

Изменение спектральных индексов в контексте природных и техногенных трансформаций ландшафтов

Н. Д. Якимов^{1,2}, Е. И. Пономарёв^{2,3}, Т. В. Пономарёва^{2,3}

¹ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: evg@ksc.krasn.ru

³ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия

Исследована вариативность спектральных индексов, рассчитанных по данным Landsat для участков с признаками природных и техногенных трансформаций растительного и почвенного покрова. Проведён анализ относительного отклонения от фоновых значений показателей Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Land Surface Temperature (LST), обусловленного изменением состояния подстилающей поверхности. Для территории Олимпиадинского горно-обогатительного комбината (Северо-Енисейский р-н, Красноярский край), которая характеризуется наличием признаков естественного (пожары) и техногенного (разработка месторождения) воздействия, выполнена классификация значимых типифакторов трансформации за период 2000–2023 гг. Степень трансформации растительного и почвенного покрова под воздействием как природных, так и техногенных факторов описана в терминах аномалий спектральных характеристик ΔNDVI и ΔLST , рассчитываемых как среднее для каждой ячейки регулярной сети на территорию исследования. Показано, что фиксируемые аномалии значений ΔNDVI и ΔLST и степень природной/техногенной трансформации растительного и почвенного покрова связаны линейно с достоверностью 0,31–0,81 для аномалий ΔLST и на уровне 0,28–0,85 для аномалий вегетационного индекса ΔNDVI . Установлено, что степень генерализации исходных данных, зависящая от линейного размера ячеек используемой регулярной сети, не оказывает критического значения на результат анализа состояния территории предложенным методом.

Ключевые слова: техногенные и природные факторы трансформации, растительность, почвенный покров, спектральные индексы, NDVI, LST

Одобрена к печати: 26.06.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-131-140

Введение

На современном этапе развития и промышленного освоения территории Сибири, особенно районов криолитозоны севера, повышается актуальность вопроса мониторинга масштабов техногенных и природных деструктивных преобразований растительности и почвенных покровов региона. Хорошо известны продукты формата Global Land Cover and Land Use Change (<https://glad.umd.edu/dataset/GLCLUC2020>), в которых динамически обобщаются ежегодные изменения состояния растительных покровов (Potapov et al., 2022). Отечественные сервисы данной направленности, такие как продукт «Vega-Pro» (<http://pro-vega.ru/maps/>) с векторными слоями растительности (Lourian et al., 2022) также настроены на оперативное картирование нарушений древостоев, в частности лесными пожарами (Барталев, Стыценко, 2021).

Масштабные трансформации растительного покрова Сибири вызваны широким спектром причин. Как правило, мониторинг таких последствий выполняется с использованием серий съёмки со спутниковых систем и последующим анализом спектральных признаков объектов исследования. Влияние на растительный покров природных факторов изучено в большей степени. Например, в большом числе публикаций представлены результаты по теме пожарного воздействия на растительность и древостои (Барталев, Стыценко, 2021; Забродин, Пономарёв, 2023; Лупян и др., 2022), а также по теме последствий, наблюдаемых в древостоях после масштабных вспышек численности фитофагов (Жиринов и др., 2016; Пономарёв и др., 2023).

Однако в современных условиях территория Сибири и особенно арктическая часть региона испытывает растущий прессинг техногенного воздействия как следствие интенсификации лесного сектора экономики, горнодобывающего комплекса, инфраструктурных преобразований территорий и других факторов. Посттехногенные проявления не так масштабны по сравнению с последствиями природных факторов, но характеризуются более глубокими и долговременными трансформациями многих компонентов экосистем, нередко имеют ландшафтообразующее значение, формируя неотехногенные ландшафты (Пономарева и др., 2020). Такие трансформации определяют значительные изменения спектральных отражательных свойств подстилающей поверхности (Калабин и др., 2013; Соромотин, Бродт, 2018), становятся причиной изменения спектрального альбедо, провоцируют аномалии температурного режима подстилающей поверхности и верхних горизонтов почвы. Накопительный эффект от таких трансформаций может быть критичным для существующих экосистем.

