

УДК 504.63(23.470.67.03)

АНАЛИЗ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ХРЕБТА ОРУЛГАН

^{1,2}Захаров М.И., ¹Данилов Ю.Г., ^{1,2}Гадал С., ³Троева Е.И., ³Черосов М.М.

¹ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет», Якутск, e-mail: mplusz@inbox.ru;

²Университет Экс-Марсель, UMR ESPACE CNRS, Экс-ан-Прованс;

³Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

Цель исследования – проанализировать ландшафтную структуру восточного склона хребта Орулган при помощи комплексного геоинформационного моделирования. В статье использованы данные полевых маршрутных наблюдений, проведенных в 2018-2019 гг. Для геоинформационного моделирования использована методика попиксельной классификации разновременных многозональных снимков Landsat 8 OLI/TIRS и Sentinel 2 MSI за вегетационный период и классификации форм рельефа по данным ASTER GDEM. В результате сочетания полученных физиономических критериев, рельефа и растительности, выявлены типы местности и урочищ района исследования. Классификатор 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 можно составить мерзлотно-ландшафтное картографирование на уровне типов урочищ. Всего в пределах района исследования выявлено 22 типа урочищ. Использование геоинформационного моделирования позволило получить детальную ландшафтную структуру района исследования и оценить основные свойства пространственной организации восточного склона хребта Орулган. Сложный горный рельеф, отличающийся сильной расчлененностью, обуславливает хорошо выраженную вертикальную поясность. В целом наиболее распространенным высотным типом мерзлотных ландшафтов является горное редколесье – 57% территории, горная тундра занимает 16%. Интразональные горные и северотажные ландшафты занимают 15%. Ведущую роль в ландшафтном разнообразии восточного склона хребта Орулган играет сочетание различных геологических структур, которым обусловлены типы местности эрозионно-тектонического (горно-склоновые и приводораздельные скальные), ледниково-аккумулятивного (моренные, зандровые и ледниково-долинные) и эрозионно-аккумулятивного (средневысотные террасовые и низкотеррасовые) происхождения.

Ключевые слова: мерзлотные ландшафты, комплексное геоинформационное моделирование, хребет Орулган, ландшафтная структура, типы местности, типы урочищ.

LANDSCAPE STRUCTURE ANALYSIS OF THE ORULGAN RIDGE EASTERN SLOPE

^{1,2}Zakharov M.I., ¹Danilov Yu.G., ^{1,2}Gadal S., ³Troeva E.I., ³Cherosov M.M.

¹North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: mplusz@inbox.ru;

²Aix-Marseille University, UMR ESPACE CNRS, Aix-en-Provence;

³Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

The aim of the research is to analyze the landscape structure of the eastern slope of the Orulgan ridge using complex geoinformation modeling. We use the field surveys data made in 2018-2019. The geoinformation modeling technique consists of the supervised pixel-based classification of time series remote sensing data of Landsat 8 OLI/TIRS and Sentinel 2 MSI and TPI-based landform classification using ASTER GDEM scenes. As a result of a combination of the obtained physiognomic criteria, relief and vegetation, the types of terrain and landscape units of the study area were identified. The Random Forest classifier was the most efficient in identifying 8 association groups with the overall accuracy of 79.7% by the confusion matrix. With an overlay of terrain types and the vegetation associations we allow to create the permafrost-landscape map. In total, 22 landscape units were identified within the study area. The use of geoinformation modeling made it possible to obtain a detailed landscape structure of study area and assess the main properties of the landscape spatial organization of the eastern slope of the Orulgan ridge. The mountainous area characterized by strong dissection, causes a well-defined vertical zonation. In general, the most common altitudinal permafrost landscapes is mountain woodlands (57% of the territory) and mountain tundra occupies 16%. Intrazonal mountain and boreal landscapes occupy 15%. The leading role in the landscape diversity of the eastern slope of the Orulgan Range is played by a combination of various geological structures that determine the types of erosion-tectonic (mountain-slope and rocky mountain tops), glacial-accumulative (moraine, outwash and glacial-valley) and erosion-accumulative terrain. (medium-altitude terrace and low-terrace) origin.

Keywords: permafrost landscapes, geoinformation modeling, Orulgan ridge, landscape structure, terrain types, landscape unit.

