

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ В КОНТЕКСТЕ ТЕХНОГЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

А.А. Карсаков¹, Е.И. Пономарев^{1, 2}

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»; ² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Эл. почта: metall8-8@ya.ru; evg@ksc.krasn.ru

Статья поступила в редакцию 23.11.2023; принята к печати 21.01.2024

Исследован отклик теплового состояния экосистемы севера Сибири в летний период на техногенные воздействия, проявляющийся в форме аномалий температурного поля подстилающей поверхности. Работа выполнена с использованием мультиспектральных, включая инфракрасный (ИК) диапазон, изображений спутниковой системы Landsat-7, -8/ETM+/OLI/TIRS (Enhanced Thematic Mapper Plus/Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) на территории, находящейся под воздействием развивающейся инфраструктуры нефтегазового комплекса в южной части Таймырского полуострова, Красноярского края (Тагуйское нефтегазовое месторождение, ТНМ). В результате предварительного анализа спектральных характеристик изучаемых объектов по композиту спутниковой сцены в каналах $\lambda = 1,560-1,660$ мкм; $\lambda = 0,845-0,885$ мкм; $\lambda = 0,630-0,680$ мкм и диапазонов вегетационного индекса растительности NDVI на исследуемом участке были выделены естественные природные и техногенные участки (с различными типифакторами воздействия), для каждого из которых анализировалось тепловое состояние (по вычисляемому показателю Land Surface Temperature, LST) в сравнении с данными для фонового ненарушенного состояния. Были сопряженно использованы долговременные ряды метеоданных о температуре приземного слоя воздуха. Показана корреляция ($R^2 = 0,35$, $p < 0,05$) между показателем LST и температурой приземного слоя воздуха летнего периода 2010–2022 годов в условиях повышения уровня техногенного воздействия на растительность и напочвенный покров. Такие изменения можно использовать в качестве дешифровочного признака при контроле масштабов техногенной трансформации экосистем. При этом относительные отклонения значений LST в условиях трансформации участков на $-5-12\%$ превышали фоновые значения. Со времени начала активного развития инфраструктуры наблюдалось закономерное снижение значений NDVI для трансформированных участков и смещение средних значений LST в область более высоких показателей. Относительное отклонение значений по сравнению с фоновыми составило $9-26\%$ для NDVI и $18-26\%$ для LST.

Ключевые слова: многозональные космические снимки, техногенная трансформация, температурное поле подстилающей поверхности, нефтегазовый комплекс, Land Surface Temperature (LST).

REMOTE MONITORING OF THE THERMAL CONDITION OF UNDERLYING SURFACE UNDER THE CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION

A.A. Karsakov¹, E.I. Ponomarev^{1, 2}

¹ Krasnoyarsk Research Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and ² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Email: metall8-8@ya.ru; evg@ksc.krasn.ru

Reported in the present paper is a study of the thermal condition of a Northern Siberian ecosystem in summer under anthropogenic impacts manifested as anomalies of mean-field underlying surface temperature. The study made use of multispectral, including the infrared (IR) range, images generated by the satellite system Landsat-7, and -8/ETM+/OLI/TIRS (Enhanced Thematic Mapper Plus / Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor) for the area impacted by the developing infrastructure of the oil-and-gas bearing basin in the south of the Taymyr Peninsular (Krasnoyarsk Region, the Tagul oil-and-gas field). A preliminary analysis of the spectral characteristics of the objects under study used a composite satellite signal in the channels $\lambda = 1.560-1.660$ μm , $\lambda = 0.845-0.885$ μm and $\lambda = 0.630-0.680$ μm and the spectral ranges of the NDVI index of vegetation. The analysis made it possible to distinguish natural intact and anthropogenically impacted areas (of different impact factors). Each such factor was analyzed with regard to its thermal condition assessed by calculating the Land Surface Temperature (LST) in comparison with data related to the intact background and with long-term series of meteorological data on the ground-air temperature. A correlation ($R^2=0,35$, $p<0,05$) has been found between LST values and air temperature in summertime of 2010–2022 under increasing anthropogenic impact on vegetation and soil cover. Such changes may be used as a deciphering indicator for controlling the degree of the anthropogenic transformation of an ecosystem. The relative deviations of LST values for the plots under anthropogenic transformation were higher by $-5-12\%$ than the background values. Since the onset of the active infrastructure development, regular decreases in NDVI values related to transformed areas were occurring, and the mean LST values shifted towards higher estimates. The relative deviations from the background values amounted to $-9-26\%$ for NDVI and $18-26\%$ for LST.

Keywords: multizonal satellite images, anthropogenic transformation, mean-field underlying surface temperature, oil-and-gas industry, Land Surface Temperature (LST).

Введение

В условиях климатических изменений [9], которые особенно значимы для арктической зоны Сибири, естественные факторы трансформации экосистем усиливаются антропогенным и техногенным воздействиями. Совокупное воздействие может выступить триггером качественных изменений состояния и стабильности функционирования экосистем севера, где многолетнемерзлые грунты чувствительны к изменениям тепловых режимов поверхности и почвы [11]. В условиях интенсивного освоения арктической зоны Сибири актуален вопрос о новых подходах к контролю состояния и динамики природно и техногенно трансформированных экосистем. Данная тема широко обсуждается в публикациях [3–6, 13].