Ранее уже выполнялись оценки динамики долговременных проявлений аномалий спектральных признаков, а также аномалий температурного режима подстилающей поверхности при различных вариантах трансформации территорий (Горный и др., 2021; Ponomareva et al., 2021; Yakimov et al., 2021). По нашему мнению, такой подход перспективен при изучении комплексного природного и техногенного влияния на состояние и динамику экосистем, когда возникает задача количественной оценки интегрального эффекта от совокупности факторов, определяющих степень трансформации отдельных участков и целых экосистем.

В данной работе проверялась гипотеза о значимой зависимости между соотношением площадей различных факторов трансформации подстилающей поверхности и уровнем аномалий вегетационных спектральных признаков и температурных аномалий, которые далее могут быть определены как интегральные характеристики для локальных территорий. Рассмотрены следующие аспекты: 1) классификация значимых типифакторов трансформации и соотношение выделяемых классов; 2) детализация относительной аномалии вегетационного индекса и теплового фона в масштабе ячеек регулярной сети на территорию исследования; 3) оценка связи аномалий теплового фона и вегетационного индекса с долей участков с признаками трансформации растительного покрова.

Исходные данные и методы исследования

Исследование выполнено на примере территории Олимпиадинского горно-обогатительного комбината (ГОК) в Северо-Енисейском р-не Красноярского края. Территория исследования площадью 1563,8 км² расположена в ландшафтной провинции Енисейского края (59,8–60,1° с. ш., 92,6–93,3° в. д.). Здесь в условиях среднегорья преобладает темнохвойная тайга на железисто-метаморфических, подзолистых и дерново-слабоподзолистых почвах. Доминирует зеленомошная елово-пихтовая тайга (*Picea obovata*, *Abies sibirica*). На восточном склоне с высотой ниже 500 м появляются сосново-лиственничные леса (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*). На вершинах встречаются естественные обнажения и каменные россыпи (рис. 1, см. с. 133).

Интенсивное промышленное освоение территории началось с 1983 г. (Калабин и др., 2013) и продолжается в настоящее время (Пономарева и др., 2020). В границах территории присутствуют инфраструктурные объекты, карьеры с механическим повреждением напочвенного покрова и растительности, а также участки с иными вариантами техногенной трансформации подстилающей поверхности, которые предложено обозначить термином «типифакторы трансформации» естественных покровов (отвалы, отстойники, участки техногенного загрязнения и т.д.). Характеристика каждого типифактора была предварительно получена по результатам серии натуральных экспериментов, проведённых в 2020–2023 гг. (см. рис. 1). Кроме того, в границах территории исследования присутствуют участки, пройденные природным пожаром, датированным 2012 г.

Работа выполнена с использованием спутниковых снимков Landsat-8/OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) и Landsat-7/ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper) среднего пространственного разрешения (15–100 м) из каталога United States

Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>) за вторую декаду июня 2000 и 2023 гг. Использованы многозональные изображения в спектральных диапазонах для Landsat-8/OLI/TIRS: 2,11–2,29 мкм (канал № 7), 1,57–1,65 мкм (канал № 6), 0,85–0,88 мкм (канал № 5), 0,64–0,67 мкм (канал № 4), 0,53–0,59 мкм (канал № 3), 0,45–0,51 мкм (канал № 2); для Landsat-7/ETM+: 2,11–2,35 мкм (канал № 7), 1,55–1,75 мкм (канал № 5), 0,77–0,90 мкм (канал № 4), 0,63–0,69 мкм (канал № 3), 0,52–0,60 мкм (канал № 2), 0,45–0,52 мкм (канал № 1). Предварительное выборочное дешифрирование типофакторов техногенной и естественной трансформации растительных покровов выполнялось экспертно для окрестностей точек натурных исследований (см. рис. 1), для участков, непосредственно прилегающих к зоне активной разработки карьера, для территорий выхода скальных пород (каменные россыпи гольцовой зоны горы) и для участка, пройденного пожаром, с привлечением съёмки субметрового (~0,3 м) пространственного разрешения WorldView-4 (<https://services.arcgisonline.com/>). В общей площади рассмотренной территории доля таких участков составила ~27 % (~410,4 км²). Таким образом, предварительно было задано шесть классов состояния растительного покрова: участки с преобладанием темнохвойных древостоев; с преобладанием светлохвойных насаждений; смешанных постпирогенных лесов; с признаками техногенной трансформации; с признаками естественной трансформации (после пожаров) и участки с наличием естественной трансформации в местах обнажения скальных пород.

