

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 911.52

DOI 10.25587/2587-8751-2024-1-75-87

*М.И. Захаров¹, М.М. Черосов², С. Гададь³, Е.И. Троева⁴*¹ СВФУ М.К. Аммосова, г.Якутск, Россия² Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства СО РАН, г.Якутск, Россия³ Университет Экс-Марсель, г.Экс-ан-Прованс, Франция⁴ Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г.Якутск, Россия
e-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

ЛАНДШАФТНАЯ СТРУКТУРА ДОЛИНЫ СРЕДНЕЙ ЛЕНЫ

Аннотация. В статье приведены результаты исследования ландшафтной структуры участков долины Средней Лены (местностей «Эркэни», «Энсиэли» и «Туймаада»), выполненные с помощью геоинформационного картографирования по спутниковым снимкам Sentinel 2 MSI и Landsat 8 OLI и цифровой моделью рельефа ASTER GDEM. Аласные комплексы и сельскохозяйственные поля были идентифицированы с помощью сегментации спутникового изображения по К-средним с разными начальными числами. Для попиксельной классификации ландшафтного покрова были протестированы три алгоритма обучения. Лучший результат достигнут с помощью классификатора Support Vector Machine. Картографирование выявила ландшафтную структуру по 20 картируемым единицам, которые были объединены по группам плакорных, аласных, склоновых, долинных и пойменных ландшафтов. Выявлена контрастность ландшафтной структуры долины Средней Лены. Северная часть долины «Энсиэли» отличается преобладанием лесных лиственничных и сосновых ландшафтов, в водоразделе широко распространены аласные комплексы, преимущественно сухие степные сообщества с остепненными лугами. В склонах практически преобладают лиственничные леса с участками березовых сообществ. Центральная часть долины «Туймаада» наиболее антропогенно трансформированная, здесь доминируют остепненные луга и антропогенные сообщества на месте степей. Плакорная часть в основном лесная с сельскохозяйственными пашнями. Южная часть участка долины «Эркэни» характеризуется наименьшей площадью долинной части с доминированием остепненных лугов, а склоны коренного берега рек Лена южной и юго-восточной экспозиции покрыты ксерофитными степями и остепненными лугами. Ландшафтная структура долины, пойменной и плакорной частей во многом определяет специфику сельскохозяйственного землепользования. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего исследования реакции мерзлотных ландшафтов долины Средней Лены на усиление антропогенной нагрузки в условиях климатических изменений.

Ключевые слова: ландшафтная структура, классификация ландшафтного покрова, сегментация изображения, долина Средней Лены.

M.I. Zakharov¹, M.M. Cherosov², S. Gada³, E.I. Troeva⁴

¹ North-Eastern Federal University named after. M.K. Ammosova, Yakutsk, Russia

² Yakutsk Research Institute of Agriculture SB RAS, Yakutsk, Russia

³ Aix-Marseille University, Aix-en-Provence, France

⁴ Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

LANDSCAPE STRUCTURE OF THE MIDDLE LENA VALLEY

Abstract. In this article we present the results of landscape structure study in the Middle Lena valley (Erkeni, Ensieli and Tuimaada), made using GIS mapping based on Sentinel 2 satellite images and ASTER GDEM datasets. Alas complexes and croplands were identified using K-means image segmentation with different initial numbers. Three machine learning algorithms were tested for pixel-based land cover classification. The best result was achieved with the Support Vector Machine classifier. The mapping revealed the landscape structure of 20 spatial units, which were organized into groups of upland, alas, slope, valley and floodplain landscapes. The contrasting landscape structure of the Middle Lena valley was revealed. The northern Ensieli valley is characterized by the predominance of forest larch-pine landscapes, alas complexes mostly dry with steppe meadows are widespread in the watershed. The slopes are dominated by larch forests with patches of birch. The central Tuimaada valley is the most anthropogenically transformed, here steppe meadows and anthropogenic steppes dominate. The plateau part is mainly forested with croplands. The southern valley of the Erkeni is characterized by the smallest area of the valley part dominated by steppe meadows, the slopes of the main bank of the southern and south-eastern exposition are covered with xerophytic meadows. The landscape structure of valleys, floodplain and plakor parts largely determines the specifics of agricultural land use of the local population. The results obtained can be used for further research into the response of permafrost landscapes of the Middle Lena valleys to increased anthropogenic pressure in the context of climate change.

Keywords: landscape structure, land cover classification, image segmentation, Middle Lena valleys.

Введение

Инвентаризация ландшафтной структуры любого региона необходима как с точки зрения природопользования, так и с точки зрения территориального планирования. Важно также учитывать функционирование ландшафтов и локальные колебания, являющиеся механизмами самоорганизации геосистем. Знания о ландшафтах в современных условиях находят особое применение в практической реализации экологической, социальной и экономической повестки дня. Актуальность таких исследований для “быстро реагирующих” мерзлотных ландшафтов повышается, в связи с происходящими климатическими изменениями, где повышение температур воздуха сопровождается деградацией криолитозоны. Речные долины в основном состоят из гидроморфных ландшафтов с двумя контрастными геосистемами: слабодренлируемыми и проточными, периодически дренируемыми [1]. Интразональные долинны ландшафты являются основными районами расселения населения, так долина Средней Лены (часть долины реки Лена на среднем течении) является наиболее густонаселенной в Центральной Якутии, где формируется городская агломерация Якутска с более чем 340 тыс. жителями [2]. Поэтому долинны ландшафты подвергаются повышенной антропогенной нагрузке, сопровождаемой трансформацией геосистем, в результате которого они могут выйти за рамки своей устойчивости [3] и в целом к ухудшению функционирования и ценности.