В условиях, когда температурный режим подстилающей поверхности реагирует и на изменение климата, и на совокупное антропогенное воздействие [1], можно предполагать значительные деструктивные трансформации большого процента криолитозоны Сибири. Среди факторов, которые определяют изменение температурного режима подстилающей поверхности, можно выделить следующие: снижение альбедо в результате деструкции напочвенного и растительного покровов; снижение биомассы вегетирующей растительности, регулирующей температурный и водный баланс почв; уничтожение или значительное сокращение мощности органогенного горизонта почв, выполняющего теплоизолирующую функцию; прямые техногенные и пост-техногенные воздействия и др. Формирование общего представления о пост-техногенных процессах в криолитозоне [10, 11] требует долговременной детализации на уровне типифакторов трансформации территорий и с привязкой к конкретным условиям, что выполнимо только на основе материалов спутникового мониторинга [2, 4, 13].

Цель данной работы – изучение отклика теплового состояния экосистемы севера Сибири в летний период на техногенные воздействия, проявляющийся в форме аномалий температурного поля подстилающей поверхности. Мы рассмотрели следующие аспекты: динамика температурного режима поверхности летнего периода для выделенных вариантов техногенно трансформированных ландшафтов (с различными типифакторами воздействия); корреляционная связь с температурой воздуха и относительные отклонения значений температуры земной поверхности (Land Surface temperature, LST) для рассматриваемых типифакторов по отношению к значениям фоновых участков. Работа выполнена на территории Тагульского нефтегазового месторождения (ТНМ) на юге Таймырского полуострова Красноярского края по ретроспективным материалам спутниковых съемок Landsat-7, –8 на временном интервале 2010–2022 годов.

Территория исследования

Территория Тагульского месторождения (67°20' с. ш. 83°02' в. д.) расположена в южной части Таймырского полуострова Красноярского края, граничит с Ямало-Ненецким автономным округом (рис. 1). Это самое южное и при этом активно осваиваемое месторождение среди подобных на Таймырском полуострове. На одной широте с ним находится г. Игарка, для которого доступны многолетние данные наблюдений за метеопараметрами на метеостанции (<https://rp5.ru>, дата обращения: 06.07.2023).

Территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), поверхностный почвенный покров формируется под действием морозного выветривания и мерзлотных деформаций в расположенном над многолетнемерзлыми породами сезонно-талом слое. Глубина сезонного промерзания грунта в данном регионе варьирует от 2,5 до 3,9 м¹.

Многолетняя среднегодовая температура воздуха в рассматриваемом районе по данным метеостанции «Аэропорт Игарка» составляет минус 8,6 °С. Средняя продолжительность безморозного периода – 83 дня. Период с отрицательными средними месячными температурами воздуха продолжается с октября по май. Летний период продолжительностью около трех месяцев (июнь–август). Среднемесячная температура воздуха в июле составляет +15,1 °С, абсолютная максимальная температура воздуха составляет +34,5 °С. Устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С, определяющий наступление весны, происходит в конце марта–начале апреля.

Растительный покров представлен редкими лесными растительными сообществами лесотундры, занятыми в основном малорослой угнетенной лиственницей (*Larix sibirica*), березой (*Betula* spp.) и редко елью (*Picea obovata*). В долинах рек и ручьев – кустарниковая растительность. Водораздельные пространства покрыты лишайником и моховыми болотами, зарослями полярных ив (*Salix polaris*), карликовой березы (*Betula nana*), багульника (*Ledum*), морозники (*Rubus chamaemorus*) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) с высотой живого напочвенного покрова до 0,2–0,5 м [7].

Территория ТНМ (рис. 1) промышленно осваивается с 2014 года по настоящее время (<https://rosgeolfond.ru>, дата обращения: 06.11.2023). Из предварительного анализа материалов спутниковой съемки следует, что пик техногенных трансформаций приходится на 2016 год. При этом рост зоны промышленного освоения продолжается по настоящее время, что делает район исследований перспективным для дальнейшего мониторинга и валидации методов спутникового контроля.

¹ Свод правил СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология».

