

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК: 911.52+551.345.1+528.87

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

КРУПНОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ ТОРФЯНИКОВ НА ЮГЕ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Дмитрий Валерьевич Московченко¹, Артур Венерович Фахретдинов²

^{1, 2} Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, Россия

¹ moskovchenko1965@gmail.com, ORCID 0000-0001-6338-7669, SPIN-код: 1737-1501, РИНЦ Author ID: 100984, Scopus Author ID: 8303528400, ResearcherID: I-5635-2018

² arthurfahretdinov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8975-9771, SPIN-код: 6893-9480, РИНЦ Author ID: 1135747, ResearcherID: HKN-6575-2023

Аннотация. На юге криолитозоны мерзлота, за редким исключением, приурочена к бугристым торфяникам. Для прогноза изменения ландшафтов под влиянием потепления и организации мониторинга необходимы точные данные о распространении торфяников и занимаемой ими площади. Однако крупномасштабные карты, на которых отмечено распространение мерзлых торфяников, очень редки. Нами проведено картографирование мерзлых торфяников в районе Сибирских Увалов в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). В ходе полевых исследований были выделены участки с мерзлыми грунтами, проведены замеры температурного режима и глубины протаивания. Отмечено, что крупнобугристые торфяники сильнее прогреваются летом и охлаждаются зимой. Температура грунта на глубине нулевых теплооборотов близка к 0 °С. В качестве источника данных при картографировании использованы спутниковые снимки Landsat. Тестирование различных методов обработки изображений показало, что наибольшая точность распознавания достигнута при использовании метода Random Forest (значение коэффициента χ «каппа» – 0,96). Повторное картографирование с использованием снимка за другой год показало высокое сходство: различия выделенных типов поверхности составили менее 2 %, что доказало эффективность метода. Согласно построенным картам, торфяники занимают примерно четверть обследованного участка. Это один из самых крупных массивов мерзлых торфяников в зоне островного распространения мерзлоты. Несмотря на то, что участок расположен в зоне крупнобугристых болот, крупнобугристые торфяники встречаются примерно в три раза реже, чем плоскобугристые, что косвенно говорит об их слабой устойчивости.

Ключевые слова: мерзлые торфяники, потепление климата, растительный покров, классификация спутниковых снимков, спектральные характеристики

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0006) и за счет гранта РНФ (23-27-00366 «Современная динамика мерзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири»).

Для цитирования: Московченко Д.В., Фахретдинов А.В. Крупномасштабное картографирование мерзлых торфяников на юге криолитозоны Западной Сибири // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 174–184. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

LARGE-SCALE MAPPING OF PALASAS IN THE SOUTH OF THE CRYOLITHOZONE OF WESTERN SIBERIA

Dmitrii V. Moskovchenko¹, Artur V. Fakhretdinov²

^{1, 2} Tyumen Scientific Center, SB RAS, Tyumen, Russia

¹ moskovchenko1965@gmail.com, ORCID 0000-0001-6338-7669, SPIN-code: 1737-1501, RSCI Author ID: 100984, Scopus Author ID: 8303528400, ResearcherID: I-5635-2018

² arthurfahretdinov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8975-9771, SPIN-code: 6893-9480, RSCI Author ID: 1135747, ResearcherID: HKN-6575-2023



© 2025 Эта работа Московченко Д.В., Фахретдинова А.В. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

Abstract. In the south of the cryolithozone, permafrost, with rare exceptions, is confined to palsas. Accurate data on the distribution of palsas and on the area occupied by them is needed to predict changes in landscapes under the influence of warming and to organize monitoring. However, large-scale maps showing the spread of palsas are very rare. We have mapped palsas in the area of Siberian Ridges in the zone of island distribution of permafrost. In the course of field research, areas with frozen soils were identified, temperature conditions and thawing depth were measured. High-mound palsas were noted to warm up to a greater extent in the summer and cool down in the winter. The ground temperature at the depth of zero annual amplitude is close to 0°C. Landsat satellite images were used as a data source for mapping. Testing of various image processing methods showed that the highest recognition accuracy was achieved using the Random Forest method (the kappa coefficient was 0.96). Repeated mapping using an image from another year showed high similarity: the differences in the selected surface types were less than 2%, which proved the effectiveness of the method. According to the maps, palsas occupy about a quarter of the research area. This is one of the largest arrays of palsas in the zone of island distribution of permafrost. Although the site is located in a zone of high-mound peatlands, high-mound palsas are about three times less common than flat-mound ones, which indirectly indicates their weak stability.

Keywords: palsas, climate warming, vegetation cover, classification of satellite images, spectral properties

Funding. The research was carried within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRZ-2021-0006) and was funded by the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00366 'Modern dynamics of frozen peatlands at the southern boundary of distribution in Western Siberia')

For citation: Moskovchenko, D.V., Fakhretdinov, A.V. (2025). Large-scale mapping of palsas in the south of the cryolithozone of Western Siberia. *Geographical Bulletin*. No. 1 (72). Pp. 174–184. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-174-184

Введение

В настоящее время в связи с глобальным потеплением климата много внимания уделяется проблеме деградации вечной мерзлоты. Наиболее выраженные последствия ожидаются в зоне островного распространения ММП, где растет температура в деятельном слое и увеличивается глубина сезонного протаивания [11]. Изменение температурного режима вызывает активизацию термокарста и деградацию мерзлых бугров [26, 30]. Вместе с тем нередки противоположные процессы мерзлотного пучения на влагонасыщенных грунтах. Геодинамические процессы разрушения мерзлых бугров либо их пучения несут опасность для объектов инфраструктуры нефтедобывающего комплекса. На севере Западной Сибири примерно 25 % трубопроводов приходится на участки с бугристыми болотами [4].

Для прогнозирования устойчивости инженерных сооружений и мониторинга температурного режима почв необходимо определить расположение и площадь мерзлотных геосистем, а также иметь достоверную информацию о температуре пород и глубине сезонного протаивания. Согласно современным мелкомасштабным картографическим построениям, ММП в Западной Сибири распространены в виде изолированных островов примерно до 60 параллели [32]. Отдельные мерзлые бугры пучения встречались до 57° с.ш. [5, 6]. Однако крупномасштабные геокриологические карты, на которых точно обозначены участки распространения ММП в зоне островного и спорадического залегания, в настоящее время практически отсутствуют. Исключение составляют карты небольших участков в районе размещения мерзлотных стационаров Нового Уренгоя [33], Надыма [25] и Пур-Тазовского междуречья [9]. Следует согласиться с мнением о плохой изученности территорий вблизи южной границы криолитозоны [6].

