их от других). Аналогичные подходы также используются за рубежом, например, в США при инвентаризации Лесными сельскохозяйственными службами, согласно которым классы растительных ассоциаций, или «альянс» единица классификации растительности содержит одну или несколько ассоциаций с характерным диапазоном видового состава, условий среды, физиогномики и диагностических видов, один из которых обычно расположен в самом верхнем или преобладающем ярусе растительности [Jennings et al, 2009; Brewer et al., 2015].

На типологическом уровне мы исходим из того, что группы растительных ассоциаций различаются по сезонной фотосинтетической активности в вегетационный бесснежный период с июня по сентябрь для исследуемого региона [Пузаченко и Черненко, 2016], что позволяет выделить картируемые единицы на основе временного ряда данных дистанционного зондирования, обогащая исходный набор данных информацией об особенностях сезонных колебаний биомассы различных растительных сообществ. Попиксельная классификация временного ряда снимков производится несколькими алгоритмами машинного обучения для отбора наиболее приемлемой точности пространственной дифференциации растительного покрова.

Для определения геолого-геоморфологических переменных моделирования используется ЦМР. Нами применен метод классификации форм рельефа по алгоритму Дженнеса [Jenness, 2005; Tagil et al., 2008] на основе индекса топографической позиции, крутизны склонов и абсолютной высоты. На основе полученных данных по рельефу и растительности производится классификация растительности для отсеивания речного галечника, курумов от горных каменистых пустынь с эпилитными лишайниками. Для мерзлотно-ландшафтного картографирования полученные растровые модели после процедуры удаления шумов (отсеивания) преобразуются в векторный формат и через оверлейные операции [Шестакова, 2006] производятся определение мерзлотных характеристик и классификация типов урочищ (группа растительных ассоциаций + тип местности).

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 группами растительных ассоциаций главного физиономического индикатора дифференциации мерзлотных ландшафтов. При этом важно отметить, что в зависимости от сложности ландшафтной структуры территории, например, наличием аласных ландшафтов или множества сельскохозяйственных полей и в целом равнинного характера исследуемой территории в технологической схеме реализации геоинформационного моделирования могут быть внесены дополнительные стадии обработки, например, объектно-ориентированный анализ изображения, который позволяет сегментировать геометрические образы в спутниковых снимках [Gadal et al., 2019; Zakharov, 2020]. Используемая нами технологическая схема реализации моделирования более подходит для редкостойных лесов, когда в спектральные характеристики попадает информация о нижних ярусах растительных сообществ, позволяя нам выделять группы растительных ассоциаций лиственничных редколесий. Для выполнения данных операций нами использованы инструменты обработки геопространственных данных, модули анализа и полуавтоматической классификации набора растровых моделей и спутниковых изображений в пакетах программного обеспечения QGIS, GRASS GIS и SAGA GIS. Общая технологическая схема геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов горных территорий представлена в рис. 16.

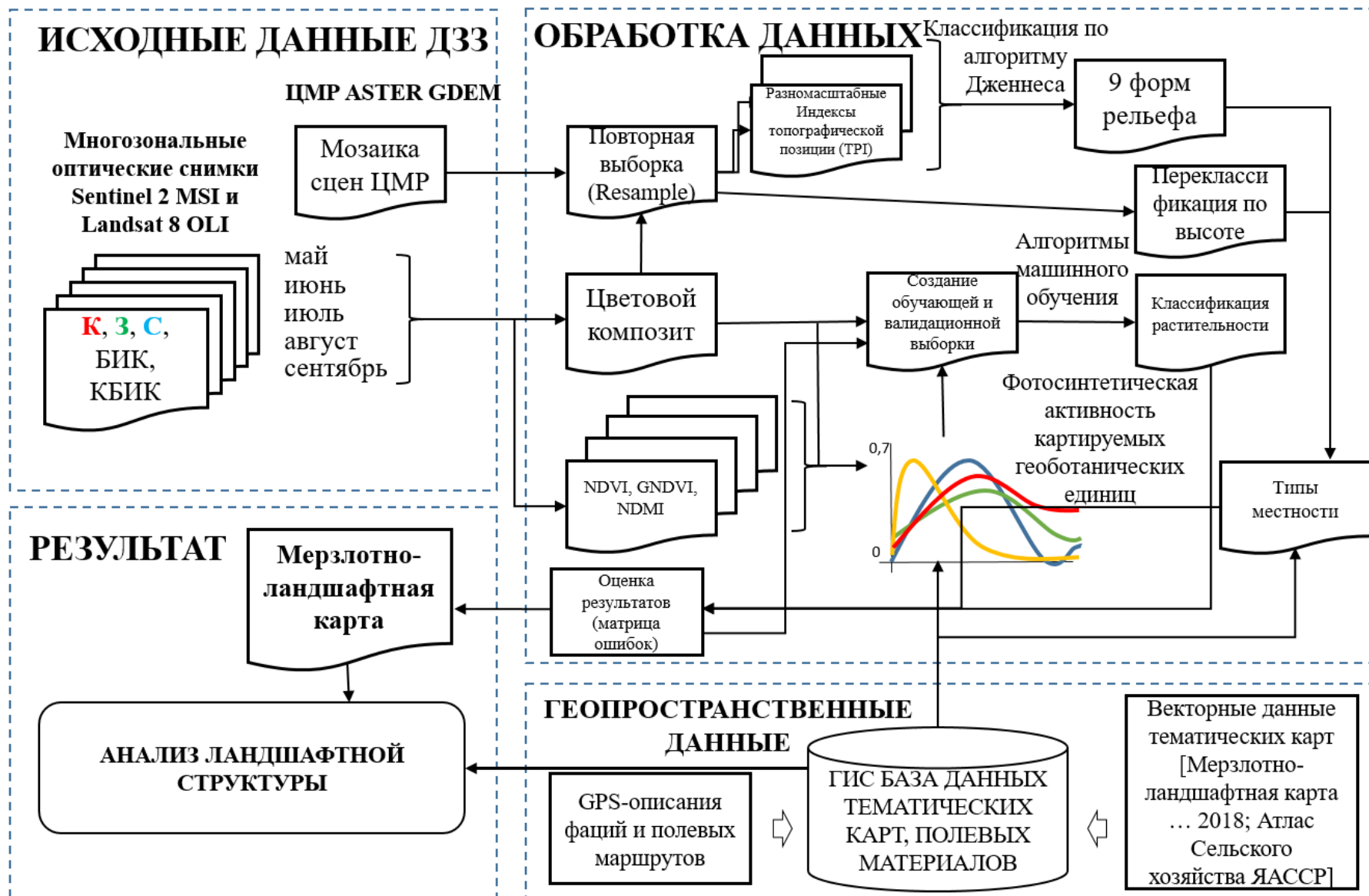


Рис. 16. Общая технологическая схема геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов горных территорий (составлено автором)

QGIS – это настольный ГИС продукт. Главным достоинством QGIS является возможность его бесплатного использования [Congedo, 2014]. 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 проведенных нами исследованиях были использованы спутниковые снимки Landsat 8 OLI и Sentinel 2, характеристики которых приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики каналов Landsat 8 OLI и Sentinel 2 MSI*

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 (3)	630-680	30	Зеленый (3)	543-578	10
4	Красный (К)	630-680	30	Красный (К)	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

* Характеристики спектральных каналов Landsat 8 взяты с сайта Геологической службы США (www.usgs.gov); характеристики спектральных каналов Sentinel 2 взяты с сайта программы «Copernicus» Европейского космического агентства (<https://sentinels.copernicus.eu/>)

** Ближний инфракрасный канал;

*** Коротковолновый инфракрасный канал

В него встроены попиксельные классификаторы: *Minimum Distance (MD)* – алгоритм минимального расстояния вычисляет евклидово расстояние между спектральными сигнатурами пикселей изображения и обучающими спектральными сигнатурами. *Maximum Likelihood (ML)* – Алгоритм вычисляет распределения вероятностей для классов, связанных с теоремой Байеса, оценивая, принадлежность пикселя 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 (SAM)* – отображение спектрального угла вычисляет спектральный угол между спектральными сигнатурами пикселей изображения и обучающими спектральными сигнатурами [Congedo, 2020]. *Support Vector Machine (SVM)* – алгоритм машинного обучения основан на теории статистического обучения и направлены на определение местоположения границ принятия решений, обеспечивающих оптимальное разделение классов [Vapnik, 1995]. *Random Forest (RF)* – 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].

Для использования в классификации унифицированных физических интерпретаций спектральных характеристик мы рассчитали несколько вегетационных индексов, имеющих наряду со спектральными каналами физическую интерпретацию; *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* – один из наиболее часто используемых вегетационных индексов для изучения фотосинтетической активности растительности [Yan et Roy, 2014; Стыценко, 2018] (формула 1). Данный спектральный индекс уменьшает спектральный шум, вызванный определенными условиями освещения, топографическими вариациями или тенями от облаков [Rouse et al., 1973]:

$$NDVI = (БИК - K) / (БИК + K) \quad (1)$$

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) - зеленый нормированный разностный вегетационный индекс [Gitelson, Merzlyak, 1998] (формула 2). Он похож на NDVI, за исключением того, что вместо красного спектра он измеряет зеленый спектр в диапазоне от 0,54 до 0,57 мкм. *Normalized Difference Moisture Index (NDMI)* – 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. Данный показатель используется нами для оценки слабо сомкнутой и угнетенной растительности, например, редкостойной лиственницы или эпилитно-лишайниковых пустынь.

$$GNDVI = (БИК - 3) / (БИК + 3) \quad (2)$$

Normalized Difference Moisture Index (NDMI) – это нормализованный разностный индекс влажности, который использует диапазоны БИК и КБИК для отображения влажности (формула 3). Полоса SWIR отражает изменения в содержании воды в растительности, в то время как на отражательную способность БИК влияют фенологическая фаза растения и содержание сухого вещества, но не содержание воды. Комбинация БИК с КБИК устраняет изменения, вызванные фенологической фазой растения и содержанием сухого вещества, повышая точность определения содержания воды в растительности. В некоторых источниках по данной формуле рассчитывается нормализованный водный индекс, что по сути является одним и тем же, но для изучения ландшафтов более подходит использование в названии именно показателя влажности [Gao, 1996.]:

$$NDMI = (БИК - КБИК) / (БИК + КБИК) \quad (3)$$

Использование комбинаций спектральных индексов с различными каналами снимков расширяет круг спектральной информации в наборе данных для классификации.

Для полуавтоматической классификации форм рельефа могут быть использованы цифровые модели рельефа с пространственным разрешением от 30 до 5 м при ландшафтных исследованиях для определения типов мезорельефа. На территорию хребта Орулган в данном диапазоне пространственных разрешений могут быть использованы два различных источника цифровых моделей рельефа, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет ASTER GDEM и ArcticDEM. Данные ArcticDEM, хоть и обладают достаточно хорошим пространственным разрешением, но осложняются наличием множества артефактов и неточностей, связанных с тем, что зачастую для сцены ЦМР берутся не отметки абсолютной высоты, а проводится по верхушкам деревьев. Для

геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов мы нашли наиболее приемлемым данные Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM). Цифровая модель рельефа находится в свободном доступе для скачивания на геопортале NASA – <https://earthdata.nasa.gov/>. Продукт ASTER GDEM является совместной разработкой Министерства экономики, торговли и промышленности Японии и Национального агентства по авионавигации и космонавтике США (NASA). ASTER GDEM последней, 3-й версии поддерживает формат GeoTIFF и ту же сетку, и структуру листов, что и в предыдущих версиях, с 30-метровым пространственным разрешением. Для проведения полуавтоматической классификации форм рельефа были рассчитаны индексы топографического положения (TPI) (формула 4):

$$TPI = E - \sum_{n-1} E_m/n, \quad (4)$$

где TPI – разница между высотой в ячейке ЦМР и средней высотой в окрестности, окружающей эту ячейку [Weiss, 2001]. Алгоритм TPI сравнивает высоту (E) каждой ячейки в ЦМР 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 TPI, близкие к нулю, являются либо плоскими участками (где наклон близок к нулю), либо областями постоянного наклона (где наклон точки значительно больше нуля). TPI представляет собой упрощение индекса положения форм рельефа [Weiss, 2001]. Значения TPI предоставляют простые и действенные средства для классификации форм рельефа по морфологическим классам [Jenness, 2005].

Значения TPI, рассчитанные из двух размеров соседства, предоставляют больше информации об общей форме рельефа, чем значения TPI из одного района, поэтому более сложные особенности ландшафта могут быть идентифицированы путем объединения сеток TPI, созданных в разных масштабах. Точка на ландшафте с отрицательным значением TPI для малого района и положительным значением TPI 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 TPI для малых окрестностей и

отрицательным значением ТРІ для больших окрестностей, вероятно, представляет собой небольшой холм или гребень в более крупной долине (рис. 17).

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

Рис. 17. Схема классификации основных форм рельефа с использованием индекса топографической позиции [Weiss, 2001].

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.

3.2. Ландшафтная структура района исследования на восточном склоне хребта

Орулган

Геоинформационное моделирование ландшафтной структуры осуществлено на восточном склоне хребта Орулган. Район исследования 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 (рис. 13). На ключевом участке расположен поселок Батагай-Алыта (административный центр Эвено-Бытантайского национального улуса) и ключевые участки наземных исследований на уровне фаций в низовье р.Бытантай и ее притоков Улахан-Саккырыр, Тумара и Харгыя. Общая площадь исследуемого участка – 6000 кв.км. В ее пределах расположен поселок Батагай-Алыта. Согласно Мерзлотно-ландшафтной карте (2018) там выделяется пять типов ландшафтов: горная пустыня, горная тундра, горное редколесье, интразональные северотаежные и интразональные горные. Типы местности: приводораздельный-скальный, элювиальный, склоновый-коллювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный, средневысотный террасовый, низкотеррасовый, ледниково-долинный, моренные и зандровые.

Тип местности определен в двух этапах, первый из которых классификация форм рельефа по индексу топографической позиции. ТРІ в размерах 500 и 2500 м показали наиболее удовлетворительный результат. С его помощью определены склоновые типы местности: склоновый коллювиальный (крутые склоны), склоновый делювиально-коллювиальный (пологие склоны и подножия крутых склонов) и приводораздельные-скальные (горные вершины). 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 не был применен и [Глотов, 2013]. Мы разделили на две категории низкотеррасовые (<500 м) и среднетеррасовые (>500 м). Средневысотные эрозионно-аккумулятивные террасы р.Бытантай выделены с помощью визуального анализа перехода зандровых волнистых равнин в моренной равниной,

выделение которых производится путем векторизации слоя сравнительного анализа с цветовым композитом каналов видимого спектра (RGB).

Типы местности, полученные по геоморфометрическому ГИС-анализу, выявил и значительную дифференциацию склоновых типов местности (рис. 18). Наиболее распространенными типами местности являются склоны средней крутизны, пологие склоны и подножия крутых склонов с делювиально-коллювиальными отложениями. Участок характеризуется сильной расчлененностью горного хребта и наличием множества узких V-образных троговых долин и меридиональным характером смены типов местности, горносклоновые типы местности сменяются моренно-зандровыми равнинами вплоть до низкотеррасовой долинной местности с аллювиальными отложениями.

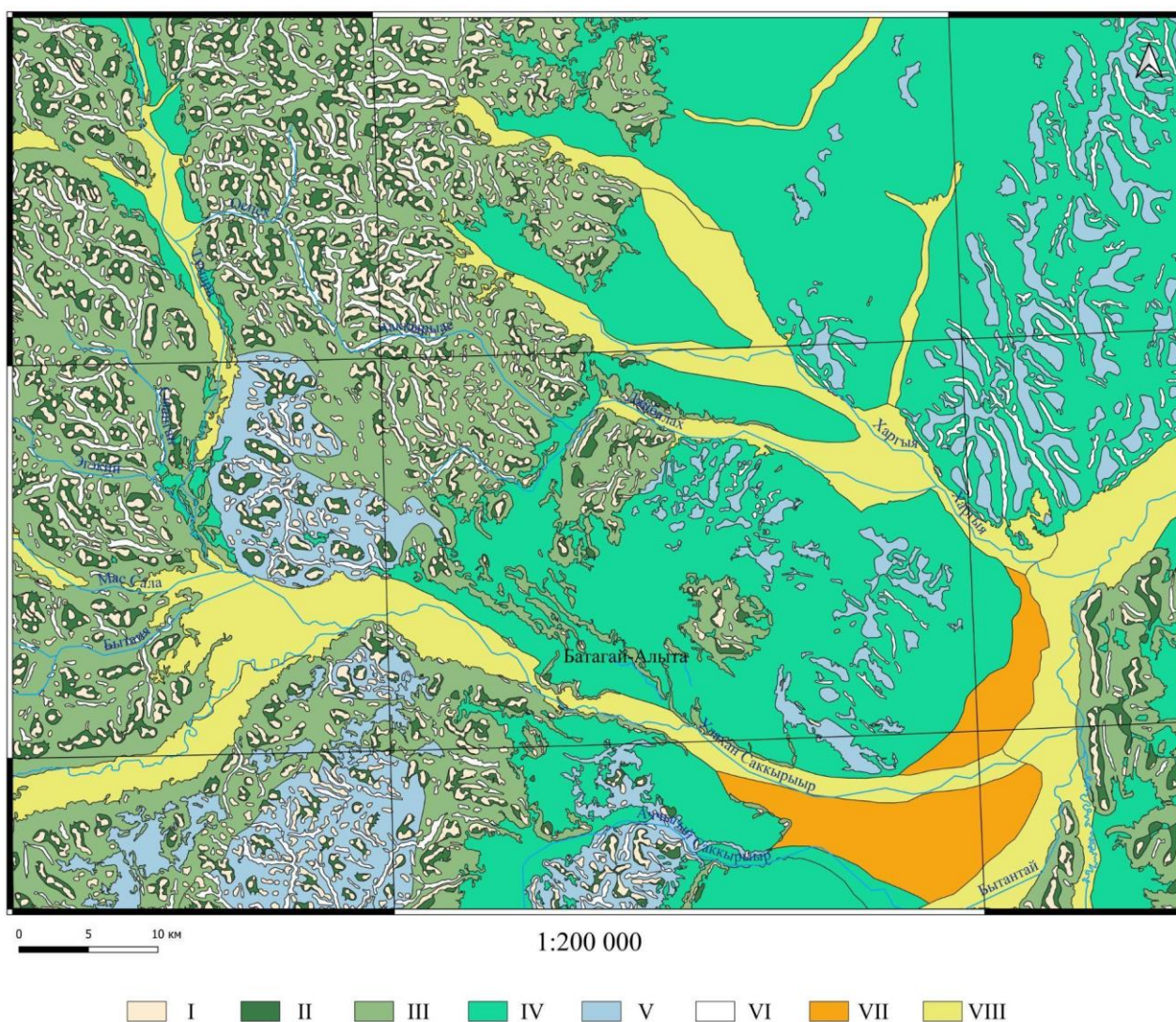


Рис. 18. Типы местности района исследования на восточном склоне хребта Орулган (составлен автором): *Типы местности: I – приводораздельные-скальные; II – склоновые коллювиальные; III*

– склоновые делювиально-коллювиальные; IV – зандровые; V – моренные; VI – ледниковые долины; VII – средневысотные террасы; VIII – низкотеррасовые;

Мы выбрали временные ряды изображений с нулевым или близким к нулю (<10%) облачным покрытием, сделанные в период с июня по сентябрь 2017-2019 гг. Для изображений Sentinel 2 произведена операция изменения пространственного разрешения по снимкам Landsat (30 м) через инструмент Resample. Набор снимков проходит процедуру радиометрической калибровки и атмосферной коррекции по данным DOS1. Далее для спутниковых снимков были рассчитаны спектральные индексы.

Растительный покров характеризуется отсутствием вечнозеленого древесного яруса и преобладанием редкостойных лиственничных лесов для обоих участков. Лиственничные редколесья в зависимости от состава нижних ярусов имеют существенные отличия в биомассе, выраженной в значении индексов. Наибольшими значениями вегетационных спектральных индексов характеризуются две группы растительных ассоциаций – лиственничные кустарничково-лишайниковые редколесья в сочетании с кедровым стлаником на склонах и долинные ивово-ольховниковые сообщества с участками лиственничных, чозениевых и тополевых лесов. 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 спектральных индексов позволяют нам выделить кустарничково-моховые и лишайниковые тундры от разнотравно-дриадовой тундры. Разнотравно-дриадовые тундры моренных и зандровых равнин находятся близко к лиственничным редколесьям лишайниковым по значениям спектральных индексов.

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, ивняков и тополя, конец цветения которых приходится раньше, чем у лиственничного леса. Данный процесс выражается низкими значениями NDVI в сентябре и ростом значения GNDVI и NDMI в этот же период времени, так как второй индекс увеличивается при деградации зеленой массы растительного покрова и увеличении увлажнения почв.

Точность классификации оценивалась с использованием средней общей точности (ОА), коэффициента каппа. ОА определяет эффективность алгоритма и измеряется путем деления общего количества правильно классифицированных выборок на общее количество обучающих выборок. Лучший результат общей точности 79,7% (рис. 19) достигнут при параметрическом классификаторе по алгоритму RF (табл. 7).