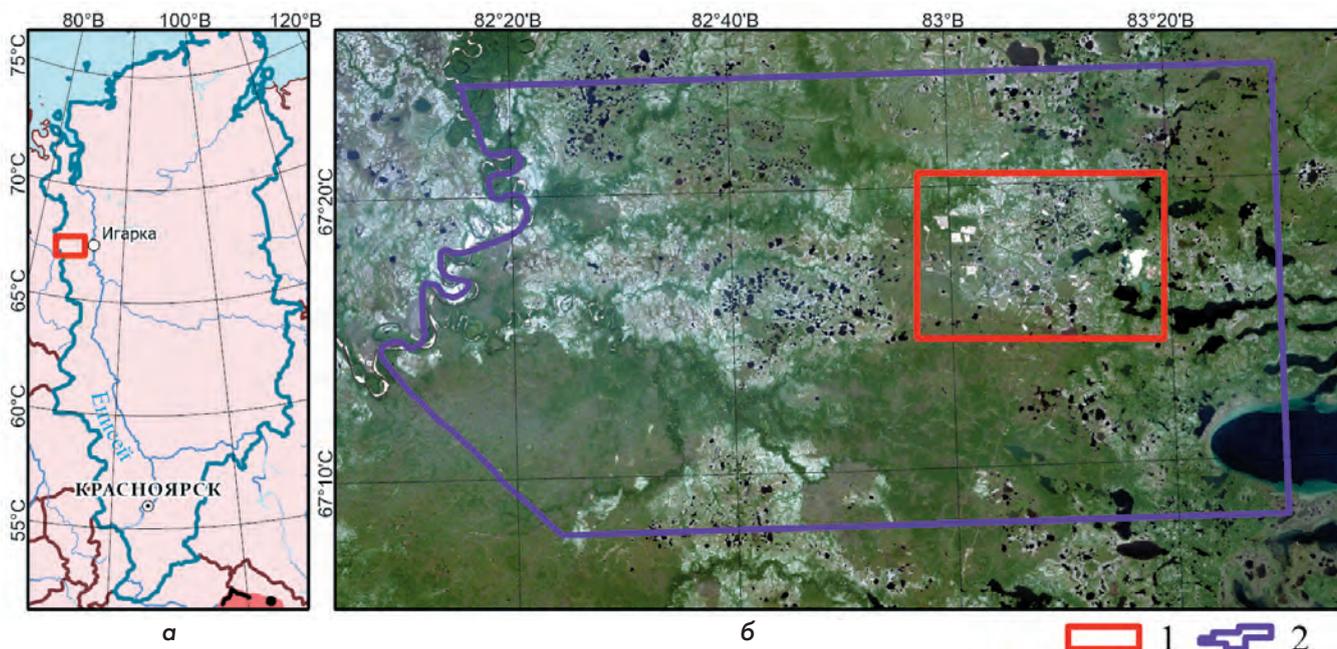


Рис. 1. Положение территории исследования: а – относительно муниципальных границ Красноярского края; б – относительно Тагульского лицензионного участка на данных Landsat-8; 1 – граница исследуемого участка ТНМ; 2 – граница Тагульского лицензионного участка (<https://rosgeolfond.ru>, дата обращения: 06.11.2023)

Материалы и методы

Состояние территории в 2010–2022 годах анализировали по данным дистанционного зондирования земли Landsat-7, -8/ETM+/OLI/TIRS (Enhanced Thematic Mapper Plus/Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) из открытого каталога USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>, дата обращения: 06.11.2023). В работе использовались данные съемки в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda = 0,63–0,69$ мкм) с разрешением 30 м, а также данные в тепловом канале ($\lambda = 10,40–12,50$ мкм) с разрешением 100 м (табл. 1).

Пространственная привязка и предварительный анализ типофакторов техногенной трансформации участка выполнялись с использованием векторных слоев границ лицензионных участков, предоставленных ФГБУ «Росгеолфонд» (<https://rosgeolfond.ru>, дата обращения: 06.11.2023).

Для стандартных продуктов Landsat Level-1 (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>, дата обращения: 06.07.2023) начало работы со сценами включало предварительно проведенные процедуры радиометрической и спектральной коррекции [7] (рис. 2а). После чего был выполнен расчет индексов NDVI с целью последующего дешифрирования и LST.

Предварительно выполняли дешифрирование на изображениях естественных объектов с характерными спектральными признаками, а также участков с типофакторами нарушенности: 1) инфраструктур-

но преобразованные территории; 2) растительность речных долин; 3) объекты гидрографии; 4) фоновые участки, включая гидроморфные ландшафты с болотными комплексами; 5) автоморфные ландшафты с лишайниковыми типами леса; 6) участки смешанной нарушенной растительности.

В качестве дополнительного признака дешифрирования фоновых и техногенно трансформированных участков и далее при классификации изображений использовались значения вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (рис. 2б, в):

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (1)$$

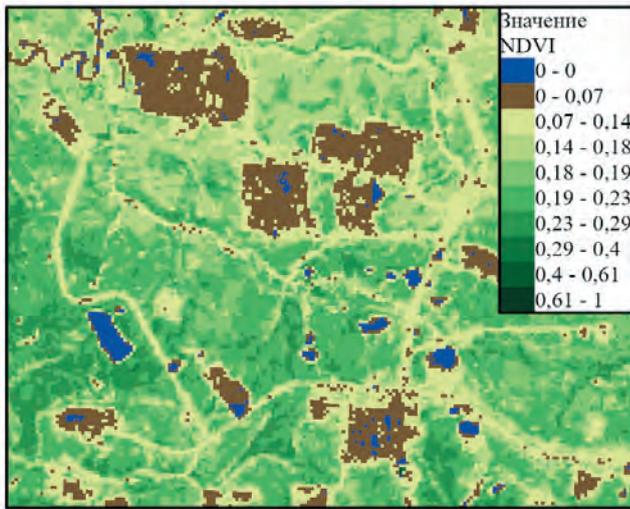
где **NIR** – отражение в ближней инфракрасной области спектра в канале с длиной волны $\lambda = 0,630–0,690$ мкм; **RED** – отражение в красной области спектра при $\lambda = 0,770–0,900$ мкм.