Долина Средней Лены по мерзлотно-ландшафтному районированию [4] входит в Лено-Амгинскую аласную провинцию, основная часть провинции расположена на правом берегу р. Лена, при этом комплекс отличается повсеместным распространением криогенных форм рельефа, прежде всего аласов (термокарстовых котловин). Провинция выделяется прежде всего единством генетической основы, поэтому аласные комплексы встречаются в противоположных берегах реки. Четвертичные отложения коренного берега (водораздела) преимущественно отно-

сятся к каргинскому межледниковому горизонту [5] с породами повышенной льдистости, ландшафты в зоне распространения этих отложений классифицируются как межаласные и аласные. Элювиальные и делювиальные супесчаные отложения формируют плакорный ландшафт коренного берега. Долина Средней Лены сформирована аллювиальными отложениями позднего неоплейстоцена (надпойменная терраса) и голоцена (якутская и сергеляхская). Из трех местностей долины северная “Энсиэли” по площади является самой большой, южная “Эркээни” самой маленькой. Местность “Туймаада” – центральная среди трех изучаемых.

Для определения района исследования нами применен подход интерференции бассейновой организации и ландшафтного районирования Лено-Амгинской аласной провинции. Для этого было выполнено оверлейное наложение векторных слоев HydroSHEDS 6-го уровня реки [6] Лена и карты мерзлотно-ландшафтного районирования (рис. 1). Выбранная нами территория для исследования в административном отношении принадлежит ГО «Якутск», ГО «Жатай», на юге Хангаласскому району, включая центр города Покровска, и Намскому району с центром Намцы на севере. Общая площадь района исследования составляет – 21 тыс. кв. км.

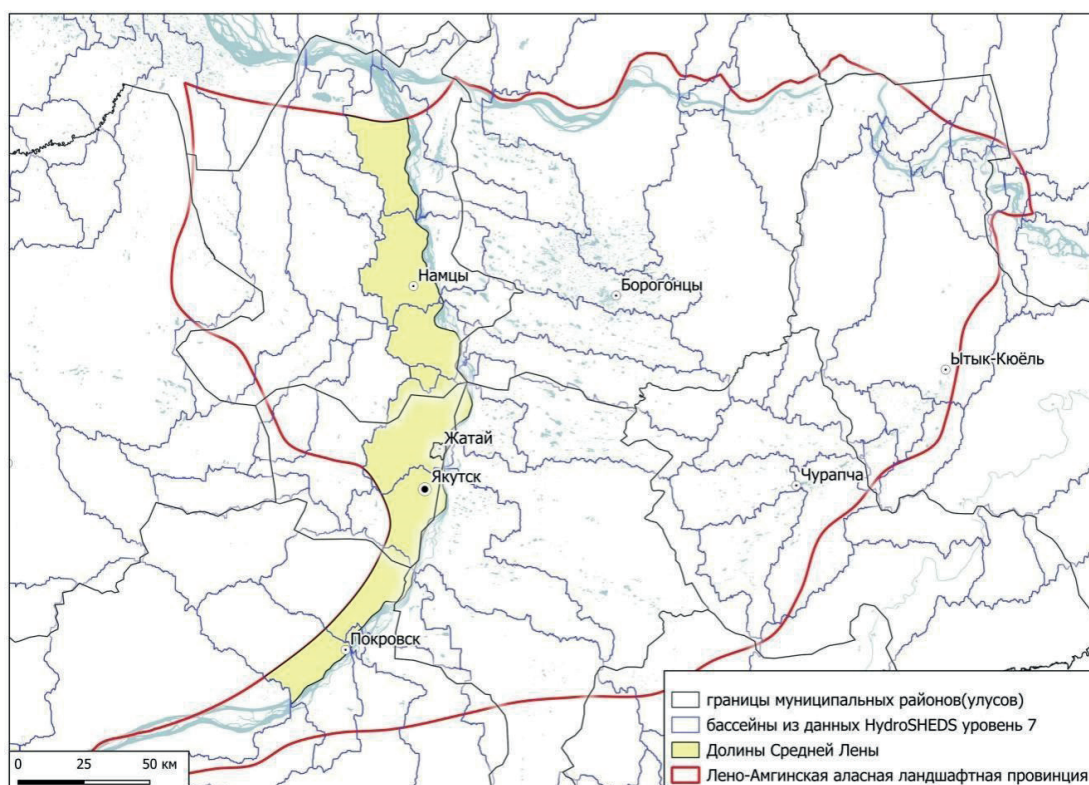


Рис. 1. Район исследования долины Средней Лены

Fig. 1. The area of exploration of the valley of the Middle Lena

Выделенный район исследования, таким образом, совмещает две почти параллельные пространственные единицы: генетически однородный комплекс ландшафтной аласной провинции и комплекс разнородных парадинамических бассейновых ландшафтов. Хотя мы не считаем, что полученный район исследования претендует на комплексное представление ландшафтной структуры речных долин с водосборными бассейнами, но представляет собой некий синтез стратиграфо-генетической и потоковой организации долины Средней Лены. Значительная часть водосборного бассейна долины «Эркээни» не попала в район исследования, что не позволяет нам в полной мере говорить о бассейновой ландшафтной структуре долины, поэтому мы

сосредоточимся в анализе на склоновой, террасовой и пойменной группе ландшафтов, при этом давая общие пространственные характеристики всей парадинамической системе.

Методы и материалы

Общий методологический рабочий процесс состоит из трех основных этапов: (1) классификация ландшафтного покрова (land cover) и землепользования (land use) с использованием функционально-динамического подхода классификации временного ряда спутниковых изображений по обучающим выделам, взятых из полевых материалов и изображений с высоким разрешением, выделенные классы действуют как набор геоботанических единиц (фитоценозы); (2) идентификация геоморфологических единиц с использованием двух подходов: геоморфологического анализа цифровой модели рельефа и сегментации изображений по алгоритму k-средних; (3) объединяя оба результата, мы улучшаем полученные геоботанические и геоморфологические единицы для инвентаризации видов ландшафта и групп ландшафтов по типам местности. Ранее вышеописанная методика была применена для локального участка исследования в долине “Энсиэли” [7].

В геоботаническом и геоморфологическом аспектах территория исследований хорошо изучена [8-10]. Рельеф территории достаточно простой и представляет собой плоскую равнину, сложенную преимущественно элювиальными суглинистыми и супесчаными отложениями древней денудационно-аккумуляционной террасы и лёссовыми супесчаными отложениями. Склон коренного берега реки Лены, имеет высоту 30-80 метров и сложен коллювиально-делювиальными супесчаными породами. Терраса на территории исследований невысокая, с разнообразными аллювиальными отложениями [11].