Одним из наиболее эффективных методов определения геокриологических условий является геоботаническая индикация. К примеру, в зоне лесотундр тундровая растительность является индикатором мерзлых пород, в то время как лесная и высококустарниковая – талых [14]. Определенные растительные ассоциации с высокой достоверностью индицируют глубину сезонного протаивания [19]. Растительность чутко реагирует на современные климатические изменения: потепление климата приводит в лесотундре к смене кустарничково-лишайниково-сфагновых редин с линзами мерзлых пород талыми кустарничково-пушицево-осоково-сфагновыми болотами [20].

На юге криолитозоны индикаторами ММП являются торфяники [34]. Приуроченность мерзлоты к торфяникам была давно известна естествоиспытателям. Почти сто лет назад было отмечено, что мерзлые крупнобугристые болота чаще всего встречаются в зоне спорадической мерзлоты [8]. Сохранение мерзлоты в торфяниках обусловлено особыми теплофизическими свойствами торфа, который является хорошим теплоизолятором и сохраняет минусовую температуру пород даже если среднегодовая температура воздуха положительна [7]. По данным теплофизических подсчетов, ММП под торфом не тают, если среднегодовая температура воздуха не превышает +1,5 °C [29].

В настоящее время в исследованиях криолитозоны широкое применение находят методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Возрастающая роль дистанционных методов связана с возможностью оперативного получения информации о наземном объекте для обширных труднодоступных территорий за различные промежутки времени. Таким образом, выделив с применением ДЗЗ торфяники, можно с высокой достоверностью определить распространение ММП, подсчитать занимаемую ими площадь и оценить риск повреждения инженерных сооружений.

Методика распознавания торфяников на аэрофотоснимках была изложена в работах Государственного гидрологического института (ГГИ), основанных на многолетних наблюдениях в различных природных зонах Западной Сибири [24]. Однако в настоящее время аэрофотоснимки используются мало и вытеснены космоснимками, поскольку значительно возросла доступность последних в открытых источниках. Появились новые методы

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

геопространственного моделирования, позволяющие распознавать на космоснимках различные типы поверхности с высокой точностью. Выделение тех или иных типов поверхности по космоснимкам нашло широкое применение при анализе нарушенности ландшафтов тундр Западной Сибири [16, 17]. Однако для более южных участков такие работы редки, а исследователи обычно ограничиваются вычислением вегетационных индексов, по которым отслеживают климатогенную динамику растительности [13, 31, 36].

Целью работы было определение оптимальных методов крупномасштабного картографирования мерзлых торфяников в южной криолитозоне. Работа основана на результатах геокриологических и геоботанических исследований, проведенных на территории природного парка Нумто (ХМАО – Югра).

Материалы и методы

Район исследования

Для разработки методики картографирования мерзлых торфяников был выбран прямоугольный участок 10x10 км, расположенный в южной части криолитозоны, на северном макросклоне Сибирских увалов в верховьях р. Казым (координаты 63°23'–63°30' с.ш., 70°38'–70°52' в.д.). Часть участка лежит в пределах природного парка Нумто, часть находится в промышленной разработке – здесь ведется добыча нефти и создана соответствующая инфраструктура (добывающие и разведочные скважины, трубопроводы, коридоры коммуникаций). Участок расположен на разделе двух болотных зон – крупнобугристых болот и выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот [2]. По данным ближайшей метеостанции Юильск, среднегодовая температура воздуха за период 1969–2023 гг. составляет –3,5 °C, при этом наблюдается рост температур с скоростью 0,052 °C/год. В последнее десятилетие среднегодовая температура варьировала от –4,4 (2014 г.) до +0,5 °C (2020 г.).

Отличительной особенностью ландшафтов парка Нумто является распространение здесь бугристых мерзлых торфяников тундрового типа, которые формируют комплексы площадью до нескольких десятков км² [3]. Выделяют плоскобугристые и крупнобугристые торфяники. Сухие плоскобугристые мерзлые торфяники совершенно непохожи на немерзлые выпуклые торфяные болота таежной зоны. По общему облику ландшафта и структуре растительного покрова они близки к тундрам южного Ямала [1]. Бугры имеют вид плоских «лепешек» высотой 30–50 см, реже до 70 см, площадь которых может достигать нескольких сотен квадратных метров: кочковатая поверхность бугров, достаточно однообразный растительный покров (кустарничково-лишайниковый), включающий пятна [3]. Другим распространенным типом болот являются крупнобугристые торфяники, представляющие собой комплексы выпукло-вершинных мерзлых торфяно-минеральных бугров высотой до 12 м и переувлажненных понижений, в которых мерзлота обычно отсутствует. Мерзлые торфяники чередуются с немерзлыми сосново-кустарничково-сфагновыми, осоково-пушицевыми, травяно-гипновыми болотами. Дренированные участки, сложенные песчаными породами, покрыты разреженными сосновыми кустарничково-лишайниками лесами. В долинах рек развиты темнохвойные травяно-моховые леса.

Полевые исследования

Распространение мерзлоты и характер растительного покрова были изучены в ходе исследований, проведенных в 2018–2023 гг. Наличие мерзлоты и глубина сезонно-талого слоя были определены с применением металлического щупа. На участках, расположенных в пределах мерзлых торфяников, выполнялись геоботанические описания по стандартной методике [22], указывалась степень нарушенности растительного покрова, фиксировались экзогенные геологические и криогенные процессы – термокарст, подтопление, термоденудация, солифлюкция и т.д. Также нами были определены техногенные нарушения, гари и горельники. На 10 участках были пробурены геокриологические скважины, в которых установлены датчики, фиксирующие температуру грунта с частотой 4 раза в сутки.

Методика обработки ДДЗ

Для определения ландшафтной структуры и картографирования мерзлых торфяников была использована управляемая классификация спутникового снимка Landsat-9 с разрешением 30 м от 28.07.2022 г. [35] в программном комплексе QGIS 3.36 с помощью плагина Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Выбор даты снимка обусловлен отсутствием облачности и максимальным развитием растительности в вегетационный период. Предварительно была выполнена радиометрическая и атмосферная коррекция.