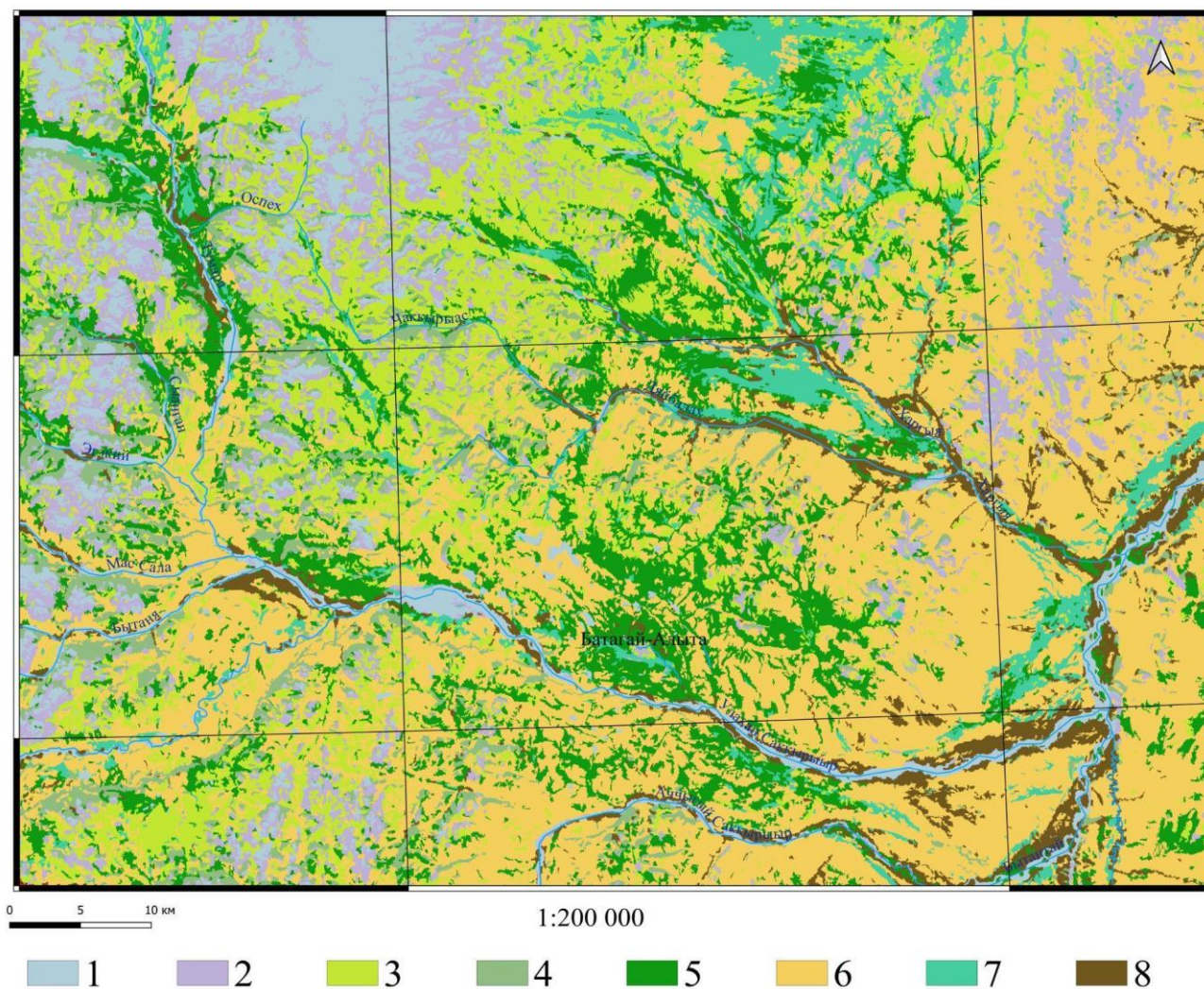


Рис. 19. Результат попиксельной классификации временного ряда спутниковых снимков (составлен автором): 1 – эпилитные лишайники каменистых пустынь и речной галечник; 2 – мохово-лишайниковая горная тундра; 3 – кустарничково-мохово-лишайниковая тундра и злаково-разнотравная тундра с ерниками; 4 – лиственничные кустарничково-моховые редколесья (преимущественно склонов северной и северо-западной экспозиции); 5 – лиственничные редколесья кустарничково-мохово-лишайниковые и моховые с участием разнотравно-злаковых лугов; 6 – лиственничные редколесья и редины лишайниковые с участием разнотравно-злаковых лугов; 7 – комплексы кустарничково-мохово-разнотравных

болот и разнотравно-злаковых заболоченных лугов; 8 – комплексы долинных лиственничных, тополево-чозениевых лесов с участием ольховниково-ивовых сообществ.

Валидация производится путем генерации случайных точек на исследуемой территории которым создается буфер размером в 20 м. Для буфера определяется группа растительной ассоциации по визуальному дешифрированию снимков высокого разрешения и данных описаний групп ландшафтных фаций и полевых маршрутов наблюдения. Всего создано 387 тренировочных данных и 550 валидационных точек.

Таблица 7

Результаты классификации растительного покрова по различным алгоритмам машинного обучения

Количество тренировочных точек	Количество валидационных точек	Алгоритм обучения	Общая точность (ОА), %
387	550	SVM	54,4
		ML	23,4
		MD	56,4
		RF	79,7

Источник: составлено автором.

Всего по классификации многозональных спутниковых изображений выделены 7 групп растительных ассоциаций: 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.

Путем оверлейного объединения векторных контуров переменных моделирования выведена ландшафтная карта ключевого участка на уровне урочищ (рис. 20), по которому проанализирована ландшафтная структура исследуемой территории. Анализ ландшафтного разнообразия основан на количественном и качественном анализе типологической структуры ландшафтов с использованием полученных результатов карт типов местности и урочищ. Для ключевого участка характерно распределение

ландшафтов в соответствии с высотно-поясными закономерностями, при этом пояс подгольцовых кустарниковых зарослей на исследуемых участках не выражен.

Из типов растительности горноредколесных мерзлотных ландшафтов значительную долю для обоих участков занимают лиственничные редколесья кустарничково зеленомошно-лишайниковые, распространенные преимущественно по склоновым типам местности. 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 в руслах рек.

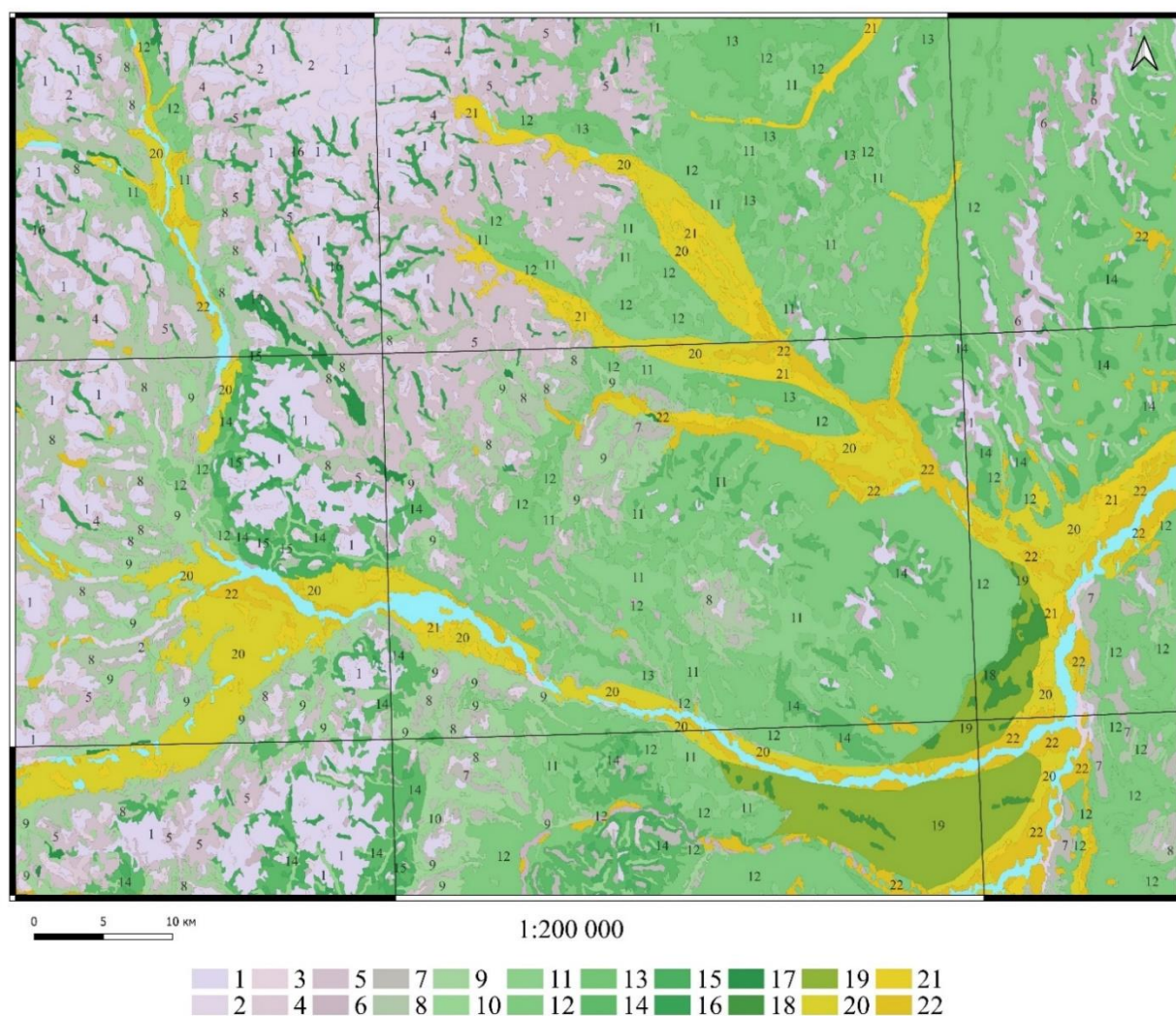


Рис. 20. Типы урочищ района исследования на восточном склоне хребта Орулган (составлено автором)

Условные обозначения

Горные пустыни

1. Скальные вершины с эпилитно-лишайниковой каменистой пустыней (с температурой пород $-11\dots-13$ °С, мощностью СТС 0,5–1,0 м).
2. Крутые склоны коллювиальные с эпилитно-лишайниковой каменистой пустыней (с температурой пород $-11\dots-13$ °С, мощностью СТС 1,0–1,5 м).

Горные тундры

3. Плоские вершины и высокие склоны коллювиально-элювиальные с мохово-лишайниковой тундрой (с температурой пород $-8\dots-11$ °С, мощностью СТС 0,7–2,0 м).
4. Склоны средней крутизны коллювиальные с кустарничково-лишайниково-моховой тундрой (с температурой пород $-8\dots-11$ °С, мощностью СТС 0,7–2,0 м).
5. Пологие склоны делювиально-коллювиальные с разнотравно-дриадовой тундрой в сочетании с кустарничково-мохово-лишайниковой тундрой с ерниками (с температурой пород $-8\dots-11$ °С, мощностью СТС 0,5–1,5 м).
6. Пологие и средней крутизны моренные гряды с разнотравно-дриадовой тундрой в сочетании с кустарничково-мохово-лишайниковой тундрой с ерниками (с температурой пород $-8\dots-11$ °С, мощностью СТС 0,7–2,0 м).

Горные редколесья

7. Пологие склоны делювиально-коллювиальные с листовничным зеленомошно-лишайниковым редколесьем (с температурой пород $-2\dots-6$ °С, мощностью СТС 1,5–2,5 м).
8. Пологие делювиально-коллювиальные склоны с листовничным кустарничково-зеленомошно-лишайниковым и зеленомошным редколесьем с ерниками (с температурой пород $-2\dots-6$ °С, мощностью СТС 1,5–2,5 м).
9. Склоны средней крутизны делювиально-коллювиальные с листовничным кустарничково-зеленомошным редколесьем (с температурой пород $-2\dots-6$ °С, мощностью СТС 2,0-3,0 м).
10. Крутые коллювиальные склоны с листовничным кустарничково-лишайниковым редколесьем (с температурой пород $-2\dots-6$ °С, мощностью СТС 2,0-3,0 м).
11. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с листовничным кустарничково-зеленомошно-лишайниковым и зеленомошным редколесьем с ерниками (с температурой пород $-4\dots-8$ °С, мощностью СТС 0,8–1,4 м).
12. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с листовничным лишайниковым и зеленомошно-лишайниковым редколесьем (с температурой пород $-4\dots-8$ °С, мощностью СТС 0,8–1,4 м).
13. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с марями и листовничными зеленомошными редианами (с температурой пород $-4\dots-8$ °С, мощностью СТС 0,8–1,4 м).
14. Пологие и средней крутизны моренные гряды с листовничным лишайниковым и зеленомошно-лишайниковым редколесьем и рединой (с температурой пород $-0,5\dots-1,5$ °С, мощностью СТС 1,5–2,5 м).
15. Пологие и средней крутизны моренные гряды листовничным кустарничково-зеленомошным-лишайниковым редколесьем (с температурой пород $-4\dots-8$ °С, мощностью СТС 0,8–1,4 м).

Интразональные горные и северотаежные ландшафты

16. Днища троговых долин и ледниково–аккумулятивных горных долин гляциальные со злаково-разнотравный лугом с участием дриадово-мохово-лишайниковой тундры (с температурой пород $-2...-5$ °С, мощностью СТС 0,8–1,4 м).

17. Ледниково–аккумулятивные горные долины гляциальные и аллювиальные с кустарничково-мохово-разнотравными болотами и разнотравно-злаковых заболоченными лугами (с температурой пород $-2...-5$ °С, мощностью СТС 0,6–1,4 м).

18. Средневысотные эрозионно-аккумулятивные террасы аллювиально-морские с листовничным лишайниковым редколесьем с участием разнотравно–злаковых лугов (с температурой пород $-3...-5$ °С, мощностью СТС 0,8–1,2 м).

19. Средневысотные эрозионно-аккумулятивные террасы аллювиальные с разнотравно-злаковыми заболоченными лугами и ерниками (с температурой пород $-3...-5$ °С, мощностью СТС 0,8-1,2 м).

20. Низкие аккумулятивные аллювиальные террасы с листовничным кустарничково-зеленомошным и травяным редколесьем (с температурой пород $-2...-6$ °С, мощностью СТС 0,7-1,2 м).

21. Низкие аккумулятивные террасы аллювиальные с разнотравно-злаковыми заболоченными лугами и ерниками (с температурой пород $-1...-4$ °С, мощностью СТС 0,7–1,2 м).

22. Низкие аккумулятивные террасы аллювиальные с комплексом ольховниково-ивовых сообществ с участием листовничных, чозениевых и тополевых лесов (с температурой пород $-2...-6$ °С, мощностью СТС 0,7–1,2 м).

Горноредколесные ландшафты 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 листовничных редколесий кустарничково зеленомошно-лишайниковых и лишайниковых с рединами. Кроме того, в некоторых участках избыточное увлажнение и недостаточный дренаж, процессы заболачивания приводят к формированию листовничных зеленомошно-сфагновых редин с торфяными болотами. Также, 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. В моренных типах местности наблюдается развитие двух типов урочищ – это эпилитные лишайники и листовничные редколесья, и редины лишайниковые.

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 занимают ивово-ольховниковые сообщества с участками лиственничных, чозениевых и тополевых лесов.

Анализ ландшафтного разнообразия основан на количественном и качественном анализе типологической структуры ландшафтов, в основном с помощью инструментов атрибутивного анализа (калькулятор полей) с использованием полученных результатов в виде карт типов местности и урочищ.

В ландшафтной структуре района исследования преобладает зандровый тип местности (34%), который преимущественно занят лиственничными лишайниковыми и зеленомошно-лишайниковыми редколесьями (26%). В более увлажненных участках со слабым дренажом зандровые равнины заняты марями и лиственничными редидами (3%), которые приурочены больше к бассейну Омоля. Моренный тип местности занимает 9% территории, в котором преобладают лиственничные лишайниковые редколесья (4%) и дриадово-разнотравные горные тундры на вершинах моренных холмов (1%). Зандровые и моренные типы местности приурочены к сильно денудированной части восточного склона, которая слабо подвержена тектоническим поднятиям. Температура ММП варьирует от -4...-8 °С в редколесьях до -8...-11 °С в горной тундре, характерна средняя объемная льдистость. В зандровых равнинах под действием криогенных процессов формируются мелкобугристые формы микрорельефа [Федоров, 2020].

Области сильных тектонических поднятий формируют склоновые коллювиальные (5%) и делювиально-коллювиальные (25%) типы местности, которые занимают среднегорную часть восточного склона с выраженным альпийским рельефом. Скалистые вершины с эпилитно-лишайниковой горной пустыней определены в отдельный тип урочища, который занимает 9% территории. Крутые склоны с коллювиальными отложениями чаще всего заняты горной пустыней (4%) и кустарничково-лишайниково-зеленомошной горной тундрой (1%). Более пологие и обширные склоны с делювиально-коллювиальными отложениями в значительной мере заняты горной тундрой (7%) и горными лиственничными кустарничково-зеленомошными редколесьями (6%). Данный тип местности формируется в нижних частях склонов и полого наклоненных участках, где тектонические поднятия вытеснили ледниковые формы рельефа, но при этом сохранили корытообразные горные долины. Склоновые типы местности более однородны в мерзлотных характеристиках от -2 до -6 °С. Наличие развитого защитного

древесного яруса обуславливает слабое проявление криогенных процессов [Федоров, 2020]. Морозобойные трещины – основная форма криогенного микрорельефа, кроме того, солифлюкция на пологих склонах образует значительные площади нагорных террас, представленных в поясе горных тундр долинами с тундровыми луговинами и элементами дриадово-мохово-лишайниковой горной тундры (2%), а в поясе редколесий – болотами и заболоченными лугами (0,5%). Ледниковые горные долины – сильнольдистые, температура пород $-2 \dots -5$ °С [Федоров, 2020].

Современное развитие ландшафтной структуры связано с образованием обширной долины р. Бытантай и ее притоков Улахан-Саккырыр и Аччыгый-Саккырыр, у которых формируются два типа местности: средневысотные эрозионно–аккумулятивные террасы и низкие аккумулятивные террасы вместе с высокой поймой. Средневысотные террасы занимают 3% района исследования и представлены лиственничным лишайниковым редколесьем с участием лугов (2%) и заболоченными лугами и ерниками (1%). Средневысотные террасы выступают переходной зоной для высотных и интразональных типов мерзлотных ландшафтов. Низкие террасы представлены обширными территориями (12%) долин крупных рек, кроме вышеупомянутых, это р. Тумара, Тала-Сала, Харгыя, Омолрой и др. Наибольшие площади в низкотеррасовых типах местности занимают лиственничные кустарничково-зеленомошные редколесья (6%), чередующиеся с урочищами заболоченных лугов с ерниками (4%). На высокой пойме и на островах рек выделяются комплексы северотаежной растительности, представленные ольховниково-ивовыми сообществами с участием лиственничных, чозениевых и тополевых лесов (2%). Средневысотные террасы, как и задровые равнины, являются слабольшдистыми. Термокарстовый и бугорковатый микрорельеф формируется под увлажненными заболоченными лугами и марями. Температура пород здесь составляет $-3 \dots -5$ °С. Низкие террасы также слабольшдистые, температура пород от $-2 \dots -6$ °С в лиственничных редколесьях и до $-1 \dots -4$ °С под заболоченными лугами [Федоров, 2020]. На низких террасах наиболее выражены криогенные процессы, которые формируют небольшие термокарстовые озера, бугры пучения, а также кочкарные и грядовые формы микрорельефа.

Сложный горный рельеф, отличающийся сильной расчлененностью, обуславливает хорошо выраженную вертикальную поясность. В целом наиболее распространенным высотным типом мерзлотных ландшафтов является горное редколесье

(57% территории), что объясняется предгорным расположением района исследования и значительными площадями ледниково-аккумулятивных равнин; горная тундра занимает 16%, охватывает различные высоты на склонах и плоских вершинах, начиная примерно с 900 м абсолютной высоты. Интразональные горные и северотаежные ландшафты занимают 15%.

В растительности преобладают редкостойные лиственничные леса с постепенным переходом на редины в верхних границах и на переувлажненных участках. Горная тундра непосредственно граничит с редколесьем, подгольцово-кустарниковые заросли не создают отдельный высотный тип. На сухих крутых и покатых склонах надпочвенный покров представлен зелеными мхами и лишайником, реже встречается ерник. Более увлажненные пологие склоны в основном заняты кустарничково-зеленомошными лиственничными редколесьями.

Северотаежные леса занимают долины крупных притоков и низовья р. Бытантай с почти отвесным коренным берегом. Комплекс долинной растительности представлен хорошо обособленными ольховниково-ивовыми сообществами и лиственничными лесами, в которых также встречаются тополь (*Populus suaveolens*), чозения (*Chosenia arbutifolia*) и осина (*Populus tremula*) [Андреев, 1987].

Ведущую роль в ландшафтном разнообразии восточного склона хребта Орулган играет сочетание различных геолого-геоморфологических структур: эрозионно-тектонические (горно-склоновые и скальные типы местности), ледниково-аккумулятивные (моренные и зандровые и ледниково-долинные типы местности) и эрозионно-аккумулятивные современные долины рек (средневысотные террасовые и низкотеррасовые типы местности). Плотность ландшафтных контуров увеличивается в эрозионно-тектонических типах местности (среднегорья и низкогорья Орулгана). Выравненные поверхности с накоплением водно-ледниковых и моренных отложений отличаются большими площадями урочищ.

3.3. Анализ ландшафтной структуры Орулганской среднегорной провинции

Тенденция развития технологий дистанционного зондирования Земли связанное с накоплением огромного массива архивных и оперативных данных мониторинга земной поверхности, требует применения 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 (районов, провинций). 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 г. 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. 21).

```
// 1-июнь=152-182; июль=183-213; август=214-244; сентябрь=245-274;

//june
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 S2_bands = ['B2', 'B3', 'B4', 'B8'];
var S2_bands1 = ['B2', 'B3', 'B4'];
var S2_mosaicJUNE = collectionJUNE.median().select(S2_bands).clip(roi);
var S2_display = {bands: S2_bands1, min: 0.1, max: 2000};
//Map.addLayer(S2_mosaicJUNE, S2_display, "S2_ImageJUNE");
function maskLandsatclouds(image) {
  var qa = image.select('BQA')
  var cloudBitMask = ee.Number(2).pow(4).int()
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0)
  return image.updateMask(mask)
    .select("B.*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}
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)

var mosaic_L8JUNE = L8JUNE.median().clip(roi);
//Map.addLayer(mosaic_L8JUNE, L8vis, "mosaic_L8JUNE")
```

Рис. 21. Фрагмент скрипта запроса снимков Sentinel 2 и Landsat 8 на территорию исследования с фильтрами по летним месяцам и облачности (составлено автором)

Облачные вычислительные платформы, такие 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 гг. и цифровая модель рельефа ArcticDEM. Также рассмотрена динамика растительности по анализу созданных карт растительности по периоду 1982–2020 гг. Данный метод является довольно эффективным для выявления пространственной организации видового состава растительности. 5-летний период позволяет накопить достаточное количество данных дистанционного зондирования Земли для арктических территорий в континентальном климате [Тутубалина и др., 2020].

Распространение больших геоданных и недавний прогресс в облачных вычислениях и услугах обработки больших данных позволяют применять их в ландшафтных исследованиях крупных региональных комплексов. 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, таких, как изменение климата, картографирование почвенно-растительного покрова на больших территориях и мониторинг ландшафта в течение нескольких десятилетий. В этом отношении GEE эффективно может отобразить ландшафтную структуру и ее динамику в пределах физико-географических провинций из больших наборов данных дистанционного зондирования, выходя за рамки ограничений мощностей стационарных компьютеров.

Нами поставлена задача разработать вариацию геоинформационного моделирования для изучения ландшафтной структуры Орулганской среднегорной провинции. Данная задача требует интеграции технологической схемы обработки спутниковых изображений в облачную среду, написания скрипта на языке программирования JavaScript. Имеющиеся в наличии инструменты анализа и классификации могут быть использованы для распознавания растительности,

приуроченной к типам (подтипам) мерзлотных ландшафтов. GEE в настоящее время не позволяет проводить анализ ЦМР по индексу топографической позиции, и классификация форм рельефа для всей провинции может сделать отображения ландшафтной структуры слишком мозаичной и нерепрезентативной. Для всей Орулганской среднегорной провинции нами отобраны разновременные снимки Landsat 8 OLI и Sentinel 2 MSI (рис. 22).