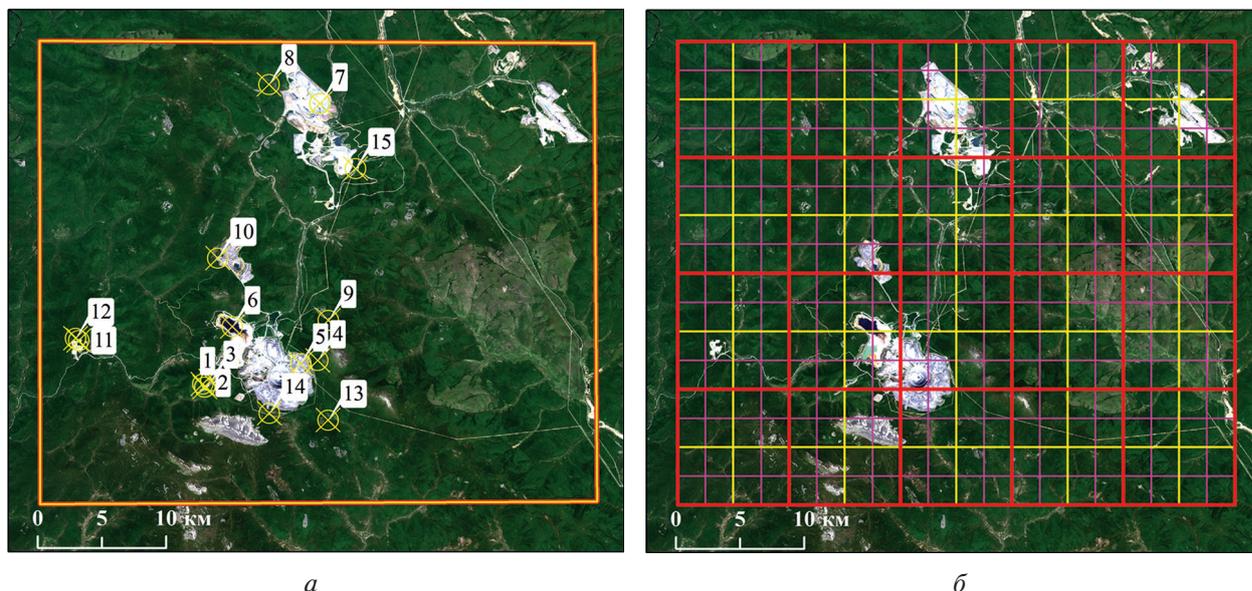


Рис. 1. Район исследования и локация точек проведения наземных обследований (а): 1 — гольцы; 2 — отвал карьера «Золотая Тырыда»; 3 — смешанный лес (фон); 4 — карьер, заполненный водой; 5, 13 — сосновый лес (фон); 6 — отвалы карьера «Восточный»; 7 — озеро — отстойник хвостохранилища; 8 — отвалы карьера «Благодатный»; 9 — темнохвойный фоновый лес; 10, 14, 15 — темнохвойный лес (фон); 11 — отвалы карьера «Титимухта»; 12 — отвалы карьера «Известковый». Варианты сетки 4×5 ячеек (размер ячейки 8,7×9,1 км), 8×10 ячеек (4,3×4,5 км), 16×20 ячеек (2,2×2,3 км) (б)

Предварительные результаты использовались в качестве обучающей выборки для классификации мультиспектральных композитных изображений, включающих данные во всех спектральных диапазонах рассматриваемых каналов Landsat, методом максимального правдоподобия (англ. Maximum Likelihood Classification, MLC). В алгоритме MLC (Hagner, Reese, 2007) для каждого класса на основе спектральных значений обучающей выборки строились функции плотности вероятности. В процессе классификации каждому пикселю присваивалась принадлежность к классу на основе относительной вероятности появления этого пикселя в функции плотности вероятности каждого класса.

Проверка точности классификации выполнялась на основе матрицы ошибок для случайного набора точек и коэффициента каппа Коэна (Warrens, 2011).