Для картографирования использован архив спутниковых данных Sentinel 2 с пространственным разрешением 10 м, 20 м и Landsat 8 с пространственным разрешением 30 м в облачной платформе Google Earth Engine (GEE). Нами отобраны малооблачные месячные сцены на период Май-Сентябрь с 2015 по 2022 год. По полученному набору снимков скомпилированы медианные значения спектральных каналов, по которым были вычислены показатели NDVI, GNDVI, NDMI, MNDVI. Всего в базе данных Google на исследуемой территории за интересующий период хранится 1259 наборов Sentinel 2 MSI и 455 наборов Landsat 8 OLI. Из всего набора изображений мы выбрали 305 наборов Sentinel 2 и 99 Landsat. Большинство изображений приходится на июнь, июль и август. В комплект входят все изображения 2013 года для Landsat 8 Collection 1 с калиброванной отражательной способностью верхней части атмосферы (TOA) уровня 1 и 2015 года для Sentinel 2, а также с калибровкой TOA. Мы использовали возможность маскировать облака и тени облаков для изображений с облачностью до 20 %. Для ряда районов с полевыми данными, в том числе Хамагатты, окрестностей Якутска, аласов севернее Якутска и террасы южнее Якутска, также были составлены выборки точек классов, с использованием картографических данных о растительности и данные геосервисов Google и Яндекс. Всего было создано 1453 точки выборки. Мы определили 40 % баллов как тренировочные и 60 % как проверочные. Количество баллов варьируется в зависимости от наличия проведенных работ и точности полевых геоботанических описаний. По результатам обработки полевых исследований и анализа изображений высокого разрешения нами выделено 9 классов ландшафтного покрова и землепользования по трем алгоритмам, имплементированных в GEE: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) и Classification and Regression Tree (CART). 7 классов представляют собой коллекции нескольких групп растительных ассоциаций, определенных по доминирующим видам: лиственные леса, сосновые сообщества, степные сообщества, настоящие луга, влажные луга, ивняки и водно-болотные угодья. Два других класса это здания и аллювиальные пески, а также водные объекты. Классы, которые мы дискриминировали, достаточно хорошо отличаются друг от друга, что мы можем определить по временным профилям NDVI, GNDVI, NDMI и MNDVI.

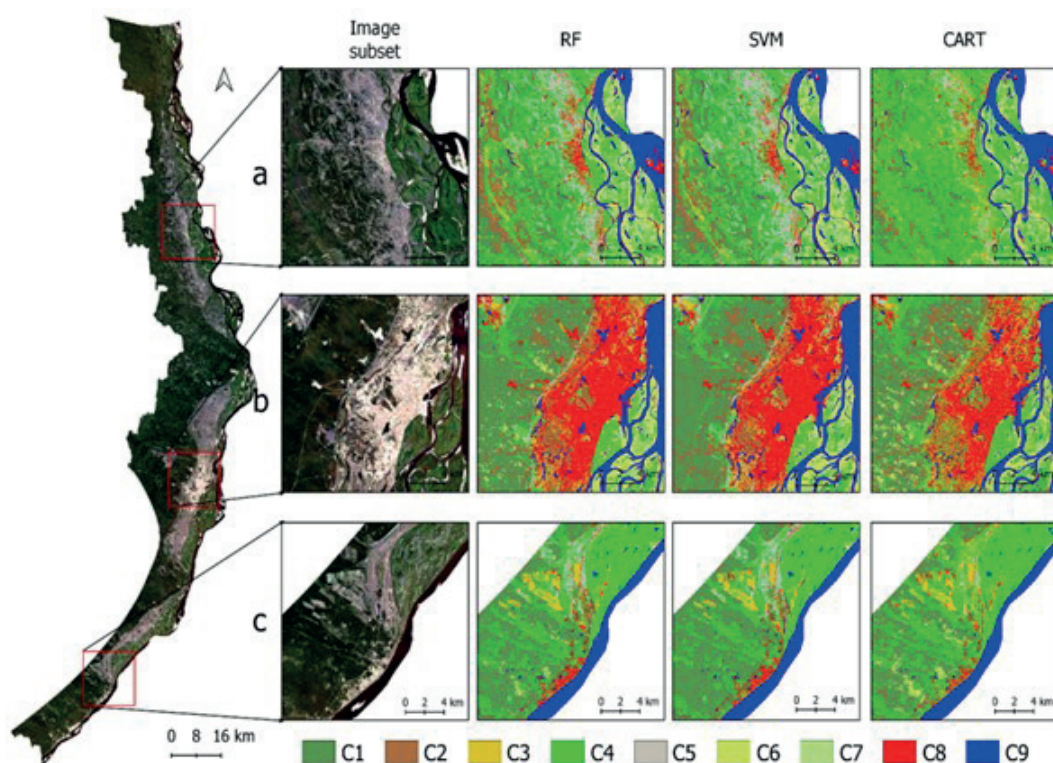


Рис. 2. Результаты классификации RF, SVM и CART ландшафтного покрова в долине Средней Лены прилегающим к (а) с.Намцы, (б) г.Якутск и (в) г.Покровск

Условные обозначения: (C1) лиственные леса; (C2) сосновые и еловые леса; (C3) влажные луга; (C4) настоящие луга; (C5) степи, остепненные луга и пашни; (C6) ивняки; (C7) водно-болотные сообщества и заболоченные луга; (C8) селитебные ландшафты и пески; (C9) водные объекты

Fig. 2. Results of classification of RF, SVM and CART landscape cover in the valley of the Middle Lena adjacent to (a) Namtsy village, (b) Yakutsk and (c) Pokrovsk

Symbols: (C1) larch forests; (C2) pine and spruce forests; (C3) wet meadows; (C4) real meadows; (C5) steppes, settled meadows and arable land; (C6) willows; (C7) wetland communities and swampy meadows; (C8) residential landscapes and sands; (C9) water bodies

Мы оценивали результаты классификации на основе общей точности классификации (OA), коэффициента Каппа, точности пользователя (UA) и точности производителя (PA). Значения OA и каппа результатов классификации алгоритмом SVM составили 88,59 % и 0,94 % соответственно, что является лучшим среди других. За исключением C3, точность для остальных типов земель была выше 85 %. Хотя точность RF классификации была приемлемой, PA и UA некоторых типов земного покрова не были идеальными. Например, PA C5 и C6 составляли 30,31 % и 58,60 %, а UA – 31,25 % и 60,15 % соответственно. PA осок и зданий по алгоритму CART составила 60,02 % и 70,25 %, UA – 64,87 % и 71,63 % соответственно. Ошибки чаще всего возникают в областях высокой неоднородности, где один или несколько классификаторов обычно выдают ошибки обобщения. Поэтому из полученных карт классификации ландшафтного покрова мы выбрали результат, полученный классификатором SVM. Классификационный растровый слой для дальнейшего использования в качестве геоботанической переменной для картографирования ландшафтов.