Пространственная организация природной среды проявляется в ландшафтной структуре, как географически упорядоченной и функционально целостной совокупности типологических комплексов [1]. Горные территории сплошного распространения

многолетнемерзлых пород (ММП) Северной Якутии, и в целом Северо-Востока Сибири, до сих пор мало изучены в ландшафтном отношении. Одной из таких территорий являются Орулганские горы, наиболее возвышенная часть Верхоянской горной системы.

Ландшафтная сфера Земли в криолитозоне, особенно со сплошным характером распространения ММП, представлена специфической частью наземного отдела природно-территориальных комплексов, называемых *мерзлотными ландшафтами* [2; 3]. Теоретической и методологической основой изучения мерзлотных ландшафтов является таксономическая организация ландшафтов Ф.Н. Милькова [4], которая получила развитие в Институте мерзлотоведения СО РАН в г. Якутске [2]. Одним из весомых преимуществ таксономических рядов организации ландшафтов мильковской школы является самостоятельность типологических единиц при чередовании критериев их выделения. На основе чередования биогидроклиматических и геолого-геоморфологических критериев выделения была составлена схема дифференциации мерзлотных характеристик [5].

Целостное представление мерзлотных ландшафтов как сложного многокомпонентного объекта исследования требует синтеза разнокачественных знаний и научных представлений о структуре и динамике мерзлотных ландшафтов. Такие исследования связаны с большим количеством географической информации и требуют привлечения методов геоинформатики и технологий дистанционного зондирования Земли. Проведение исследований с применением различных наборов пространственных данных может в значительной мере улучшить понимание организации мерзлотных ландшафтов и пространственной дифференциации мерзлотных характеристик горных территорий и по-новому оценить их хозяйственное значение, устойчивость к климатической и гидрологической вариативности. В настоящее время, в связи с долгосрочными планами освоения арктических территорий, актуальным также становится проведение ландшафтных инвентаризационных работ для оптимизации природопользования в криолитозоне [6]. Многофакторное моделирование и применение межкомпонентных связей мерзлотных ландшафтов в геоинформационной среде в этом плане имеет широкие перспективы применения.

Исследуемый хребет сформировался в начале позднемиоценовой эпохи и позже был практически разрушен денудацией. Современный облик хребта получил в результате эрозионно-тектонических процессов четвертичного периода, когда тектоническое поднятие усложнилось сплошными тремя стадиями оледенения. Поэтому рельеф

хребта выражено альпийский, долины рек узкие, глубоко врезаемые, V-образные, особенно в зоне сильного поднятия. В восточном склоне сохранились следы ранне-неогеновой денудации, также усложнённой ледниковой деятельностью. В этой части хребта долины корытообразные, формируются моренные и водно-ледниковые отложения [7].

Цель исследования – проанализировать ландшафтную структуру восточного склона хребта Орулган. Район исследования расположен на переходе Орулганских гор в Янское плоскогорье, определенное долиной реки Бытантай. Долина р. Омолуй выступает буфером между Орулганом и южной конечностью кряжа Кулар. Исследуемая территория расположена между $68^{\circ}24,1'$ – $67^{\circ}34,3'$ северной широты и $129^{\circ}14,5'$ – $131^{\circ}32'$ восточной долготы и занимает площадь размером 60×100 км. В ее пределах расположен центр Эвено-Бытантайского национального улуса – поселок Батагай-Алыта. Климат резко континентальный, согласно метеоданным станции Батагай-Алыта (абсолютная высота – 486 м), среднегодовая температура $-14,7^{\circ}\text{C}$, годовое количество осадков 192 мм [8].

Материалы и методы исследования

Достижение детальности исследования ландшафтной структуры для горных территорий является довольно сложной задачей, методы и способы отображения во многом переходят из области картографии в область комплексного геоинформационного моделирования на основе различных наборов геопространственных данных. В работе А.А. Глотова (2011) были изложены основные положения геоинформационного моделирования ландшафтов и обосновано их применение на примере парагенетических долинно-речных ландшафтов Воронежской области [9]. Описание пространственного объекта, например природного комплекса или явления, в рамках геоинформационного моделирования проводится путем составления аппаратного комплекса, то есть набора операций в ГИС-среде, конечным результатом которых являются геоданные, содержащие формализованное описание объектов, заложенных в теоретической основе моделирования. Его конечная цель – представление исследуемых частей объекта в совокупности и по отдельности. Вариаций геоинформационного моделирования много, и аппаратный комплекс при этом адаптируется под каждый объект изучения.

