Спектральные признаки трансформации ландшафтов в характеристике тепловых режимов почв криолитозоны Средней Сибири

М. Ю. Сыроежко^{1,2}, Е.И. Пономарёв^{1,2}, Т.В. Пономарёва^{1,2}

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия ² Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия E-mails: syroezhko.m@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

Выполнена обзорная классификация ландшафтов криолитозоны на примере Норильского промышленного района Красноярского края по материалам архива Landsat-8, -9 за летний период 2016–2023 гг. В комплексе анализировались диапазоны спектральных индексов, характеризующих степень трансформации ландшафтов, а также наземные данные о растеплении почв на двух пробных площадях в районе исследований. Для классификации снимков изучаемых ландшафтов использовался метод максимального подобия, а также стандартные методы оценки состояния растительности, основанные на спектральных индексах NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) и LST (англ. Land Surface Temperature). Обзорная классификация позволяет выявлять до 11 классов состояния ландшафтов криолитозоны исследуемой территории. Зафиксированы два наиболее контрастных состояния ландшафтов, выделяемых по степени трансформации растительного покрова и степени деструкции теплоизолирующего органогенного горизонта почвы. В районе исследований доля территории с признаками трансформации после техногенного и аэротехногенного воздействия составляла от 5 % на фоновом участке до 77 % на участках, подвергшихся техногенным воздействиям. Участки с признаками трансформации характеризовались аномально низкими значениями NDVI, достигающими не более 54 % от показателей ненарушенных ландшафтов и вариацией показателя LST в диапазоне от -7,0 до 3,6 % относительно фоновых значений. По натурным измерениям границы протаивания почвы отмечено значительное (в 1,5-2,0 раза) отличие глубины растепления на участках фона и в условиях трансформированного состояния ландшафта. Вариативность сезонного растепления почв криолитозоны качественно согласуется с оценками степени трансформации ландшафтов. Таким образом, классификация съёмки на тундровые ландшафты позволяет косвенно характеризовать вариации тепловых режимов почв криолитозоны Сибири.

Ключевые слова: Сибирь, криолитозона, спектральные индексы, NDVI, LST, почва, глубина растепления

Одобрена к печати: 23.04.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-182-192

Введение

Высокие темпы хозяйственного освоения Арктики определяют растущий уровень техногенной трансформации ландшафтов в криолитозоне Сибири, отличающихся хрупкостью и низкой скоростью естественного восстановления. Деструктивные факторы воздействия на ландшафты имеют как естественную природу (ветровая эрозия, лесные пожары, криопучения и др.), так и техногенную (пост-хозяйственное, промышленное деструктивное воздействие, загрязнение территорий продуктами производства, атмосферные выбросы и т.д.). Последствия такого рода воздействий нередко проявляются в значительных изменениях не только на ландшафтном, но и на экосистемном уровне (Шишикин, 2016; Юркевич и др., 2021).

Дистанционные методы на основе материалов спутниковых систем Landsat, Sentinel-2, Terra/MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и др. — наиболее информативный способ контроля долговременных проявлений изменений и восстановительных процессов на уровне ландшафтов. Для разных лесорастительных условий показана возможность оценки состояния растительности по спектральным признакам (Кашницкий, 2022),

разрабатываются методы тематической обработки данных дистанционных съёмок, алгоритмы классификации и автоматизированного картографирования растительности (Барталев и др., 2015; Шестаков, Топаз, 2024).

В задачах данного рода наиболее часто используются вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normal Different Vegetation Index), водный индекс NDWI (*англ.* Normal Different Water) и тепловой индекс LST (*англ.* Land Surface Temperature). В частности, показана применимость дистанционных данных в оценке состояния территории при разработке нефтегазоносного месторождения (Карсаков, Пономарев, 2024), возможность оценки степени антропогенных трансформаций ландшафтов по диапазонам изменения индекса LST (Корниенко, 2022; Пономарев и др., 2024; Сыроежко, Пономарёв, 2024). Для региона Арктики анализ динамики NDVI позволил зафиксировать увеличение продуктивности растительности на значительных территориях ~37,3 % (Berner et al., 2020). В работе (Якимов и др., 2024) предложено использовать временные вариации спектральных индексов NDVI и LST в мониторинге состояния трансформированных ландшафтов для анализа динамики растительного покрова как ответа на увеличение техногенного воздействия.