Исходными данными для картографирования аласных комплексов послужила медианная мозаика всех снимков Sentinel-2, позволяющая избежать сезонных колебаний значений космо-

снимков растительности аласов, приводящих к “слиянию” их с лесами, и следов лесных пожаров, которые не учитываются при медианном значении (рис. 3, а). Мы получили наиболее оптимальный результат сегментации, используя начальное число 20 (рис. 3, б). Полученный результат был векторизован, и полигоны, связанные с аласными комплексами, были выбраны вручную. Помимо аласов, на возвышенности выявлены и сельскохозяйственные угодья. Всего нами обнаружен 751 объект, отнесенный к категории алас, и 103 объекта, приуроченных к пашням.

Геоморфологические единицы, определяемые мезорельефом, идентифицировались с помощью мозаики сцен ASTER GDEM. Мозаика ЦМР предварительно обработана для сглаживания перепада высот и удаления ненужных локальных высот, которые нельзя определить, как форму мезорельефа. Для этого были использованы инструменты GRASS GIS и SAGA GIS для анализа окрестности по среднему значению окна в 5 пикселей, затем dtm-фильтр и билинейная интерполяция. По сути, мы перекомпилировали ЦМР, чтобы отбросить аномальные абсолютные высоты. Геоморфологический анализ состоял из трех этапов (рис. 3): (с) анализ с помощью *r.geomophon*, с помощью которого различаем склон между возвышенностью и пойменной террасой и с помощью порога отделяем возвышенность и пойменную террасу; (d) результат векторизации сегментации изображения для выделения аласов и пашен (е) объединение полученных результатов.

Классификация ландшафтного покрова и землепользования, сегментация изображений и анализ рельефа в совокупности определяют геоботанические и геоморфологические переменные для определения видов ландшафта и местности и их картографирования. Для этого мы выполняем оверлейную операцию пересечения, растеризации, просеивания, анализа соседства и переклассификации [7].

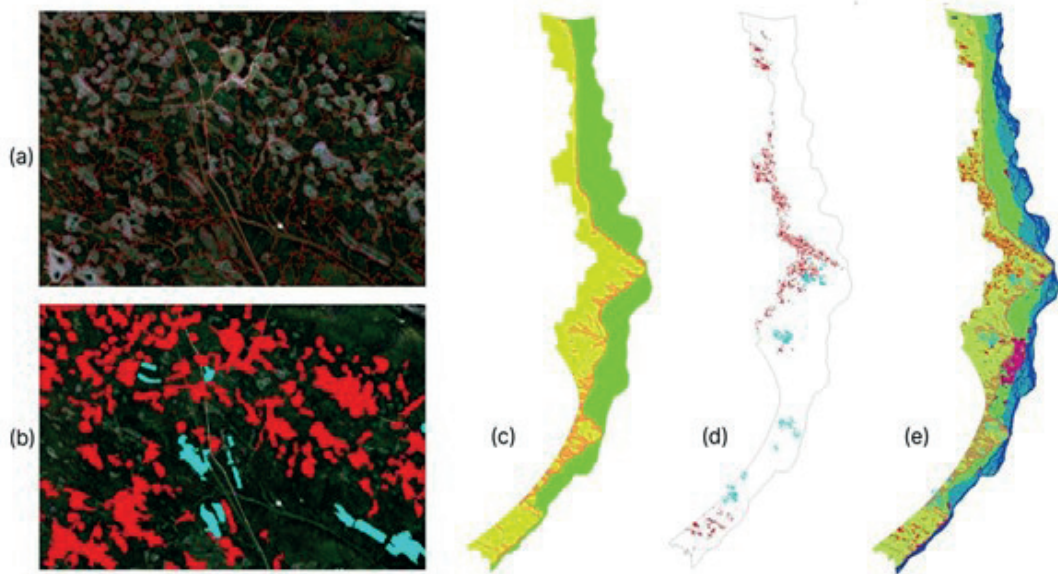


Рис. 3. Идентификация геоморфологических единиц: (а) результат сегментации изображения с помощью классификации k-средних; (б) извлечение аласов (красный цвет) и сельскохозяйственных пашен (синий цвет) (с) анализ местности по ЦМР; (d) результаты GEOBIA; (е) карта типов местности

Fig. 3. Identification of geomorphological units: (a) the result of image segmentation using k-means classification; (b) extraction of alas (red) and agricultural arable land (blue); (c) terrain analysis by DEM; (d) GEOBIA results; (e) terrain type map