В зависимости от типа бортового оборудования использовали (см. табл. 1): в данных Landsat ETM+ – канал 3 (область видимого спектра, красный) и канал 4 (ближний инфракрасный диапазон); в данных Landsat OLI TIRS – канал 4 (диапазон красного цвета), канал 5 (ближний инфракрасный диапазон).

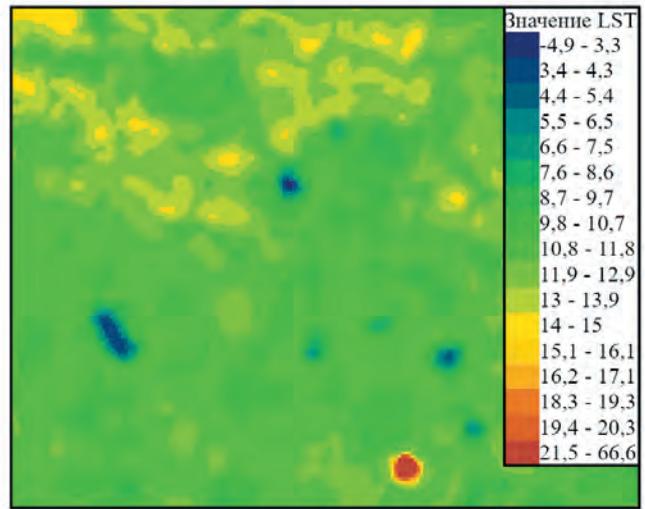
Участки, относимые по состоянию на 2022 год к классу инфраструктурных объектов, и объекты гидрографии дешифрированы пороговым методом по диапазонам NDVI: при $NDVI \leq -0,11$ выделялся класс «вода», при $-1,12 < NDVI < 0,17$ выделялись объекты

Исходная выборка съемки Landsat

Спутник/радиометр	Номер кадра Path/Row	Используемые каналы	Дата снимка
Landsat-7/ ETM+/ TIRS	155/013	4, 5, 10	16.08.2010
	154/013	4, 5, 10	25.06.2011
Landsat-8 /OLI/TIRS	155/013	4, 5, 10	04.07.2012
	153/013	4, 5, 6, 10	17.07.2013
	153/013	4, 5, 10	21.08.2014
	155/013	4, 5, 10	07.07.2016
	155/013	4, 5, 10	26.07.2017
	154/013	4, 5, 10	06.07.2018
	153/013	4, 5, 10	20.07.2020
Landsat-8	155/013	4, 5, 10	21.07.2021
Landsat-8	154/013	4, 5, 6, 10	01.07.2022



а



б

Рис. 2. Результат расчета индексов в 2022 году по данным сцены спутника Landsat-8: а) градиент значений NDVI; б) градиент значений LST

инфраструктуры. Среди остальных классов максимально близкими по диапазону значений NDVI к инфраструктуре является класс лишайники. Для выделения остальных классов применена классификация изображения с помощью обучающей выборки и предварительной сегментацией изображения. Обучающая выборка подготовлена путем визуальной интерпретации на изображении выделяемых классов подстилающей поверхности и растительного покрова.

Точность классификации растительного покрова оценивали путем визуальной верификации на основе данных спутниковой сцены WorldView-3 с разрешением 0,31 м, транслируемой компанией Махаг через протокол WMS (Web Map Service) в открытом

доступе (https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer, дата обращения: 06.11.2023).

Точность классификации класса инфраструктура выполняли с использованием коэффициента Каппа Коэна по формуле [8, 12]:

$$k = \frac{d-q}{N-q}, \quad (2)$$

где: d – число случаев правильного получения результата (сумма значений, расположенных по диагонали матрицы ошибок); q – число случайных результатов, вычисляемое через число случайных результатов и истинных в столбцах матрицы ошибок; N – общее число точек.

Для абсолютно точных результатов коэффициент Каппа $k = 1$, а при полном случайном совпадении $k = 0$. Для соблюдения релевантности статистической обработки из всех результатов работ полностью исключены недостающие данные в границах аппаратной ошибки спутника Landsat-7.

Значения температуры (рис. 2з) подстилающей поверхности рассчитывались из соотношения для Land Surface Temperature (LST):

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{\lambda T_B}{\rho}\right) \ln \varepsilon} \quad (3)$$

где: LST – температура поверхности земли (°K); T_B – яркостная температура (°K); λ – длина волны излучения ($\lambda = 11,457$ мкм для Landsat TM, $\lambda = 11,269$ мкм для Landsat ETM+, $\lambda = 10,904$ мкм для Landsat OLI TIRS); $\rho = (h \times c) / \sigma = 1,438 \times 10^{-2}$ мК; $\sigma = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $h = 6,26 \times 10^{-34}$ Дж \times с – постоянная Планка; $c = 2,998 \times 10^8$ м/с – скорость света; ε – коэффициент излучения поверхности Земли (LSE), связанный со значением индекса растительности NDVI соотношением:

$$\varepsilon = 1,0094 + 0,047 \ln(NDVI) \quad (4)$$

Далее анализировали температурный режим поверхности в течение летнего периода для каждого из выделенных типофакторов техногенно трансформированных ландшафтов по дискретным измерениям в соответствии с исходной выборкой съемки (табл. 1). Относительные аномалии значений LST для рассматриваемых типофакторов определялись по отношению к значениям участков, выбранных в качестве фоновых (ненарушенных).