Классифицирование осуществлялось на основе мультиспектрального изображения, представленного в «естественных цветах» (комбинация каналов 4-3-2), что обусловлено удобством при проведении визуального дешифрирования для создания эталонных участков (выборок), используемых в качестве обучения. На космоснимках были выделены однородные участки (сегменты), на которых в ходе наземных полевых исследований были описаны различные типы поверхности (ТП). В качестве основной таксономической единицы природных комплексов были избраны уроцища. Из сегментов площадью 2–5 га были сформированы обучающие выборки – совокупность пикселей, относящиеся к различным ТП.

Анализ видимой различимости объектов на спутниковом снимке и использование материалов полевых наземных исследований позволили выделить 8 основных ТП, формирующих ландшафтную структуру территории: крупно- и плоскобугристые мерзлые торфяники; олигомезотрофные переувлажненные болота; олиготрофные болота с угнетенной сосной; грядово-мочажинные болота; сосново-кедровые среднесомкнутые леса; сосновые лишайниковые редкостойные леса; пойменные елово-кедровые леса, водные поверхности. Помимо этого, выделено два дополнительных ТП, представляющих собой видоизмененные коренные уроцища: гари и горельники,

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

антропогенно нарушенные территории (участки, занятые инфраструктурой нефтедобычи). Пирогенные урочища выделяли по изменению спектральных характеристик при помощи синтеза каналов 7-5-3 для более наглядного представления горелых территорий.

В работе было рассмотрено несколько алгоритмов формирования типов поверхности – Random Forest, Minimum Distance и Spectral Angle Mapper. Постобработка итоговых изображений включала вычисление достоверности обработанных растров и выявление площади полученных ТП. Для более качественной демонстрации результата были использованы инструменты геообработки «отсеивание» при минимальном заданном пороговом значении и «редактор растров». Помимо этого, для анализа различимости выделенных ТП по спектральным критериям были получены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ).

Результаты

Геокриологические условия и геоботаническая характеристика

Замеры в геокриологических скважинах показали, что температура мерзлых пород в торфяниках на глубине годовых нулевых амплитуд (10 м) составляла от $-0,1$ до $-0,47$ °С. Преобладает диапазон $-0,3\dots-0,2$ °С. Таким образом, мерзлые грунты высокотемпературные, неустойчивые к дальнейшему потеплению.

Годовой ход температур в плоскобугристых и крупнобугристых торфяниках различается. Крупнобугристые торфяники сильнее охлаждаются зимой из-за небольшого слоя снега и сильнее прогреваются летом вследствие того, что растительный покров на них зачастую разрежен либо полностью отсутствует, слой торфа невелик из-за ветровой эрозии и растрескивания, влагонасыщенность торфа мала.

Глубина сезонного протаивания изменяется в зависимости от мощности торфа, характера растительности, расположения бугров и мочажин. Максимальное протаивание (2,0 м) отмечено на одиночных буграх пучения с маломощным (0,2–1,0 м), деградировавшим слоем торфа. Геоботаническим индикатором маломощного торфа и глубокого сезонного протаивания является древесный ярус из кедра на вершинах бугров. В случае если торфяные почвы на крупных буграх относятся к среднемощным и мощным, сезонное протаивание варьирует от 0,8 до 1,2 м (и более, если деградирующий торфяной бугор покрыт трещинами).

Глубина сезонного протаивания плоскобугристых торфяников зависит от местоположения. В центре крупных плоскобугристых массивов сезонное протаивание составляет 0,5–0,6 м, в краевых частях вблизи мочажин превышает 1,0 м. Поскольку длина шупа-мерзлотомера составляла 1,6 м, не было возможности точно определить наличие либо отсутствие мерзлоты в мочажинах, но кровля ММП не была в них обнаружена ни разу. Вероятно, мочажины являются талыми.

Растительность крупно- и плоскобугристых торфяников по набору видов – эдификаторов и доминантов – сходная. В большинстве случаев основу кустарникового яруса составляет ерник с обилием сор1–сор3. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 10–40 % с преобладанием багульника, бруслики, голубики, водяники, мицелия болотного. Характерными видами травянистых растений являются морошка, осока шаровидная, пущица. Облик фитоценозов определяет доминирование кустистых лишайников *Cladina stellaris*, *C. Rangiferina*, *Cetraria islandica*, *C. delisei*, *C. nivalis*, *C. coccifera*, *Alectoria ochroleuca*. Растительность мочажин осоково-сфагновая, пущицевая, гидрофитнотравяная. Доминантами мочажин являются осоки (*Carex chordorrhiza*, *C. rotundata*, *C. limosa*), пушкицы (*Eriophorum polystachyon*, *E. russeolum*), сфагновые мхи (*Sphagnum balticum*, *Sph. Lindbergii*). В центре крупных обводненных мочажин в большом количестве встречается вахта (*Menyanthes trifoliata*).

Спектральные особенности мерзлых торфяников на ДДЗ

Одной из поставленных в данной работе задач был выбор оптимального метода картографирования торфяников и в целом ландшафтов с использованием пакетов программ, применяемых для обработки геопространственных данных. Исходя из этого, было создано классифицированное изображение с различными ТП с характерными для них растительными сообществами, а также водными и техногенными объектами (рис. 1). Основным критерием построения классифицированного изображения по выделенным ТП являлась максимальная достоверность, рассчитываемая на основе матрицы ошибок [15]. Результат показал максимально высокую достоверность классификации при использовании метода Random Forest (99,6 %, значение коэффициента χ «каппа» – 0,96) (табл. 1). Меньшая общая точность определена при выборе алгоритмов Minimum Distance и Spectral Angle Mapper, что в немалой степени обусловлено низкой спектральной разделимостью классов торфяников с редкостойными сосняками кустарничково-лишайниковых (значение евклидового расстояния < 1 , показатель сходства Брея-Кертиса > 90 %). Визуально, а также при сравнении площадей это проявлялось в уменьшении доли торфяников (17–19 %) и увеличении площади облесенных территорий в сравнении с результатами по алгоритму классификации Random Forest (25 %) (табл. 2). Кроме этого, выявлена частичная ошибка пропуска и присоединения пикселей ерниково-кустарничково-лишайниковых торфяников с болотными микроландшафтами, что обусловлено соседством данных типов болотных комплексов и сходством флористического состава на их границах. В целом для снимков со средним и высоким пространственным разрешением при мозаичности растительного покрова актуальной остается проблема наличия смешанных пикселей и отсутствия явного доминирования определенного класса [12].

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.Б.