Группы ландшафтов	Ландшафты	
Плакорные	1	Межаласье суглинистые с лиственничными кустарничково-зеленомошными лесами
	2	Плакоры суглинисто-супесчаные с сосновыми толокнянково-лишайниковыми лесами
	3	Плакоры суглинистые с лиственничным кустарничковыми лесами с участием березы
	4	Межаласье суглинистые возвышенность с березняками, лугами и болотами.
Аласные	5	Аласы суглинистые со степными мезофитными лугами
	6	Аласы суглинистые с заболоченными лугами и болотами
Склоновые	7	Склоны песчано-делювиально-коллювиальными с сосновыми толокнянковыми лесами
	8	Склоны суглинистые и песчаные делювиальные с лиственнично-сосновыми лесами с участием березы
	9	Пологие делювиальные склоны суглинистые с березняками и заболоченными лугами
	10	Крутые склоны делювиально-солифлюкционные с остепненными ксерофитными лугами
Долинные	11	Средние террасы аллювиальные супесчаные лиственнично-сосновые толокнянковые леса
	12	Средние террасы аллювиальные супесчаные сосновые толокнянковые леса
	13	Низкие террасы аллювиальные песчаные с березовыми и ивовыми зарослями
	14	Низкие террасы аллювиальные суглинисто-песчаные с преимущественно антропогенными степями.
	15	Низкие террасы суглинистые с мезофитными лугами
	16	Низкие террасы аллювиальные супесчано-суглинистые с заболоченными лугами и болотами
Пойменные	17	Нижние и средние поймы аллювиальные песчаные с ивняками
	18	Высокие поймы аллювиальные песчаные с березовыми лесами с участием ели
	19	Высокие и средние поймы аллювиальные супесчано-песчаные с мезофитными лугами
	20	Нижние и средние поймы аллювиальные супесчаные с заболоченными лугами и болотами.
	21	Сельскохозяйственные пашни (в том числе заброшенные с сеgetальной растительностью)
	22	Постройки и дорожное покрытия
	23	Аллювиальные пески и антропогенно нарушенные открытые почвы (карьеры)
	24	Водные поверхности

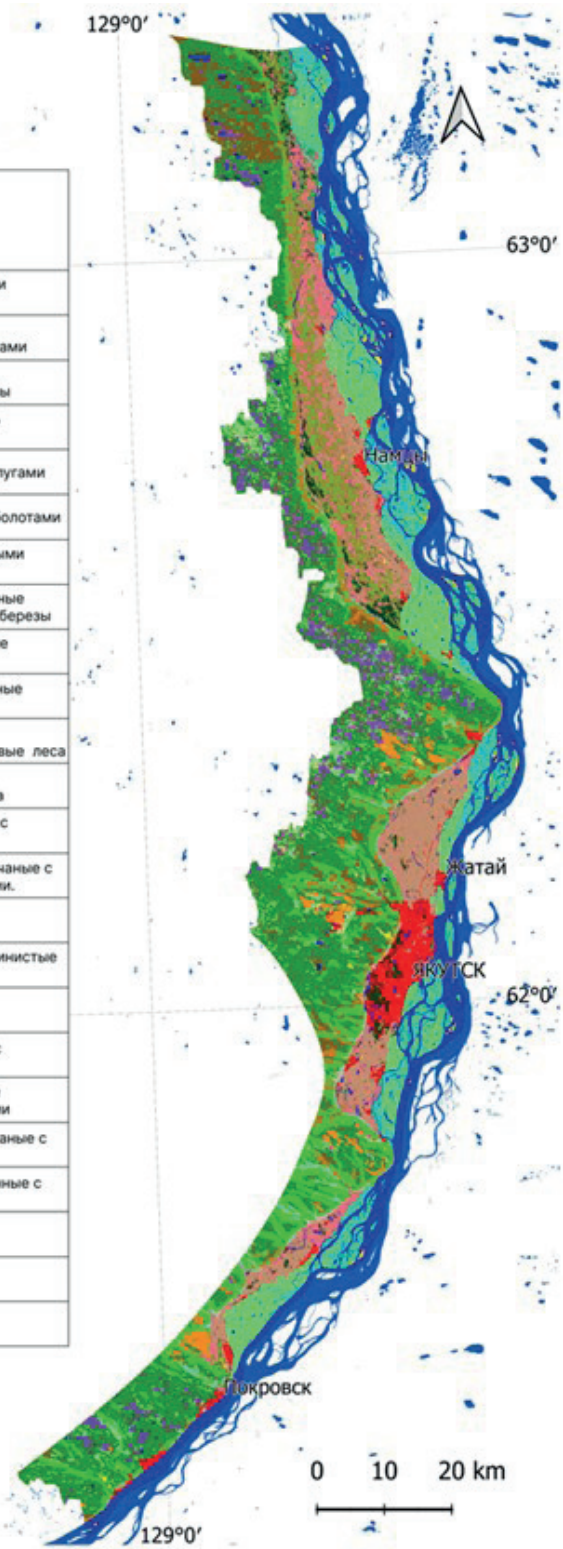


Рис. 4. Ландшафты долины Средней Лены
Fig. 4. Landscapes of the valley of the Middle Lena

Результаты и обсуждение

В результате картографирования получена ландшафтная структура долины Средней Лены по 20 видам ландшафтов и 8 типов местности, включая территории населенных пунктов и пашни (рис. 4). В табл. 1 приведено подробное описание ландшафтов с описанием деталей литологии типов местности в зависимости от растительности, литологии и мезорельефа по данным. В районе исследования распространены четыре древесных породы: лиственница (*Larix cajanderi*), сосна (*Pinus sylvestris*), береза (*Betula pendula*) и ель (*Picea obovata*). Лиственничный лес густой в сочетании с березой и кустарниками доминирующий фитоценоз на водоразделе и представлены на северной части долины “Энсиэли”. Сосна занимает более сухие участки, где имеется степная растительность, на склоне коренного берега реки Лены на хорошо дренируемых склонах южной экспозиции. Ель в классификации входит в С2 наряду с сосной как темнохвойная порода деревьев, но ель в регионе растет только в пойме, поэтому хорошо дифференцируется по типу местности. В целом виды ландшафтов определяются как части местности (один мезорельеф), но отличаются различиями в геоботанических единицах. Например, лиственничные леса выделяются как на возвышенности, так и на террасе, как и сосновые леса, но при этом их литолого-почвенный покров будет отличаться. Различия проявляются и в криогенных процессах. Например, солифлюкция характерна для безлесных участков склонов с близкой мерзлотой, поэтому на исследуемой территории, если склон имеет степной покров, то тип рельефа будет склоновый делювиально-солифлюкционный, в противном случае склоновый делювиально-коллювиальный. Два вида ландшафтов аласных комплексов выделены в зависимости от увлажнения: степные и остепненные ксерофитные луга и настоящие/заболоченные луга. Таким образом, полученная карта отражает нанесенные на карту геосистемы, которые можно определить с помощью комплексного геоинформационного моделирования.