Рассматривалась также корреляционная связь с температурой воздуха по сопряженным данным метеонаблюдений. Сопряженно метеопараметры, соответствующие датам съемки изображений, были обобщены на основе данных с метеостанции «Аэропорт Игарка» (WMO ID 23274) (<https://rp5.ru>, дата обращения: 06.07.2023). Использованы данные о приземной температуре воздуха в самый теплый месяц года – июль в 16 часов местного времени, долговременный ряд значений построен для временного интервала с 2010 по 2022 год.

Выявленные расхождения долговременной динамики значений LST с метеоданными о температуре воздуха были соотнесены с масштабом техногенной трансформации территории, который в значительной степени определяет изменения теплового режима территории.

Результаты и обсуждение

Результат классификации снимка территории исследований с применением обучающей выборки для 6 классов удовлетворяет поставленной задаче иссле-

дования и позволил достоверно выделить в том числе инфраструктурные объекты (класс 2), для которых уровень техногенной трансформации максимален (рис. 3). Отдельно выделены комплексы речных долин (класс 3) и объекты гидрографии (класс 4). В качестве фоновых территорий были выделены три класса растительности: гидроморфные ландшафты с болотными комплексами (класс 5), автоморфные ландшафты с лишайниковыми типами леса (класс 6) и древесно-кустарниковая и травянистая активно вегетирующая растительность (класс 7).

На основе анализа результатов классификации было установлено, что классы с лишайниковыми типами леса (34,19%) и древесно-кустарниковая и травянистая активно вегетирующая растительность (30,62%) доминируют на исследуемой территории на съемках 2022 года. Площадь класса инфраструктурных объектов составляет ~5% общей площади участка. Процентное соотношение всех выделяемых классов за два срока наблюдений представлено в табл. 2.

На рис. 4б приведены дискретные данные о температуре воздуха приземного слоя летнего периода по материалам метеостанции «Аэропорт Игарка» за 2010–2022 годы. Усреднения выполнялись для самого теплого месяца года – июля. При существенных отличиях рядов дискретных измерений для летних периодов (июль–август) температуры приземного воздуха на метеостанции и по индексу LST (рис. 4а, б) между анализируемыми параметрами зафиксирован значимый уровень корреляция ($R^2 = 0,35$, $p < 0,05$) (рис. 4в).

Для всей территории исследований на фоне значительных межсезонных вариаций амплитуды и температуры воздуха и LST значимые тренды не выявлены, коэффициенты достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,02$ и $0,06$) незначительны. Вероятно, некоторое снижение LST обусловлено только присутствием двух спорадических максимумов в 2013 и 2016 годах на фоне стабильных значений для остальных лет, варьирующих на уровне ~17 °С.

В то же время на фоне увеличения доли техногенно трансформированных участков и площади инфраструктуры и связанных с этим снижений альбедо поверхности (на ~40% в зависимости от нарушенности [4]) и степени черноты (изменение на ~10%) следует ожидать рост LST для больших участков в районе исследований. Таким образом будет проявляться отклик на техногенные воздействия, меняющие тепловой режим подстилающей поверхности. Аномальные экстремумы температуры воздуха 2013 и 2016 годов отразились и на показателе LST, который демонстрирует синфазность изменения в данный период (рис. 4а, б). Однако далее после 2017 года интегральное значение LST рассматриваемой территории не следует отрицательному тренду температуры воздуха, а демонстрирует хоть и незначительный, но положительный тренд.



Рис. 3. Результат классификации территории ТНМ по состоянию на 2022 год. Описание выделенных классов: 1 – облачность в кадре; 2 – инфраструктурные объекты; 3 – растительность речных долин; 4 – объекты гидрографии; 5 – гидроморфные болотные комплексы; 6 – автоморфные комплексы с лишайниковыми покровами; 7 – древесно-кустарниковая и травянистая растительность (активно вегетирующая)

Табл. 2

Соотношение площадей типифакторов в районе исследований по результатам классификации снимков за 2013 и 2022 годы

Типофактор	Площадь, га		От общей площади, %		LST среднее	
	2013	2022	2013	2022	2013	2022
Облачность	109	10	0,52	0,04	–	–
Техногенно трансформированный покров /инфраструктура	103	1082	0,49	4,90	26,85	59,06
Растительность речных долин	957	1140	4,58	5,16	25,75	58,09
Объекты гидрографии	2749	2323	13,16	10,51	20,54	54,12
Болотные комплексы	1785	3220	8,54	14,57	25,95	58,40
Лишайниковый покров	6470	6766	30,97	30,62	27,00	58,87
Активно вегетирующая растительность	8721	7552	41,74	34,19	25,71	58,24

Точность выполненной классификации составила не ниже 78,5% при коэффициенте каппа $k = 0,63$ (табл. 3).