Результаты классификации использовались далее для оценки динамики состояния территории исследования и категоризации доминирующих типофакторов трансформации поверхности на временном интервале 2000–2023 гг.

Параллельно был выполнен попиксельный расчёт значений вегетационного индекса NDVI с использованием стандартных процедур калибровки данных в соответствующих каналах Landsat-8/OLI, а также Landsat-7/ETM+ (Carlson, Ripley, 1997). Диапазоны значений вегетационного индекса дополнительно использовались для контроля и уточнения результатов классификации.

Для анализа теплового состояния подстилающей поверхности использовали индекс Land Surface Temperature (LST), вычисляемый стандартными методами по калиброванным значениям в 10-м канале Landsat-8/TIRS (длина волны 10,6–11,2 мкм) и в 6-м канале Landsat-7/ETM+ (10,4–12,5 мкм) (Meng et al., 2019).

Количественную оценку степени трансформации территории с величиной аномалий ΔLST и $\Delta NDVI$ выполняли с генерализацией значений индексов в ячейках регулярной сети с тремя вариантами линейного размера элементарных ячеек (см. рис. 1). Ячейкам задавался линейный размер, соответствующий характерным размерам типофакторов трансформации поверхности, выявленным по результатам классификации изображения Landsat. Результаты были рассчитаны для сетки размером 4×5 ячеек (размер ячейки 8,7×9,1 км), 8×10 ячеек (4,3×4,5 км), 16×20 ячеек (2,2×2,3 км). Для всех пикселей каждой i -й ячейки рассчитывались средние значения показателей $NDVI_i$ и LST_i , а также вычислялась доля естественной/техногенной трансформации (от 0 до 100 %) как отношение участков разных типофакторов к общей площади ячейки. В качестве фоновых ячеек выбирались такие, в которых доля трансформации территории составляла менее 5 %. Уровень аномалии ΔLST и $\Delta NDVI$ (в %) оценивали по отношению к значениям, вычисленным для фоновых ячеек.

Результаты и обсуждение

На территории исследования выделены шесть классов состояния растительного покрова (рис. 2).

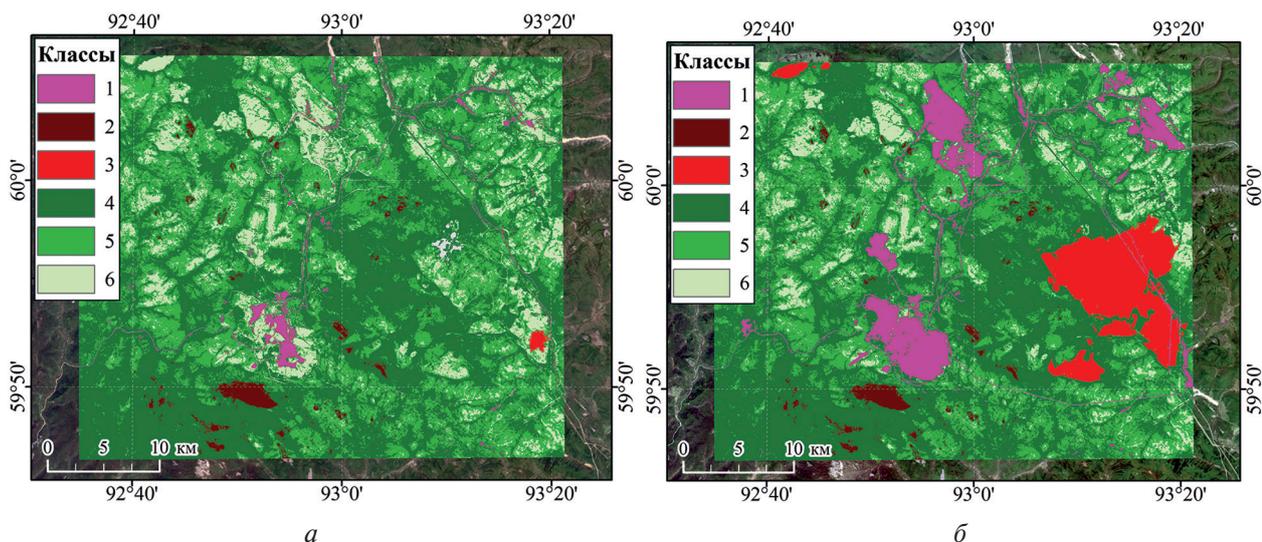


Рис. 2. Классификация исследуемой территории на основе снимков 1-го уровня обработки: а — Landsat-7/ETM+, 2000 г.; б — Landsat-8/OLI, 2023 г. 1 — ТТ, 2 — СП, 3 — ЕТ, 4 — ТД, 5 — СД, 6 — СПЛ (описание см. в тексте)