Последствия техногенных воздействий в арктической зоне необходимо рассматривать в сопряжении с климатическими изменениями, фиксируемыми на данных территориях. Так в Средней Сибири, особенно на Таймыре, наблюдается положительный тренд температуры воздуха, достигающий 0,6-0,8 °C/10 лет, отмечен аномальный прирост продолжительности вегетационного периода до 20-50 дней в промежутке 2017-2020 гг. (Бардин и др., 2015; Горный и др., 2021; Третьяков, Пономарёв, 2023). Пост-техногенные деструктивные проявления, отражающиеся на теплоизолирующих свойствах растительных покровов и верхних горизонтов почвы криолитозоны, в совокупности с климатическими изменениями теплообеспеченности определяют значимые вариации теплового состояния почвенного профиля и сезонных закономерностей протаивания мёрзлых пород (Пономарёва и др., 2022; Lebedeva et al., 2014). Мониторинг этих процессов имеет большое значение для понимания и прогнозирования устойчивости экосистем криолитозоны в целом. Использование комплексного подхода, включающего как данные дистанционного зондирования, так и материалы натурных исследований, позволяет с большей достоверностью описывать происходящие и прогнозируемые процессы на уровне ландшафтов и экосистем региона, хотя материалы натурных обследований на территории криолитозоны, как правило, малодоступны.

Цель настоящей работы — обзорная классификация тестовых участков в районе Норильского промышленного района по дистанционным данным и оценка применимости результатов классификации ландшафтов для характеристики теплового режима почв и их сезонного протаивания, регистрируемых в натурных условиях.

Были рассмотрены следующие вопросы:

1) оценка особенностей спектральных характеристик естественных и трансформированных ландшафтов на рассмотренных территориях;

2) анализ соотношения выделяемых классов для категорирования степени трансформации территории по сравнению с фоновым состоянием;

3) сопоставление натурных измерений тепловых профилей почв с выявленными классами трансформации ландшафтов.

Район исследований

Рассматриваемые в работе территории относятся к Норильскому промышленному району (северная часть Приенисейской Сибири, 69,4° с. ш., 86,8° в.д.). Они располагаются в пределах 50 км от города Норильска. На данных участках были выполнены натурные эксперименты и заложены пробные площади (ПП). Первый участок — ПП1 Боганида — расположен в долине реки Болгохтох и озера Боганидское и относится к фоновому состоянию ландшафта. Второй участок — ПП2 Оганер — был заложен в районе реки Норильская. Данный участок характеризуется признаками трансформации напочвенного покрова и почв в результате комплексного долговременного техногенного воздействия (*рис. 1*, см. с. 184).



Рис. 1. Территория исследований (a) (красным прямоугольником показано расположение Норильского промышленного района) и заложенные пробные площади (δ); ПП1 Боганида (A — фоновый участок; Б — фоновый с включением инфраструктурных объектов); ПП2 Оганер (B — с наличием признаков значительной трансформации; Г — умеренно трансформированный). Красными точками указаны участки: 1 — ПП1.1 Боганида (фон, тундра); 2 — ПП1.2 Боганида (фон, лиственничник); 3 — ПП2.1 Оганер (с признаками трансформации); 4 — ПП2.2 Оганер (редколесье)

Климат района субарктический, резко континентальный, с продолжительной и снежной зимой и коротким прохладным летом. Средняя месячная температура июля +15,3 °C. Среднегодовая относительная влажность воздуха — 76 % (https://rp5.ru/). По физико-географическому районированию территория относится к лесотундровой зоне, а также редколесьям (Телятников, 2022). Растительный покров арктических территорий отличается низкой скоростью регенерации (Юркевич и др., 2021).