Так, геоинформационное моделирование ландшафта представляет собой комплекс, состоящий из субсистем (компонентов ландшафтов и их функциональных взаимосвязей), представленных количественными данными, такими как цифровые модели рельефа, растительность, климат и т.д. Для исследования мы использовали методические разработки, представленные в предыдущей публикации [10]. Для выполнения данной задачи нами были использованы инструменты обработки геопространственных данных и модули анализа и полуавтоматической классификации набора растровых моделей и спутниковых изображений в пакетах программного обеспечения QGIS, GRASS GIS и SAGA GIS. Для полуавтоматиче-

ской классификации форм рельефа создана мозаика сцен данных цифровой модели рельефа ASTER GDEM. Тип местности определялся в два этапа, первый из которых – классификация форм рельефа. Нами рассчитаны индексы топографической позиции в двух размерностях (500 и 2500 м) для классификации форм рельефа по алгоритму Дженнеса [11], который показал удовлетворительный результат, определив шесть форм рельефа (вершины, крутые склоны, средние склоны, V-образные долины, долины и локальные возвышенности). Полученные результаты были наложены на карту четвертичных отложений, и через визуальную дешифровку (второй этап) были определены восемь типов местности (рис. 1).

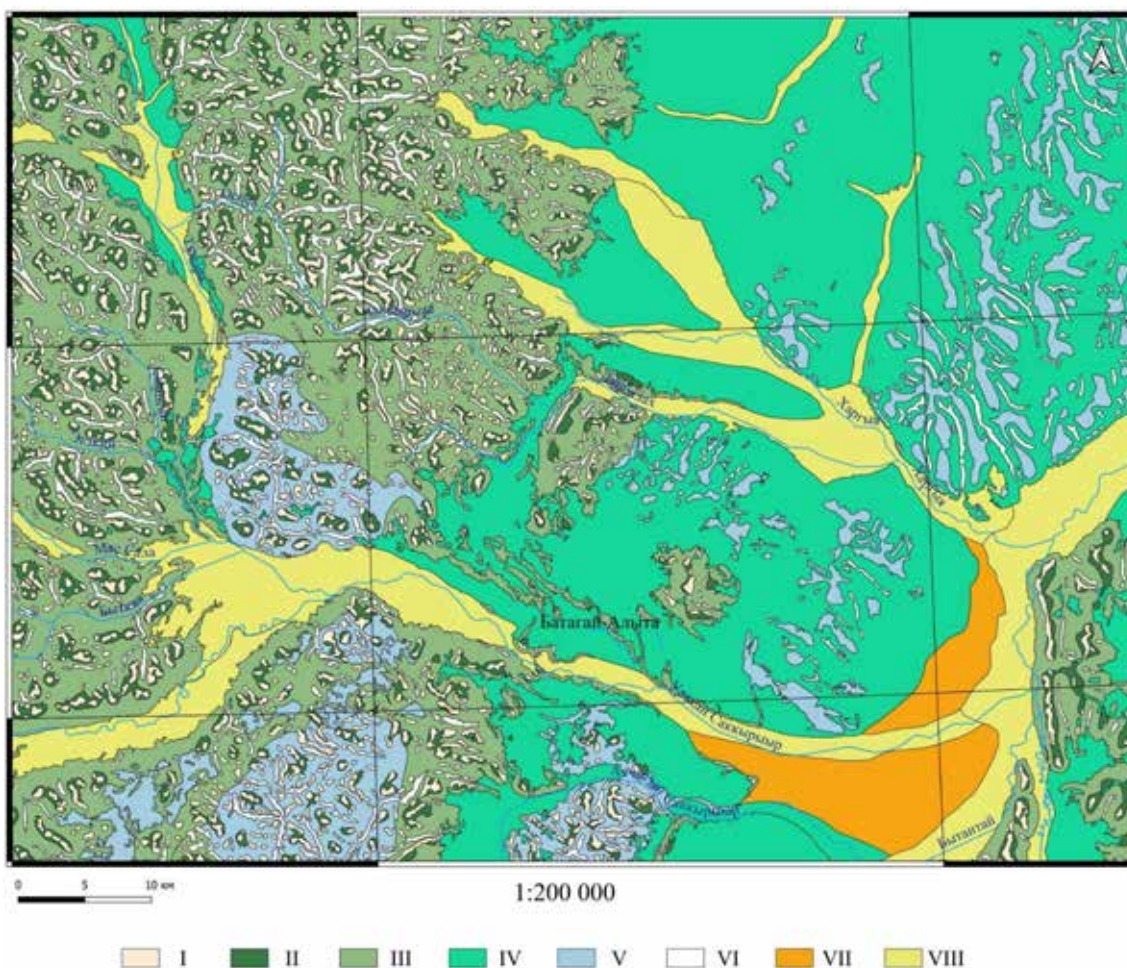


Рис. 1. Карта типов местности района исследования

Условные обозначения

Местности: I – приводораздельные-скальные; II – склоновые коллювиальные; I
 II – склоновые делювиально-коллювиальные; IV – зандровые; V – моренные;
 VI – ледниковые долины; VII – средневысотные террасы; VIII – низкотеррасовые