Три класса фоновой растительности соответствовали основным вариантам преобладающих древостоев: темнохвойные древостои (класс ТД), представленные елью сибирской (*Picea obovata*) и пихтой сибирской (*Abies sibirica*) с диапазоном $0,3 < NDVI < 0,51$; светлохвойные древостои (класс СД) с доминированием сосны и лиственницы (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*) и диапазоном $0,521 < NDVI < 0,59$; а также смешанные постпирогенные леса (класс СПЛ) с диапазоном $NDVI > 0,59$. Классы техногенной трансформации (ТТ) и естественных обнажений скальных пород (СП) характеризовались диапазоном $NDVI < 0,299$.

При выделении класса естественных трансформаций (класс ЕТ) на послепожарных участках дополнительно использовались признаки LST. Порогом показателя для таких участков был $LST > 20$ °С. Температурная аномалия на послепожарных участках, как показано ранее (Ponomareva et al., 2021), сохраняется длительное время, что позволяет использовать данный критерий для успешного разделения ненарушенных и пройденных пожаром древостоев. Соотношение площади (S) классов и спектральные характеристики рассматриваемых типифакторов обобщены в таблице.

Пороговые значения и диапазоны вариации значений для выделяемых классов по признакам NDVI и LST

Характеристика		Классы (типофакторы)					
		ТТ	СП	ЕТ	ТД	СД	СПЛ
Порог по NDVI		<0,299		–	0,3–0,52	0,521–0,59	>0,59
Порог по LST		–		>20	<20		
2000 г.	S, км ²	22,3	18,7	3,6	748,1	587,1	180,6
	Доля S, %	1,4	1,2	0,2	47,9	37,6	11,6
	NDVI	0,03±0,02	0,16±0,14	0,35±0,07	0,5±0,08	0,58±0,05	0,63±0,05
	LST, °C	24,3±2,1	26,2±2,3	25,6±2,0	22,3±1,7	22,0±1,3	21,8±1,3
2023 г.	S, км ²	103,0	18,6	98,8	713,7	513,5	115,2
	S, %	6,6	1,2	6,3	45,7	32,9	7,4
	NDVI	0,05±0,02	0,13±0,13	0,4±0,07	0,47±0,04	0,55±0,02	0,61±0,02
	LST, °C	18,9±2,0	19,5±2,2	20,7±2,0	17,0±1,4	16,5±0,9	16,4±0,8

Можно констатировать, что с 2000 по 2023 г. площадь участков класса ТТ выросла в четыре раза (>400 %) на 80,7 км². Площадь класса ЕТ увеличилась в 30 раз (>3000 %) на 95,2 км² в результате единственного, но крупного пожара 2012 г.

Проверка точности показала удовлетворительную (75,0–98,0 % для доверительной вероятности $\alpha = 0,03$) достоверность классификации типифакторов естественной и техногенной трансформации. Проверка выполнялась на основе 1200 точек, распределённых по выделяемым классам с учётом их доли в общем покрытии территории. При этом в данной работе взаимные ошибки первого и второго рода для классов доминирующих древостоев не влияли на решение основной задачи. Коэффициент каппа Коэна для результатов классификации составил $k = 0,74$.

Промежуточные результаты решения задачи оценки связи величины аномалии ΔLST и $\Delta NDVI$ и степени трансформации территории с генерализацией значений в масштабах ячеек регулярной сети представлены на рис. 3 (см. с. 136).