Предварительный экспертный анализ спутниковых сцен на район исследований позволил оценить степень однородности территорий в непосредственной близости от заложенных пробных площадей ПП1 и ПП2 (см. *puc. 1*). В результате территория, рассматриваемая в работе в качестве классифицируемой, была увеличена, и общая площадь исследуемых участков составила 739,1 км².

Участок ПП1 Боганида, включающий две пробные площади — ПП1.1 Боганида (фон, травянистая тундра) и ПП1.2 Боганида (фон, лиственничник), расположен в пределах тундровой равнины. По данным натурных обследований, почвы представлены торфяно-криозёмами (почвенные горизонты Т (0–20 см), CR_{\perp} (20–30 см)), а также криозёмами типичными (почвенные горизонты О (0–14 см), CR (14–55 см), C (от 55 см)). Кустарниковый ярус образован ивами (*Salix sp.*) и берёзой карликовой (*Betula nana*), а также можжевельником сибирским (*Juniperus sibirica*). На территории присутствуют редколесья с преобладанием лиственницы (*Larix sp.*) и лиственных пород (*Betula pubescens, Betula tortuosa*). Напочвенный покров представлен мхами, кустарничками, лишайниками. В почвенном профиле выделяется торфяный горизонт, толщина которого составляет 20–25 см. Живой напочвенный покров и торфяный горизонт — естественные регуляторы тепловых потоков и формируют естественные фоновые режимы сезонного протаивания (Пономарёва и др., 2022).

Участок ПП2 Оганер, включающий две пробные площади — ПП2.1 и ПП2.2, представляет два состояния ландшафта: с признаками значительной трансформации и умереннотрансформированный соответственно. Территория характеризуется высокой степенью поражения древесной растительности и напочвенного покрова. Пробная площадь ПП2.1 расположена на тундровых буграх с признаками аэротехногенной деструкции. Почвы представлены криозёмами (почвенные горизонты О (0–10 см), CR (10–55 см)) на суглинистых отложениях. Мохово-лишайниковый покров и древостой погибли в результате аэротехногенного воздействия, при этом наблюдается сильная степень разложения растительного опада и подстилки с признаками минерализации верхнего (2 см) слоя, а органогенный горизонт почвы, выполняющий теплоизолирующую функцию, фрагментарен. Участок находится в начальной фазе восстановления, скорость которого крайне низка. Правобережный участок (ПП2.2) характеризуется условно-трансформированным состоянием с сохранившимся древостоем (редколесье) и высокой обводнённостью (~10–14 % территории занято водоёмами). Подпологовые кустарники карликовой берёзы и ольхи (*Duschekia sp.*) образуют сплошной покров.

Таким образом, рассматриваемые ландшафты представляют собой два наиболее контрастных состояния с характерной спецификой растительного покрова и структурой живого напочвенного покрова и органогенного горизонта почв, что определяет особенности теплового режима почвы и значительную сезонную вариабельность глубины протаивания в них.

Материалы и методы

Исходные материалы дистанционного зондирования Земли Landsat-8, -9 (OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor)) Level-1 (https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product) получены из открытого банка данных USGS (*англ.* United States Geological Survey) Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov) на летний период 2016–2023 гг. Всего обработано пять спутниковых сцен. Отобраны снимки Landsat-8, -9, в которых отсутствует облачность. Обработка материалов выполнялась в программном обеспечении с открытым кодом Quantum GIS (https://qgis.org).

Предварительное дешифрирование осуществлялось с использованием экспертного подхода с учётом предварительных данных натурных обследований участков. Исходные изображения содержали информацию каналов #В4 (длина волны излучения λ равна 0,630–0,680 мкм), #ВЗ ($\lambda = 0.525-0.600$ мкм), #В2 ($\lambda = 0.450-0.515$ мкм) и были дополнены данными панхроматического канала #В8 ($\lambda = 0.500-0.680$ мкм) (разрешение 15 м/пиксель). Классификация проводилась с использованием обучающей выборки методом максимального подобия.