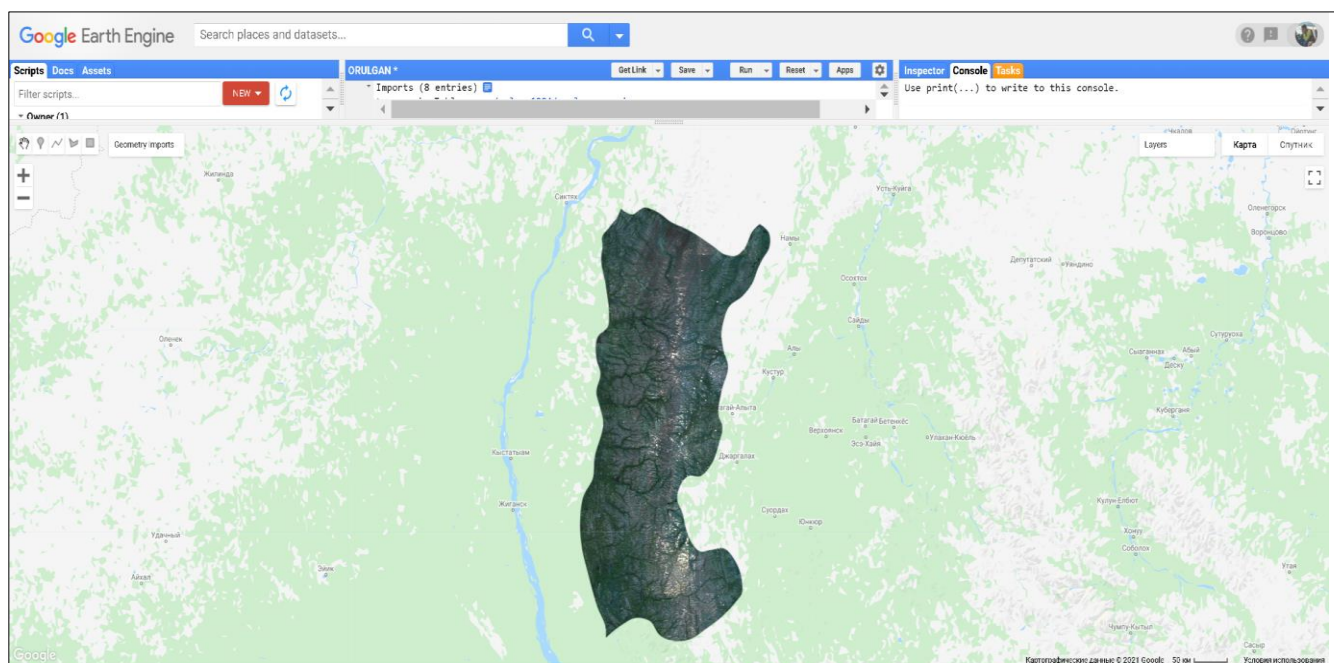


Рис. 22. Мозаика композитов каналов 2, 3, 4 за август спутниковых снимков Sentinel 2 на платформе Google Earth Engine территории Орулганской среднегорной провинции (составлено автором)

Всего в базе данных Google на территории исследования хранится 2888 наборов Sentinel 2 MSI и 1249 наборов Landsat 8 OLI за указанный вегетационный период (Таблица 8). Из всего набора снимков нами отобраны 550 снимков Sentinel 2 и 223 снимка Landsat 8. Больше всего снимков приходится на август. В набор включены все снимки с 2013 г. для Landsat 8 и с 2015 г. для Sentinel 2. Нами использованы возможности маскировки облаков и теней от облаков для снимков с облачностью до 20%.

Так как мы выделяем типы (подтипы) мерзлотных ландшафтов, технологическая схема геоинформационного моделирования приспособлена для определения сочетаний групп растительных ассоциаций, аналогичных мерзлотно–ландшафтной карте [Федоров, 2018].

Таблица 8

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

Источник: составлено автором.

На рис. 23 представлена вариация геоинформационного моделирования на платформе GEE, где есть существенные изменения в части обработки ЦМР, которая необходима как вспомогательный элемент улучшения выделения растительности. Вариации геоинформационного моделирования по такой технологической схеме могут быть использованы и на других таксономических уровнях (типы урочищ). Кроме того, в каталоге GEE хранятся массивы ландшафтно-экологических геопространственных данных (например, Copernicus Global Land Cover, WorldClim, векторные данные подбассейнов HydroSHEDS и особо охраняемые природные территории).

Первый этап состоит из автоматической классификации, для чего были созданы обучающие образцы. Так как выделяемые сочетания групп растительных ассоциаций визуально хорошо различимы на снимках высокого разрешения, мы создали несколько ключевых площадок определения обучающих образцов классифицируемых единиц растительности. 40% созданных точек каждой площадки и класса становятся обучающими, остальные 60% – валидационными. Всего было отобрано 326 образцов для обучения и 465 для валидации по 7 классам. В GEE интегрированы несколько алгоритмов контролируемой классификации и неконтролируемой кластеризации. Нами использованы алгоритмы RF и SVM. Наиболее приемлемый результат достигнут алгоритмом SVM.

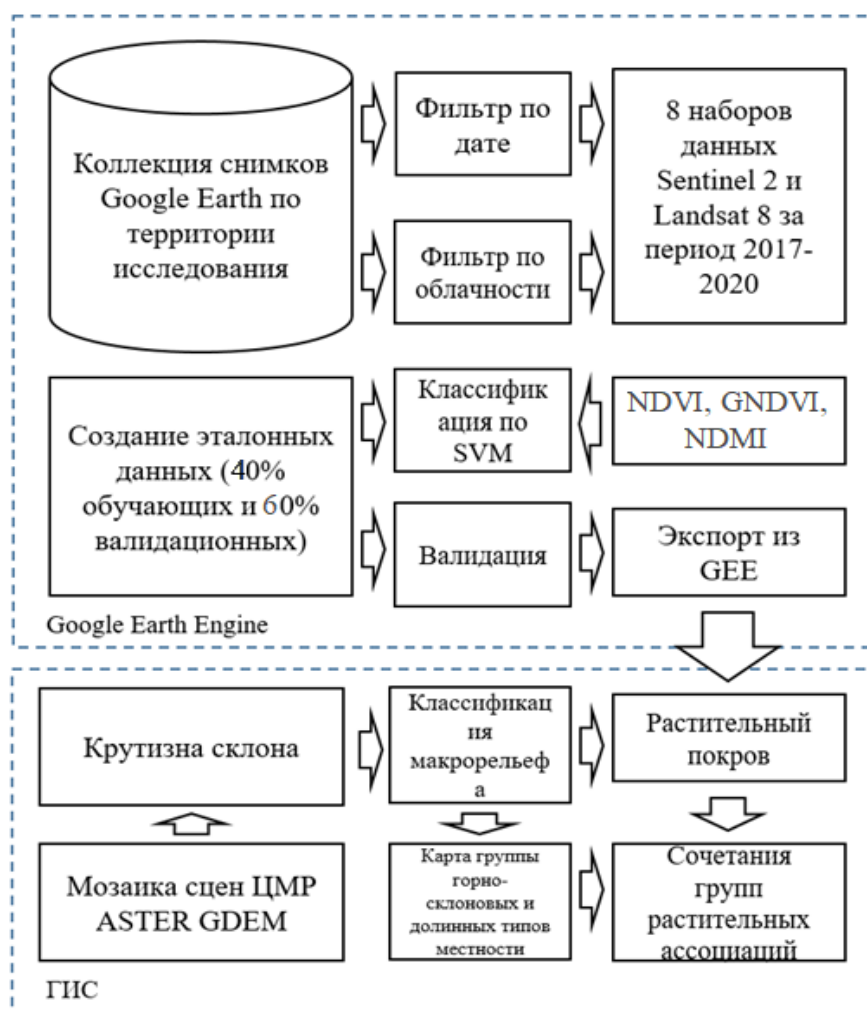


Рис. 23. Вариация геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов с помощью облачной платформы Google Earth Engine (составлена автором)

Результирующие классы отражают сочетания групп растительных ассоциаций по их спектрально-отражательной характеристике и фотосинтетической активности (рис. 24). При этом данный способ приводит к слиянию разнородных типов растительности, таких, как интразональные долинные комплексы, где по сути мы видим сочетание речного галечника и воды, которые имеют схожие характеристики с эпилитно лишайниковыми каменистыми пустынями, и ольховниково-ивовых сообществ с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов для северотаежных и горноредколесных ландшафтов.

Полученный результат имеет эффект «соли и перца», т.е. имеются малые по количеству пикселей участки выделенных классов. Для удаления такого рода шумов на этапе создания карты и стилизации в QGIS мы применили инструмент «Отсеивание» с порогом в 500 м.

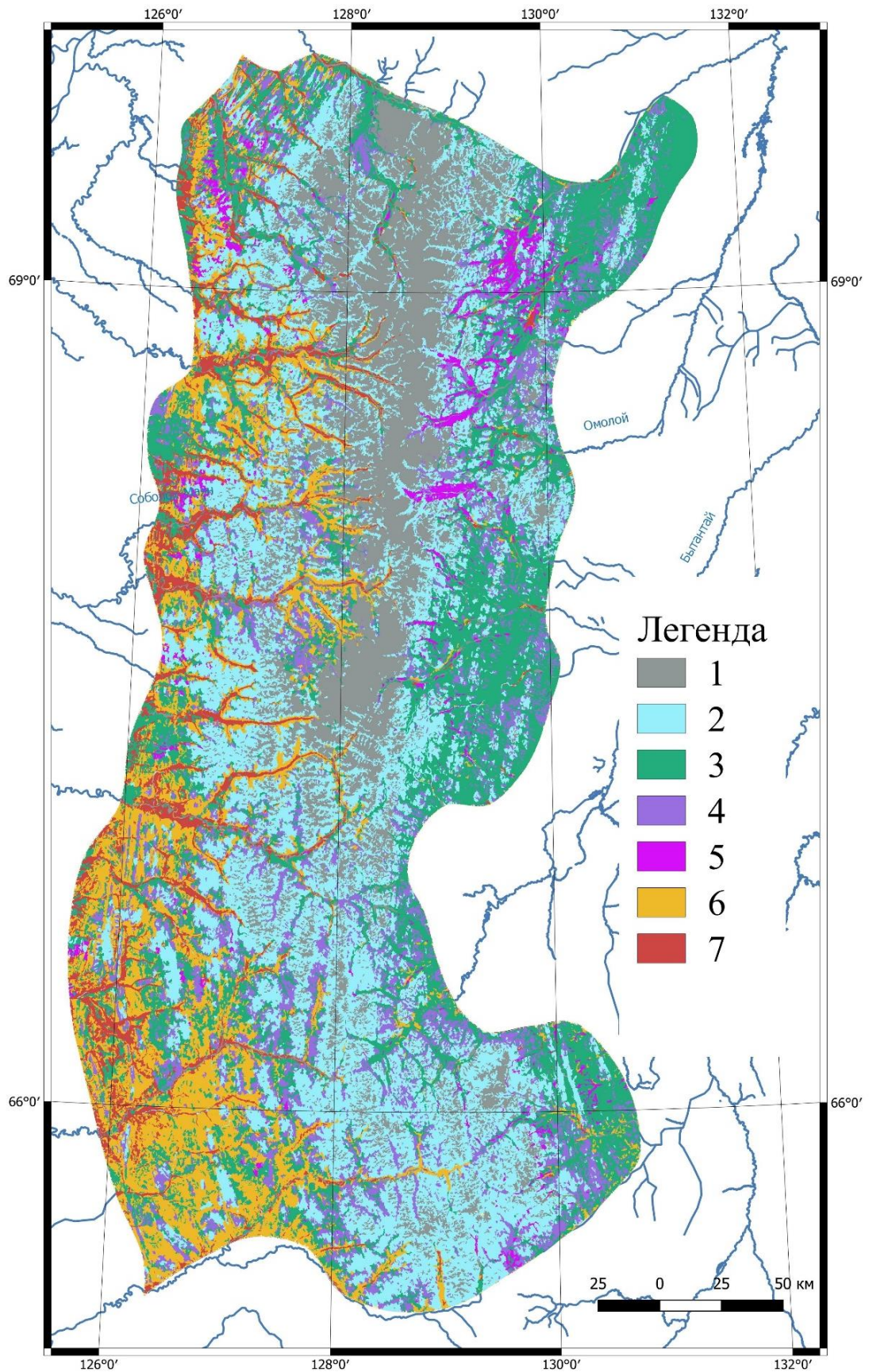


Рис. 24. Растительный покров по классификации снимков в GEE (составлено автором): 1) эпилитно-лишайниковые сообщества, курумы и речной галечник; 2) кустарничково-лишайниковая и дриадово-разнотравная тундра; 3) лиственничные редколесья кустарничково-

лишайниковые и моховые; 4) лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниково-моховые с ерниками; 5) сфагновые болота, мари и лиственничные редины моховые; 6) лиственничные редколесья кустарничково-моховые и кедровые стланики кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховником и ерниками; 7) долинные комплексы ивовых сообществ, лиственничные чозениево-ольховниково-тополевые леса в сочетании с травяными пойменными лугами.

Результат классификации отображает детальную ландшафтную структуру хребта Орулган. Сложная типологическая структура хребта объясняется геологическим строением и сильной разреженностью узкими долинами рек и современными поднятиями западной части хребта, имеющей преимущественное складчатое строение, с выраженным альпийским рельефом. В восточной части ярко прослеживается влияние складчато-глыбового структурного строения предгорий Орулгана. Широтная закономерность также хорошо выдерживается, при этом долины рек создают значительные площади интразональных комплексов, достигающих до самых высоких отметок главного водораздела хребта.

Google Earth Engine позволяет достаточно быстро классифицировать огромные площади исследуемых территорий, при этом точность определяемых объектов сильно зависит не только от качества набора обучающих данных, но и от качества выборки снимков; необходимо удалять снимки, сделанные в вечернее время под низким углом солнца, так как большие площади попадают под тень гор. Как и в случае полуавтоматической классификации спутниковых изображений, для ключевого участка исследования в бассейне р. Бытантай два определяемых класса объединили в несколько сочетаний групп растительных ассоциаций: 1) *эпилитно-лишайниковые сообщества, курумы и речной галечник*; 2) *лиственничные редколесья кустарничково-моховые и кедровые стланики кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховником и ерниками*. Такой результат связан со схожестью спектрально-отражательных свойств земной поверхности у данных сообществ фотосинтетическая активность практически одинакова в течение всего вегетационного периода у эпилитных лишайников и каменистых пустынь значения вегетационные индексов практически не меняются.

Матрица ошибок и оценка точности были рассчитаны с использованием набора валидационных точек для каждого класса (табл. 9). Алгоритм классификации SVM имел высокий ОА – 82,5%. Наиболее точно классифицированными являются лиственничные

редколесья и редины кустарничково-лишайниково-моховые с ерниками, преобладающий класс в горных редколесьях. Большинство неправильно классифицированных пикселей относились к эпилитным лишайникам и кустарничково-лишайниковой и дриадово-разнотравной тундре. Относительно невысокими являются показатели точности определения между лиственничными редколесьями кустарничково-моховыми и кедровыми стланиками кустарничково-лишайниковыми в сочетании с ольховником и ерниками и долинными комплексами ивовых сообществ, лиственничными чозениево-ольховниково-тополевыми лесами в сочетании с травяными пойменными лугами.

Таблица 9

Матрица ошибок классификации растительного покрова классификатором SVM

Сочетание групп растительных ассоциаций	1	2	3	4	5	6	7	Ошибка пользователя
1	68	5	0	2	0	0	0	0,91
2	2	44	0	4	0	0	0	0,88
3	0	0	65	4	1	0	0	0,93
4	5	1	0	68	4	2	0	0,85
5	0	0	0	2	64	3	1	0,91
6	0	0	3	0	0	40	7	0,80
7	0	0	0	1	0	11	58	0,82
Ошибка производителя	0,91	0,88	0,95	0,83	0,93	0,71	0,88	0,82

Источник: составлено автором.

Для извлечения долинных комплексов нами использована мозаика ЦМР ASTER GDEM. Применяя инструмент расчета склона, мы классифицировали ЦМР на территории провинции на 2 класса: 1 – типы местности речных долин и эрозионно-аккумулятивных равнин; 2 – типы местности горных склонов и водоразделов (рис. 25).

Через инструмент калькулятор растра мы объединили значения результата классификации и классификации групп типов местности и после реклассификации отдельно выделили объединившиеся значения; не попавшие в долины пиксели были переклассифицированы, и получены 9 различных значений растра по типам (подтипам) ландшафтов (рис. 26).

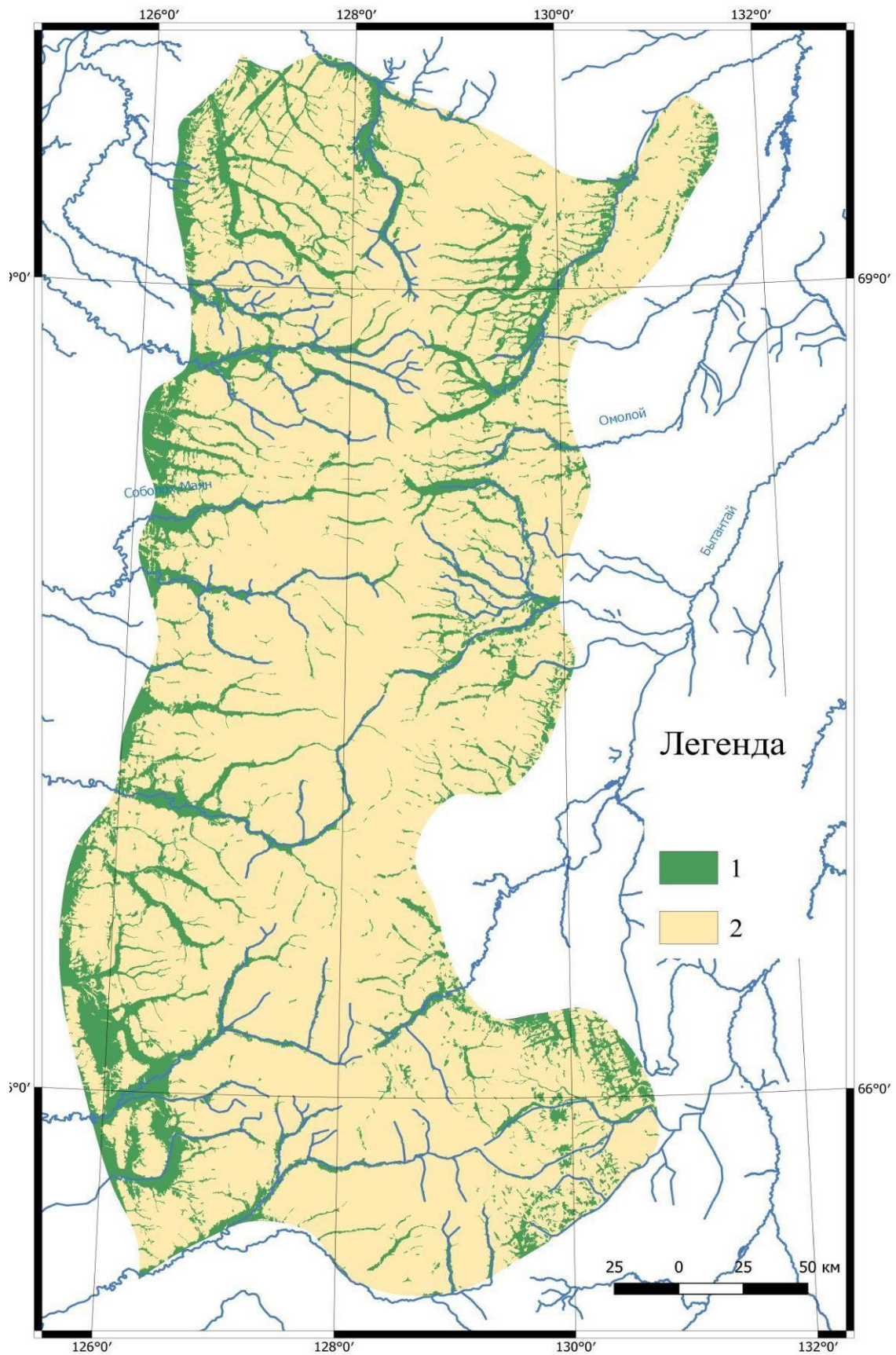


Рис. 25. Классификация рельефа по склону (составлена автором): 1 – типы местности речных долин и эрозионно–аккумулятивных равнин; 2 – типы местности горных склонов и водоразделов

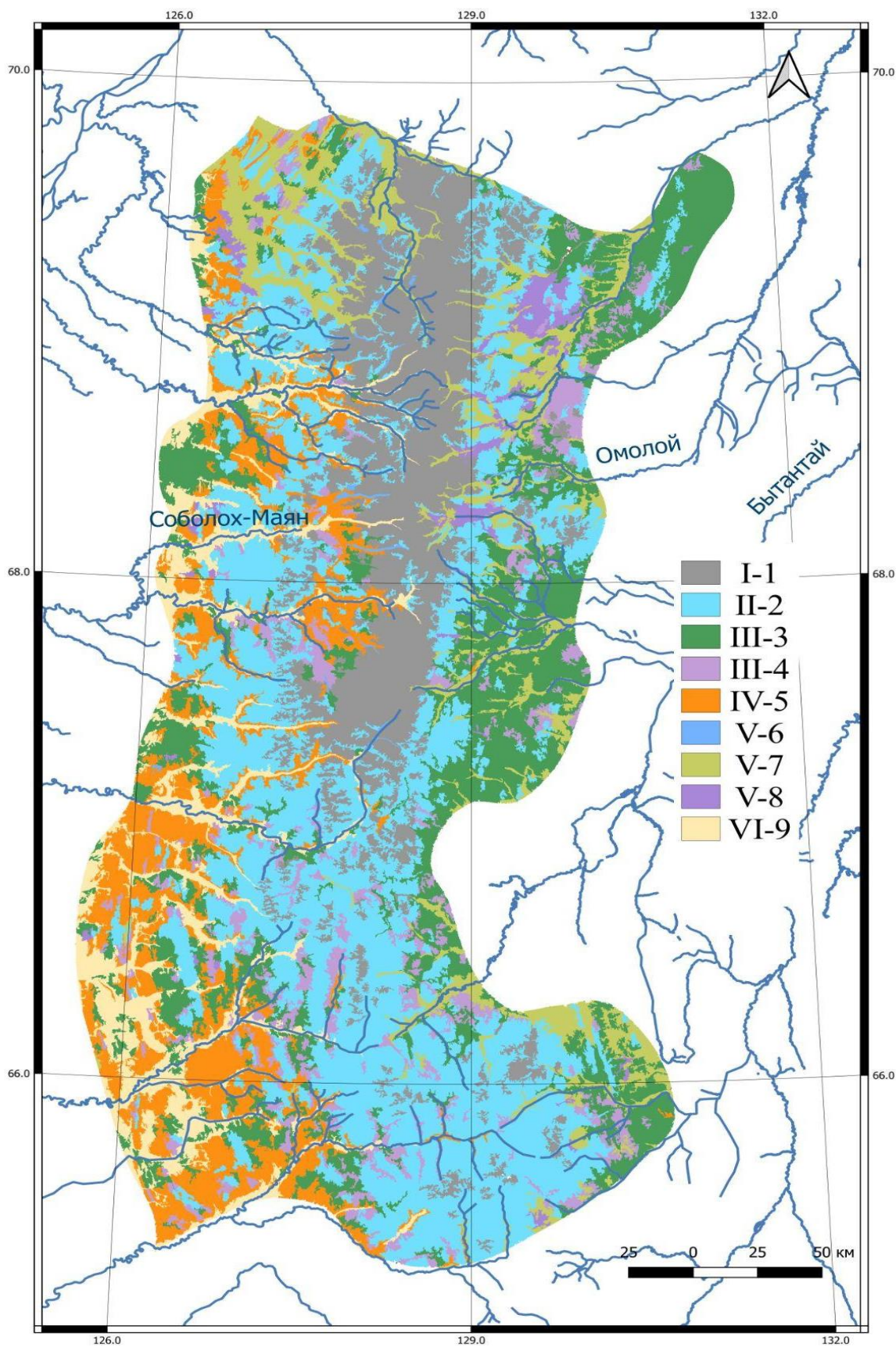


Рис. 27. Типы мерзлотных ландшафтов Орулганской среднегорной провинции
(составлено автором)

Условные обозначения

Типы мерзлотных ландшафтов и сочетания групп растительных ассоциаций

I – Горная пустыня: 1. Эпилитные лишайники;

II – Горная тундра: 2. Тундры кустарничково-лишайниковые и моховые;

III – Горное редколесье: 3. Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниковые и моховые; 4. Лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые;

IV – Подгольцово-кустарниковые заросли: 5. Кедровый стланик кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховником и ерниками;

V – Интразональные горные: 6. Комплекс горнотундровой долинной растительности; 7. Комплекс горноредколесной долинной растительности; 8. Мари и лиственничные редины моховые;

VI – Интразональные северотаежные: 9. Комплекс северотаежной долинной растительности

В Мерзлотно–ландшафтной карте в этой провинции не выделяли мари горнотаежные с лиственничными редины. При ГИС–моделировании хорошо выделено сочетание пушицевых, дриадовых болот и лиственничных сфагновых редин, которые можно объединить в сочетание групп растительных ассоциаций – мари горнотаежные с лиственничными редины. ГИС моделирование не позволили отчетливо выделить подгольцовый пояс, где господствует кедровый стланик, так как он часто смешивается с лиственничными редколесьями. Подгольцово-кустарниковый пояс выделяется только в западной части хребта, что также отмечает Е.Г. Николин (2011), который подвергает сомнению выделение подгольцово-кустарникового пояса в Западном Верхоянье. При этом надо учесть, что в этот класс попадает достаточно много точек, где растительность приурочена к северным редколесьям. Кедровый стланик кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховником и ерниками характерен для склонов южной и западной экспозиции, где возвышенная часть состоит из зарослей кедровых стлаников с постепенным увеличением сомкнутости лиственничников с ольховниками и ерниками при понижении с переходом к долинным комплексам с типичной северной тайгой.