Наиболее распространенными видами ландшафтов района исследования и имеющими большие размеры на межаласном типе рельефа являются лиственнично-кустарниково-зеленомошные леса на плакоре и межаласье, фактически занимающие почти весь водораздел, ее сукцессионная часть, как вид ландшафта, возникающий преимущественно вследствие лесных пожаров и характеризующийся развитием послепожарной сукцессии растительного покрова (лиственница и берёза). Фрагментация этого вида ландшафта очень высока, что объясняется большим количеством и пространственной дифференциацией гарей. Кроме того, водораздел сильно фрагментирован аласными комплексами.

Почти 80 % аласных комплексов приходится на водораздел долины “Энсиэли” в его южной части, меньше всего в долине “Эркээни”, что, объясняется сменой литогенной основы ландшафта, а также не включение значительной части водораздела в картографируемую территорию, но даже рассматривая снимки геосервисов можно заметить отсутствие аласных комплексов. В целом по медианным размерам сухие ксерофитные луга занимают большую территорию, чем мезофитные и гидрофитные, они сопоставимы по количеству единиц, но в то же время влажные луга уступают по общей площади почти в два раза. Этот факт указывает на аридные условия Центральной Якутии для аласных комплексов.

Таблица 1 – Характеристика ландшафтной структуры

Код на карте	Описание растительности	Описание литогенной основы
L1	Лиственничные (<i>Larix cajanderi</i>) кустарниковые леса (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) и зеленомошные	Лёссы межаласные супесчаные и элювиальные суглинистые

L2	Сосновые (<i>Pinus sylvestris</i>) толокнянники (<i>Arctostaphylos uva-ursi</i>) леса с лиственницей (<i>Larix cajanderi</i>)	Лёссы межаласные супесчаные
L3	Лиственничные (<i>Larix cajanderi</i>) кустарничковые леса (<i>Vaccinium vitis-idaea</i>) с берёзой (<i>Betula pendula</i>)	Лёссы межаласные супесчаные и элювиальные суглинистые
L4	Берёзняки (<i>Betula pendula</i>) с заболоченными и мезолугами.	элювиальные суглинистые и делювиальные супесчаные
L5	Комплекс аласных степей и остепненных лугов	Суглинистый и супесчаный термокарстовые
L6	Комплекс аласных растительных сообществ от болот и заболоченных лугов до мезофитных лугов.	Суглинистый и супесчаный термокарстовые
L7	Сосновые (<i>Pinus sylvestris</i>) леса с дерновыми степями (<i>Stipa krylovii</i> , <i>Agropyrum cristatum</i> , <i>Festuca lenensis</i>)	Супесчаные делювиально-коллювиальные и делювиально-солифлюкционные
L8	Сосновые (<i>Pinus sylvestris</i>) и лиственничные (<i>Larix cajanderi</i>) леса с дерновыми степями (<i>Stipa krylovii</i> , <i>Agropyrum cristatum</i> , <i>Festuca lenensis</i>) и берёзовыми кустарниками (<i>Betula pendula</i>)	Суглинистые делювиально-коллювиальные
L9	Берёзняк (<i>Betula pendula</i>) с комплексом заболоченных лугов и болот (<i>Carex spp.</i> , <i>Iris setosa</i> , <i>Potamogeton spp.</i> , <i>Lemna spp.</i>)	Суглинистые делювиально-коллювиальные
L10	Дерновые (<i>Stipa krylovii</i> , <i>Agropyrum cristatum</i> , <i>Festuca lenensis</i>) степи	Супесчаные делювиально-солифлюкционные
L11	Сосново-лиственничные леса (<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Larix cajanderi</i>) с кустарниками берёзы (<i>Betula pendula</i>)	Супесчаные делювиально-коллювиальные
L12	Сосновые леса (<i>Pinus sylvestris</i>) со степными травянистыми лесами (<i>Koeleria seminuda</i> , <i>Pulsatilla angustifolia</i> , <i>Festuca spp.</i>) и еловыми (<i>Picea obovata</i>)	Песчаные аллювиальные
L13	Ивовые (<i>Salix pseudopentandra</i> , <i>S. bebbiana</i>) с берёзовыми (<i>Betula pendula</i>), лиственничными (<i>Larix cajanderi</i>), еловыми (<i>Picea obovata</i>) лесами и берёзовыми (<i>Betula pendula</i>), лиственничными (<i>Larix cajanderi</i>) лесами.	Песчаные аллювиальные
L14	Комплекс корневищных (<i>Carex duriuscula</i>) и дерновых (<i>Festuca lenensis</i> , <i>Koeleria cristata</i>) степей природного и антропогенного происхождения.	Песчаные аллювиальные
L15	Комплекс заболоченных лугов и болот (<i>Carex spp.</i> , <i>Iris setosa</i> , <i>Potamogeton spp.</i> , <i>Lemna spp.</i>) и комплекс мезо (<i>Polygonum aviculare</i> , <i>Potentilla anserina</i> , <i>Taraxacum ceratiforme</i>) и степных лугов (<i>Elytrigia repens</i> , <i>Carex duriuscula</i> , <i>Saussurea amara</i> , <i>Artemisia commutata</i> , <i>Hordeum brevisubulatum</i> , <i>Thalictrum simplex</i>)	Песчаные аллювиальные
L16	Комплекс заболоченных лугов и болот (<i>Carex spp.</i> , <i>Iris setosa</i> , <i>Potamogeton spp.</i> , <i>Lemna spp.</i>)	Песчаные аллювиальные