После классификации выполнялась генерализация мелких сегментов классов (площадью менее 5000 м²). Далее при необходимости проводилась экспертная корректировка результатов на основе данных полевых обследований. Достоверность результатов классификации контролировалась с использованием съёмки высокого разрешения WorldView-2 (разрешение 0,46 м/пиксель) (https://worldview.earthdata.nasa.gov/) по стандартной методике. Проверка точности классификации проводилась контролем попадания точек случайной выборки в заданные классы в сравнении с материалами WorldView. Истинным результатом считалось корректное попадание точки в заданный класс. Верификация выполнена на основе множества из 362 точек, случайно распределённых по территории исследования.

Для количественной оценки степени трансформации территорий использовали рассчитываемые значения спектральных индексов.

Индекс NDVI восстанавливали из данных каналов #В4 и #В5, для которых проводилась предварительная радиояркостная калибровка по файлу метаданных:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR — значения пикселей из инфракрасного канала #B5 ($\lambda = 0,845-0,885$ мкм); RED — значения пикселей из канала в красном диапазоне #B4.

Индекс температуры поверхности (LST (в K)) рассчитывался с использованием данных канала #B10 ($\lambda = 10,30-11,30$ мкм) и продукта NDVI:

$$LST = \frac{T_B}{1 + (\lambda T_B / \rho) \ln(\varepsilon)},$$

где T_B — яркостная температура поверхности (K); $\lambda = 11,457$ мкм для Landsat TM (*англ*. Thematic Mapper), $\lambda = 11,269$ мкм для Landsat ETM+ (*англ*. Enhanced Thematic Mapper Plus), $\lambda = 10,904$ мкм для Landsat OLI/TIRS; $\rho = (hc)/\sigma = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·K, $\sigma = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К —

постоянная Больцмана, h = $6,26 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, c = $2,998 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; ε — коэффициент излучения поверхности земли LSE (*англ*. Land Surface Emissivity), связанный со значением индекса растительности NDVI соотношением: $\varepsilon = 1,0094 + 0,047$ ln(NDVI).

Полученные значения спектральных индексов усреднялись для выбранных участков, и выполнялся сопряжённый анализ спектральных индексов фоновых участков и участков, на которых наблюдаются признаки трансформации. Количественно степень трансформации характеризовали через относительное отклонение спектральных индексов для анализируемых участков от фоновых значений.

На пробных площадях в районе исследований была выполнена серия натурных измерений границы протаивания почвы в различные сроки летнего периода в 2023–2024 гг. Исходные данные представляют собой дискретные измерения температуры вдоль почвенного профиля от поверхности до границы мерзлоты. Материалы были использованы для обобщения сезонного хода глубины растепления почвы в условиях фонового ландшафта (ПП1 Боганида) и в условиях ландшафта со значительной степенью трансформации растительного покрова и деструкцией органогенного горизонта (ПП2 Оганер). Степень трансформации ландшафта, определённая в процентах к общей площади классифицируемого участка, рассматривалась как косвенная характеристика, определяющая режимы сезонного портаивания почвы.

Результаты и обсуждение

При классификации ландшафтов исследуемого района выявлено 11 классов состояния подстилающей поверхности, согласно различиям спектральных характеристик. Для участков ПП1 Боганида и ПП2 Оганер учитывались материалы наземного обследования и выполнялась экспертная корректировка классов (*puc. 2*). Результирующие классы могут быть отнесены к следующим двум категориям: естественные ландшафты криолитозоны и техногеннопреобразованные ландшафты криолитозоны. К естественным классам следует отнести: реки и озёра, мелкотравянистую тундру, пойменные лишённые растительности участки, долинные комплексы лиственничников и ельников, кустарничковую тундру, умеренно изменённые лесотундровые участки, гольцы и открытые участки (*таблица*).