Эпилитно-лишайниковые сообщества каменистых пустынь (включая и не занятые растительностью обнажения горных пород) характерны для 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 подтверждает общую широтную закономерность снижения в направлении к северу долевого участия лесного и подгольцово-кустарникового пояса и увеличения в противовес территорий покрытых горно-тундровой растительностью и сообществами эпилитных лишайников.

Также по результатам классификации мы можем отметить относительное отсутствие контрастности в растительном покрове при их глубокой врезанности в горный хребет. Например, горная река Нёлон, приток реки Лены, берущий начало на хребте Орулган (рис. 28), на всем своем протяжении сохраняет ольховниково-ивовые сообщества с участками лиственничных, тополевых и чозениевых лесов.



Рис. 27. Долина реки Нёлон снимок Sentinel 2 за начало августа RGB в естественных цветах (составлено автором)

Результаты интерпретируются 2 способами для понимания пространственной организации мерзлотных ландшафтов провинции: 1) Анализ ландшафтной структуры для выделения территорий ландшафтных классов и сопоставления с базовой мерзлотно-ландшафтной картой Республики Саха (Якутия) в масштабе 1:1 500 000, так как мы используем ту же классификационную схему. 2) Составление общей схемы высотнотопографического распределения ландшафтов хребта Орулган, позволяющей оценить геоморфологические границы горных мерзлотных ландшафтов.

Статистический анализ типологической структуры ландшафтов позволил определить степень неоднородности хребта. В табл. 10 показаны площади, типы (подтипы) ландшафтов и их сравнение с соответствующими типами растительности на Мерзлотно–ландшафтной карте. Анализ ландшафтной структуры выявил преобладание

горнотундровых и горнопустынных типов ландшафтов 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 увеличилась с 16,5% до 42%, т.е. соотношение между горнотундровыми и горноредколесными ландшафтами практически 1:1 (рис. 29). В процентном соотношении тундра и горная пустыня занимают 27 и 16% территории. Наиболее распространенный зональный ландшафтный класс редколесья занимает 18%. Эти измерители подтверждают целесообразность выделения мерзлотно-ландшафтной провинции как группы горно-тундровых и горноредколесных ландшафтов в сплошном распространении криолитозоны при проведении мерзлотно-ландшафтного районирования.

Таблица 10

Соотношение площадей выделенных сочетаний групп растительных ассоциаций по Мерзлотно–ландшафтной карте и по проведенному геоинформационному моделированию

Растительность	Мерзлотно-ландшафтной карта* Площадь, кв.км.	Ландшафтная структура по ГИС моделированию, Площадь, кв.км.
Эпилитные лишайники	14,307.5	13,395.1
Горные тундры лишайниковые и кустарничково-моховые	43,571.2	22,107.0
Кедровый стланник кустарничково-лишайниковый в сочетании с ольховником и ерниками	3411.9	9327.6
Лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниково-моховые ерниковые	8723.3	14,901.3
Лиственничные редколесья и редины кустарничково-лишайниковые и моховые	1570.4	8399.2
Комплекс горно-тундровой долинной растительности	3670.6	678.3
Комплекс горноредколесной долинной растительности	6684.8	5850.1
Мари и лиственничные редины моховые	Не выделено	1754.9
Комплекс северотаежной долинной растительности	1023.3	5542.5

* [Федоров и др. 2018]

Результаты геоинформационного моделирования позволили уточнить сведения по ландшафтной структуре хребта Орулган, так, установлено значительные площади лесных ландшафтов и интразональных долинных ландшафтов. 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 значимость северотаежной и горноредколесной растительности в пространственной структуре ландшафтов провинции, в особенности в долинных комплексах и на западном склоне хребта.

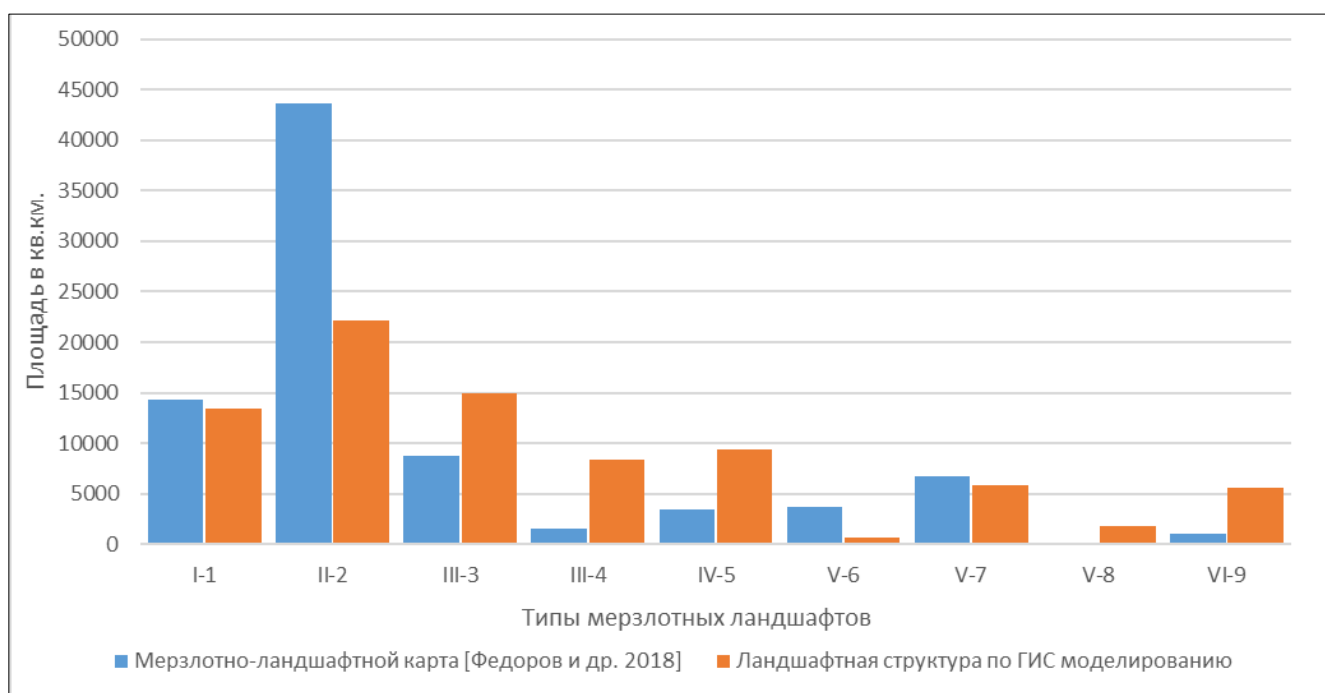


Рис. 28. Соотношение типов мерзлотных ландшафтов и их растительности Орулганской среднегорной провинции (составлено автором)

Анализ структуры многолетнемерзлых горных ландшафтов в региональном масштабе стал возможен благодаря накоплению большого количества данных дистанционного зондирования Земли и развитию платформ облачных вычислений типа GEE. Данным исследованием мы предлагаем новый подход к картографированию горных территорий Северо-Востока Сибири и Арктики в региональном масштабе. Основой для моделирования экологических переменных ландшафтов вечной мерзлоты являются временные ряды изображений Sentinel 2 и Landsat 8 OLI, которые можно успешно объединить в GEE. Интегрированные алгоритмы машинного обучения успешно справляются с картографированием растительности, а интерфейс удобен для

пользователя. При классификации растительности используется гибкий подход к картографированию геоботанических единиц, так как их пространственное распределение в горных районах сильно различается в долинах рек и на склонах.

Созданная карта показывает изменчивость топографических ландшафтов хребта Орулган и ее зависимость от глобального распределения тепла и влияния макросклонов. Полученные статистические данные о структуре ландшафта согласуются с данными ландшафтной карты вечной мерзлоты. Актуализированы сведения о роли распространении бореально-лесных ландшафтов и роли речных систем в проникновении северной тайги в высокогорные районы.

Интенсивность взаимодействия и масштабы перераспределения вещества и энергии между ландшафтами определяют их гипсометрическую изменчивость. Высотная поясность обусловлена температурным и барическим градиентом, деятельностью внутренних факторов, определяющих морфогенетические типы рельефа, величину горизонтального и вертикального расчленения, энергию речных, склоновых и других процессов и, соответственно, особенности растительности. Для анализа ландшафтной структуры хребта Орулган были построены три долготных и три широтных гипсометрических ландшафтных профиля. Они определили высоту различных частей горного сооружения, ярусность и конфигурацию элементов макро- и микрорельефа, т. е. создали основу для формирования высотной поясности.

На рис. 29 показаны продольные профили. Профиль А выполнен на $129^{\circ}16'46,9''$ в. д. в северной части хребта с высотами от 866 до 1459 м. Долины покрыты комплексами горноредколесной растительности, а у подножия крутых склонов проходит узкая полоса пояса кедровых стлаников. Горная тундра начинается на высоте около 1100 м. Профиль В выполнен в центральной части хребта на долготе $127^{\circ}59'15,4''$ в.д., перепад высот от 400 до 1555 м. Северотаежные леса проникают в широкие долины рек. Редколесья на склонах не распространены. Долина сильно углублённая. Подгольцово-кустарниковые заросли занимают узкую полосу в нижней части склонов достигая 1000 м. Узкие интразональные горнотундровые ландшафты формируются в ледниковых долинах.

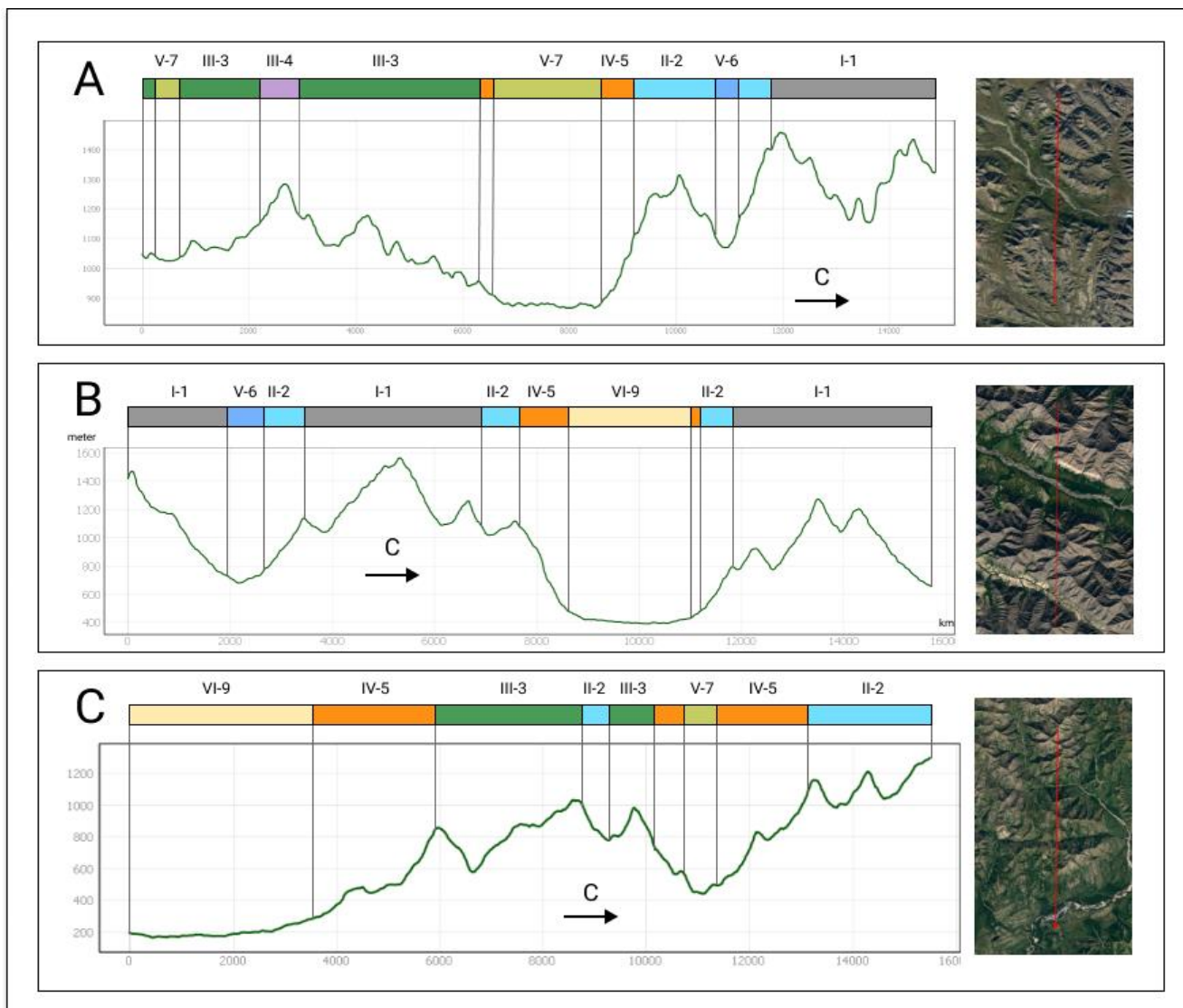


Рис. 29. Гипсометрические ландшафтные профили хребта Орулган по долготам
(составлено автором)

Профиль С выполнен в южной части хребта на долготе $126^{\circ}40'48,6''$ в.д., перепад высот от 189 до 1287 м. На этом профиле отчетливо представлено вертикальное распределение ландшафтов. Ширина долины почти 4 км, и покрыта северотаежными лесами с богатым биоразнообразием. Склоны покрыты редкостойной лиственницей с кедровым стлаником. Склоны долин низкогорий покрыты лиственничными кустарничково-мохово-лишайниковыми редколесьями. Ландшафтная структура гипсометрических профилей отражает «правило предварения» В.В. Алехина. Склоны северной экспозиции покрыты горной тундрой, с непрерывной полосой тундры, начинающейся на высоте около 1000 м. В основном горные тундры покрывают вершины

только невысоких гор или распространены по южным склонам в центральной и северной частях хребта и по северным склонам в более южных частях хребта.

На рис. 30 показаны широтные профили. Профиль D выполнен на широте 69°08'00" с.ш. в диапазоне высот от 497 до 1765 м. На данном ландшафтном профиле отчетливо прослеживается долготная секторность хребта Орулган.

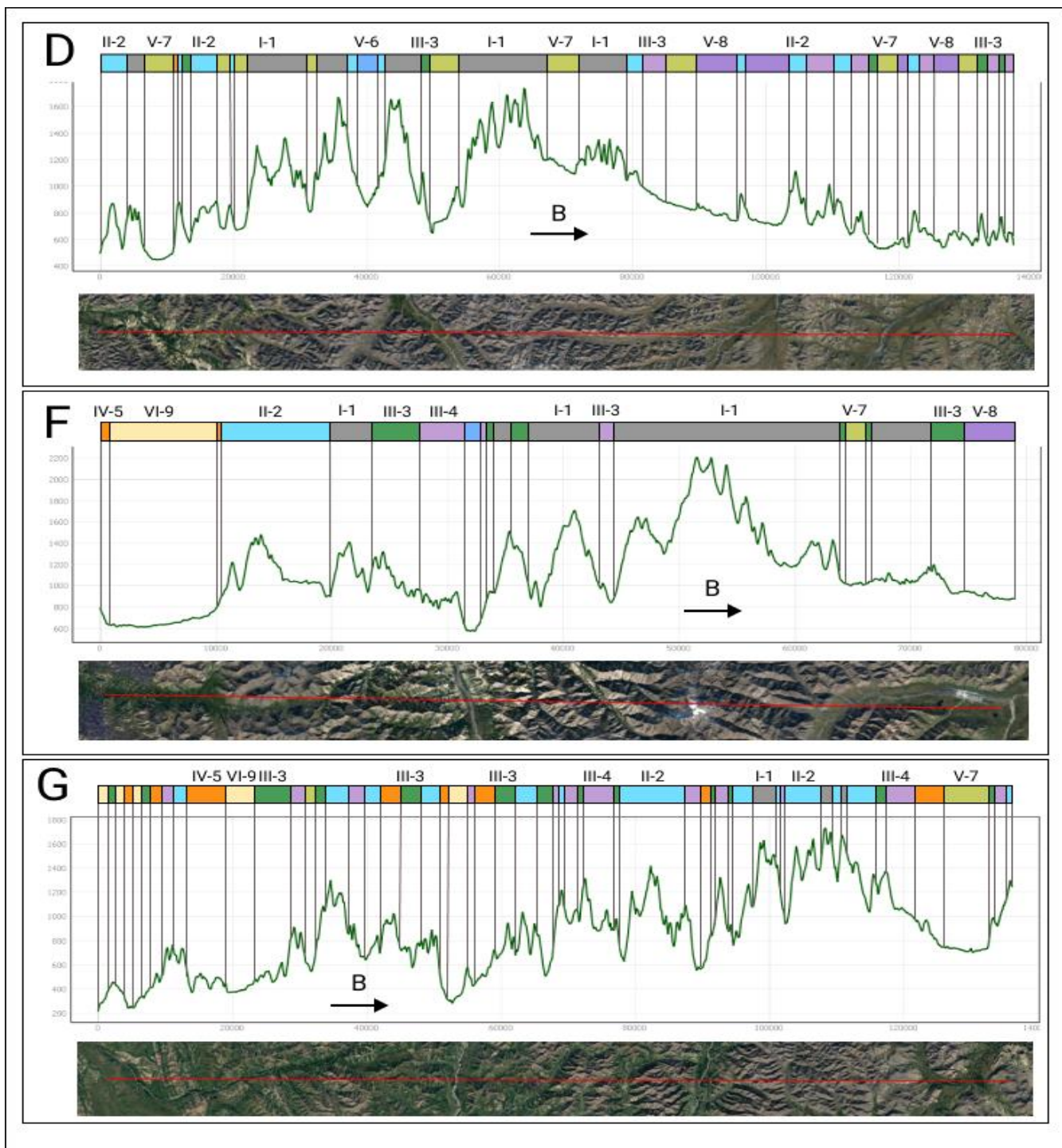


Рис. 30. Гипсометрические ландшафтные профили хребта Орулган по широтам (составлено автором)

Хребет делится на два склона: восточный и западный. Западный склон относится к бассейну р.Лены, восточный – к бассейну рек Яна и Омолой. На пологих склонах лиственничные лишайниковые редколесья, на восточном склоне распространены мари и лиственничные редины моховые. Профиль F выполнен на широте 67°35'01" с.ш. с перепадом высот от 594 до 2211 м. Значительную часть профиля занимают горные пустыни, что объясняется крутымы склонами и центральным расположением. Склоны восточной экспозиции покрыты лиственничным лесом, что говорит о более южном расположении этих склонов. В высокогорных ледниковых и троговых долинах интразональные ландшафты не выражены. Профиль G выполнен на широте 66°19'51,0" с.ш. с высотами от 594 до 2211 м. Мерзлотные ландшафты данного южного профиля очень разнообразны. Здесь представлены практически все типы ландшафтов. Западный склон полным спектром высотно-поясных ландшафтов, восточный склон хребта представлен горным редколесьем и горными тундрами. Горные тундры приурочены преимущественно к крутым склонам и вершинам высотой до 1400 м, затем сменяются горными пустынями.

3.4. Выводы по главе 3

1. Комплексное геоинформационное моделирование состоит из двух практически обособленных технологических циклов обработки данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа. Типологические комплексы мерзлотных ландшафтов выделяют по сочетанию растительность, рельеф и стратиграфо-генетические комплексы, согласно классификации А.Н. Федорова (1989). Современные достижения в области интеллектуализации ГИС позволяют использовать мощности алгоритмов искусственного интеллекта для создания технологической схемы выделения мерзлотных ландшафтов. В итоге проведения моделирования получаются два конечных результата – ландшафтная типологическая структура и растровая основа для мерзлотно-ландшафтного картографирования.