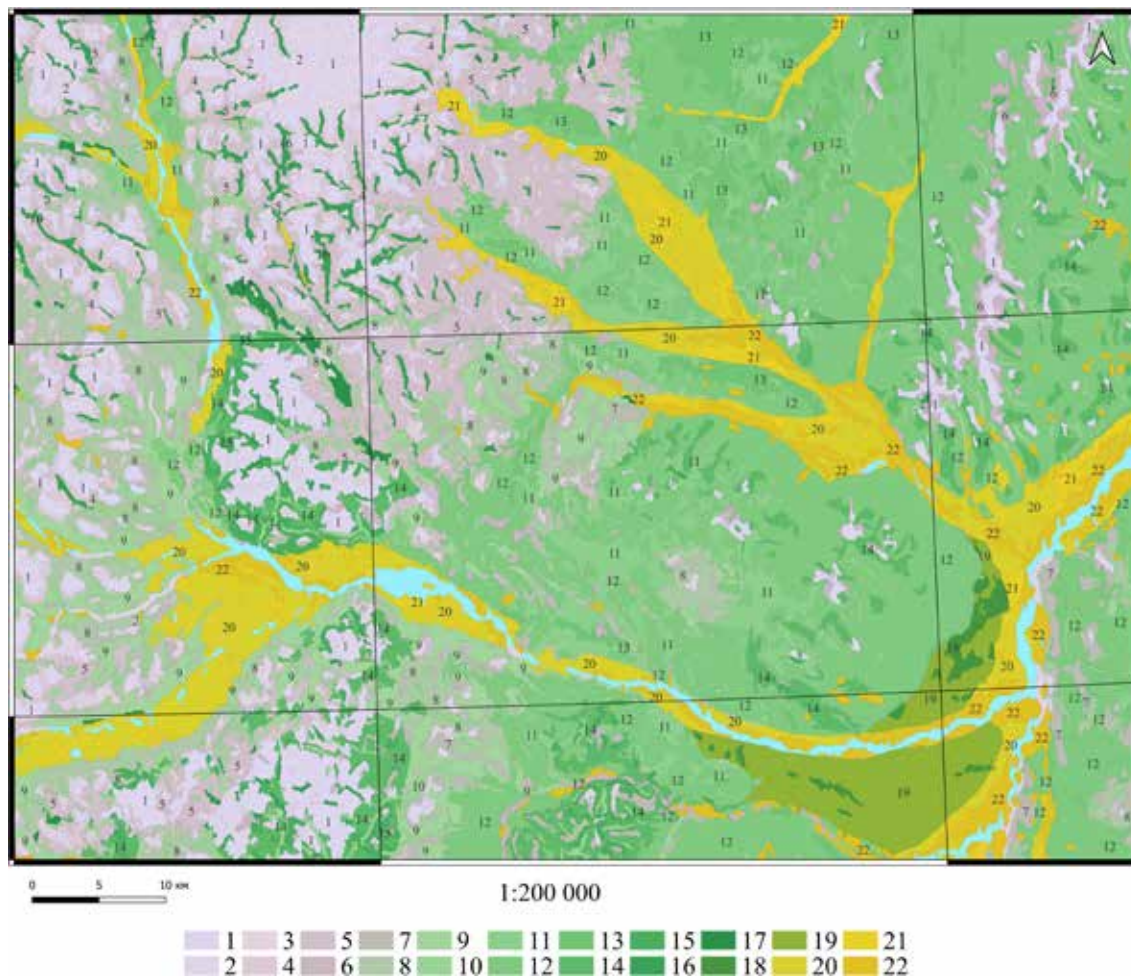


Рис. 2. Карта типов урочищ района исследования

Условные обозначения: Горные пустыни: 1. Скальные вершины с эпилитно-лишайниковой каменной пустыней; 2. Крутые склоны коллювиальные с эпилитно-лишайниковой каменной пустыней. Горные тундры: 3. Плоские вершины и высокие склоны коллювиально-элювиальные с зеленомошно-лишайниковой горной тундрой; 4. Склоны средней крутизны коллювиальные с кустарничково-лишайниково-зеленомошной горной тундрой; 5. Пологие склоны делювиально-коллювиальные с разнотравно-бриадовой тундрой в сочетании с кустарничково-зеленомошно-лишайниковой горной тундрой с ерниками; 6. Пологие склоны и средней крутизны моренные гряды с разнотравно-бриадовой горной тундрой с ерниками. Горные редколесья: 7. Пологие склоны делювиально-коллювиальные с лиственничным зеленомошно-лишайниковым редколесьем; 8. Пологие делювиально-коллювиальные склоны с лиственничным кустарничково-зеленомошным и зеленомошным редколесьем с ерниками; 9. Склоны средней крутизны делювиально-коллювиальные с лиственничным кустарничково-зеленомошным редколесьем; 10. Крутые коллювиальные склоны с лиственничным кустарничково-зеленомошным редколесьем; 11. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с лиственничным кустарничково-зеленомошно-лишайниковым и зеленомошным редколесьем с ерниками; 12. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с лиственничным лишайниковым и зеленомошно-лишайниковым редколесьем; 13. Пологие зандровые флювиогляциальные террасы с марями и лиственничными зеленомошными и сфагновыми рединами; 14. Пологие и средней крутизны моренные гряды с лиственничным лишайниковым и зеленомошно-лишайниковым редколесьем и рединой; 15. Пологие и средней крутизны моренные гряды с лиственничным кустарничково-зеленомошным-лишайниковым редколесьем. Интразональные горные и северотаежные ландшафты: 16. Ледниково-аккумулятивные горные долины гляциальные с тундровыми луговинами с участием бриадово-мохово-лишайниковой горной тундры; 17. Ледниково-аккумулятивные горные долины гляциальные и аллювиальные с болотами и заболоченными лугами; 18. Средневысотные эрозионно-аккумулятивные террасы с лиственничным лишайниковым редколесьем с участием лугов; 19. Средневысотные эрозионно-аккумулятивные террасы с заболоченными лугами и ерниками; 20. Низкие аккумулятивные аллювиальные террасы с лиственничным кустарничково-зеленомошным редколесьем; 21. Низкие аккумулятивные террасы аллювиальные с заболоченными лугами и ерниками; 22. Низкие аккумулятивные террасы аллювиальные с комплексом ольховниково-ивовых сообществ с участием лиственничных, чозениевых и тополевых лесов.