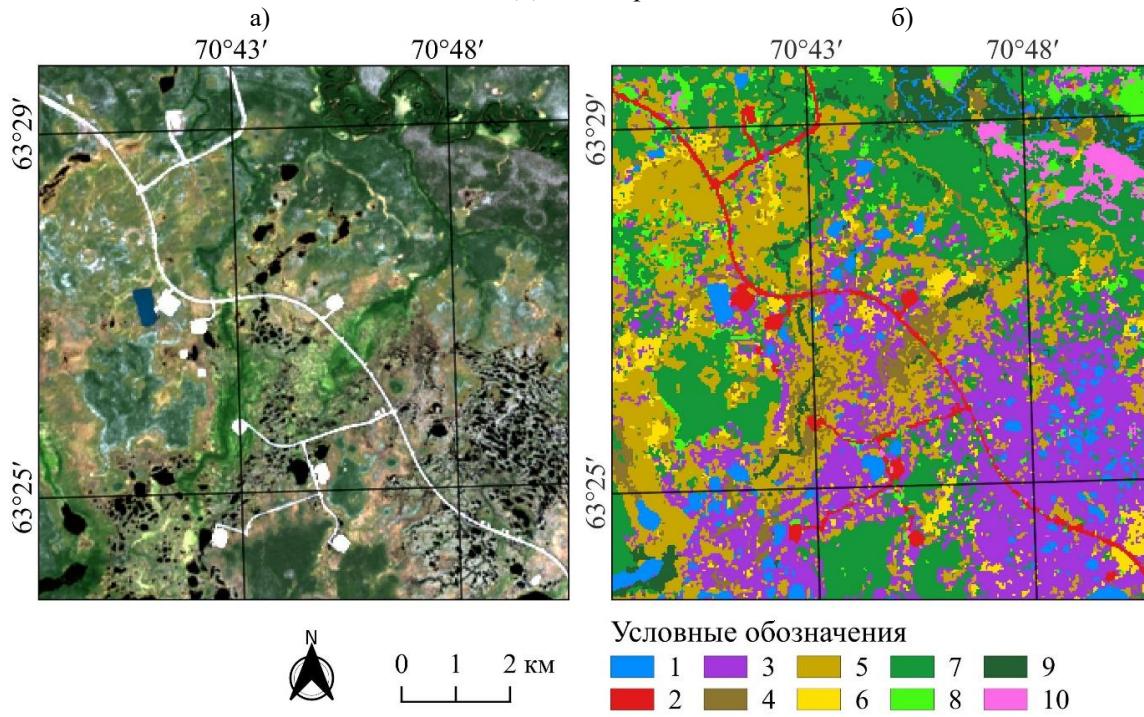


Рис. 1. а) спутниковое изображение территории исследования по данным мультиспектральной съемки Landsat-9;
б) карта-схема классифицированного растра с выделенными ТП (метод Random Forest):

1 – водные объекты; 2 – антропогенные объекты; 3 – крупно- и плоскобугристые мерзлые ерниково-кустарничково-лишайниковые торфяники; 4 – олигомезотрофные травяно-осоково-сфагново-гипновые переувлажненные болота; 5 – олиготрофные кустарничково-осоково-сфагновые болота, облесенные угнетенной сосной; 6 – грядово-мочажинные болотные комплексы с чередованием ерниково-кустарничково-сфагновых гряд и осоково-сфагновых обводненных мочажин; 7 – междуречные сосновые зеленомошно-лишайниковые и кедровые, местами лиственничные, кустарничково-зеленомошные и кустарничково-лишайниковые леса; 8 – сосновые лишайниковые редко-стойные леса; 9 – пойменные елово-кедровые, с примесью берёзы, травяно-кустарничково-зеленомошные и багульниково-брусличные леса; 10 – горелье участки соснового лишайникового леса

Fig. 1. a) a satellite image of the research area according to Landsat-9; b) a map of the classified raster with selected surface types (Random Forest method): 1 – water bodies; 2 – anthropogenic objects; 3 –dwarf birch-shrub-lichen palsas; 4 – oligomesotrophic grass-sedge-sphagnum-hypnum moss bogs; 5 – oligotrophic shrub-sedge-sphagnum moss bogs forested with suppressed pine; 6 – hummock-ridge bog complexes with shrub-sphagnum moss ridges and sedge-sphagnum moss watered flarks; 7 – watershed pine green moss-lichen forests and cedar, in places with larch, shrub-green moss, and shrub-lichen forests; 8 – pine lichen sparse forests; 9 – floodplain spruce-cedar, in places with birch, grass-shrub-green moss and wild rosemary-lingonberry forests; 10 – burnt pine lichen forest areas

Таблица 1

Матрица ошибок выделенных классов при использовании различных методов
классификации спутникового снимка Landsat-9

The error matrix of the selected classes when using various methods of classifying a Landsat-9 satellite image

I*	2*										3*	4*	5*	6*
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Метод Random Forest. Общая точность – 99,6 %, коэффициент χ «каппа» – 0,96														
1	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	100
2	0	149	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	0	100
3	0	0	225	0	0	0	1	0	0	0	226	1	3	99,6
4	0	0	0	97	0	0	0	0	0	0	97	0	0	100
5	0	0	1	0	187	0	0	0	0	0	188	1	1	99,5
6	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	68	0	0	100,0
7	0	0	2	0	1	0	843	0	1	1	848	5	2	99,4
8	0	0	0	0	0	0	1	231	0	0	232	1	0	99,6
9	0	0	0	0	0	0	0	87	0	87	0	1	100	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	138	0	1	100
всего	93	149	228	97	188	68	845	231	88	139	2126	8	8	-