Рис. 2. Результат классификации спутникового снимка Landsat-8 за 05.08.2023 на территории с привязкой к пробным площадям ПП1 Боганида (*a*) и ПП2 Оганер (*б*)

В вариантах трансформированного состояния растительности доминируют классы: инфраструктура, трансформированные участки заболоченной тундры, техногенные территории, сильно нарушенные лесотундровые ландшафты (*таблица*).

Номер	Название	Площадь, км ²	Доля, %	Площадь, км ²	Доля, %
класса		ПП1 Боганида		ПП2 Оганер	
1	Реки и озёра	27,99	6,14	39,03	13,91
2	Инфраструктура	9,82	2,16	31,77	11,32
3	Мелкотравянистая тундра	188,98	41,47	_	_
4	Трансформированные участки заболоченной тундры	30,97	6,80		
5	Пойменные лишённые растительности участки	4,55	1,00	1,70	0,61
6	Долинные комплексы лиственничников и ельников	10,91	2,39	_	_
7	Кустарничковая тундра	182,42	40,04	15,33	5,46
8	Участки техногенных территорий	_	—	3,50	1,25
9	Сильно нарушенные лесотундровые ландшафты			114,75	40,89
10	Умеренно изменённые лесотундровые участки			70,79	25,33
11	Гольцы и открытые участки			3,73	1,33

Соотношение выделяемых классов для ПП1 Боганида и ПП2 Оганер

Точность классификации достигает 70 % и варьирует в зависимости от детализации классификации по классам, уровня генерализации мелких объектов, а также дополнительной экспертной корректировки на основе натурных обследований. Коэффициент каппа-статистики равен 0,56.

Результаты позволяют констатировать, что в районе интересов в соответствии с долей трансформированных участков можно выделить два контрастных варианта состояния ландшафтов (*рис. 3*). В фоновом состоянии масштабы трансформации не выше 5–12 % от площади участка (ПП1 Боганида, ПП1.1 Боганида, ПП1.2 Боганида), в то время как сильно трансформированное состояние ландшафта (ПП2 Оганер, ПП2.1 Оганер) характеризуется долей трансформаций, достигающей 50–77 % всей площади.

Рис. 3. Соотношение масштабов трансформации в границах рассматриваемых участков ПП1 Боганида, ПП1.1 Боганида (фоновый), ПП1.2 Боганида (фоновый с включением инфраструктурных объектов), ПП2 Оганер, ПП2.2 Оганер (умеренно-трансформированный), ПП2.1 Оганер (с признаками значительной трансформации)



Характерные значения спектральных индексов для участков с привязкой к пространственному положению пробных площадей (см. *puc. 1*) также демонстрируют значимые сезонные различия (*puc. 4*, см. с. 188).

Средние значения за летний период 2016–2023 гг. индекса NDVI для участков с сильной степенью трансформации достигали не более 53,4±4,6 % от фоновой нормы (см. *рис. 4a*). Различие средних значений индекса LST для участков с разной степенью трансформации по отношению к фону варьировало в пределах от 3,6±7,4 до –7,2±9,9 % (см. *рис. 4б*). При этом занижения индекса LST на трансформированных участках, вероятно, связаны с особенностями растительного покрова. В частности, состояние ПП2.2 Оганер в целом отличается наличием большого количества озёр карстового типа образования и, соответственно, повышенной обводнённостью, что определяет отрицательный тренд LST относительно фоновых ландшафтов.