Для изучения ландшафтной структуры на уровне типов урочищ нами были использованы разновременные многозональные спутниковые снимки Landsat 8 OLI и Sentinel 2, на основе которых проведена попиксельная классификация растительного покрова. Мы выбрали временные ряды оптических изображений с нулевым или близким к нулю (<20%) облачным покрытием, сделанных в период с июня по сентябрь 2017-2019 гг. (всего 7 наборов Sentinel 2 и 10 наборов Landsat 8). Для изображений Sentinel 2 проведена операция изменения пространственного разрешения по снимкам Landsat 30 м через инструмент Resample. Далее, после предобработки для спутниковых снимков, были рассчитаны спектральные индексы NDVI, GNDVI и NDMI [12]. Точность классификации оценивалась с использованием средней общей точности (OA). OA определяет эффективность алгоритма и измеряется путем деления общего количества правильно классифицированных выборок на общее количество обучающих выборок. Наилучший результат достигнут при параметрическом классификаторе по алгоритму случайного леса (Random Forest), показана общая точность 79,7% по матрице ошибок. Результат попиксельной классификации разновременных спутниковых снимков района исследования и сравнение с основными геоботаническими единицами региона [13] позволили выделить 8 классов пикселей, которые стали базой для выделения картируемых единиц растительности: 1. Сообщества эпилитных лишайников каменистых пустынь, россыпей склонов долин рек и предгорий, речной галечник; 2. Мохово-лишайниковая горная тундра; 3. Кустарничково-мохово-лишайниковая и дриадово-разнотравная горная тундра с ерниками и тундровыми луговинами; 4. Лиственничные редколесья кустарничково-моховые; 5. Лиственничные редколесья кустарничково-мохово-лишайниковые и моховые с участием лугов; 6. Лиственничные редколесья и редины лишайниковые; 7. Комплекс болот и заболоченных лугов; 8. Комплекс долинных лиственничных, тополево-чозениевых лесов с участием ольховниково-ивовых сообществ.

Путем оверлейного объединения векторных контуров переменных моделирования выведена ландшафтная карта на уровне типов урочищ (рис. 2), по которой проанализирована ландшафтная структура исследуемой территории.

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.

Результаты исследования и их обсуждение

В ландшафтной структуре района исследования преобладает зандровый тип местности (34%), который преимущественно занят лиственничными лишайниковыми и зеленомошно-лишайниковыми редколесьями (26%). На более увлажненных участках со слабым дренажом зандровые равнины заняты марями и лиственничными рединами (3%), которые приурочены больше к бассейну Омолоя. Моренный тип местности занимает 9% территории, на 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. На зандровых равнинах под действием криогенных процессов формируются мелкобугристые формы микрорельефа [5].

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 урочищ, занимающий 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 наклонных участках, где тектонические поднятия вытеснили ледниковые формы рельефа, но при этом сохранились корытообразные горные долины. Склоновые типы местности более одно-

родны по мерзлотным характеристикам: от -2 до -6°C . Наличие развитого защитного древесного яруса обуславливает слабое проявление криогенных процессов [5]. 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 $-2 \dots -5^{\circ}\text{C}$ [5].

Современное развитие ландшафтной структуры связано с образованием обширной долины р. Бынтай и его притоков – р. Улахан-Саккырыр и р. 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 листовничным лишайниковым редколесьем с участком 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, р. Тала-Сала, р. Харгыя, р. Омолуй и др. Наибольшие площади заняты низкими аккумулятивными аллювиальными террасами с листовничным кустарничково-зеленомошным редколесьем (6%), чередующимся с урочищами заболоченных лугов с ерниками (4%). На высокой пойме и на островах рек выделяются комплексы северотаежной растительности, представленные ольховниково-ивовыми сообществами с участием листовничных, чозениевых и тополевых лесов (2%). Средневысотные террасы, как и задровые равнины, являются слабольдистыми. Термокарстовый и бугорковатый микрорельеф формируется под увлажненными заболоченными лугами и марями. Температура пород здесь составляет $-3 \dots -5^{\circ}\text{C}$. Низкие террасы также слабольдистые, температура пород от $-2 \dots -6^{\circ}\text{C}$ в листовничных редколесьях до $-1 \dots -4^{\circ}\text{C}$ под заболоченными лугами [5]. На низких террасах наиболее выражены криогенные процессы, которые формируют небольшие термокарстовые озера, бугры пучения, а также кочкарные и грядовые формы микрорельефа.

Выводы

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%. Она 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 листовничные леса с постепенным переходом в редины близ верхних границ и на переувлажненных участках. Горная тундра непосредственно граничит с редколесьем, подгольцово-кустарниковые заросли не создают отдельный высотный тип. На сухих крутых и покатых склонах напочвенный покров представлен зелеными мхами и лишайником, реже встречается ерник. Более увлажненные пологие склоны преимущественно заняты кустарничково-зеленомошными листовничными редколесьями.

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

Ведущую роль в ландшафтном разнообразии восточного склона хребта Орулган играет сочетание различных геологических структур, которое обусловлено верхнечетвертичными тектоническими поднятиями и создает эрозионно-тектонические типы местности (горно-склоновые и скальные), типы местности преимущественно ледниково-аккумулятивного происхождения (моренные и задровые и ледниково-долинные) и эрозионно-аккумулятивные типы местности (средневысотные террасовые и низкотеррасовые).