Табл. 3

Точность классификации растительного покрова за выбранный период

Год		Объекты гидрографии (%)	Инфраструктура (%)	Общая точность (%)	Коэффициент Каппа
2022	Точность пользователя	79,56	77,97	78,58	0,63

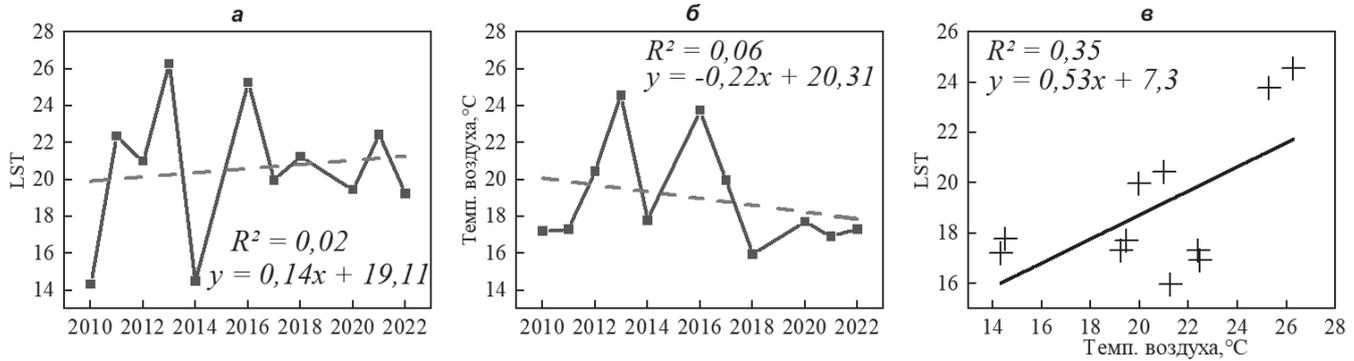


Рис. 4. Многолетние тренды индекса LST и температуры воздуха по данным метеостанции «Аэропорт Игарка»: а – температура подстилающей поверхности по данным дистанционного зондирования; б – усредненная температура воздуха июля по данным метеостанции в г. Игарка; в – график корреляционного поля

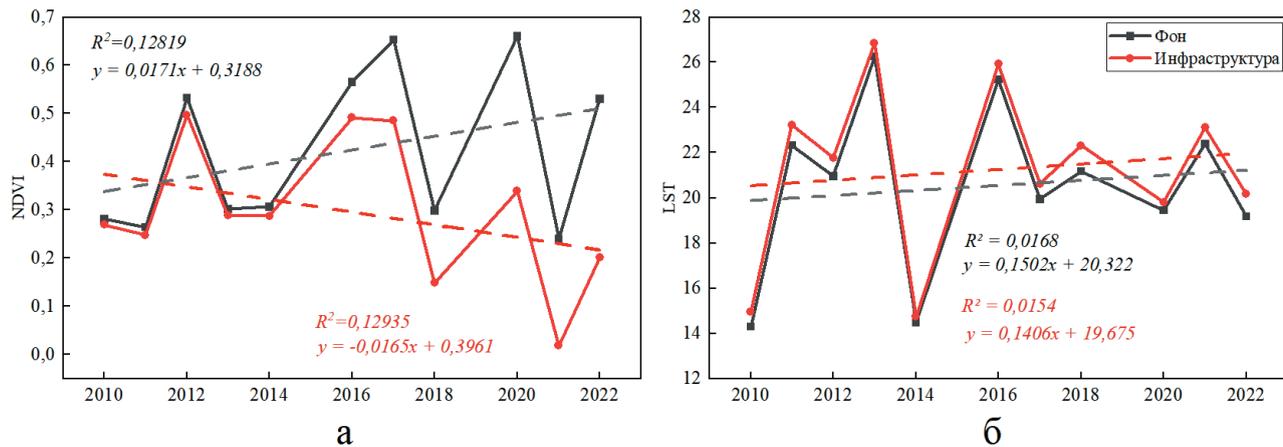


Рис. 5. Динамика летнего периода NDVI и LST на территории района исследований с учетом типофакторов состояния и трансформации: а – индекс NDVI (разрешение 30 м); б – индекс LST (разрешение 100 м)

Показателен общий тренд на снижение значений NDVI для всех типофакторов, относимых к трансформированным участкам (рис. 5а, табл. 4). Время значительных изменений и NDVI, и LST совпадает с началом интенсивной разработки участка в 2016 году. Относительные отклонения значений LST при этом достигло ~5–12% при сравнении с ненарушенными фоновыми территориями (рис. 5б). Детализация относительных аномалий для каждого из типофакторов обобщена в табл. 4.