Рис. 4. Межсезонная вариативность спектральных индексов NDVI (*a*) и LST (*б*) для участков на пробных площадях фонового (ПП1) и трансформированного (ПП2) вариантов

Степень трансформации ландшафтов с точки зрения состояния экосистем определяет вариативность тепловых режимов в почвах. Этот факт является следствием изменения теплоизолирующих свойств поверхности (Горный, 2021; Пономарев и др., 2024). При этом формируемые в новом режиме тепловые потоки вдоль почвенного профиля становятся причиной сезонных аномалий протаивания в условиях мерзлотных почв. По натурным измерениям, выполненным в районе исследования в 2023–2024 гг., выявлено, что в течение летнего периода глубина протаивания почвы значительно увеличивается (в 1,5–2,0 раза) в условиях трансформированного состояния ландшафта в сравнении с фоном (*рис. 5*).



Рис. 5. Натурные измерения глубины сезонного протаивания почвы криолитозоны на участках с преобладанием фонового состояния ландшафта (верхний ряд, ПП1 Боганида) и в условиях значительной трансформации и деградации верхнего органогенного горизонта (нижний ряд, ПП2 Оганер). Заштрихованная часть графика показывает границу мерзлоты по одновременным натурным измерения на ПП1 Боганида и ПП2 Оганер в июне, июле, августе 2023–2024 гг.

Такие различия в глубине сезонного протаивания почв фиксируют многие авторы для разных исследуемых регионов (Пономарёва и др., 2022; Lebedeva et al., 2014). Основываясь на том, что спутниковые методы имеют большую эффективность в оценке состояния ландшафтов, особенно в условиях криолитозоны с высокой степенью разреженности или при полном отсутствии древесного полога, прямая характеристика состояния ландшафтов может быть использована для косвенной оценки тепловых характеристик почвы, включая степень и глубину протаивания при соответствующей калибровке по материалам натурных измерений или результатам численного моделирования (Финников и др., 2023).

Заключение

Сопряжённое использование данных спутниковых снимков в сочетании с локальными наземными исследованиями позволяет категорировать состояние ландшафтов применительно к задаче мониторинга тепловых режимов почв. Различная степень трансформации ландшафтов, подвергшихся воздействию деструктивных факторов, значительно меняет теплоизолирующие свойства верхних горизонтов почвы. Глубина сезонного протаивания почв криолитозоны качественно согласуется с выявленными категориями ландшафтов по степени трансформации. По всей вероятности, классификация материалов съёмки тундровых ландшафтов может быть основой косвенной характеристики вариации тепловых режимов почв криолитозоны Сибири, что потенциально является актуальным направлением развития технологий дистанционного мониторинга.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, https://rscf.ru/project/23-14-20007/, Красноярского краевого фонда науки. Спутниковые данные обработаны в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Литература

- 1. *Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф.* Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы // Тр. Гидрометеоролог. научно-исследоват. центра Российской Федерации. 2015. № 358. С. 13–35.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. и др. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
- 3. Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г. и др. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
- 4. *Карсаков А.А., Пономарев Е. И.* Дистанционный мониторинг теплового состояния подстилающей поверхности в контексте техногенных трансформаций // Биосфера. 2024. Т. 16. № 1. С. 20–29.
- 5. *Кашницкий А. В.* Метод автоматического детектирования повреждений растительного покрова природными пожарами по данным спутников серий Landsat и Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 29–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-29-38.
- 6. Корниенко С. Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
- 7. Пономарев Е. И., Пономарева Т. В., Якимов Н.Д. Мониторинг техногенно-нарушенных земель на основе анализа динамики тепловых аномалий поверхности // Наука и технологии Сибири. 2024. № 2(13). С. 102–105.
- 8. Пономарёва Т.В., Пономарёв Е.И., Литвинцев К.Ю. и др. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычислит. технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 16–35. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.