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

Окончание табл. 1

I*	2*										3*	4*	5*	6*
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Метод Minimum Distance. Общая точность – 87,9 %, коэффициент χ «каппа» – 0,81														
1	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	100
2	0	149	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	2	100
3	0	0	172	0	0	0	53	0	0	1	226	54	117	76,1
4	0	0	0	93	0	4	0	0	0	0	97	4	14	95,9
5	0	0	13	4	166	4	1	0	0	0	188	22	5	88,3
6	0	2	7	10	1	46	2	0	0	0	68	22	8	67,6
7	0	0	86	0	1	0	728	25	8	0	848	120	72	85,8
8	0	0	2	0	0	0	7	217	0	6	232	15	25	93,5
9	0	0	1	0	3	0	9	0	74	0	87	13	8	85,1
10	0	0	8	0	0	0	0	0	0	130	138	8	7	94,2
всего	93	151	289	107	171	54	800	242	82	137	2126	258	258	-
Метод Spectral Angle Mapper. Общая точность – 85,5 %, коэффициент χ «каппа» – 0,79														
1	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	100
2	0	149	0	0	0	0	0	0	0	0	149	0	10	100
3	0	0	122	8	0	17	79	0	0	0	226	104	99	54,0
4	0	0	22	45	12	6	6	0	6	0	97	52	38	46,4
5	0	0	0	13	171	0	1	0	3	0	188	17	12	91,0
6	0	0	17	10	0	40	1	0	0	0	68	28	25	58,8
7	0	0	54	3	0	1	782	3	5	0	848	66	104	92,2
8	0	9	0	0	0	0	10	213	0	0	232	19	6	91,8
9	0	0	0	4	0	0	5	0	78	0	87	9	14	89,7
10	0	1	6	0	0	1	2	3	0	125	138	13	0	90,6
всего	93	159	221	83	183	65	886	219	92	125	2126	308	308	-

* 1 – классы по выборкам, 2 – типы поверхности по классификации и число отнесенных к ним пикселов, 3 – количество пикселей в классе, 4 – ошибка комиссии (присоединение), пиксели, 5 – ошибка омиссии (пропуска), пиксели, 4 – точность выделения класса, %

* 1 – classes by regions of interest, 2 – surface types according to classification and the number of pixels assigned to them, 3 – the number of pixels in the class, 4 – commission error (joining), pixels, 5 – omission error (skipping), pixels, 4 – accuracy of class allocation, %

Для определения правильности выделения торфяников было произведено повторное классифицирование исследуемой территории на основе спутникового снимка Landsat-8 от 30.07.2023 г. Общая величина изменчивости ТП составила менее 2 % (табл. 2). Таким образом, выбранный алгоритм позволяет достоверно выделить на космоснимках мерзлые бугристые торфяники и фиксировать их последующие изменения, вызванные потеплением климата.

Таблица 2

Доля различных ТП в районе исследования, согласно классификации методом Random Forest

The proportion of different types of surfaces in the research area, according to classification

by the Random Forest method

Тип поверхности, полученный при классификации	Площади, %		Изменение доли площадей к предыдущему году, %
	Landsat-9 от 28.07.2022	Landsat-8 от 30.07.2023	
1	3,62	3,59	-0,03
2	2,08	2,48	0,40
3	24,6	26,7	2,07
4	4,36	4,8	0,44
5	19,6	17,4	-2,22
6	3,78	5,24	1,46
7	31,4	31,1	-0,28
8	3,85	2,62	-1,23
9	4,69	4,61	-0,08
10	2,07	2,07	0

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

Для наилучшего распознавания объектов нами также использовался КСЯ. Спектральные коэффициенты яркости являются отношением яркости объекта в данном направлении к яркости эталона (идеального рассеивателя) в том же направлении при одинаковом освещении обоих [10]. КСЯ нашли применение при оценке изменения свойств подстилающей поверхности [23], оценке состава растений в агроценозах [27], определении запасов кормов на оленевых пастбищах [18].

Значения КСЯ мерзлых торфяников в районе исследования составляют во 2 канале (синий) $0,025 \pm 0,002$ (\pm стандартное отклонение (SD)), в 3 канале (зеленый) $0,039 \pm 0,004$, в 4 канале (красный) $0,046 \pm 0,005$, в 5 канале (ближний инфракрасный) $0,21 \pm 0,021$ (рис. 2).

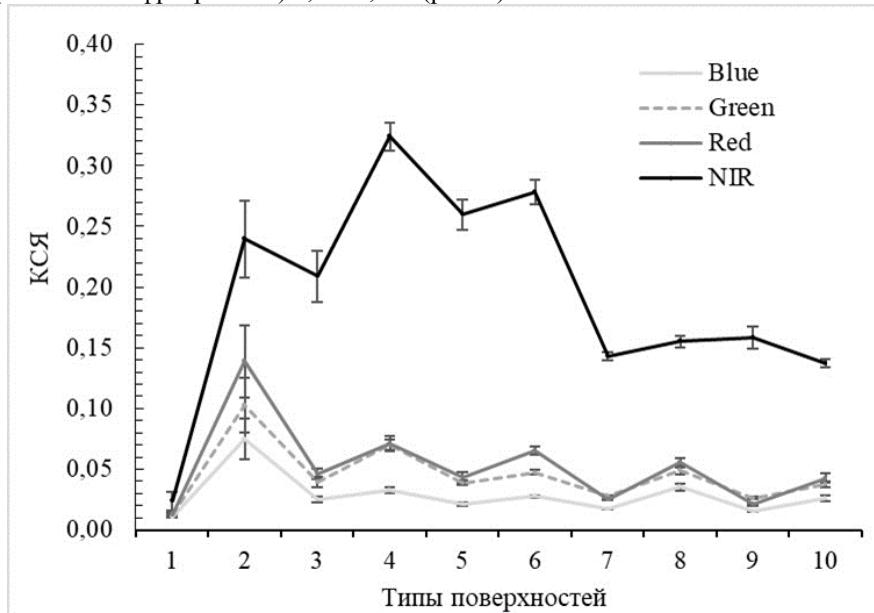


Рис. 2. Спектральные кривые по ТП с 2 по 5 каналы классифицированных спутниковых изображений Landsat-9, природный парк «Нумто» (в виде пределов погрешностей указаны значения стандартного отклонения)

Fig. 2. Spectral signatures according to the surface types from 2 to 5 bands of classified Landsat-9 satellite images, Numto Nature Park (the values of the standard deviation are indicated as error limits)

Спектральная кривая гари в придолинном сосновом лишайниковом редколесье ниже, чем для участков, не затронутых пожаром, а при соотнесении с торфяниками характеризуется меньшими значениями КСЯ в 3 и 4 каналах. Техногенным объектам на песчаных отсыпках присущи самые высокие величины КСЯ.