Можно предположить, что низкий процент площади класса инфраструктуры (~5% общей площади) (табл. 4) является причиной занижения значений LST при использовании спутниковой съемки в тепловом диапазоне с пространственным разрешением 100 м. Это может накладывать ограничения на получаемые решения и в целом на возможность контроля аномалий теплового состояния исследуемого полигона. Предположение подтверждается динамикой индекса

NDVI (рис. 5б), рассчитываемого на данных более высокого пространственного разрешения, где при тех же внешних условиях абсолютная и относительная разница в динамике классов значимо проявляется и увеличивается во времени с NDVI = 0,26 для инфраструктуры в 2010 году до NDVI = 0,2 для инфраструктуры фона в 2022 году, при фоновых значениях на ненарушенных участках NDVI ~ 0,53.

Относительное отклонение значений по сравнению с фоновыми составило ~9–26% для NDVI и 18–26% для LST (табл. 4). Отклонение индекса LST для класса «инфраструктура» от средних значений фона в процентном отношении варьирует на уровне ~3,2–5,5% в течение рассмотренного периода 2010–2022 годы.

Текущая степень воздействия инфраструктуры нефтегазового комплекса на тепловой режим подстилающей поверхности на участке ТНМ характеризуется также изменением гистограммы распределения значений в сторону высоких значений (рис. 6). Однако

Уровень относительной аномалии NDVI и LST для рассматриваемых типофакторов в процентах к значениям фона

Типофактор воздействия	Доля от общей площади, %	NDVI, % к фону		LST, % к фону	
		2013	2022	2013	2022
Облачность		–	–	–	–
Техногенно трансформированный покров/инфраструктура	4,90	23,37	9,19	25,72	26,50
Растительность речных долин	5,16	29,96	29,15	24,66	24,40
Объекты гидрографии	10,51	–30,13	–14,86	19,68	18,57
Болотные комплексы	14,57	20,08	22,26	24,85	24,96
Лишайниковый покров	30,62	22,76	21,76	25,86	25,91
Активно вегетирующая растительность	34,19	27,20	26,83	24,63	24,73

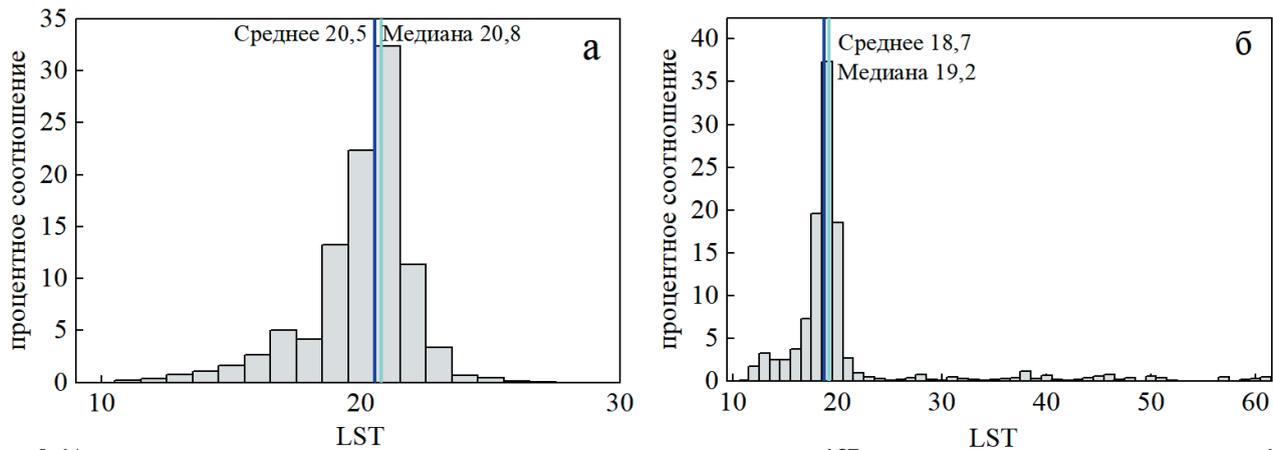


Рис. 6. Исследуемая территория в температурном градиенте на основе индекса LST: а – распределение пикселей индекса LST на основе данных Landsat-8 в 2013 году; б – распределение пикселей индекса LST на основе данных Landsat-8 в 2022 году

изображения температурного градиента включают спорадические максимумы индекса LST, связанные с присутствием факелов открытого горения.

Зафиксированные изменения в тепловом режиме трансформированных участков района исследований согласуются с результатами, полученными для других вариантов техногенного воздействия на растительность и почвы. Как показано ранее [11, 13], техногенное воздействие остается значимым на длительных временных интервалах (более 40 лет), оказывая воздействие и на почву, и на все остальные компоненты экосистем. При этом отмечается, что экосистемы не возвращаются в исходное состояние даже в условиях естественного многолетнего восстановления и представляют собой неотехногенные экосистемы с изменениями не только температурного, но и водного режима почв [4]. Для северных территорий аномалии теплового режима являются в целом значимым фактором стабильности многолетнемерзлых пород [4, 10].