- 9. *Сыроежко М. Ю., Пономарёв Е. И.* Аномалии спектральных индексов в оценке состояния территории Севера // Материалы Международ. конф. «Лесные экосистемы бореальной зоны: биосферная роль, биоразнообразие, экологические риски». Красноярск: ИЛ СО РАН, 2024. С. 386–387.
- 10. *Телятников М. Ю.* Изменение фиторазнообразия природных экосистем, испытывающих влияние нефтепродуктов в Норильском промышленном районе // Сибирский эколог. журн. 2022. Т. 29. № 2. С. 202–221. DOI: 10.15372/SEJ20220207.
- 11. *Третьяков П.Д., Пономарёв Е. И.* Горимость арктической зоны Сибири в условиях климатических изменений XX начала XXI вв. // Сибирский лесной журн. 2023. № 6. С. 17–31. DOI: 10.15372/ SJFS20230603.
- 12. Финников К. А., Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю. Исследование влияния последствий лесных пожаров на перенос тепла и влаги в сезонно-талом слое почвы методами численного моделирования // Теплофизика и аэромеханика. 2023. № 6. С. 1215–1222.
- 13. Шестаков Н.А., Топаз А.А. Картографирование лесной растительности на основе автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования // Журн. Белорусского гос. ун-та. География. Геология. 2024. № 1. С. 98–112.
- 14. Шишикин А. С. Организация исследований техногенных территорий // Сибирский лесной журн. 2016. № 2. С. 102–119. DOI: 10.15372/SJFS20160210.
- 15. Юркевич Н. В., Ельцов И. Н., Гуреев В. Н. и др. Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 12. С. 230–249. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207.
- 16. *Якимов Н.Д., Пономарёв Е.И., Пономарёва Т.В.* Изменение спектральных индексов в контексте природных и техногенных трансформаций ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-131-140.
- 17. Berner L., Massey R., Jantz P. et al. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // Nature Communications. 2020. V. 11. Article 4621. DOI: 10.1038/s41467-020-18479-5.
- Lebedeva L., Semenova O., Vinogradova T. Simulation of active layer dynamics, upper Kolyma, Russia, using the hydrograph hydrological model // Permafrost and Periglacial Processes. 2014. V. 25. No. 4. P. 270–280. DOI: 10.1002/ppp.1821.

Spectral features of landscape transformation as characteristics of thermal regimes of soils of Central Siberia cryolithozone

M. Yu. Syroezhko^{1,2}, E. I. Ponomarev^{1,2}, T. V. Ponomareva^{1,2}

¹ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
² Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia E-mails: syroezhko.m@ksc.krasn.ru, evg@ksc.krasn.ru

Using the Norilsk industrial region of Krasnoyarsk Krai as an example, the paper presents a review classification of cryolithozone landscapes based on Landsat-8, -9 archive materials for the summer period of 2016–2023. The ranges of spectral indices characterizing the degree of landscape transformation, as well as ground-based data on soil thawing in two sample plots in the study area, were analyzed according to a complex methodology. The maximum similarity method was used to classify the images of the studied landscapes, as well as standard methods for assessing the state of vegetation based on spectral indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and LST (Land Surface Temperature). The review classification permits identification of up to 11 distinct landscape states within the cryolithozone of the study area. Two most contrasting landscape states were recorded, which were distinguished by the degree of transformation of the vegetation cover and the degree of destruction of the heat-insulating organogenic soil horizon. In the study area, the proportion of territory with signs of transformation after technogenic and aerotechnogenic impact varied from 5 % in the background area to 77 % in the technogenically disturbed area. Areas with signs of transformation to reacterized by abnormally low NDVI values, reaching no more than 54 % of the indicators of undisturbed landscapes and a variation in the LST indicator between -7.0 and 3.6 % relative

to the background values. According to field measurements of the soil thawing boundary, a significant 1.5-2.0-fold difference was observed in the depth of thawing in background conditions and in a transformed state of the landscape. The variability of seasonal thawing of soils in the cryolithozone is in qualitative agreement with estimates of landscape transformation. Therefore, the classification of the survey data into tundra landscapes enables us to indirectly characterize the variations in the thermal regimes of soils within the cryolithozone of Siberia.