Следует отметить, что использование снимков Landsat в картографировании мерзлых торфяников имеет ограничения, поскольку небольшое пространственное разрешение не позволяет разделить плоско- и крупнобугристые торфяники, имеющие различные геокриологические характеристики. Эта задача может быть решена применением космоснимков сверхвысокого разрешения. Выделенные с использованием снимков Landsat торфяники были нами проанализированы на снимках сверхвысокого разрешения QuickBird и WorldView2 [28]. Этот анализ с привлечением данных полевых ландшафтных описаний позволил разделить участки плоско- и крупнобугристых торфяников, различающихся по геокриологическим условиям, а также выделить участки с длительнопромерзающими породами, залегающими под немерзлыми сосново-кустарничково-сфагновыми и осоково-гипновыми болотами. Согласно классификации, проведенной при помощи алгоритма Random Forest, бугристые торфяники занимают четверть территории исследования (25 %). Полученные по снимкам сверхвысокого разрешения результаты показали, что 19 % площади занято плоскобугристыми торфяниками, 6 % – крупнобугристыми, т.е. соотношение плоскобугристых к крупнобугристым составляет примерно 1:3. На обследованном участке доля крупнобугристых торфяников меньше, чем в среднем по региону. По данным исследований ГГИ, микроландшафты плоскобугристой группы занимают в среднем до 60 % площади болот северной тайги и лесотундры [24]. Малая площадь, занимаемая крупнобугристыми торфяниками, косвенно подтверждает их меньшую устойчивость к потеплению. Тенденция к росту температур воздуха, увеличению высоты снега, а также увеличение фитомассы кустарников и кустарничков, способствующее снегозадержанию, делают неблагоприятным прогноз сохранности ММП под крупнобугристыми торфяниками [21].

Заключение

На территории природного парка «Нумто» расположен один из самых крупных южных массивов мерзлых бугристых торфяников в зоне островного распространения ММП. Управляемая классификация с высокой степенью точности позволила выделять участки с мерзлыми бугристыми торфяными болотами. Наилучший результат

Анализ спектральных кривых выделенных ТП показывает, что ерниково-кустарничково-лишайниковые торфяники по всем 4 каналам по величине КСЯ уступают большинству болотных микроландшафтов. При сопоставлении яркостных характеристик торфяников с лесными урочищами важную роль имеет степень преобладания лишайников в напочвенном покрове и сомкнутость древостоя – по значению КСЯ в видимом диапазоне (2–4 каналы) густые пойменные и водораздельные смешанные леса уступают торфяникам, а придолинные сосновые лишайниковые редколесья, наоборот, заметно выше. Однако необходимо отметить, что отличительной особенностью торфяников является более высокое значение КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, чем для лесных геосистем.

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

показал метод Random Forest. Отличительной особенностью криогенных геосистем является более низкая спектральная яркость в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн при сравнении с другими типами болотных комплексов и более высокая при сопоставлении с лесными геосистемами. При анализе различимости природных комплексов в районе исследования по спектральным характеристикам наиболее значимым является степень преобладания лишайников в структуре растительности.

Библиографический список

1. Аветов Н.А., Арефьев С.П., Валеева Э.И., Глазунов В.А., Губарьков А.А., Зах В.А., Игнатова Е.А., Минаева Т.Ю., Маркина А.В., Московченко Д.В., Сирин А.А., Терехин С.А., Толпышева Т.Ю., Шишконакова Е.А. Парк «Нумто»: природа и историко-культурное наследие. Сургут: ОАО «Сургутнефтегаз», Рекламно-издательский информационный центр «Нефть Приобья», 2017. 150 с. EDN: YNTXSG
2. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / ред. К.Е. Иванов, С.М. Новиков. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 446 с.
3. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка «Нумто». Новосибирск, 2008. 280 с. ISBN: 978-5-02-023230-3 EDN: PYJOIT
4. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на Европейском Севере России – южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2011. № 2. С. 56–72. EDN: PBJRHP
5. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 18–32. EDN: PAZODH
6. Васильчук Ю. К. Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 1. С. 17–27. EDN: PWVAZL
7. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Е.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. Т. 2. 454 с.
8. Городков Б.Н. Крупнобугристые торфяники и их географическое распространение // Природа. 1928. № 6. С. 599–601.
9. Данько М.М., Хомутов А.В. Изменения полигонально-жильных структур торфяников в зоне взаимодействия «торфяник-озера» на севере Пур-Тазовского междуречья // К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 29–30 ноября 2023 года. Тюмень: ТюмГУ-Press, 2023. С. 39–42. EDN: KCBNCW
10. Дмитриева Е.Е. Оценка точности функций спектральных коэффициентов яркости природных объектов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1998. № 3. С. 90–97. EDN: WGACYB
11. Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Крестин Б.М., Сироткин Д.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А. Создание карты геокриологических условий в составе ГИС-пакета инженерно-геологических карт листов Q-41, Q-42, R-42, R-43 масштаба 1: 1 000 000 // Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности. ITES-2022: материалы VI Всероссийской конференции, Владивосток, 03–08 октября 2022 года. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2022. С. 33–34. EDN: HXPPXY
12. Елсаков В. В. Влияние детальности аэрокосмических изображений на результаты классификации растительных сообществ тундры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 176–188. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188 EDN: CUTTTM
13. Елсаков В.В., Телятников М.Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 260–271. EDN: RBKBEL
14. Иванова Т.Ф. Применение аэрометодов при инженерно-геокриологических изысканиях. М.: Наука, 1982. 70 с.
15. Корниенко С.Г. Оценка влияния разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения на состояние территории лесотундры по данным ИСЗ Landsat // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 78–87. EDN: KUETKV
16. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. Т. 32, № 1. С. 67–73. EDN: NDRIJT
17. Корниенко С.Г. Характеристика антропогенных трансформаций напочвенного покрова в районе Ямбургского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 2. С. 184–201. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-184-201 EDN: POEFDO
18. Михайлов В.В., Чежина В.М. Определение коэффициентов спектральной отраженной яркости доминирующих видов кормовых растений в тундрах западного Таймыра // Научно-технический бюллетень НИИ сельского хозяйства Крайнего Севера СО ВАСХНИЛ. 1988. № 1–2. С. 69–71. EDN: WESZJB
19. Москаленко Н. Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13, № 4. С. 18–23. EDN: KYRZFX
20. Москаленко Н. Г. Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли. 2012. Т. 16, № 2. С. 38–42. EDN: OYVAWN
21. Московченко Д.В., Губарьков А.А. Температурные режимы почв на южной границе зоны мерзлых болот в Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2023. № 117. С. 23–51. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-23-51 EDN: LARYBE
22. Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. М., Л.: Наука, 1964. Т. 3. 530 с.
23. Прокопов Д.А., Жуков А.П. Разработка и верификация технологии прогнозирования коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности по данным MODIS Terra/Aqua. Известия Алтайского государственного университета. 2014. Т. 81, № 1–2. С. 211–217. DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.2-37 EDN: RBETWE
24. Усова Л.И. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.Б.