2. Для определения картируемых геоботанических единиц, т.к. группа растительных ассоциаций, наиболее эффективным является создание набора спектральных индексов NDVI, GNDVI и NDMI за вегетационный период для получения информации по ходу фотосинтетической активности. Использование временного ряда спектральных индексов существенно улучшает выделение комплексов долинной растительности и значительно

снижает ошибочность классификации в участках в более сомкнутыми листовенными редколесьями.

3. Использование геоморфометрического ГИС-анализа по индексу топографической позиции для полуавтоматической классификации форм рельефа по алгоритму Дженнеса позволили определить после уточнения распространения четвертичных отложений 8 типов местности и отразить их в мерзлотно-ландшафтной карте ключевого участка в бассейне р. Бытангай. Набор спектральных индексов биомассы и увлажнения временного ряда многозональных спутниковых снимков Landsat 8 OLI и Sentinel 2 MSI позволяет дифференцировать группы растительных ассоциаций и их сочетания при полуавтоматической классификации.

4. Алгоритм Random Forest оказался наиболее эффективным в определении 8 объединений групп растительных ассоциаций, показав общую точность 79,7% по матрице ошибок. При оверлейном объединении слоя типов местности и объединений групп растительных ассоциаций позволяет составить мерзлотно-ландшафтное картографирование на уровне типов урочищ. Всего в пределах ключевого участка выявлено 22 типа урочищ.

5. Получены среднемасштабные мерзлотно-ландшафтные карты на уровне типов местности и типов урочищ окрестностей поселка Батагай-Алыта. Использование геоинформационного моделирования позволило получить детальную ландшафтную структуру района исследования, что позволяет оценить основные свойства пространственной организации восточного склона хребта Орулган.

6. Разработана вариация геоинформационного моделирования с использованием облачной платформы GEE. Одним из весомых преимуществ использования GEE является универсальность выработанного скрипта обработки разновременных многозональных данных дистанционного зондирования Земли, что позволяет с незначительными изменениями и созданием обучающего и валидационного набора данных использовать его в других региональных комплексах, что может внести вклад в механизм внедрения мерзлотно-ландшафтных исследований в принятие решений, планировании и прогнозировании развития территорий.

7. Получены более точные сведения по ландшафтной структуре Орулганской среднегорной провинции на уровне типов (подтипов) ландшафтов. Выявлено более высокое доленое участие в ландшафтном разнообразии провинции горноредколесных

ландшафтов 42%. Широтная зональность ярче всего проявляется в распространении подгольцо-кустарниковых зарослей, представленных кедровым стлаником. Интразональные северотаежные ландшафты приурочены к долинам рек западного склона хребта. В поясе горных пустынь и горных тундр в южной части преобладают горные тундры кустарничково-лишайниковые, в северной части более распространены сообщества эпилитных лишайников.

8. Необходимо отметить, что использование методов геоинформационного моделирования позволило значительно увеличить детальность отражения ландшафтной структуры. Получаемые по данной методике геопространственные данные могут быть использованы в планировочных и оценочных работах в различных отраслях хозяйственной деятельности человека, например, в сельском, лесном хозяйствах, ландшафтно-экологическом и водный мониторинге земельных, лесных и водных ресурсов.

ГЛАВА 4. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ХРЕБТА ОРУЛГАН

4.1. Региональные особенности пространственной организации по главным бассейнам хребта Орулган

Многие ландшафтоведы сходятся во мнении, что основная деятельность по пространственной организации ландшафтов и дифференциация их хозяйственных функций происходит вокруг речных бассейнов и подбассейнов. Кроме того, бассейны рек являются объектами государственного регулирования в рамках бассейновых водных управлений территориальных органов Федерального агентства водных ресурсов межрегионального уровня, в деятельности которого также необходимо учитывать ландшафтную и водохозяйственную структуру водосборных бассейнов. Функционально-структурные связи типологических комплексов в горных условиях наиболее сильно проявляются в рамках водосборных бассейнов, где многие исследователи выделяют формирование бассейновой организации ландшафтов, под которым подразумеваются определенная упорядоченность и целостность ландшафтной структуры в пределах бассейновой структуры [Корытный, 1991; Халатов, 2004; Черных, 2012 и др.].

Специфика ландшафтной структуры горных сооружений во многом определяется гипсометрическим перепадом высот и экспозиционными различиям. Анализ структуры высотной поясности в пределах горных провинций показывает, что в рамках одного типа поясности нередко формируются его географические варианты. Формирование различных вариантов, может быть обусловлено позиционным фактором (не выходящие за рамки инварианта климатические различия на разных склонах хребта), литологией (варианты поясности на гранитных массивах, известняках и т.д.), а также другими факторами. Макросклоны определяемые водосборными бассейнами формируют особые условия ландшафтообразования, определяемые, прежде всего, в мезоклиматических условиях. Учитывая неравномерность интенсивности неотектонических движений для западной и восточной части хребта Орулган, вычленение таких факультативных единиц, как *подпровинции* вполне обоснована.

К главным бассейнам хребта Орулган относятся реки Лена, Омолуй и Яна. Полученная нами ландшафтная структура позволяет оценить ландшафтное разнообразие, как главный элемент специфики пространственной организации ландшафтов. Нами изучены количественные ландшафтно-морфологические показатели по этим бассейнам.

Ввиду значительной разницы размеров бассейнов мы избегаем использования индексов, которые вычисляются по прямой зависимости от площади. К таковым мы относим, например, широко используемый индекс Магарлефа. Всего использовано четыре ландшафтно–морфологических показателя, которые традиционно используются для количественной оценки разнообразия и организации ландшафтов [Плюснин, 2000; Черных, 2001 и др.]. Используя инструменты зональной статистики, геообработки и калькулятора полей, рассчитаны следующие показатели: количество типов ландшафтов (m), количество ландшафтных контуров (n), площади главных бассейнов (S) в кв. км., средняя площадь контуров (S_0) в кв. км. [Николаев, 1979], площади типов ландшафтов (S_m) в кв.км., индекс дробности ландшафтной структуры ($K=n/ S*100$) [Николаев, 1979], энтропийная мера разнообразия Шеннона ($H = -\sum S_m/S*\log(S_m/S)$) [Шеннон, 1963], максимальная энтропия ($H_{max}=\log(m)$), энтропийный показатель упорядоченности ($R=1-H/H_{max}$), длина водотоков по данным HydroSHEDS (L) в км., амплитуда перепада высот (A) в метрах, коэффициент эрозионной расчлененности ($\varepsilon=(1000*\Delta A/L/S)$) [Трофимов, 1965]. Отметим, что использование геоинформационного моделирования значительно увеличивает количество ландшафтных контуров, несмотря на применение процедуры «отсеивания» контуров с малыми размерами. Всего на территории хребта выделено 1353 контура, большая часть которых приходится на бассейн р.Лена (табл. 11).

Таблица 11

Ландшафтно-морфологические показатели бассейнов Орулганской среднегорной провинции

	Площадь бассейна, (кв.км) S	Кол-во типов ландшафтов, m	Кол-во ландшафтных контуров, n	Средняя площадь контуров (кв. км), S_0	Индекс дробности ландшафтной структуры, K	Энтропийная мера разнообразия Шеннона, H	Энтропийный показатель упорядоченности, R	Коэффициент эрозионного расчленения, ε
Бассейн р.Лена	55223	6	934	59.1	1.691	2.411	0.067	1.7
Бассейн р.Омолуй	10296	4	144	71.2	1.399	1.856	0.071	1.0
Бассейн р.Яна	16538	4	275	60.1	1.663	1.808	0.095	1.3

Источник: составлено автором.

Различия сложных показателей ландшафтной структуры бассейна могут быть

обусловлены геолого-геоморфологическими и климатическими различиями. Так как ландшафтное разнообразие в значительной мере зависит от площади [Ганзей, 2014], энтропийная мера разнообразия Шеннона имеет относительно высокий показатель в бассейне р. Лена. Два других бассейна примерно одинаковы по размерам. Бассейн р. Яна имеет наименьшее значение ландшафтного разнообразия, что делает структуру более упорядоченной. По коэффициенту эрозионного расчленения можно предположить различия в эрозионно-тектонических процессах бассейнов. Высокое значение свидетельствует об альпийском характере рельефа, поэтому мы можно сказать, что бассейн Омоя более всех сохранил следы палеогенового и раннеогенового выравнивания.

Различия бассейнов рек Омоя и Яны обусловлены разницей климатических условий. Средняя площадь контуров выше, чем у остальных бассейнов, что коррелируется с низким значениям коэффициента эрозионной расчлененности. Бассейн р. Омоя расположен в северо-восточной части хребта и отличается низким показателем упорядоченности по сравнению с бассейном р. Яна при почти одинаковых значениях индекса разнообразия. Данное различие связано с, относительно, невысоким перепадом высот по сравнению с Янским бассейном и слабовыраженной высотной поясностью ландшафтов. Выявленные различия по сложным индексам разнообразия довольно слабо отражают различия ландшафтных структур хребтов, при этом указывая и подтверждая на исследования по неоднородности геолого-геоморфологического строения хребта. Поэтому для дифференциации нами использованы различия в соотношении и спектре представленности типологических комплексов.

Региональные (подпровинциальные) особенности типов местности проанализированы на основе контуров, определенных в Мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) [Федоров и др. 2018]. Набор типов местности отражает генетические и геолого-геоморфологические различия выделяемых подпровинций. По генетическому признаку типов местности главные бассейны имеют хорошо выраженные различия, обусловленные неоднородностью проявления ведущих ландшафтообразующих литогенных и климатогенных процессов (рис. 31).

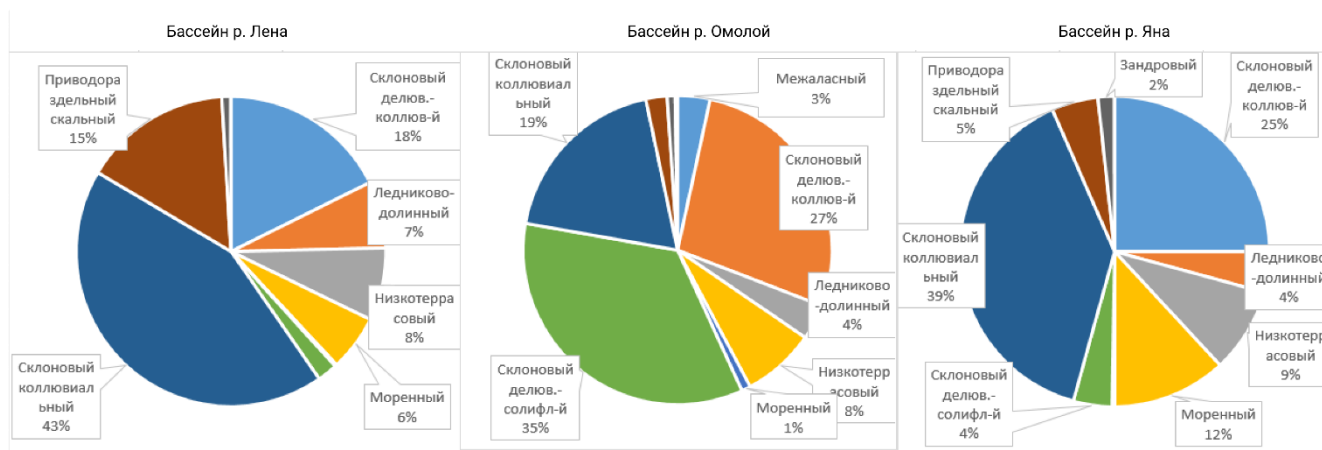


Рис. 31. Соотношение типов местности главных бассейнов Орулганской среднегорной провинции (составлено автором по данным [Федоров и др. 2018])

Самый крупный Ленский бассейн, несмотря на субмеридиональное распространение и высокое значение ландшафтного разнообразия, характеризуется орографической однородностью высокогорных, среднегорных и низкогорных участков. Генетическая однородность проявляется в структуре типов местности. Склоновый коллювиальный, склоновый делювиально-коллювиальный и приводораздельно-скальный типы местности имеют эрозионно-тектоническое происхождение. Альпийский рельеф формируется при глубоком ледниковом расчленении горного хребта, что объясняет относительно высокую долю ледниково-долинного типа местности (8%). Склоновый коллювиальный тип местности преобладает в бассейне р.Лена, занимая 43%. Высокогорные скальные водоразделы с эпилитно-лишайниковыми каменистыми пустынями занимают значительные площади (15%) в бассейне р.Лена. Склоновый делювиально-коллювиальный тип местности является сопутствующим к склоновым коллювиальным, занимая более пологие нижние части гор (18%).

В бассейне р.Омолуй преобладающим типом местности является склоновый делювиально-солифлюкционный (35%). Развитие данного типа местности говорит о перенасыщении влагой почвы, что характерно для бассейна р.Омолуй, где растительность представлена марями и лиственничными рединами, хотя по существующим данным количеством осадков бассейн р.Омолуй не сильно отличается от аналогичных участков в бассейне Лены и Яны. Практически отсутствие древостоя на горных склонах способствует развитию солифлюкции. Субарктический тип климата и скудность растительного покрова не позволяют почве испарять большую часть поступившей влаги, накапливая ее, что обуславливает развитие соответствующих типологических единиц

ландшафтов. Также практически отсутствие крутых склонов создает оптимальные условия для медленного вязкопластичного солифлюкционного течения, который формирует грядовые и валовые мерзлотные формы рельефа. Ледниково-аккумулятивные типы местности для бассейна р.Омолой нехарактерны, при этом имеется межлассный тип местности, свидетельствующий о большом объеме льдистости грунта и развитии термокарстовых форм рельефа.

Бассейн р.Яна сформирован в сочетании типов местности эрозионно-тектонического и ледниково-аккумулятивного происхождения. Моренный тип местности занимает значительные площади (12%) низкогорий хребта, тем самым предопределяя переход хребта к Приверхоянской моренной провинции [Мерзлотно-ландшафтная карта ..., 2018]. Моренному типу местности сопутствуют зандровые равнины, занимающие наиболее открытые поверхности выравнивания. На среднегорьях и низкогорьях восточного склона в целом преобладают холмисто-грядовые формы ледникового, моренного происхождения, контрастирующие со скальными и альпийскими формами высокогорий.

На основе анализа ландшафтно-морфологических показателей по типам ландшафтов, соотношения типов местности и выделения доминирующих и субдоминирующих типов ландшафтов нами обоснованы выделения подпровинций: *западной приленской, северо-восточной приомолойской и восточной прирянской*. По данным WorldClim определены усредненные климатические показатели температуры по типам местности.

Западная приленская подпровинция. Доминирующими типами ландшафтов являются горная тундра и горное редколесье, что говорит о высокогорности территории бассейна. Сильная расчленённость указывает на преобладание комплексов северотаежной растительности долин которые расположены на высоте до 400 м. Подгольцово-кустарниковый тип высотного ландшафта занимает примерно 16,4% территории бассейна (рис.32). Наиболее распространенные типы местности – склоновый коллювиальный и склоновый делювиально-коллювиальный. Среднегодовая температура воздуха варьируется от -13,9 °С в горных пустынях до -12,2 °С в интразональных северотаежных ландшафтах.

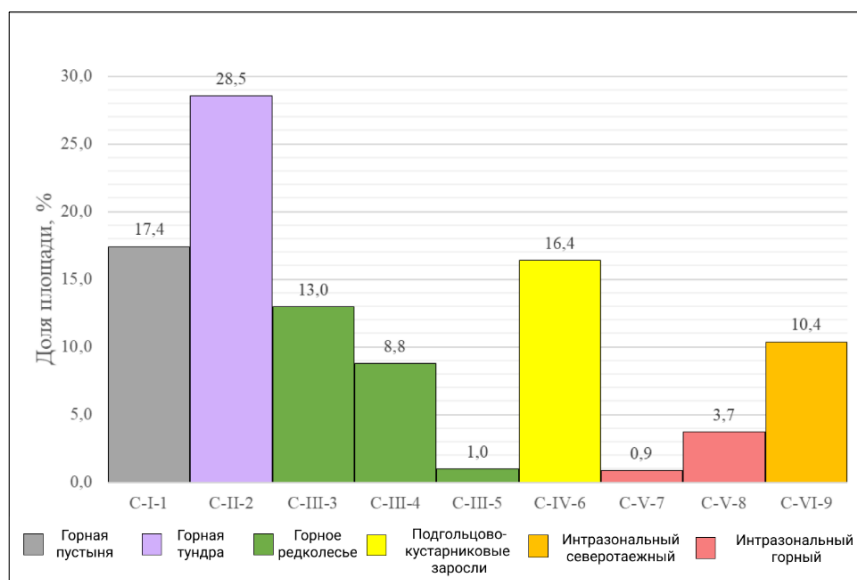


Рис. 32. Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Лена (составлено автором)

Северо-Восточная приомолойская подпровинция – самая маленькая по площади, занимает северо-восточную часть хребта; данная часть хребта менее всего подвергалась четвертичному поднятию, и поэтому здесь лучше сохранились поверхности выравнивания с преобладающим развитием моренных и водно-ледниковых отложений. Поэтому территория больше представлена горным редколесьем, причем слабый дренаж и северное расположение бассейна приводят к увеличению доли более увлажненных марей и лиственничных моховых редиц (рис. 33). Наиболее распространенные типы местности – склоновый делювиально-солифлюкционный и склоновый делювиально-коллювиальный. Среднегодовая температура воздуха варьируется от $-15,2^{\circ}\text{C}$ в горных пустынях до $-14,8^{\circ}\text{C}$ в интразональных горноредколесных ландшафтах.

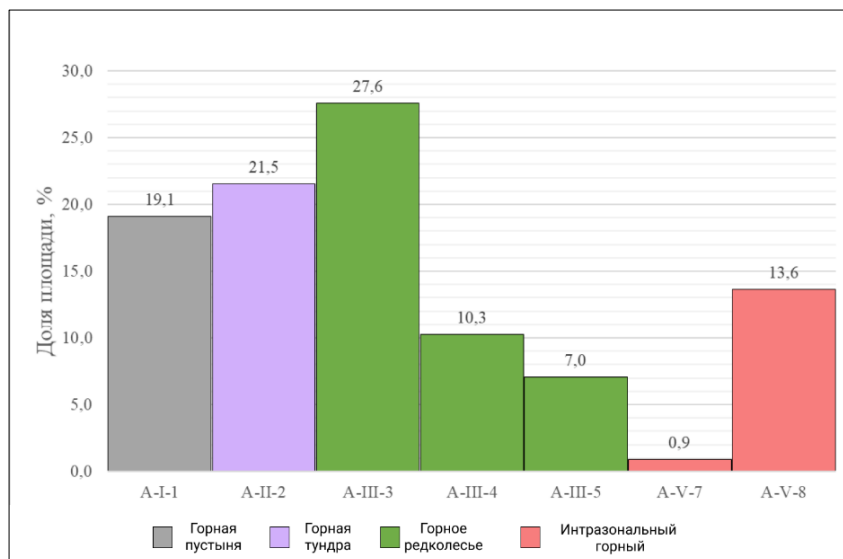


Рис. 33. Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Омолрой (составлено автором)

Восточная прианская подпровинция. Янский бассейн представлен бассейнами притоков р.Бытантай и р.Дулгалах. Бассейн включает области тектонических поднятий со значительными площадями поверхностей выравнивания и надпойменных террас современных рек. В соотношении типов ландшафтов доминирует горное редколесье (рис. 35). Горная тундра преобладает, доходя до самых вершин, из-за чего доля горных пустынь незначительна. Среднегодовая температура воздуха варьируется от -14,6 °С в горных пустынях до -13,9 °С в интразональных северотаежных ландшафтах.

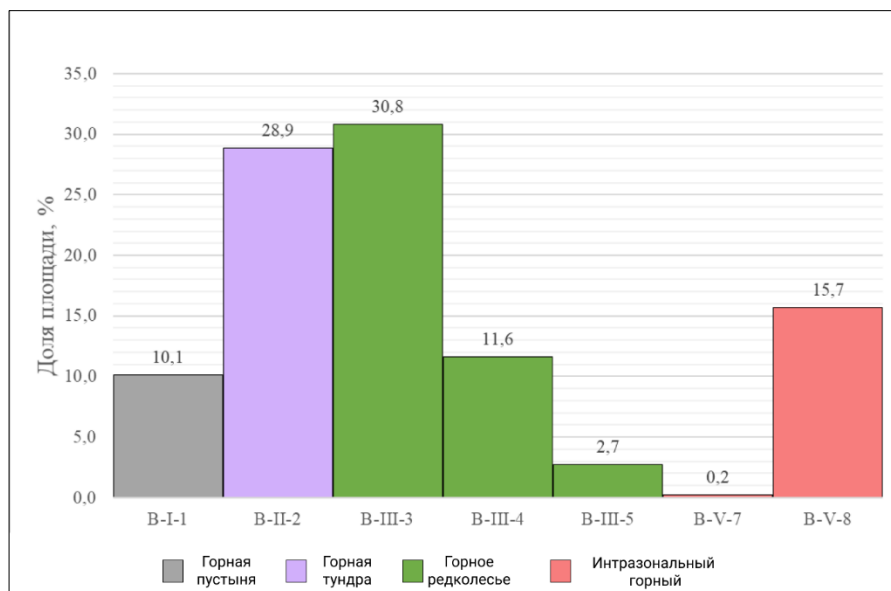


Рис. 34. Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Яна (составлено автором)

По выделенным подпровинциям обновлена мерзлотно-ландшафтная карта (рис. 36) в масштабе 1:1 500 000 и составлена новая легенда мерзлотно-ландшафтной карты Орулганской среднегорной провинции. Легенда карты составлена на основе выделения 23 регионально-типологических единиц, т.е. выделенные нами единицы растительности типов ландшафтов (рис. 35) привязаны к физико-географическим подпровинциям. Легенда обновленной карты различает ландшафты-аналоги по климатическим показателям (среднегодовая температура, средняя температура января и июля) и по мерзлотному содержанию (температура пород и мощность активного слоя) (табл. 12).

Климатические данные ландшафтов получены с помощью зональной статистики в QGIS растровых данных температур WorldClim. Ландшафты-аналоги имеют существенные различия по подпровинциям. Например, лиственничные кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые редколесья в западной приленской провинции (С-III-

3) имеют среднегодовую температуру $-13,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в северо-восточной приомолойской провинции (А-III-3) – $-14,86\text{ }^{\circ}\text{C}$. Безусловно, различия получения тепла и влаги играют значительную роль в устойчивости и динамике мерзлотных ландшафтов, исследование которых еще предстоит сделать. Теплые ландшафты аналоги относятся к приленской подпровинции, холодные – к приомолойской. Разница среднегодовых температур и температур января около $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, июльская разница температур достигает $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разница температур хорошо выражена в горных редколесьях и интразональных ландшафтах. Для горных пустынь и тундр разница минимальна.