Список литературы / Reference

1. Черных Д.В., Булатов В.И. Горные ландшафты: пространственная организация и экологическая специфика: Аналит. обзор // ГПНТБ, ИВЭП СО РАН / Науч. ред. В.М. Плоснин. (Сер. Экология. Вып. 65). Новосибирск. 2002. С. 83.

- Chernykh D.V., Bulatov V.I. Mountain landscapes: spatial organization and ecological specificity. Mountain Landscapes: Space Arrangement and Ecological Particularities: Analit. obzor // GPNTB, IVEP SO RAN / Nauch. red. V. M. Plyusnin. (Ser. Ekologiya. Vyp. 65), Novosibirsk. 2002. P. 83 (in Russian).
2. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. М.: Ин-т мерзлотоведения СО РАН СССР, Якутск. 1991. 140 с.
- Fedorov A.N. Permafrost landscapes of Yakutia: methods of allocation and mapping issues. M.: In-t merzlotovedeniya SO RAN SSSR, Yakutsk. 1991. 140 p. (in Russian).
3. Булатов В.И. Мерзлота в ландшафтной сфере: вопросы теории // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2015. № 1. С. 20-25.
- Bulatov V.I. Permafrost in the landscape sphere: questions of theory // Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 2015. № 1. P. 20-25 (in Russian).
4. Милюков Ф.Н. Ландшафтная сфера Земли. М.: Мысль, 1970. 207 с.
- Milkov F.N. Landscape sphere of the Earth. M.: Mysl, 1970. 207 p. (in Russian).
5. Федоров А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Якутск, 2020. 38 с.
- Fedorov A.N. Evolution and dynamics of permafrost landscapes: avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. Yakutsk, 2020. 308 p. (in Russian).
6. Осадчая Г.Г. Мерзлотные ландшафты Большеземельской тундры как основа рационального природопользования: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Ухта, 2018. 35 с.
- Osadchaya G.G. Permafrost landscapes of the Bolshezemelskaya tundra as the basis of rational nature management: avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. Ukhta, 2018. 35 p. (in Russian).
7. Николин Е.Г. Флора Верхоянского хребта и ее пространственная организация: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Якутск, 2012. 35 с.
- Nikolin E.G. Flora of the Verkhoyansk Range and its spatial organization: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. Yakutsk, 2012. 35 p. (in Russian).
8. Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., Shestakova A.A., Varlamov S.P., Zheleznyak M.N., Shepelev V.V., Konstantinov P.Y., Kalinicheva S.S., Basharin N.I., Makarov V.S., Ugarov I.S., Efremov P.V., Argunov R.N., Egorova L.S., Samsonova V.V., Shepelev A.G., Vasiliev A.I., Ivanova R.N., Galanin A.A., Lytkin V.M., Kuzmin G.P., Kunitsky V.V. Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1: 1,500,000. Geosciences. 2018. Vol. 8. P. 465. DOI: 10.3390/geosciences8120465.
9. Глотов А.А. Геоинформационное моделирование эволюции долинно-речных ландшафтов Воронежской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2013. 24 с.
- Glotov A.A. Geoinformation modeling of the evolution of valley-river landscapes of Voronezh Region: avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Voronezh, 2013. 24 p. (in Russian).
10. Zakharov M., Cherosov M., Troeva E., Gadal S. Vegetation cover analysis of the mountainous part of north-eastern Siberia by means of geoinformation modelling and machine learning (basic principles, approaches, technology and relation to geosystem science). BIO Web of Conferences, EDP Sciences. 2021. P. 38.
11. Mokarram M., Roshan G., Negahban, S. Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Koria-Darab plain, Iran). Model. Earth Syst. Environ. 2015. Vol. 1. № 40. DOI: 10.1007/s40808-015-0055-9.
12. Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В. Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167-191.
- Puzachenko M.Yu., Chernenkova T.V. Determination of factors of spatial variation of vegetation cover using DDZ, DEM and field data on the example of the central part of Murmansk Region // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. Vol. 13. № 5. P. 167-191 (in Russian).
13. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Satellite mapping of the vegetation cover of Russia. M.: IKI RAN, 2016. 208 p. (in Russian).