L17	Комплекс заболоченных лугов и болот (<i>Carex spp.</i> , <i>Iris setosa</i> , <i>Potamogeton spp.</i> , <i>Lemna spp.</i>) и ивовых сообществ (<i>Salix viminalis</i> , <i>S. dasyclados</i>) травянистых в сочетании с тростниковыми лугами (<i>Calamagrostis langsдорфii</i>) и ивовыми сообществами (<i>Salix viminalis</i> , <i>S. dasyclados</i>) травяной в сочетании с тростниковыми лугами (<i>Calamagrostis langsдорфii</i>)	Песчаные аллювиальные
L18	Ельники (<i>Picea obovata</i>) в сочетании с ивами (<i>S. bebbiana</i>)	Песчаные аллювиальные
L19	Степные луга (<i>Elytrigia repens</i> , <i>Carex duriuscula</i> , <i>Artemisia commutata</i> , <i>Hordeum brevisubulatum</i> , <i>Thalictrum simplex</i>) с настоящими лугами (<i>Hordeum brevisubulatum</i> , <i>Thalictrum simplex</i> , <i>Geranium pratense</i>)	Песчаные аллювиальные
L20	Заболоченные тростниковые луга (<i>Calamagrostis langsдорфii</i>) в сочетании с заболоченными осоковыми лугами и болотами.	Песчаные аллювиальные

Сосновые леса распространены на большей части склонов между возвышенностью и террасой. По количеству пикселей на надпойменной террасе больше всего их в долине “Туймаада” и “Энсиэли”. На склоне также распространены степи, характерные для крутых склонов южной и юго-восточной экспозиции и более распространенные в Якутске, что, возможно, связано с антропогенной нагрузкой. В целом антропогенная нагрузка играет значительную роль в распространении террасных ландшафтов. Выпас скота, сенокос и другая деятельность человека являются основным фактором возникновения и распространения степей и остепненных лугов. Степень остепнённости террасовых и пойменных типов ландшафтов может служить важным индикатором изменения антропогенной нагрузки, роста городов и развития сельского хозяйства. Более 50 % площади корневищных и дерновинных степей приходится на долину “Эркээни”.

Луга и водно-болотные угодья на низких террасах являются наиболее “фрагментированными” типами ландшафтов в районе исследования. Влажные луга на низкой террасе приурочены к локальным понижениям (мочажинам) и старицам, иногда в местах активизации термокарстовых процессов.

Для пойменных ландшафтов, где нет криолитозоны, характерно распространение четырех видов ландшафтов (код на карте L17, L18, L19 и L20). В пойме преобладают ивняковые сообщества и заболоченные луга с болотами. Остепненные луга занимают до 8 % территории долины “Энсиэли” и “Эркээни”. Остепненные и степные луга поймы высокопродуктивны и используются как пашни и сенокосные угодья, что получило отражение в спектральной характеристике, отнесшей их к СЗ.

В целом по мезорельефу преобладают виды ландшафтов: в водоразделе L1; на аласных комплексах L6; на склоне L8; на террасе L14; на пойме L19. По составу доминирующих типов ландшафта можно судить, что склоны, аласы, террасы, в том числе пойменные, на большей части своей территории испытывают недостаток влаги, а в условиях изменения климата в котором сценарные прогнозы предполагают рост температур при практически неизменности количества осадков [12] можно предположить, что более засушливые типы ландшафтов имеют тенденцию к расширению.

Несмотря на значительные размеры долины “Энсиэли” по L9 и L10, уступает двум остальным долинам. Этот факт объясняется двумя факторами: 1) почти все склоны долины “Энсиэли” имеют северную, восточную и северо-восточную экспозицию и, соответственно, получают меньше солнечной радиации. Северное расположение, исходя из климатических данных, объясняет относительно более высокий уровень влажности и холодных температур, разница среднегодовых температур Якутска и Батамая составляет более 1°C.

Пахотные земли на возвышенности более характерны для долины “Туймаада” и “Эркээни”. Большая часть пахотных земель возникла еще в “советское” время, но, в настоящее время, многие из них не используются по назначению, из-за чего на них развиваются термокарстовые

процессы. На террасе и пойме реки Лены имеются пашни, но их выбор будет достаточно условным и во многом может быть неточным.

Заключение

Работа посвящена геоинформационному картографированию и анализу ландшафтной структуры долины Средней Лены в рамках бассейнового комплекса и одной ландшафтной провинции. Полученная карта представляет 20 видов плакорных и межаласных, аласных склоновых, надпойменных и пойменных ландшафтов. Расчет морфометрических показателей позволил выявить различия в размещении ландшафтов в трех муниципальных районах: Якутского (долина «Туймаада»), Намского улуса (долина «Энсиэли») и Хангаласского улуса (долина «Эркээни»). В целом наиболее антропогенно нарушенной является часть, принадлежащая Якутску, где почти 80 % террасы принадлежит либо постройкам, либо корневищным и дерновинным степям антропогенного происхождения. Намский район более влажный и, соответственно, меньшую площадь занимают степи. Прослеживается четкая тенденция изменения состава видов лесных ландшафтов по широтному климатическому градиенту.

Литература

1. Николаев, В.А. Проблемы регионального ландшафтоведения / В.А. Николаев – Москва : Издательство Московского университета 1979. – 160 с – Текст: непосредственный.
2. Гнатыук, Г.А. К вопросу о формировании Якутской городской агломерации / Г.А. Гнатыук, Ж.Ф. Дегтева, В.Ю. Кузин. – Текст: непосредственный // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2023 – № 3. – С. 65-72.
3. Гродзинский, М.Д. Устойчивость геосистем: теоретический подход к анализу и методы количественной оценки / М.Д. Гродзинский. – Текст: непосредственный // Известия АН СССР. Серия географическая – 1987. – № 6. – С. 5-15.
4. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / А.Н. Федоров, Я.И. Торговкин, А.А. Шестакова [и др.]; главный редактор М.Н. Железняк. – Якутск: – ИМЗ СО РАН, 2018. – 2 с. – Текст: непосредственный.
5. Карта четвертичных отложений: Р-52, 53 (Якутск): Государственная геологическая карта Российской Федерации (Новая серия). Карта четвертичных образований, масштаб: 1:1000000, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ» / редактор: Натапов Л.М. – 1998 г.
6. Linke, S. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution / S. Linke, B. Lehner, C.O. Dallaire [et al.] // Sci Data 6, 283, 2019.
7. Gadal, S. Alas Landscape Modelling by Remote Sensing Image Analysis and Geographic Ontology: Study Case of Central Yakutia (Russia) / S. Gadal, M. Zakharov, J. Kamičaitytė and Y. Danilov. – Text : unmediated // In Proceedings of the 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management – GISTAM, pp. 112-118.
8. Mirkin, B. The floodplain grasslands of the Middle Lena-river. I. General characteristic and ordination. / B. Mirkin, K. Kononov, P. Gogoleva, E. Burtseva, & L. Naumova. – Text: unmediated. // Folia geobot. phytotax. 27, 1992, – P.225–245.
9. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР / Андреев В., Галактионова Т., Перфильева В., Щербаков И. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1987. – 156 с. – Текст: непосредственный.
10. Desyatkin, A. Landscape Microzones within Thermokarst Depressions of Central Yakutia under Present Climatic Conditions / A. Desyatkin, F. Takakai, & M. Nikolaeva // Geosciences 2018, 8, 439 p. – Text : unmediated.
11. Правкин, С.А. Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине / С.А. Правкин, Д.Ю. Большаков, О.А. Поморцев, [и др.] – Текст: непосредственный // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2018. – Т. 63. – Вып. 2. – С. 209-229.
12. Kirillina, K. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. Kirillina, N. Tananaev, A. Savvinova, V. Lobanov, A. Fedorova, A. Borisov – Text : unmediated // Climate Services, Volume 30, 2023, 100356