Для определения температуры пород и мощности активного слоя нами использованы карты главных мерзлотных характеристик, разработанные на основе Мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [Shestakova et al., 2021]. Температура пород распределяется по сочетанию растительности и типа местности, и, так как подпровинции существенно отличаются по составу и соотношениям площадей типов местности, то, безусловно, для ландшафтов-аналогов мерзлотное содержание также будет отличаться. Детальность ландшафтной структуры типов ландшафтов требует детальности на уровне типов местности, правильного обобщения полученных результатов и определения мерзлотного содержания. В настоящей работе мы представили данные по наложению производных карт мерзлотных характеристик с результатом регионально-типологической классификации. Различия характерны для горного редколесья, так как именно к этому высотному поясу приходится наибольшее разнообразие типов местности.

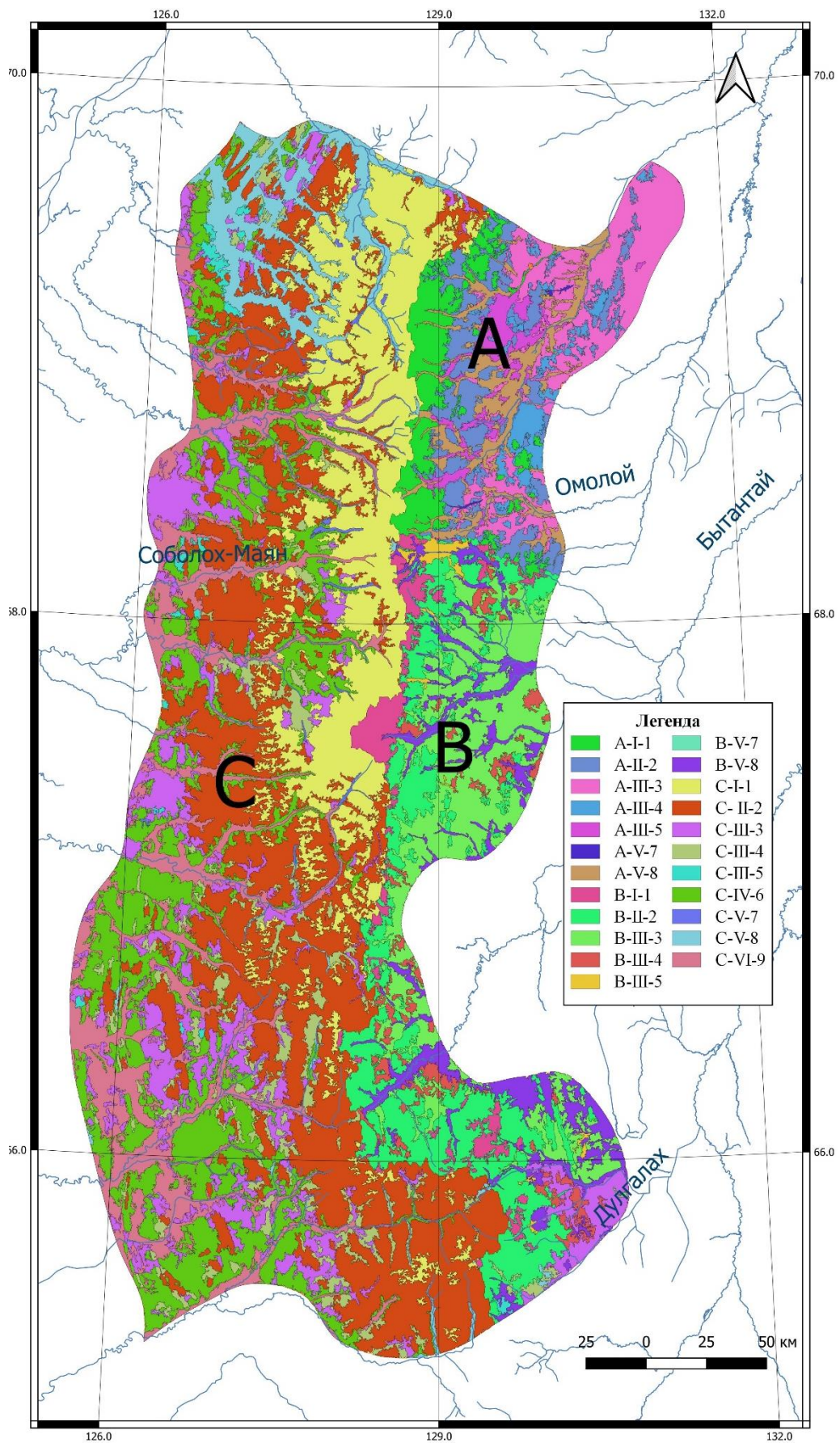


Рис. 35. Мерзлотно-ландшафтная карта подпровинций Орулганской среднегорной провинции (составлено автором)

Легенда мерзлотно-ландшафтной карты подпровинций Орулганской среднегорной провинции

Региональный комплекс	Тип (подтип) ландшафта	Растительность	Индекс на карте	Среднегодовая температура, °С*	Температура января, °С*	Температура июля, °С*	Температура ММП °С**	Деятельный слой, м**
Северо-Восточная приомолойская подпровинция (А)	Горнопустынный	Эпилитные лишайники	А-I-1	-15,96	-36,87	16,31	-10...-12	1...1.5
	Горнотундровый	Горные тундры лишайниковые и кустарничковые	А-II-2	-15,37	-36,87	16,16	-8...-11	1...1.5
	Горноредколесный	Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые	А-III-3	-14,86	-37,20	16,93	1...-1	1...1.5
		Лиственничные редколесья и редины лишайниковые и моховые	А-III-4	-15,04	-37,28	16,81	-4...-8	1...1.5
		Мари и лиственничные редины сфагновые с болотами	А-III-5	-14,90	-37,12	16,75	-4...-8	1
	Интразональный горный	Комплекс горнотундровой долинной растительности	А-V-7	-14,86	-36,98	16,30	-5...-8	1
		Комплекс горноредколесной долинной растительности	А-V-8	-15,13	-37,16	16,83	1...-2	1
Восточная прианская подпровинция (В)	Горнопустынный	Эпилитные лишайники	В-I-1	-14,66	-36,30	17,10	-10...-12	1...1.5
	Горнотундровый	Горные тундры лишайниковые и кустарничковые	В-II-2	-14,37	-36,34	17,16	-8...-11	1.5...2
	Горноредколесный	Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые	В-III-3	-13,92	-36,46	18,15	-1...-2	1.5...2
		Лиственничные редколесья и редины лишайниковые и моховые	В-III-4	-14,26	-36,46	17,88	-4...-8	1...1.5
		Мари и лиственничные редины сфагновые с болотами	В-III-5	-14,27	-36,37	17,45	-4...-8	1...1.5
	Интразональный горный	Комплекс горнотундровой долинной растительности	В-V-7	-15,23	-36,45	15,54	-5...-8	1
		Комплекс горноредколесной долинной растительности	В-V-8	-14,13	-36,38	17,85	1...-2	1
Западная приленская подпровинция (С)	Горнопустынный	Эпилитные лишайники	С-I-1	-15,01	-36,47	17,66	-10...-12	1.5...2
	Горнотундровый	Горные тундры лишайниковые и кустарничковые	С-II-2	-14,06	-36,55	17,43	-8...-11	1.5...2
	Горноредколесный	Лиственничные редколесья кустарничково-лишайниково-моховые и ерниковые	С-III-3	-13,05	-36,82	18,48	-1...-2	1...1.5
		Лиственничные редколесья и редины лишайниковые и моховые	С-III-4	-13,33	-36,66	18,21	-4...-8	1...1.5
		Мари и лиственничные редины сфагновые с болотами	С-III-5	-13,43	-36,68	17,93	-4...-8	1...1.5
	Подгольцово-кустарниковые заросли	Лиственничные редколесья с кедровым стлаником кустарничково-лишайниковые в сочетании с ольховниками и ерниками	С-IV-6	-12,69	-36,88	18,72	-4...-6	1.5...2
	Интразональный горный	Комплекс горнотундровой долинной растительности	С-V-7	-13,46	-36,83	17,97	-5...-8	1...1.5
		Комплекс горноредколесной долинной растительности	С-V-8	-12,71	-36,80	18,91	1...-2	1
	Интразональный северотаежный	Комплекс-северотаежной долинной растительности	С-VI-9	-12,26	-37,29	19,32	-2...-6	1

*Температурные данные рассчитаны по WorldClim [Fick and Hijmans, 2017]; **Температура пород и активный слой по данным [Shestakova et al, 2021]

4.2. Парадинамические бассейновые комплексы хребта Орулган

Одним из прикладных задач изучения пространственной организации является ландшафтное обоснование территориальной дифференциации хозяйственной деятельности человека и оптимизации природопользования, что особенно актуально для криолитозоны. Конкретные участки освоения в мерзлотных условиях должны быть исследованы, с точки зрения, ландшафтно-ориентированного подхода, который базируется на мерзлотно-ландшафтную структуру [Осадчая, 2018].

Традиционное хозяйство коренных народов «жестко» привязано к ландшафтам [Медведков, 2016]. Для эвенов и якутов, проживающих на территории хребта Орулган главными «кормящими» ландшафтами, являются долинные комплексы. Эвены-оленеводы занимают высокогорья и среднегорья, где по долинам рек распространены тундровые ландшафты, якуты скотоводы предпочитают низкогорья, где реки сформировали более обширные долины с северотаежными и горноредколесных долинных комплексов, которые сочетают лиственничные леса с заболоченными лугами. Долинные ландшафты функционально зависимы от склоновых и приводораздельных участков бассейна. Любая негативная человеческая деятельность в условиях залегания ММП и изменения климата имеет аккумулируется долинных участках, как замыкающих ландшафтах в латеральной структуре бассейнов. Поэтому для выхода к рациональному природопользованию в горных территориях с мерзлотными ландшафтами целесообразно использовать бассейновое направление функционально-целостного подхода дифференциации ландшафтной сферы Земли.

Бассейны рек и озер являются самыми строго организованными и распространенными территориальными единицами на земной поверхности [Корытный, 2017]. Гидрологическая и геоморфологическая обусловленность бассейнов определяет функциональную целостность и особенности эндогенных морфодинамических процессов. Для них характерны разнонаправленные ландшафтно-геохимические потоки, которые выражены в движении веществ по склону и речными водами. Неоднородность ландшафтной структуры и сложность потоков вещества зависит от типа горного рельефа [Семенов, 1991]. Геолого-геоморфологическое строение речного бассейна на различных его участках формирует инвариантные наборы типов урочищ и местностей [Бевз, 2005].

В таксономической системе Ф.Н. Милькова выделяется бассейновая

парадинамическая ландшафтная система, которая подразделяется на водоразделы и долинно-речная [Мильков, 1981]. В.Б. Михно и А.А. Глотов определяют бассейновый парадинамический комплекс в двух подсистемах – долинно-речной и междуречно-водораздельный [Михно, 2001; Глотов, 2013]; данный подход для равнинных территорий позволяет выделить и обозначить ресурсный потенциал речных долин. Для горных территорий обособленное изучение долинно-речных ландшафтов мы считаем нецелесообразным. Форма пространственной организации долинных ландшафтов не может быть отделена от склоновых и приводораздельных комплексов.

В последние годы был достигнут значительный прогресс в создании более точной гидрографической бассейновой информации с высоким разрешением, которая позволяет очертить границы водоразделов и речных сетей на основе ЦМР с разрешением до ~ 30 м пикселей; наиболее ярким примером является база данных HydroSHEDS [Lehner и Grill, 2013]. Данные HydroSHEDS предоставляют 12 уровней дифференциации водосборной области на бассейны и подбассейны, что также может стать основой для горизонтального разделения парагенетической ландшафтной структуры на различных участках течения и хозяйственную значимость каждого из них. Наличие нескольких уровней взаимосвязанных водосборных бассейнов позволяет объединять их в региональные ландшафтные комплексы, согласно гидроклиматическим условиям. Наибольшая дифференциация водосборных подбассейнов представлено на 12 уровне данных HydroSHEDS.

Одной из преимуществ использования глобальных пространственных данных является перспективные возможности обогащения результатами других исследований, проводимых в пределах тех же пространственных объектов. Но при этом остается открытым вопрос о создании государственной базы пространственных данных речных бассейнов, что существенно бы упростило внедрение ландшафтных исследований в природопользование и анализ ландшафтной структуры бассейнов рек, учтенных в государственном водном реестре.

Для классификации форм бассейновой организации мерзлотных ландшафтов нами использованы количественные показатели по ЦМР и мерзлотно-ландшафтной карте типов урочищ. Показатели рассчитаны при помощи инструментов ГИС анализа (зональная статистика, калькулятор полей, анализ рельефа, геообработка), реализованные

в QGIS. На основе полученных данных нами составлена ГИС база данных рек ключевого участка в виде атрибутивной таблицы (табл. 13).

Таблица 13

Показатели ландшафтно-морфометрического анализа парадинамических мерзлотно-ландшафтных комплексов Орулганской среднегорной провинции

Показатель	Индекс	Формула определения	Источник	Инструмент анализа в ГИС
Площадь, га	S,басс.	-	HydroSHEDS	Зональная статистика
Максимальная высота	Hmax, м	-	ASTER GDEM	
Минимальная высота	Hmin, м	-	ASTER GDEM	
Перепад высот	H, м	Hmax-Hmin	-	Зональная статистика, калькулятор полей
Индекс лесистости	FSI	Sлес/S,басс	Copernicus Global Land Cover [Buchhorn и др., 2020]	
Индекс пересечённости рельефа	TRI	Вычисляется для каждой ячейки растра	Riley et al., 1999	Модуль морфометрического анализа
Максимальное значение индекса увлажнения	AImax	-	Trabucco и Zomer, 2019	Зональная статистика
Минимальное значение индекса увлажнения	AImin			
Типологический ландшафтный индекс (каждого высотного типа ландшафта)	TLI	S/S,басс	Ландшафтная структура типов мерзлотных ландшафтов	Реклассификация, Зональная статистика, калькулятор полей

По полученным данным составлена ГИС база данных по подбассейнам HydroSHEDS 12 уровня. При создании множества показателей, определяющих факторы формирования ландшафтной структуры, необходимо провести корреляционный анализ для выявления наличия причинно-следственных отношений между показателями [Плюснин, 2000]. Для ландшафтно-морфологических показателей как переменных с интервальной и номинальной шкалой можно применять коэффициент корреляции Пирсона. Значения парных показателей коэффициента корреляции представлены на рис.

37. Сильные корреляционные связи существуют между типологическими ландшафтными индексами и значениями высот и увлажнения.

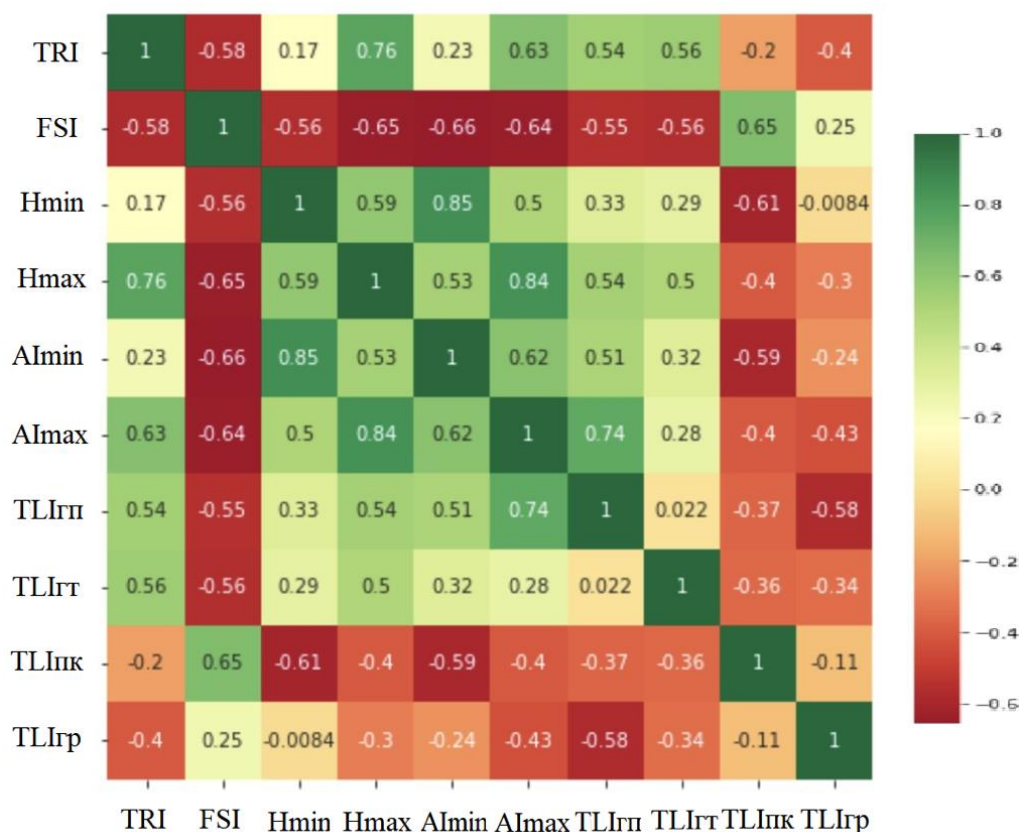


Рис. 36. Коэффициент корреляции Пирсона ландшафтно-морфологических показателей (составлено автором)

Простая интерпретация результатов расчета коэффициента позволяет определить положительные, отрицательные (обратные) и нулевые корреляционные связи. Положительные значения коэффициента Пирсона свидетельствуют о синхронном росте значений показателей. Положительные связи наблюдаются между значениями высот и увлажнения, довольно сильные корреляционные связи между значениями индекса лесистости и доли подгольцово-кустарниковых и горноредколесных типов ландшафтов. Скорее всего, корреляция лесистости с подгольцовыми кустарниками свидетельствует о наличии ошибок классификации и, одновременно, о сложности выделения зарослей от густых северотаежных лесов с кедровыми стланиками. С увеличением максимальной высоты подбассейна растет значение индекса пересеченности местности.

Надо отметить, что среди выбранных показателей нет такого, что коррелируется со всеми остальными. Индекс пересеченности не коррелируется с минимальной высотой подбассейна. Минимальная высота приходится на днища долин поэтому слабо синхронно

коррелируется со всеми высотно-поясными типами ландшафтов и индексом увлажнения; максимальная высота хорошо коррелируется с долями горных пустынь и горных тундр. Безусловно, между долями типов мерзлотных ландшафтов нет особых корреляционных связей.

Отрицательные значения коэффициента корреляции свидетельствуют об асинхронности показателей, т.е. при увеличении одного второй показатель увеличивается. Такие связи наблюдаются между индексом лесистости и значениями минимальных, максимальных высот и индекса пересеченности. Лесистость местности уменьшается при общем подъеме территории.

Наличие корреляционных связей указывает на возможность анализа, но при этом важно также то, что имеются слабо коррелируемые показатели, которые обогащают набор используемых для кластерного анализа данных и достоверно дифференцировать парадинамические комплексы; так как исходные показатели имеют разные корреляционные связи, они являются пригодными для кластерного анализа. В географических исследованиях часто используют два метода кластеризации: иерархическую и k-средних. Наилучший и репрезентативный результат достигнут с помощью алгоритма K-средних [MacQueen, 1967]. Кластеризация является методом классификации без обучения, поэтому полученные данные интерпретируются после получения результатов обработки. Полученные кластеры комбинаций значений показателей позволяют нам выделить 6 вариантов парадинамических бассейновых комплексов, объединенных схожей типологической структурой мерзлотных ландшафтов и набором ландшафтно-морфологических характеристик (рис. 37).

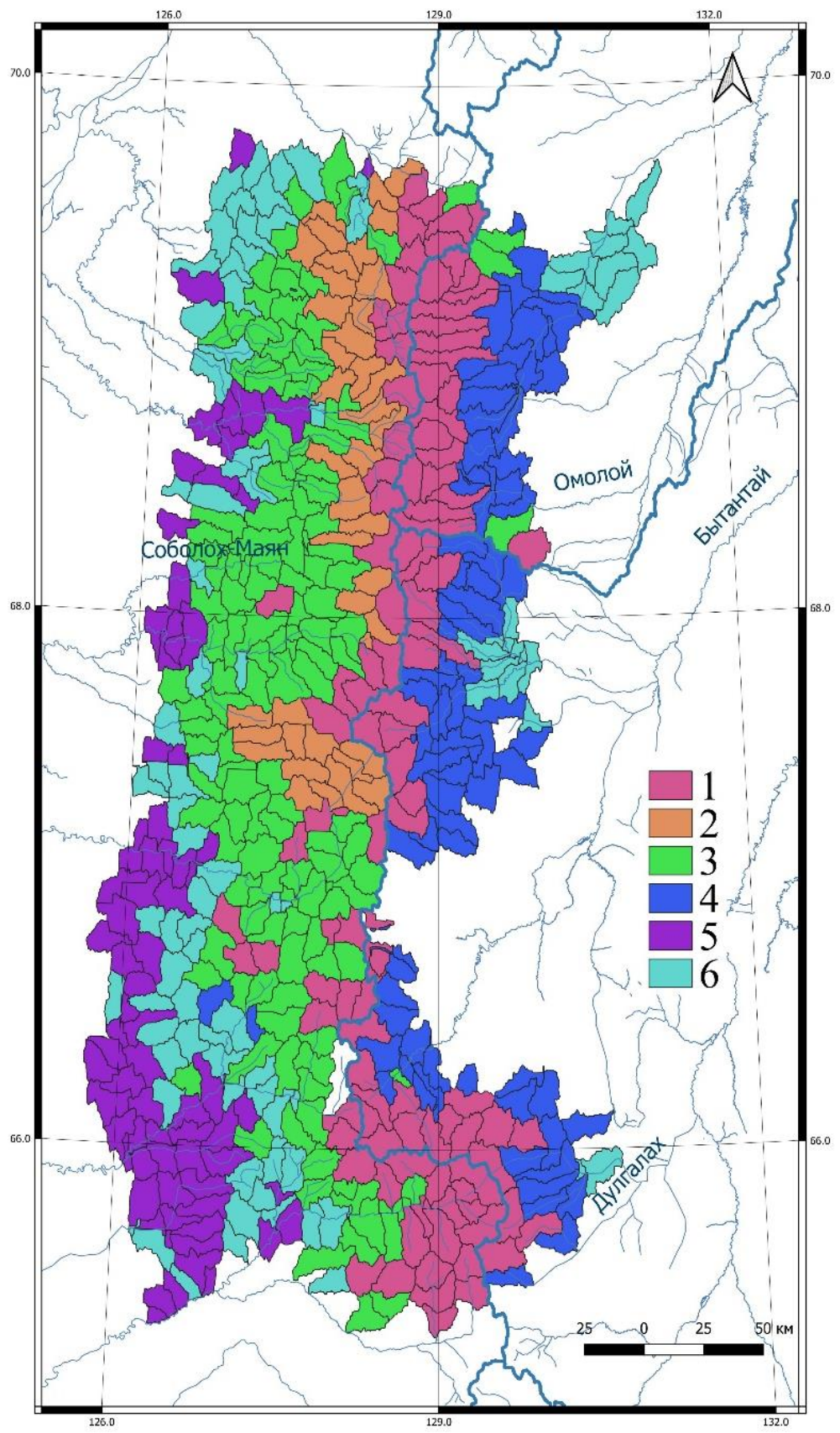


Рис. 37. Варианты парадинамических бассейновых комплексов мерзлотных ландшафтов хребта Орулган (легенда карты в тексте) (составлено автором)

Ниже представлено краткое описание и характеристика основных ландшафтно-мофрологических показателей вариантов парадинамических бассейновых комплексов. Для каждого варианта дается характеристика предполагаемых типов природопользования на основе преобладающих типов ландшафтов:

1. *Высокогорные горнопустынные водосборные бассейны с комплексом горнотундровой растительности в долинах* (амплитуда высот: 600–2000 м, индекс увлажнения: 0,9...2,4, температура пород: -13...-5 °С, индекс пересеченности местности: 20...30°, индекс лесистости: >0,03, мощность СТС в долине: 0,4...0,8).