Заключение

Изменения температурного режима подстилающей поверхности в районах с интенсивным влиянием инфраструктуры нефтегазовых комплексов могут вести к серьезным экологическим последствиям. При активной разработке месторождений неизбежно возрастает степень техногенной трансформации растительных и почвенных покровов, играющих роль термоизолятора и регулятора тепловых потоков в почве. В этих условиях в летний период температура воздуха, корреляция которой с данными LST зафиксирована на уровне $R^2 = 0,35$ при $p < 0,05$, уже не определяет универсальный тепловой режим для всей поверхности. При различных типофакторах трансформации он будет в той или иной степени отличаться от фонового. На примере ТНМ показано, что участки, относимые к классу инфраструктурно трансформированных территорий, характеризуются превышением значений LST

на 3,2–5,5% относительно средних показателей для фона. В общем, зафиксированные трансформации в термическом режиме измененных территорий исследуемого района соответствуют результатам, полученным для некоторых других вариантов техногенного влияния на растительность и почву в арктической зоне Сибири.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-20007, <https://rscf.ru/project/23-14-20007/>, Красноярского краевого фонда науки. Материалы спутникового мониторинга получены в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН и обработаны в рамках проекта государственного задания № FWES-2024-0023 (ИЛ СО РАН).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Горный ВИ, Киселев АВ, Крицук СГ, Латыпов ИШ, Тронин АА. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021;18(6):155-64.
2. Горный ВИ, Крицук СГ, Латыпов ИШ, Манвелова АБ, Тронин АА. Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022;19(3):23-34.
3. Лупян ЕА, Лозин ДВ, Балашов ИВ, Барталев СА, Стыщенко ФВ. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022;(3):217-32.
4. Пономарева ТВ, Пономарев ЕИ, Литвинцев КЮ, Финников КА, Якимов НД. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования. Вычислительные технологии. 2022;(3):16-35.
5. Соколов ДА, Андрокханов ВА, Абакумов ЕВ. Почвообразование в техногенных ландшафтах: тренды, результаты и отражение в современных классификациях (обзор). Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021;(56):6-32.
6. Султсон СМ, Пономарев ЕИ, Швецов ЕГ, Третьяков ПД, Горошко АА, Кулакова НН, Михайлов ПВ. Применение дистанционного зондирования для прогноза нарушений темнохвойных лесов после вспышки численности сибирского шелкопряда. Биосфера. 2023;15(1):21-30.

7. Трофимова ИЕ. Районирование Западно-Сибирской равнины по термическому режиму почв. География и природные ресурсы. 2015;(3):27-38.

Общий список литературы/References

1. Gornyi VI, Kiselev AV, Kricuk SG, Latypov ISH, Tronin AA. [Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change]. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021;18(6):155-64. (In Russ.)
2. Gornyi VI, Kricsuk SG, Latipov ISH, Manvelova AB, Tronin AA. [Satellite mapping of urban air overheating risk (by the example of Helsinki, Finland)]. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2022;19(3):23-34. (In Russ.)
3. Lupian EA, Lozin DV, Balashov IV, Bartalev SA, Stytsenko FV. [Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data]. *Sovremennye Problemy Distantcionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2022;(3):217-32. (In Russ.)
4. Ponomareva TV, Litvintsev KY, Finnikov KA, Yakimov ND, Sentyabov AV, Ponomarev EI. Soil temperature in disturbed ecosystems of Central Siberia: remote sensing data and numerical simulation. *Forests*. 2021;12(8):994.
5. Sokolov DA, Androkhanov VA, Abakumov EV. Soil formation in technogenic landscapes: trends, results, and representation in the current classifications (review). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2021;(56):6-32.
6. Sultson SM, Ponomarev EI, Shvetsov EG, Tret'yakov PD, Goroshko AA, Kulakova NN, Mikhaylov PV. [Using remote sensing for forecasting damage to dark coniferous forests after Siberian silkmoth outbreak]. *Biosfera*. 2023;15(1):21-30. (In Russ.)

7. Trofimova IYe. Zoning of the West Siberian Plain according to the thermal regime of soils. *Geografiya i Prirodnye Resursy*. 2015;(3):27-38. (In Russ.)
8. Flood N. Continuity of reflectance data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape. *Remote Sens*. 2014;(6):7952-70.
9. Melillo JM, Terese R, Gary WY. Climate Change Impacts in the United States. The Third National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program. 2014:841.
10. Orgogozo L, Prokushkin AS, Pokrovsky OS, Grenier C, Quintard M, Viers J, Audry S. Water and energy transfer modeling in a permafrost dominated, forested catchment of Central Siberia: the key role of rooting depth. *Permafrost and Periglacial Process*. 2019;(30):75-89.
11. Ponomareva TV, Ponomarev EI, Litvincev KYU, Fennikov KA, Yakimov ND. Thermal state of disturbed soils in the permafrost zone of Siberia according the remote data and numerical simulation. *Forests*. 2022;(3):16-35.
12. Warrens J. Cohen's kappa is a weighted average. *Statist Methodol*. 2011;8(6):473-84.
13. Yakimov ND, Ponomarev EI, Ponomareva TV. Satellite data in thermal range for natural and technogenic ecosystems monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2021;(333):6 p. DOI:10.1051/e3s-conf/202133302017.