Результаты (см. рис. 3) позволили получить множества дискретных (для каждой *i*-й ячейки сети) значений рассматриваемых характеристик $NDVI_i$ и LST_i для территории исследований в зависимости от степени естественной и техногенной трансформации в границах каждой рассматриваемой ячейки. Отображая эти множества дискретных значений в формате корреляционного поля (рис. 4, см. с. 136), мы зафиксировали линейную связь между аномалиями ΔLST и $\Delta NDVI$ и уровнем природной/техногенной трансформации растительного и почвенного покрова рассматриваемой территории. Достоверность результатов (R^2) —

в диапазоне 0,31–0,81 для аномалий ΔLST и на уровне 0,28–0,85 для показателя $\Delta NDVI$ (см. рис. 4). Для показателя $NDVI$ с ростом степени трансформации подстилающей поверхности характерно линейное снижение значений по отношению к фону, для LST — тренд роста.

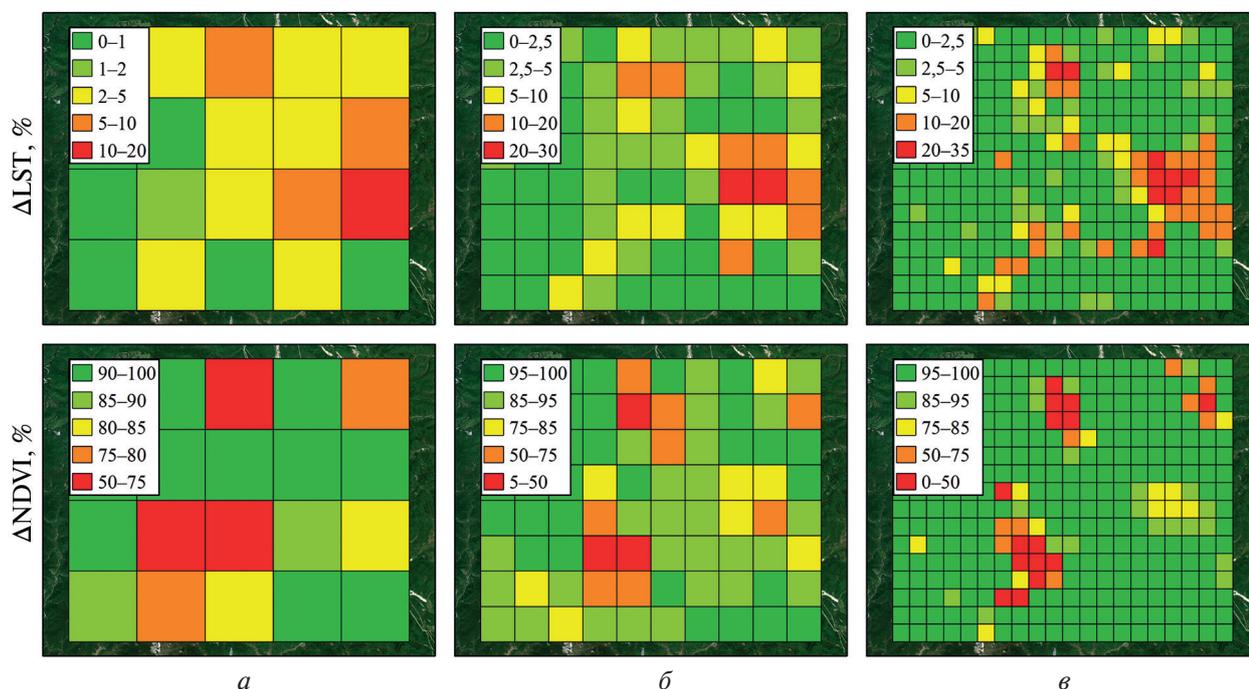


Рис. 3. Детализация относительной аномалии $\Delta NDVI$ и ΔLST (в %) исследуемых индексов в зависимости от степени трансформации растительного и почвенного покрова в ячейках регулярной сетки при размере ячеек: а — 8,7×9,1 км; б — 4,3×4,5 км; в — 2,2×2,3 км