Высокогорные участки хребта Орулган преимущественно приурочены к восточным склонам с чередованием широких ледниковых долин с дриадово-разнотравной тундрой и троговыми долинами. Древесный ярус отсутствует. Долины и прилегающие пологие склоны, покрытые дриадово-разнотравной тундрой, являются летними пастбищами оленей.

2. *Высокогорные горнопустынные водосборные бассейны с комплексом северотаежной растительности в долинах* (амплитуда высот: 300–2000 м, индекс увлажнения: 0,7...2,0, температура пород: -13...-2 °С, индекс пересеченности местности: 25...35°, индекс лесистости: 0,03–0,3, мощность СТС в долине: 0,5...1,0).

Приурочены к главному водоразделу хребта к западным склонам. Характерны перепады высот между водоразделом и дном долины. Склоны крутые коллювиальные, древесный ярус хорошо выражен склонах восточной и западной экспозиции и в долинных комплексах растительности, выделяются подгольцово-кустарниковые заросли кедрового стланика. В хозяйственном отношении, северотаежные леса долин используются при лесозаготовке, ввиду относительно высокого бонитета лесов. Значительная часть парадинамических комплексов расположена в ресурсном резервате «Орулган-Сис», где под охраной находятся снежные бараны (чубуку) и черношапочный сурок [Софронов, 2008].

3. *Среднегорные горнотундровые водосборные бассейны с комплексом северотаежной растительности в долинах* (амплитуда высот: 250–1450 м, индекс увлажнения: 0,6...1,1, температура пород: -11...-2 °С, индекс пересеченности местности: 20...30°, индекс лесистости: 0,25–0,45, мощность СТС в долине: 0,5...1,0).

Приурочены к среднему течению притоков Лены по ландшафтной структуре на склонах последовательно сменяют эпилитно-лишайниковые горные пустыни, горные

кустарничково-лишайниковые тундры, подгольцовые заросли кедрового стланика и горное лиственничное редколесье. Долины рек практически полностью покрыты лиственничными лесами и комплексами ивовых и ольховниковых сообществ. Присутствуют редкие участки заболоченных лугов и болот. Эта часть западного склона хребта мало задействована в хозяйственной деятельности.

4. *Среднегорные горнотундровые водосборные бассейны с комплексом горноредколесной растительности в долинах* (амплитуда высот: 400–1700 м, индекс увлажнения: 0,8...1,5, температура пород: -11...-4 °С, индекс пересеченности местности: 20...30°, индекс лесистости: 0,05–0,2, мощность СТС в долине: 0,8...1,4).

Занимают горно-ледниковые долины и средневысотные, местами плоские вершины гор восточного склона хребта. Долины широкие с обширными слабонаклоненными участками зандровых равнин и моренных гряд, занятых лиственничными редидами, марями и заболоченными лугами. Используются в качестве оленьих пастбищ, в том числе, зимних, реже для заготовки сена и выпаса лошадей и крупного рогатого скота в обширных заболоченных лугах в пологих склонах.

5. *Низкогорные подгольцово-кустарниковые заросли водосборные бассейны с комплексом северотаежной растительности в долинах* (амплитуда высот: 150–1200 м, индекс увлажнения: 0,5...0,9, температура пород: -8...-2 °С, индекс пересеченности местности: 10...25°, индекс лесистости: 0,4–0,7, мощность СТС в долине: 0,5...1,0).

Занимают западные предгорья хребта с высотой до 1200 м. Вершины часто заняты лесами или хорошо выраженными подгольцово-кустарниковыми зарослями. Высотные переходы ландшафтов слабо выражены. Долины рек становятся широкими, с большими площадями беслесных ландшафтов с активным развитием криогенного микрорельефа с болотными и заболоченными лугами.

6. *Низкогорные горнотундровые водосборные бассейны с комплексом горноредколесной растительности в долинах* (амплитуда высот: 300–1100 м, индекс увлажнения: 0,6...0,9, температура пород: -11...-4 °С, индекс пересеченности местности: 10...20°, индекс лесистости: 0,1–0,2, мощность СТС в долине: 0,8...1,4).

Занимают в основном бассейны и подбассейны рек, приуроченных к северной части хребта. Лесистость бассейнов невысокая, чаще всего они заняты либо горной тундрой, либо лиственничными редидами. В рельефе преобладают пологие склоны и слабонаклоненные участки зандровых волнистых равнин со сфагновыми болотами и

разнотравно-злаковыми заболоченными лугами. Хозяйственная значимость – в заготовке сена, выпасе лошадей. На восточном склоне по рекам Тумара и Тара-Сала в последнее время начали осваивать туристско-рекреационный потенциал территории, связанный с рыболовством, этнотуризмом и сбором лекарственных трав.

В целом природопользование на хребте Орулган не отличается разнообразием. Ввиду отдаленности от морских, речных и наземных транспортных путей, и слабого экономического интереса к промышленному освоению, основным видом природопользования остается традиционное сельское хозяйство.

4.3. Выводы по главе 4

1. На основе анализа ландшафтной структуры типов (подтипов) ландшафтов Орулганской среднегорной провинции получены ландшафтно-морфометрические показатели разнообразия и организации мерзлотных ландшафтов по главным бассейнам хребта. На основании изучения их ландшафтной структуры мы пришли к выводу, что различия в них существенные, что, на наш взгляд, соответствует критериям выделения региональных комплексов на факультативном уровне физико-географических подпровинций.

2. Выделенные подпровинции отличаются по доминирующим типам ландшафтов и типов местности. Определены особенности климатических и мерзлотных условий ландшафтов аналогов: первое объясняется неравномерностью широтного и высотного распределения тепла и влаги, второе отражает сочетания различных типов местности и растительности, к которому привязаны мерзлотные характеристики.

3. Выбранный нами набор ландшафтно-морфометрических показателей продемонстрировал удовлетворительный результат при кластерном анализе распределения значений показателей для характеристики типологических комплексов в пределах векторных наборов данных речных бассейнов HydroSHEDS. Варианты парадинамических бассейновых комплексов представляют собой функционально целостные мерзлотно-ландшафтные единицы, антропогенное воздействие в пределах которой может иметь последствия для всего комплекса. Поэтому парадинамические комплексы могут выступать в качестве территориальных единиц ограничения видов природопользования и антропогенного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе теоретико-методологических разработок различных научных школ ландшафтоведения с использованием традиционных и новых методов географической науки в диссертационном исследовании проведен комплексный географический анализ пространственной организации мерзлотных ландшафтов хребта Орулган на разных таксономических уровнях. Для достижения намеченной цели были выполнены все поставленные задачи, что позволило получить основные результаты и сделать следующие выводы:

1. В результате анализа мерзлотных ландшафтов репрезентативных ключевых участков исследования на восточном склоне хребта Орулган определены ведущие факторы формирования пространственной организации: неоднородность геолого-геоморфологического строения и развитие криогенного микрорельефа. Структурно-генетическая сложность и ландшафтное разнообразие хребта подтверждается выделением 26 подурочищ.

2. Ландшафтная структура района исследования на восточном склоне хребта Орулган представлена 8 типами местности и 22 типами урочищ, которые были выделены в результате применения, разработанной нами методики геоинформационного моделирования. Геоинформационное моделирование позволяет выявить детальную пространственную структуру и проводить среднемасштабное мерзлотно-ландшафтное картографирование с использованием разновременных многозональных спутниковых оптических изображений, полуавтоматической классификации форм рельефа по индексам топографической позиции.

3. Проведенный анализ ландшафтной структуры позволяет рассматривать свойства пространственной организации. Упорядоченность прослеживается в геоморфологической поперечной структуре бассейнов, функциональные связи усиливаются по вектору склона к днищу долины. Сложность и разнообразие днищ долин и пологих склонов обусловлена развитием криогенных процессов, что отражается на пространственной дифференциации типов урочищ и подурочищ.

4. С использованием вычислительных мощностей облачной платформы Google Earth Engine разработана вариация методики геоинформационного моделирования высотно-поясных и интразональных типов мерзлотных ландшафтов. На ее основе получены новые сведения о ландшафтной структуре Орулганской среднегорной провинции.

Преобладающим типом высотно-поясных мерзлотных ландшафтов является горная тундра – 43%, установлена значительная доля интразональных горноредколесных (7,2%) и северотаежных (7%) ландшафтов. Подгольцово-кустарниковые заросли характерны только для южной части западного склона хребта. Северотаежные леса по долинам рек достигают почти до главного водораздела хребта, чему способствуют сильно углубленные, широкие долины рек.

5. Совокупность особенностей совместного проявления климатогенного и криолитогенного фактора хорошо дифференцируется по главному водоразделу хребта, что позволяет выделить три довольно контрастных склона, приуроченных к бассейнам рек Лена, Омолой и Яна. Анализ результатов вычисления ландшафтно-морфологических показателей по главным бассейнам хребта позволяет установить их различия и обосновать выделение в их пределах 3-х физико-географических подпровинций. Подпровинции различаются по доминантному и субдоминантному составу типов ландшафтов и местности. Нами составлена мерзлотно-ландшафтная карта хребта Орулган в масштабе 1:1 500 000 и легенда с выделением 23 регионально-типологических единиц мерзлотных ландшафтов, в которой ландшафты-аналоги отличаются средними температурами, температурой пород и мощностью активного слоя.

6. Кластерный анализ ландшафтно-морфологических показателей по речным подбассейнам данных HydroSHEDS позволил выделить 6 вариантов парадинамических бассейновых комплексов на территории хребта. Варианты отличаются по составу и пространственной организации высотно-поясных и долинных ландшафтов, что позволяет сделать выводы о хозяйственной значимости подбассейнов как функционально-целостных единиц. Выделенные нами варианты парадинамических бассейновых комплексов могут быть использованы при создании или пересмотре статусов территорий традиционного природопользования, особо охраняемых природных территорий и в целом для ведения рациональной политики природопользования в криолитозоне.

Методика геоинформационного моделирования позволяет существенно улучшить результаты средне- и мелкомасштабного картографирования, а использование облачных платформ снимает некоторые ограничения по вычислительным мощностям при проведении работ на больших участках. Методика может быть использована для других горных территорий и при незначительных изменениях в технологической схеме

применятся и на равнинных участках, где также перспективным является использование объектно-ориентированного анализа изображений.

На основе полученных данных в дальнейшем могут быть разработаны аналогичные ландшафтные модели для других провинций гор Северо-Востока Сибири. Методика геоинформационного моделирования имеет перспективы расширения для изучения пространственно-временной организации мерзлотных ландшафтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алисов Б.П. Климат СССР (учебное пособие для ВУЗов). – М.: Изд-во МГУ, 1956. – 128 с.

Ананичева М.Д. Новые оценки и элементы прогноза состояния ледников хребта Орулган / М.Д. Ананичева, А.Н. Кренке // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 25. 2013. – С.154-174.

Андреев В.Н. Карта растительности / В. Н. Андреев [и др.] // Атлас сельского хозяйства Якутской АССР [под ред. И.А. Матвеева]. М.: ГУГК, 1989. – 156 с.

Андреев В.Н. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. / В.Н. Андреев, Т.Ф. Галактионова, В.И. Перфильева, И.П. Щербаков. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – 156 с.

Арманд А.Д. Информационные модели природных комплексов / А. Д. Арманд. – М.: Наука, 1975. – 126 с.

Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем / А.Д. Арманд. – М.: Наука, 1988. – 264 с.

Арманд Д.Л. Наука о ландшафте / Д.Л. Арманд. – Москва: Мысль, 1975. – 287 с.

Атласов И.П. Орулганский хребет. / И.П. Атласов // Труды Аркт. инст., 1938. № 1. С.99-104.

Байкалова Т.В. Геоинформационные технологии анализа многовременных космических радарных и оптических изображений для распознавания геоморфологических объектов и растительных сообществ: авторефер. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.35 / Байкалова Татьяна Викторовна. – Барнаул. 2002. – 25 с.

Баранов И.Я. Принципы геокриологического (мерзлотного) районирования области многолетнемерзлых пород / И.Я. Баранов. – М.: Наука, 1965. – 150 с

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. – 210 с.

Барталев С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жаркоб, [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – № 5. – С.203-221.

Башарин Н.И. Применение беспилотных летательных аппаратов для оценки активизации термокарста / Н.И. Башарин, Л.С. Егорова, Н.Ф. Васильев, [и др.] // Вестник СВФУ. Серия “Науки о Земле” 2020. № 3 (19). С.36-44.

Бевз В.Н. Факторы развития и общие признаки бассейновых динамико-генетических систем склоновых ландшафтов / В.Н. Бевз // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. 2005. № 1. С.34-42.

Беляков Г.Д. Геологическое строение района верховьев рек Джарджан и Сакында (Орулганский хребет) / Г.Д. Беляков, Ю.С. Бушканец // Фонды Инст-та геологии Арктики, 1958. – 90 с.

Берг Л.С. 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.

Беручашвили Н.Л. Геофизика ландшафта: Учеб пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – 287 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.

Булатов В.И. Мерзлота в ландшафтной сфере: вопросы теории / В.И. Булатов // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. 2015. № 1. С.20-25.

Вейсман Л.И. Исследование криогенных процессов методом ландшафтных индикаторов и вопросы их дешифрирования (на примере севера Западной Сибири): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.07 – М., 1977. – 20 с.

Викторов С.В. Индикационное направление в современной географии / С.В. Викторов // Бюл. МОИП. Отд. Геол., 1962. Т. 37. Вып. 6. С.139-149.

Владимиров И.Н. Динамика таежных геосистем Предбайкалья: моделирование и прогнозирование: авторефер. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Владимир Игорь Николаевич. – Иркутск, 2004. – 25 с.

Выркин В.Б. Методические основы структурно-диахронического анализа ландшафтообразующих процессов / В.Б. Выркин // Географические исследования Сибири: В 5 т. / А.Н. Антипов (гл. ред) [и др.]; Т 2. Ландшафтообразующие процессы / Отв. ред. В.Б.Выркин, Е.Г. Нечаев. – 2007. – С.18-24.

Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах / М.К. Гаврилова. – Новосибирск.: Наука, 1981. – 112 с.

Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов / К.С. Ганзей // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. №2. С.61-70.

Гвоздецкий Н.А. О типологическом понимании ландшафта / Н.А. Гвоздецкий // Вестник МГУ. Сер. биол., почв., геол., географии. – 1958. – № 4. – С.165-173.

Геоинформатика: в 2 кн. Кн.1: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарёв, В.С. Тикунов и др.]; под ред. В.С. Тикунова: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.

Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1: 2 500 000; [гл. ред. Э.Д. Ершов]. Винница, 1996. – 16 с.

Гитерман Р. Е. История растительности Северо-Востока СССР в плиоцене и плейстоцене / Р. Е. Гитерман. – М.: Наука, 1985. – 109 с.

Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. / М.А. Глазовская – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 230 с.

Глотов А.А. Геоинформационное моделирование эволюции долинно-речных ландшафтов Воронежской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Глотов Алексей Александрович. – Воронеж., 2013. – 24 с.

Государственный водный реестр [Электронный ресурс] URL: <http://textual.ru/gvr/> (дата обращения: 10.01.2022)

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 / Григорьев А.А. – Л.: 1975. – 165 с.

Григорьев А.А. Субарктика. Опыт характеристики основных типов географической среды / А.А. Григорьев – М.: Л. АН СССР, 1946. – 171 с.

Данилов Ю.Г. Ландшафты Якутии / Ю.Г. Данилов [и др.] – Якутск.: Изд. дом СВФУ. 2016. – 127 с.

Десяткин Р.В. Почвы Якутии / Р.В. Десяткин, М.В. Оконешникова, А.Р. Десяткин. – Якутск.: Бичик, 2009. – 64 с.

Дроздов Д.С. Информационно-картографическое моделирование природно-техногенных сред в геокриологии: автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук: 25.00.36 / Дроздов Дмитрий Степанович. – Тюмень., 2004. – 49 с.

Еловская Л.Г. Почвы Северной Якутии / Л.Г. Еловская, Е.И. Петрова, Л.В. Тетерина – Новосибирск: «Наука», 1979. – 304 с.

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.

Журкин И.Г. Геоинформационное моделирование и картографирование природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий. Учебное пособие для подготовки магистров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование» / И.Г. Журкин, В.С. Грузинов, Л.Н. Чабан – М.: МИИГАиК, 2012. – 67 с.

Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. Учебное пособие для студентов ВУЗов / В.К. Жучкова, Э.М. Раковская – М.: Академия, 2004. – 368 с.

Исаев А.П. Характеристика растительного покрова бассейна р. Эндыбал (Центральное Верхоянье) / Исаев А.П. // 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: 25.00.35 / Истомина Елена Александровна. – 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. – № 4. – С.3-17.

Карта четвертичных образований территории Российской Федерации. Масштаб 1:2 500 000; [ред.: О.В. Петров и др.]. – ВСЕГЕИ, 2014 URL:

http://neotec.ginras.ru/neomaps/M025_Russia_2014_Quatern-depos.jpg (дата обращения: 15.01.2022)

Козин В.В. Ландшафтные исследования в нефтегазоносных районах / В.В. Козин. Тюмень, Изд-во Тюм. ун-та, 1984. – 60 с.

Козин В.В. Сравнительный анализ ландшафтов долины Верхнего и Среднего Дона (опыт парагенетического анализа): автореф. дис. ... канд. геог. наук: 11.00.01 / Козин Василий Васильевич. – Воронеж, 1974. – 28 с.

Колбовский Е.Ю. Ландшафтоведение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Е. Ю. Колбовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 480 с.

Колосов Д.М. Проблемы древнего оледенения Северо-Востока СССР / Д.М. Колосов // Труды Горно-геол. упр. Главсевморпути. 1947. – № 30. – С.29-34.

Коновалова Т.И. Научные основы геосистемного картографирования / Т.И. Коновалова // Серия «Науки о Земле». - 2019. - № 29. - С.85-100.

Коновалова Т.И. Пространственно-временная самоорганизация геосистем юга Средней Сибири: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Коновалова Татьяна Ивановна. – Иркутск: ИГ СО РАН, 2009. – 44 с.

Коновалова Т.И. Пространственная организация геосистем / Т.И. Коновалова, З.О. Кузавкова // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2017. –№ 19. – С.78-95.

Корытный Л.М. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию / Л.М. Корытный // География и прир. ресурсы. –2017. –№ 2. – С.5-16.

Корытный Л.М. Бассейновый подход в географии / Л.М. Корытный // География и прир. ресурсы. –1991. –№ 1. – С.161-166.

Коссовская А.Г. Мезозойские и верхнепалеозойские отложения Западного Верхоянья и Вилюйской впадина: / А.Г. Коссовская, В.Д. Шутов, Е.И. Муравьев // Труды геол. инст-та АН СССР, 1960. – 276 с.

Кренке А.Н. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. 25.00.23 / Кренке Александр Николаевич. – Москва, 2011. – 28 с.

Куваев В.Б. Флора субарктических гор Евразии и высотное распределение ее видов. / В.Б. Куваев. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2006. – 424 с.

Кудрявцев В.А. Мерзлотная съемка как основной вид мерзлотных исследований / В.А. Кудрявцев. // Мерзлотные исследования. – М.: МГУ, 1961. – Вып. 1. – С.3-10.

Кузавкова З.О. Пространственная организация геосистем западного макросклона Баргузинского хребта: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Кузавкова Зоя Олеговна. – Иркутск, 2019. – 24 с.

Лазукова Г.Г. Использование растительности в качестве индикаторов мерзлотных условий / Г. Г. Лазукова // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 1967. – № 4. – С.54-58.

Ландшафты криолитозоны Западно–Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск, Наука, 1983. – 185 с.

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. Основы ландшафтоведения. / Г.И. Марцинкевич, Н.К. Клищунова, А.Н. Мотузко – М.: 1986. – 89 с.

Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков / А.А. Медведков // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2016. – № 22. – С.380-384.

Медведков А.А. Трансформация "кормящих ландшафтов" и традиционной культуры аборигенных народов Сибири в условиях изменения климата / А. А. Медведков // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2016. – Т. 22. № 1. – С.69-70.

Мельников В.П. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования // В.П. Мельников, А.Н. Хименков, А.В. Брушков, [и др.] – Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2010. – 390 с.

Мельников Е.С. Ландшафтные индикаторы инженерно-геологических условий и вопросы их использования при картировании в криолитозоне / Е.С. Мельников, Л.Н. Тагунова, Л.И. Вейсман // Бюл. НТИ. Ландшафтные методы в гидрогеологии и инженерной геологии (из серии: Гидрогеология и инженерная геология, №1). – М., 1966. – С.52-57.

Мельников Е.С. Научные основы и методы региональных инженерно-геологических исследований равнин криолитозоны (на примере Западной Сибири) / Е.С. Мельников: автореф. дис. ... д-ра. геол.-минерал. наук. – М., 1985. – 44 с.

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 с.

Мерзлотные ландшафты Якутии (Пояснительная записка к Мерзлотноландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1:2 500 000) / Федоров А.Н. [и др.]; [ред. П.И. Мельников] – Новосибирск: ГУГК, 1989. – 170 с.

Мильков Ф.Н. Бассейн реки как парадинамическая система и вопросы природопользования / Ф.Н. Мильков // География и прир. ресурсы, 1981. №4. С.11-18.

Мильков Ф.Н. Долинноречные ландшафтные системы / Ф.Н. Мильков // Известия Всесоюзного Географического общества. ТЛЮ. – 1978. № 4. С.289-296.

Мильков Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли / Ф.Н. Мильков. – М.: Мысль, 1970. – 207 с.

Мильков Ф.Н. Парагенетические ландшафтные комплексы / Ф.Н. Мильков // Научные записки Географического общества СССР. - 1966. - № 7. - С.3-7.