Keywords: Siberia, cryolithozone, spectral indices, NDVI, LST, soil, thawing depth

Accepted: 23.04.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-182-192

References

- 1. Bardin M. Yu., Platova T. V., Samokhina O. F., Features of observed climate changes on the territory of Northern Eurasia according to regular monitoring data and their possible factors, *Trudy Gidrometeorologi-cheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2015, No. 358, pp. 13–35 (in Russian).
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 203–221 (in Russian).
- 3. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G. et al., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
- 4. Karsakov A. A., Ponomarev E. I., Remote monitoring of the thermal condition of underlying surface under the conditions of anthropogenic transformation, *Biosfera*, 2024, V. 16, No. 1, pp. 20–29 (in Russian).
- 5. Kashnitskii A. V., Method for automatic detection of burned areas by wildfires using Landsat and Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 29–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-29-38.
- 6. Kornienko S. G., Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 106–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
- Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Yakimov N. D., Monitoring of technogenically-disturbed lands based on the analysis of the dynamics of thermal anomalies of the surface, *Nauka i texnologii Sibiri*, 2024, No. 2(13), pp. 102–105 (in Russian).
- 8. Ponomareva T. V., Ponomarev E. I., Litvintsev K. Y. et al., Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation, *Computational Technologies*, 2022, V. 27, No. 3, pp. 16–35 (in Russian), DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.003.
- Syroezhko M. Y., Ponomarev E. I., Anomalies of spectral indices in the assessment of the state of the territory of the North, *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Lesnye ehkosistemy boreal'noi zony: biosfernaya rol', bioraznoobrazie, ehkologicheskie riski"* (Proc. Intern. Conf. "Forest Ecosystems of the Boreal Zone: Biosphere Role, Biodiversity, Environmental Risks"), Krasnoyarsk: IL SO RAN, 2024, pp. 386–387 (in Russian).
- Telyatnikov M. Yu., Dynamics of the phytodiversity of natural ecosystems affected by oil products in the Norilsk Industrial District, *Contemporary Problems of Ecology*, 2022, V. 15, pp. 160–179, DOI: 10.1134/ S1995425522020093.
- 11. Tretyakov P. D., Ponomarev E. I., Wildfires of the Arctic zone of Siberia under the conditions of climatic changes of the XX–early XXI centuries, *Siberian J. Forest Science*, 2023, No. 6, pp. 17–31, DOI: 10.15372/SJFS20230603 (in Russian).
- 12. Finnikov K.A., Ponomareva T.V., Ponomarev E.I., Litvintsev K.Yu., Impact of wildfire on heat and moisture transfer in a seasonally thawed layer of soil studied by numerical simulation, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2023, V. 30, No. 6, pp. 1149–1156.
- 13. Shastakou M.A., Tapaz A.A., Mapping of the forest vegetation based on automated interpretation of remote sensing data, *J. Belarusian State University. Geography and Geology*, 2024, No. 1, pp. 98–112 (in Russian).
- 14. Shishikin A. S., Organization of research of technogenic territories, *Siberian J. Forest Science*, 2016, No. 2, pp. 102–119, DOI: 10.15372/SJFS20160210 (in Russian).
- 15. Yurkevich N. V., Yeltsov I. N., Gureyev V. N. et al., Technogenic effect on the environment in the Russian Arctic by the example of the Norilsk industrial area, *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta*. *Inziniring Georesursov*, 2021, No. 12, pp. 230–249, DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207 (in Russian).

- 16. Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Variation in spectral indices in the context of natural and technogenic transformations of landscapes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 131–140, DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-131-140 (in Russian).
- 17. Berner L., Massey R., Jantz P. et al., Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome, *Nature Communications*, 2020, V. 11, Article 4621, DOI: 10.1038/s41467-020-18479-5.
- Lebedeva L., Semenova O., Vinogradova T., Simulation of active layer dynamics, upper Kolyma, Russia, using the hydrograph hydrological model, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, V. 25, No. 4, pp. 270–280, DOI: 10.1002/ppp.1821.