и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гос. учреждение «Гос. гидрологический ин-т». СПб: Нестор-История, 2009. 78 с. ISBN: 978-5-98187-461-1 EDN: QKJMVL

25. Устинова Е.В. Крупномасштабное картографирование криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири: труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению ТИСОР: ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире, Салехард, 25–29 июня 2012 года. Салехард: ООО «Печатник», 2012. Т. 3. С. 539–544. EDN: PUIANT

26. Шишконакова Е.А., Аветов Н.А., Березина Н.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) // Бюллентень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2016. Т. 121, № 3. С. 39–50. EDN: WAWCHV

27. Шпанев А.М., Смук В.В. Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах северо-запада России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177 EDN: IILYVQ

28. ArcGIS Online Map Viewer. URL: <https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/> (дата обращения 03.04.2024)

29. Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming // Climatic Change. 2005. Vol. 68, No. 1. P. 135–152. DOI: 10.1007/s10584-005-4785-y EDN: MDKBDF

30. Chasmer L., Hopkinson C. Threshold Loss of Discontinuous Permafrost and Landscape Evolution // Global Change Biology. 2017. Vol. 23, No. 7. P. 2672–2686. DOI: 10.1111/gcb.13537 EDN: YFGHGO

31. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol. 16, No. 15. P. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016 EDN: WVZKHT

32. European Environment Agency. Permafrost in the Northern hemisphere. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/permafrost-in-the-northern-hemisphere> (дата обращения 26.03.2024)

33. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurtdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15, No. 7. DOI: 10.3390/en15072311 EDN: RDGTTA

34. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // Permafrost and Periglacial Processes. 2007. Vol. 18, No. 1. P. 7–19. DOI: 10.1002/PPP.582 EDN: XUQXVQ

35. USGS Earthexplorer. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 02.04.2024)

36. Walker D.A., Leibman M.O., Epstein H.E., Forbes B.C., Bhatt U.S., Raynolds M.K., Comiso J.C., Gubarkov A.A., Khomutov A.V., Jia G.J., Kaarlejarvi E., Kaplan J.O., Kumpula T., Kuss P., Matyshak G., Moskalenko N.G., Orekhov P., Romanovsky V.E., Ukraientseva N.G., Yu Q. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // Environmental Research Letters. 2009. Vol. 4, No. 4. P. 045501. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045004 EDN: MWSDRR

References

1. Avetov N.A., Aref'ev S.P., Valeeva E.I., Glazunov V.A., Gubarkov A.A., Zakh V.A., Ignatova E.A., Minaeva T.Yu., Markina A.V., Moskovchenko D.V., Sirin A.A., Terekhin S.A., Tolpysheva T.Yu., Shishkonakova E.A. (2017), *Park «Numto»: priroda i istoriko-kul'turnoe nasledie* [Numto Park: nature and historical and cultural heritage], OAO «Surgutneftegaz», Reklamno-izdatel'skii informatsionnyi tsentr «Neft' Priob'ya», Surgut, Russia.
2. Ivanov K.E., Novikov S.M. (ed.) (1976), *Bolota Zapadnoi Sibiri, ikh stroenie i gidrologicheskii rezhim* [Bogs of Western Siberia, their structure and hydrological regime], Leningrad, Gidrometeoizdat, USSR.
3. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Arefev S.P. (2008), *Prirodnyi kompleks parka "Numto"* [The natural complex of park "Numto"], Nauka, Novosibirsk, Russia
4. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. (2011), “Palsas in the European North of Russia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamics”, *Inzhenernaya geologiya*, no. 2, pp. 56–72.
5. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. (2012), “Palsas in the north of Western Siberia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamics”, *Inzhenernaya geologiya*, no. 6, pp. 18–32.
6. Vasil'chuk Yu.K. (2013), “Modern southern limit of permafrost in Western Siberia lowland”, *Kriosfera Zemli*, vol. 17, no. 1, pp. 17–27.
7. Ershov E.D. (ed.) (1989), *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], Nedra, Moscow, USSR
8. Gorodkov B.N. (1928), “Palsas and their geographical distribution”, *Priroda*, no. 6, pp. 599–601.
9. Danko M.M., Khomutov A.V. (2023), “Changes in polygonal-vein structures of peatlands in the zone of interaction “peat-lake” in the north of the Pur-Taz interfluvium”, *K poznaniyu tsel'nogo obrazza kriosfery Zemli: izuchenie prirodnykh yavlenii i resursnogo potentsiala Arktiki i Subarktiki* [towards the knowledge of the integral image of the Earth's cryosphere: the study of natural phenomena and the resource potential of the Arctic and Subarctic], *sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhunarodnym uchastiem* [collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation], Tyumen, Russia, November 29–30 2023, pp. 39–42.
10. Dmitrieva E.E. (1998), “Estimation of the accuracy of functions of spectral brightness coefficients of natural objects”, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos"* emka, no. 3, pp. 90–97.
11. Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Krestin B.M., Sirotkin D.V., Pizhankova E.I., Popova A.A. (2022), “Creation of a map of geocryological conditions as part of a GIS package of engineering and geological maps of sheets Q-41, Q-42, R42, R-43 scale 1: 1 000 000”, *Informatsionnye tekhnologii dlya nauk o Zemle i tsifrovizatsiya v geologii i gornodobyvayushchey promyshlennosti. ITES–2022* [Information technology for Earth sciences and digitalization in geology and mining. ITES–2022], *Materialy VI Vserossiiskoi konferentsii* [Materials of the VI All-Russian Conference], Vladivostok, Russia, 3–8 October 2022, pp. 33–34.
12. Elsakov V.V. (2023), “The influence of aerospace imagery spatial resolution on mapping results of tundra vegetation”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 20, no. 1, pp. 176–188. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.Б.