Мильков Ф.Н. Принцип контрастности в ландшафтной географии / Ф.Н. Мильков // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1977. – №6. – С.93-101.

Мильков Ф.Н. Проблема динамики ландшафтных комплексов / Ф.Н. Мильков // Землеведение. – 1985. – № 16. – С.23-30.

Михеев В.С. Общие принципы геоэкологического картографирования /В.С. Михеев, В.В. Козин, А.И. Шеховцов // Экологическое картографирование Сибири. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1996. – С.20-43.

Михно В.Б. К вопросу о взаимосвязи урочищ в парагенетическом комплексе на примере балки «Владимирский лог» / В.Б. Михно // Вопросы ландшафтной географии. - Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 1969. – 155 с.

Михно В.Б. Симметрия как фактор структурной организации, динамики и устойчивости ландшафтов / В.Б. Михно // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология, 2014. – № 4 – С.5-11.

Москаленко Н.Г. Изменение криогенных ландшафтов Северной тайги Западной Сибири в условиях изменяющегося климата и техногенеза / Н.Г. Москаленко // Криосфера Земли, 2012. – № 2. – С. 38–42.

Наумов А.М. О характере сочленения Верхоянской складчатой системы и Приверхоянского передового прогиба в районе западного склона хр. Орулган / А.М. Наумов // Труды НИИГА, 2006. – №19. – С.130-132.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1-6, № 24. Якутская АССР. Кн. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 607 с.

Николаев В.А. К теории ландшафтного полигенеза / Николаев В.А. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2006. №6. – С.3-7.

Николаев В.А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. / Николаев В.А. – М.: МГУ, 1978. – 63 с.

Николин Е.Г. Флора Верхоянского хребта и ее пространственная организация: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.01 / Николин Евгений Георгиевич. – Якутск, 2012. - 35 с.

Николин Е.Г. Карта ботанического районирования Верхоянского хребта / Е.Г. Николин, Е.И. Троева // Матер. Всероссийской конф.: Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. СПб, 2011. – С.379-381.

Обуховский Ю.М. Ландшафтная индикация. Учебное пособие. / Ю.М. Обуховский – Минск, 2008. - 299 с.

Перфильева В.И. Краткий очерк растительности восточного склона Орулганского хребта / В.И. Перфильева, Л.А. Добрецова // Ботанические материалы по Якутии. Якутск, 1975. – С.21-37.

Петренко П.С. Организация лесных геосистем бореального экотона Нижнего Приамурья: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Петренко Полина Сергеевна. – Иркутск, 2016. – 24 с.

Петрова Е.И. О подзолообразовании в северотаежных почвах Якутии – В кн.: Биологические проблемы Севера. № 6. Якутск – 1974 – С.33-40.

Плюснин В.М. Ландшафтный анализ горных территории (на примере Прибайкалья): Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 11.00.01 / Плюснин Виктор Максимович. – Иркутск, 2000. – 40 с.

Попов А.И. Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. – М.: Издательство МГУ, 1985. – 330 с.

Преображенский В.С. Организация, организованность ландшафтов / В.С. Преображенский. – М., 1986. – 52с.

Пузаченко М.Ю. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области / М.Ю. Пузаченко, Т.В. Черненко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. – Т.13. – № 5. – С.167-191.

Пузаченко Ю.Г. Разнообразие ландшафта и методы его измерения / Ю.Г. Пузаченко, К.Н. Дьяконов, Г.М. Алещенко // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Экоцентр МГУ, 2002. С.143-302.

Рулев А.С. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов / А.С. Рулев, В.Г. Юферев, М.В. Юферев // ВНИАЛМИ. Волгоград, 2015 – 150 с.

Сакс В.Н. Четвертичный период в Советской Арктике / В.Н. Сакс // Труды Инст. геол. Арктики, 1953. – 90 с.

Самсонов Т.Е. Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты / Т.Е. Самсонов // Lambert Academic Publishing Saarbrucken 2011. – 208 с.

Самсонова В.В. Криоландшафтное картографирование лесопокрываемых территорий Якутии на основе дистанционных материалов: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 04.00.07 / Самсонова Вера Васильевна. – Якутск, 1999. – 20 с.

Северная Якутия. «Морской транспорт»; Л.: Труды АНИИ, том, 1960. – 280 с.

Седельников В.П. Пространственная организация и разнообразие высокогорной растительности Азиатской России / В.П. Седельников // Матер. Всероссийской конф.: Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы. СПб., 2011. – С.418-419.

Семенов Ю.М. Ландшафтно–геохимический синтез и организация геосистем. / Ю.М. Семенов – Новосибирск: Наука, 1991. – 145 с.

Семенов Ю.М. Проблемы дифференциации вещества и организация геосистем: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 11.00.01 / Семенов Юрий Михайлович. – Иркутск: ИГ СО АН СССР, 1990. – 32 с.

Скачков Ю.Б. Динамика изменения среднегодовой температуры воздуха в Республике Саха Якутия за последние 50 лет / Ю.Б. Скачков // Труды IX Международного симпозиума «Баланс углерода, воды и энергии и климат бореальных и арктических регионов с особым акцентом на восточную Евразию». Изд-во Университета Нагоя, 2016. – С.208-211.

Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов / В.Н. Солнцев. – М: Мысль, 1981. - 240 с.

Солнцев Н.А. Учение о ландшафте (избранные труды) / В.Н. Солнцев. – М.: МГУ, 2001. – 384 с.

Софронов Р.Р. Краткий очерк флоры ресурсного резервата «Орулган-Сис» (Эвено-Бытантайский улус Республики Саха (Якутия) / Софронов Р.Р. // Матер. Всероссийской конф.: Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века. Ч. 4. Сравнительная флористика, урбанофлора. Петрозаводск, 2008. – С. 110-111.

Сочава В.Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах / В.Б. Сочава // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск.: Наука, 1974. С. 3-86.

Сочава В.Б. Структурно-динамическое ландшафтоведение и географические проблемы будущего / В.Б. Сочава // Докл. Института геогр. Сибири и Дал. Востока. 1967. № 16. С. 18-31.

Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах / В.Б. Сочава. – Новосибирск: Наука, 1978. – 318 с.

Старожилов В.Т. Ландшафтная география Приморья (регионально-компонентная специфика и пространственный анализ геосистем): автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Старожилов Валерий Титович. – Томск, 2012. – 36 с.

Стрелков С.А. Север Сибири. История развития рельефа Сибири / С.А. Стрелков. – М.: Наука, 1965. – 334 с.

Стыценко Е.А. Разработка методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных зональных космических изображений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Стыценко Екатерина Александровна. – М.: 2018. – 24 с.

Тайсаев Т.Т. Геохимия мерзлотных ландшафтов (на примере гор юга Сибири) / автореф. дис... д-ра геогр. наук: 11.00.01 / Тайсаев Трофим Табанович. – Иркутск, 1994. – 51 с.

Тихомиров Б.А. Современное состояние растительного покрова Крайнего Севера СССР и очеренные проблемы его изучения / Б.А. Тихомиров // Ботан. журн., т. 40, №4. – 1955. – 210 с.

Торговкин Я.И. Ландшафтная индикация и картографирование мерзлотных условий бассейна р. Лены: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.08 / Торговкин Ярослав Ильич. – Якутск, 2005. – 24 с.

Троева Е.И., Черосов М.М. Экологические подходы к корректировке карты растительности Якутии с использованием компьютерных технологий / Е.И. Троева, М.М. Черосов // Матер. Всероссийской научной конф. СПб., 2011. Т. 1. С.427-429.

Трофимов А.М. Морфометрические и морфографические методы в геоморфологии / А.М. Трофимов // Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1965. – 49 с.

Тумель В.Ф. О мерзлотной съемке / В.Ф. Тумель // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. – 1945. – Т.9, №2. – С.135-144

Тумель Н.В. Геоэкология криолитозоны: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / Н.В. Тумель, Л.И. Зотова. – 2-е изд., испр., и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2018. – 180 с.

Тутубалина О.В. Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine / О.В.Тутубалина, Е.И. Голубева, М.В. Зимин, [и др.]// LXXX Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли с космоса» – 2020. – 110 с.

Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа / А.П. Тыртиков. – М.: Наука, 1979. – 116 с.

Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.08 / Федоров Александр Николаевич. – Якутск, 2020. – 38 с.

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

Фролов А.А., Геоинформационный анализ и прогнозирование изменчивости ландшафтов Предбайкалья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Фролов Александр Андреевич. – Иркутск, 2011. – 24 с

Халатов В.Ю. Интерференция ландшафтной и бассейновой структур горных территорий (на примере Армянского нагорья): автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Халатов Виталий Юрьевич. – М., 2004. – 48 с.

Хименков А.Н. Геосистемный подход в геокриологии / А.Н. Хименков // Криосфера Земли. т. XVII, № 2, 2013. – С.74-82.

Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта / Хорошев А.В. – М: Товарищество научных изданий КМК. 2016. – 416 с.

Черкашин А.К. Иерархическая классификация географических систем геосистем / А.К. Черкашин // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2021. –№ 35. – С.125-153.

Черных Д.В. Классификация долинных ландшафтов для ландшафтной карты Русского Алтая / Д.В. Черных // Известия Алтайского государственного университета, 2011. – 98 с.

Черных Д.В. Пространственная организация горных ландшафтов (на примере Алтая): автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Черных Дмитрий Владимирович. – Барнаул, 2001. – 17 с.

Черных Д.В. Пространственно-временная организация внутриконтинентальных горных ландшафтов (на примере Русского Алтая): автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Черных Дмитрий Владимирович. – Томск, 2012 – 51 с.

Чистяков К.В. Ландшафты Внутренней Азии: динамика, история и использование: автореф. дис. ...д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Чистяков Кирилл Валентинович. – СПб., 2001. – 50 с.

Шелудякова В.А. Растительность Верхоянского района Якутской ЯАССР. // В.А. Шелудякова – Якутск: научно-исслед. база Акад. наук, Якутск, 1948. – 222 с.

Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон – М.: Издательство иностранной литературы, 1963 г. – 832 с.

Шестакова А.А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере Приленского плато): автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.08 / Шестакова Алёна Алексеевна. – Якутск, 2011. – 20 с.

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

Щербаков И.П. Лесной покров Северо-Востока СССР. / И.П. Щербаков – Новосибирск. Наука, 1975. – 344 с.

Abdi A.M. Land Cover and Land Use Classification Performance of Machine Learning Algorithms in a Boreal Landscape Using Sentinel-2 Data / A.M. Abdi // GIScience & Remote Sensing 55 (1). 2019. – P.1-20.

Amani M. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review / M. Amani, A. Ghorbanian, S.A. Ahmadi [et al.]// IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing, Vol. 13, 2020. – 330 p.

Arvor D., Jonathan M., Meirelles M.P., Dubreuil V., Durieux L., Classification of MODIS EVI time-series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil / D. Arvor, M. Jonathan, [et al.] // International Journal of Remote Sensing, 32 (22). 2011. – P.7847-7871.

Brewer C.K. Existing Vegetation Mapping. Existing Vegetation Classification, Mapping, and Inventory Technical Guide Version 2.0. / C.K. Brewer, [et al.] // United States Department of Forest Service Agriculture Gen. Tech. Report WO-90. 2015. – 1120 p.

Brown J. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions Version 2 / J. Brown [et al.] // National Snow and Ice Data Center, 2002. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cp45> (дата обращения: 10.01.2022)

Buchhorn M., Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. / M. Buchhorn, [et al.] // Remote Sensing 2020, 12 Volume 108, –1044 p.

Chignell S.M., Luizza M.W., Skach S., Young N.E. and Evangelista P.H., An integrative modeling approach to mapping wetlands and riparian areas in a heterogeneous Rocky Mountain watershed / S.M. Chignell, [et al.] // Remote Sens Ecol Conserv, 4. 2018. – P.150-165.

Comaniciu D. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis / D. Comaniciu, P. Meer // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 24(5), 2002. – P.603-619.

Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, 2020. / Congedo L. URL: <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 20.09.2020)

Debella-Gilo M. Mapping Seasonal Agricultural Land Use Types Using Deep Learning on Sentinel-2 Image Time Series. / M. Debella-Gilo, A.K. Gjertsen // Remote Sensing. 2021. № 13. – P.289-310.

Di Gregorio A. Environment and Natural Resources Service / Di A. Gregorio, L.J.M. Jansen. // GCP/RAF/287/ITA Africover - East Africa Project and Soil Resources, Management and Conservation Service., Rome. 2000. – 455 p.

Farr T.G. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data, Eos Trans / T.G. Farr, M. Kobrick // AGU, 2000. - № 81. – P.583-585.

Gadal S. Alas Landscape Modeling by Remote Sensing Image Analysis and Geographic Ontology: Study Case of Central Yakutia (Russia) / S. Gadal, M. Zakharov, J. Kamičaitytė, Y. Danilov // In Proceedings of the 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. 2020. – P.112-118.

Gao B.C. NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.C. Gao // Remote Sensing of Environment. 58. 1996. – P.257-266.

Gao J. Knowledge-Based Approaches to Accurate Mapping of Mangroves from Satellite Data / J. Gao [et al.]// Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Number 11 – 2004. – P.1241-1248(8).

Gitelson A.A. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves / A.A. Gitelson, M.N. Merzlyak // Advances in Space Research, 22. 1998. – P.689-692.

Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation / S. Gruber // The Cryosphere, 6. 2012. – P.221–233.

Jahromi M.N. Google Earth Engine and Its Application in Forest Sciences / M.N. Jahromi, [et al.] // Spatial Modeling in Forest Resources Management. 2020. – P.629-649.

Jenness J. Topographic position index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x. / J. Jenness // Jenness Enterprises. 2005. URL: <http://www.jennessent.com> (дата обращения: 11.02.2021)

Jennings M.D. Standards for associations and alliances of the U.S. national vegetation classification / M.D. Jennings, D. Faber-Langendoen, O.L. Loucks // Ecological Monographs. 79(2), 2009. – P.173-179.

Jorgenson M.T. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change. / M.T. Jorgenson [et al.] // Can. J. For. Res., 2010. 40, – P.1219-1236.

Jorgenson M.T. Remote Sensing of Landscape Change in Permafrost Regions / M.T. Jorgenson, G. Grosse // Permafrost & Periglacial Processes. 2016. – 670 p.

Kalinicheva S.V. Mapping Mountain Permafrost Landscapes in Siberia Using Landsat Thermal Imagery / S.V. Kalinicheva, A.N. Fedorov, M.N. Zhelezniak // Geosciences 2019. 9. 4.

Kanevski M. Machine learning models for geospatial data. Handbook of theoretical and quantitative geography / M. Kanevski, [et al.]// University of Lausanne, Lausanne. 2009. P. – 175–227.

Lehner B. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems / B. Lehner, G. Grill // Hydrological Processes, 27(15). P.2171-2186. URL: www.hydrosheds.org (дата обращения: 17.11.2021)

MacQueen J.B. Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. / J.B. MacQueen // University of California Press.: Vol. 1, 1967. – P.281-297.

Michel J. Stable mean-shift algorithm and its application to the segmentation of arbitrarily large remote sensing images / J. Michel, D. Youssefi, M. Grizonnet // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 53(2). 2015. – P.952-964.

Mokarram M. Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran) / M. Mokarram, G. Roshan, S. Negahban // Model. Earth Syst. Environ. 1, 40, 2015. P.1-7.

Paudel S. Assessing landscape changes and dynamics using patch analysis and GIS modeling / S. Paudel, F. Yuan // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation. 16. 2012. – P.66-76.

Petitjean F. Satellite Image Time Series Analysis Under Time Warping / F. Petitjean, J. Inglada, P. Gancarski // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 50. 8. 2012. – P.3081-3095.

Prokopiev A. Some Aspects of the Tectonics of the Verkhoyansk Fold-and-Thrust Belt (Northeast Asia) and the Structural Setting of the Dyandi Gold Ore Cluster. / A. Prokopiev, V. Fridofski, A. Deikunenko // Polarforschung 69, 1999. – 176 p.

Shestakova A.A. Mapping the Main Characteristics of Permafrost on the Basis of a Permafrost-Landscape Map of Yakutia Using GIS / A.A. Shestakova [et al.]// Land 2021, 10, – 462 p.

Spijker V. Morphological Landscape-classifications of the Front Range of the Rocky Mountains near Boulder, Colorado. Wageningen University and Research Centre / V. Spijker // Thesis Report GIRS-2013-23. 2013. – 84 p.

Tagil S. GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje / S. Tagil J. Jenness // Journal of Applied Sciences, 8, 2008. – P. 910-921.

Tamiminia H. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review / H. Tamiminia [et al.]// ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing. 2020. vol. 164. – P.152-170.

Trabucco A. Global Aridity Index and Potential Evapo-Transpiration (ET0) Climate Database v2. CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) / A. Trabucco, R.J. Zomer 2018. URL: <https://cgiarcsi.community/2019/01/24/global-aridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v2/> (дата обращения: 19.01.2022)

Vapnik V.N. The Nature of Statistical Learning Theory / V.N. Vapnik –New York: Springer-Verlag, 1995. – 740 p.

Velichko A.A. Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the late glacial and Holocene / A.A. Velichko, A.A. Andreev, V.A. Klimanov // Quaternary International. Vol. 41-42, 1997, – P.71-96.

Wang Z.W. Mapping the vegetation distribution of the permafrost zone on the Qinghai-Tibet Plateau / Z.W. Wang, [et al.] // Journal of Mountain Science, 2016. 13 (6). – P.1035-1046.

Warwick F.V. Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach. / F.V. Warwick, L. Mickaël, A. Michel //Arctic Science. 3(2): 2019. – P. 39-64.

Weiss A. Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference / Weiss A.San Diego, CA. 2001.URL: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf (дата обращения: 17.11.2021)

Xu R. A Simple Phenology-Based Vegetation Index for Mapping Invasive Spartina Alterniflora Using Google Earth Engine / R. Xu, S. Zhao, and Y. Ke // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 14, 2020 – P.190-201.

Yan L., Roy D.P. Automated crop field extraction from multi-temporal Web Enabled Landsat Data / L. Yan, D.P. Roy //Remote Sensing of Environment Volume 144, 25 March 2014, – P.42-64.

Zakharov M. Mapping Siberian Arctic Mountain Permafrost Landscapes by Machine Learning Multi-Sensors Remote Sensing: Example of Adycha River Valley / M. Zakharov, S. Gadal, Y. Danilov, J. Kamičaitytė // In Proceedings of the 7th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management - Volume 1: – P.125-133.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунки

1	Области распространения ММП в Северном полушарии.....	12
2	Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия) в масштабе 1:1 500 000.....	23
3	Физико-географическое положение хребта Орулган.....	33
4	Климатические показатели хребта Орулган: а) среднегодовая температура воздуха в Цельсиях по данным WorldClim V3; б) годовое количество осадков, мм Индекс засушливости по данным Global Aridity Index Database	39
5	Внутренние воды. Данные по водоразделам HydroSHEDS.....	41
6	Термокарстовая озеро Булгунняхтах в горно-ледниковой долине.....	43
7	Горное лиственничное редколесье хребта Орулган.....	44
8	Тополевый иванчайно-разнотравный лес.....	45
9	Пушицево-осоковая болотная тундра.....	46
10	Мерзлотно-ландшафтная карта Орулганской среднегорной провинции.....	49
11	Комплекс долинной горноредколесной растительности р. Тумара. Абсолютная высота - 689 м.....	50
12	Карта-схема маршрутов полевых наблюдений района исследования и размещение ключевых участков описания фаций.....	52
13	Подурочища ключевых участков на восточном склоне хребта Орулган: а) р.Оспех; б) оз. Булгунняхтах; в) р. Бытантай	56
14	Проявление высотной поясности на склонах горно–ледниковой долины с разнотравным заболоченным лугом.....	60
15	Ландшафтный профиль участка оз. Булгунняхтах.....	61
16	Общая технологическая схема геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов горных территорий.....	70
17	Схема классификации основных форм рельефа с использованием индекса топографической позиции.....	75
18	Типы местности района исследования на восточном склоне хребта Орулган	77
19	Результат попиксельной классификации временного ряда спутниковых снимков.....	79
20	Типы урочищ района исследования в восточном склоне хребта Орулган.....	81

21	Фрагмент скрипта запроса снимков Sentinel 2 и Landsat 8 на территорию исследования с фильтрами по летним месяцам и облачности.....	87
22	Мозаика композитов каналов 2,3,4 за август спутниковых снимков Sentinel 2 на платформе Google Earth Engine территории Орулганской среднегорной провинции.....	89
23	Вариация геоинформационного моделирования мерзлотных ландшафтов с помощью облачной платформы Google Earth Engine.....	91
24	Растительный покров по классификации снимков в GEE.....	92
25	Классификация рельефа по склону.....	95
26	Типы мерзлотных ландшафтов Орулганской среднегорной провинции.....	96
27	Долина реки Нёлон снимок Sentinel 2 за начало августа RGB в естественных цветах.....	98
28	Соотношение типов мерзлотных ландшафтов и их растительности Орулганской среднегорной провинции	100
29	Гипсометрические ландшафтные профили хребта Орулган по долготам.....	102
30	Гипсометрические ландшафтные профили хребта Орулган по широтам.....	103
31	Соотношение типов местности главных бассейнов Орулганской среднегорной провинции	110
32	Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Лена.....	112
33	Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Омолой.....	112
34	Соотношение типов мерзлотных ландшафтов бассейна р. Яна.....	113
35	Мерзлотно-ландшафтная карта подпровинций Орулганской среднегорной провинции.....	115
36	Коэффициент корреляции Пирсона ландшафтно-морфологических показателей.....	120
37	Варианты парадинамических бассейновых комплексов мерзлотных ландшафтов хребта Орулган.....	122
Таблицы		
1	Климатические показатели по метеостанциям.....	40
2	Основные характеристики зональных типов мерзлотных ландшафтов хребта Орулган.....	48

3	Мерзлотные ландшафты ключевых участков района исследования на восточном склоне хребта Орулган.....	58
4	Основные рубежи ландшафтообразования хребта Орулган.....	63
5	Критерии выделения ландшафтов при геоинформационном моделировании	67
6	Характеристики каналов Landsat 8 OLI и Sentinel 2 MSI.....	71
7	Результаты классификации растительного покрова по различным алгоритмам машинного обучения.....	80
8	Количество спутниковых данных на Орулганскую среднегорную провинцию.....	90
9	Матрица ошибок классификации растительного покрова классификатором SVM.....	94
10	Соотношение площадей выделенных сочетаний групп растительных ассоциаций по Мерзлотно–ландшафтной карте и по проведенному геоинформационному моделированию.....	99
11	Ландшафтно-морфологические показатели бассейнов Орулганской среднегорной провинции.....	108
12	Легенда мерзлотно-ландшафтной карты подпровинций Орулганской среднегорной провинции.....	116
13	Показатели ландшафтно–морфометрического анализа парадинамических мерзлотно-ландшафтных комплексов Орулганской среднегорной провинции	119