References

1. Nikolaev, V.A. Problemy regional'nogo landshaftovedeniya / V.A. Nikolaev – Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta 1979. – 160 s – Tekst: neposredstvennyj.
2. Gnatjuk, G.A. K voprosu o formirovanii Jakutskoj gorodskoj aglomeracii. /G.A. Gnatjuk, Zh.F. Degteva, V.Ju. Kuzin. – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. 2023 – № 3 S. 65-72.
3. Grodzinskij, M.D. Ustojchivost' geosistem: teoreticheskij podhod k analizu i metody kolichestvennoj ocenki / M.D. Grodzinskij. – Tekst: neposredstvennyj // Izvestija AN SSSR. Serija geograficheskaja – 1987. – № 6. – S. 5-15.
4. Merzlotno-landshaftnaja karta Respubliki Saha (Jakutija). Masshtab 1: 1 500 000 / A.N. Fedorov, Ja.I. Torgovkin, A.A. Shestakova [i dr.]; glavnyj redaktor M.N. Zheleznyak – Jakutsk: IMZ SO RAN, 2018. – 2 s. – Tekst: neposredstvennyj.
5. Karta chetvertichnyh otlozhenij: P-52, 53 (Jakutsk): Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii (Novaja serija). Karta chetvertichnyh obrazovanij, masshtab: 1:1000000, sostavlena: FGBU «VSEGEI» / redaktor: Natapov L.M. – 1998 g.
6. Linke, S. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution / S. Linke, B. Lehner, C.O. Dallaire [et al.] // Sci Data 6, 283, 2019.
7. Gadal, S. Alas Landscape Modelling by Remote Sensing Image Analysis and Geographic Ontology: Study Case of Central Yakutia (Russia) / S. Gadal, M. Zakharov, J. Kamičaitytė and Y. Danilov. – Text : unmediated // In Proceedings of the 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management – GISTAM, pp. 112-118.
8. Mirkin, B. The floodplain grasslands of the Middle Lena-river. I. General characteristic and ordination. / B. Mirkin, K. Kononov, P. Gogoleva, E. Burtseva, & L. Naumova. – Text: unmediated. // Folia geobot. phytotax. 27, 1992, – P.225–245.
9. Osnovnye osobennosti rastitel'nogo pokrova Jakutskoj ASSR / Andreev V., Galaktionova T., Perfil'eva V., Shherbakov I. – Jakutsk: JaF SO AN SSSR, 1987. – 156 c. – Tekst: neposredstvennyj.
10. Desyatkin, A. Landscape Microzones within Thermokarst Depressions of Central Yakutia under Present Climatic Conditions / A. Desyatkin, F. Takakai, & M. Nikolaeva // Geosciences 2018, 8, 439 p. – Text : unmediated.
11. Pravkin, S.A. Rel'ef, stroenie i vozrast chetvertichnyh otlozhenij doliny r. Leny v Jakutskoj izluchine / S.A. Pravkin, D.Ju. Bol'shijanov, O.A. Pomorcev, [i dr.] – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. 2018. T. 63. Vyp. 2. S. 209–229.
12. Kirillina, K. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. Kirillina, N. Tananaev, A. Savvinova, V. Lobanov, A. Fedorova, A. Borisov – Text : unmediated // Climate Services, Volume 30, 2023, 100356

Сведения об авторах

ЗАХАРОВ Моисей Иванович – к.г.н., PhD, доцент эколого-географического отделения, старший научный сотрудник лаборатории климата и северных экосистем СВФУ, e-mail.ru: mi.zakharov@s-vfu.ru

ЗАХАРОВ Moisei Ivanovich – Candidate of Geographic Sciences, PhD, Associate Professor of the Department of Ecology and Geography and Senior Researcher at the Laboratory of Climate and Northern Ecosystems, Insitute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern FU

ЧЕРОСОВ Михаил Михайлович – д.б.н., и.о. директора Якутского научно-исследовательского института сельского хозяйства СО РАН, e-mail.ru: cherosov@mail.ru

CHEROSOV Mikhail Mikhailovich – Doctor of Biological Sciences, Acting Director of the Yakut Scientific Research Institute of Agriculture SB RAS, e-mail.ru: cherosov@mail.ru

ГАДАЛЬ Себастьян – проф. Университета Экс-Марсель, e-mail.ru: sebastien.gadal@univ-amu.fr

GADAL Sébastien – Full Professor, Habilitation Doctor, Aix-Marseille University, e-mail.ru: sebastien.gadal@univ-amu.fr

ТРОЕВА Елена Ивановна – к.б.н., с.н.с. Института биологических проблем криолитозоны СО РАН,
e-mail.ru: troeva.e@gmail.com

TROEVA Elena Ivanovna – Candidate of Biological Sciences, sns. Institute of Biological Problems of the
Cryolithozone SB RAS, e-mail.ru: troeva.e@gmail.com