13. Elsakov V.V., Teljatnikov M.Yu. (2013), "Effects of interannual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia", *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 10, no. 3, pp. 260–271.
14. Ivanova T.F. (1982), *Primenenie aerometodov pri inzhenerno-geokriologicheskikh izyskaniyah* [The use of aerometodes in engineering and geocryological surveys], Nauka, Moscow, USSR.
15. Kornienko S. G. (2009), "Estimation of Urengoy's Oil and Gas Deposit Mining Impact on a Condition of Forest Tundra Landscape Using Landsat Data", *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, no. 4, pp. 78–87.
16. Kornienko S. G. (2011), "Assessing the transformations of natural landscapes of the Taz peninsula using space-borne imagery", *Geography and Natural Resources*, vol. 32, no. 1, pp. 67–73.
17. Kornienko S. G. (2023), "Characteristics of anthropogenic transformations of the ground cover in the area of Yamburg gas field based on Landsat satellite data", *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 20, no. 2, pp. 184–201.
18. Mikhailov V.V., Chezhina V.M. "Determination of the spectral reflected brightness coefficients of the dominant species of forage plants in the tundra of Western Taimyr", *Nauchno-tehnicheskii byulleten' NII sel'skogo khozyaistva Krainego Severa VASKhNIL*, no. 1–2, pp. 69–71.
19. Moskalenko N. G (2009), "Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis", *Kriosfera Zemli*, vol. 13, no. 4, pp. 18–23.
20. Moskalenko N. G (2012), "Cryogenic landscape changes in the West Siberian northern taiga in the conditions of climate change and human-induced disturbances", *Kriosfera Zemli*, vol. 16, no. 2, pp. 38–42.
21. Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A. (2023), "Soil temperature regimes on the southern border of the zone of frozen bogs in Western Siberia", *Dokuchaev Soil Bulletin*, no. 117, pp. 23–51. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-23-51
22. Lavrenko E.M., Korchagina A.A. (ed.) (1964), *Polevaya geobotanika* [Field geobotany], Nauka, Moscow, USSR.
23. Prokopov D.A., Zhukov A.P. (2014), "Development and verification of the technology for land surface reflectances prediction from MODIS – Terra/Aqua data", *Izvestiya of Altai State University Journal*, vol. 81, no. 1–2, pp. 211–217. DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.2-37
24. Usova L.I. (2009), *Prakticheskoe posobie po landshaftnomu deshifrirovaniyu aerofotosnimkov razlichnykh tipov bolot Zapadnoi Sibiri* [A practical manual to landscape interpretation of aerial photographs of various types of bogs in Western Siberia], Nestor-Istoriya, Saint-Petersburg, Russia.
25. Ustinova E.V. (2012), "Large-scale mapping of cryogenic landscapes of the Northern taiga of Western Siberia", *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu TICOP* [Tenth international conference on permafrost TICOP], *Resursy i riski regionov s vechnoi merzlotoi v menyayushchemsya mire* [Resources and risks of permafrost areas in a changing world], Salekhard, 25–29 June 2012, pp. 539–544.
26. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Berezina N.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. (2016), "Manifestation of regressive processes in mires of south part of Numto nature park (Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra)", *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Biological Series*, vol. 121, no. 3, pp. 39–50.
27. Shpanev A.M., Smuk V.V. (2022), "Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agroecosenes of the North-West of Russia", *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 19, no. 3, pp. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177
28. ArcGIS Online Map Viewer (2024), available at: <https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/> (Accessed 3 April 2024).
29. Camill P. (2005), "Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming", *Climatic Change*, vol. 68, no. 1, pp. 135–152. DOI: 10.1007/s10584-005-4785-y
30. Chasmer L., Hopkinson C. (2017), "Threshold Loss of Discontinuous Permafrost and Landscape Evolution", *Global Change Biology*, vol. 23, no. 7, pp. 2672–2686. DOI: 10.1111/gcb.13537
31. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. (2016), "Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia", *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, no. 15, pp. 9563–9577. DOI: 10.5194/acp-16-9563-2016
32. European Environment Agency. Permafrost in the Northern hemisphere (2024), available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/permafrost-in-the-northern-hemisphere> (Accessed 26 March 2024).
33. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V., Sadurdinov M., Shein A., Skvortsov A., Sudakova M., Tsarev A. (2022), "Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic", *Energies*, vol. 15, no. 7. DOI: 10.3390/en15072311
34. Shur Y.L., Jorgenson M.T. (2007), "Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems", *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 18, no. 1, pp. 7–19. DOI: 10.1002/PPP.582
35. USGS Earthexplorer (2024), available at: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Accessed 2 April 2024)
36. Walker D.A., Leibman M.O., Epstein H.E., Forbes B.C., Bhatt U.S., Reynolds M.K., Comiso J.C., Gubarkov A.A., Khomutov A.V., Jia G.J., Kaarlejarvi E., Kaplan J.O., Kumpula T., Kuss P., Matyshak G., Moskalenko N.G., Orekhov P., Romanovsky V.E., Ukrainets N.G., Yu Q. (2009), "Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index", *Environmental Research Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 045501. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045501

Статья поступила в редакцию: 10.05.24, одобрена после рецензирования: 04.12.24, принятая к опубликованию: 12.03.25.

The article was submitted: 10 May 2024; approved after review: 04 December 2024; accepted for publication: 12 March 2025.

Картография и геоинформатика
Московченко Д.В., Фахретдинов А.В.

Информация об авторах

Дмитрий Валерьевич Московченко

доктор географических наук, заведующий сектором геоэкологии Института проблем освоения Севера, Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН;

625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86

Information about the authors

Dmitrii V. Moskovchenko

Doctor of Geographical Sciences, Head of the Geoecology Section, Institute of the Problems of Northern Development, Federal Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 86, Malygina st., Tyumen, 625026, Russia

e-mail: moskovchenko1965@gmail.com

Артур Венерович Фахретдинов

младший научный сотрудник Института проблем освоения Севера, Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН;

625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86

Artur V. Fakhretdinov

Junior Researcher, Institute of the Problems of Northern Development, Federal Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 86, Malygina st., Tyumen, 625026, Russia

e-mail: arthurfahretdinov@gmail.com

Вклад авторов

Московченко Д.В. – идея исследования, формирование концепции статьи, сбор, обработка и анализ полевых данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Фахретдинов А.В. – обработка и анализ данных ДЗЗ, создание графических материалов, участие в написании методики и результатов исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Dmitrii V. Moskovchenko – the research idea; the article concept; collection, processing, and analysis of field data; writing of the article; scientific editing of the text.

Artur V. Fakhretdinov – processing and analysis of remote sensing data; creation of the graphic materials; participation in the writing of the methodology and research results.

The authors declare no conflict of interest.