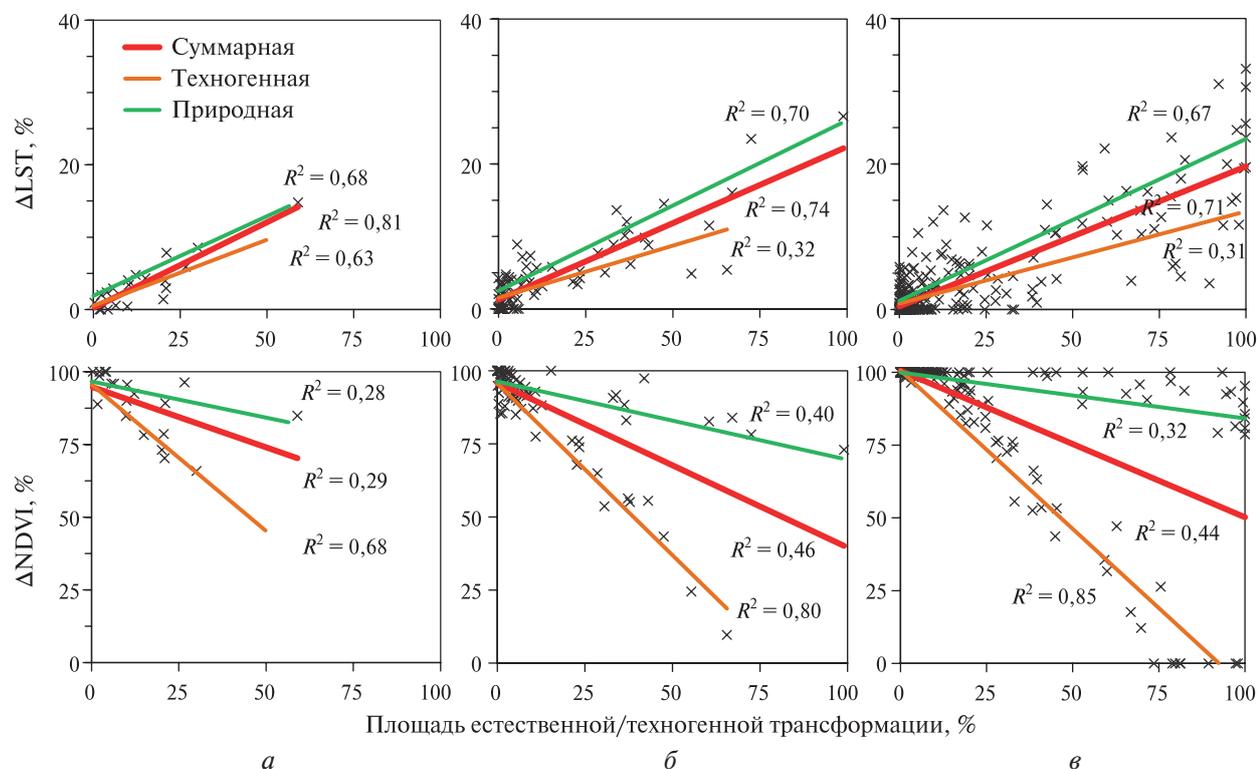


Рис. 4. Корреляционное поле для данных о степени трансформации территории и уровня аномалий значений $\Delta NDVI$ и ΔLST относительно фона. Результаты на основе сети с дискретностью: а — 4×5 ячеек; б — 8×10 ячеек; в — 16×20 ячеек

Можно констатировать, что в использованном подходе при построении рядов дискретных значений степень генерализации данных (в зависимости от размера ячеек сети) не оказывает критического значения на общий результат. Хотя достоверность линейной связи и варьирует (см. рис. 4), но вид трендов при этом сохраняется. Достоверность линейной связи варьирует в зависимости от размера ячеек сети, что обусловлено разбросом значений в ячейках, включающих различные варианты трансформации ландшафта. Следует отметить, что размер ячеек сетки целесообразно задавать с привязкой к характерным линейным и площадным размерам естественных и техногенных трансформаций на рассматриваемой территории. Такой подход снизит уровень неопределённости получаемых данных при размерах сетки много больших, чем характерные размеры трансформаций, а также исключит излишнюю детализацию при ячейках много меньшего размера в сравнении с характерными размерами трансформации. Это позволяет предполагать универсальность подхода и его применимость как для контроля степени трансформации по известным значениям аномалий спектральных признаков, так и для прогноза изменения вегетационных и тепловых характеристик участков при воздействии различных внешних факторов.

В данной работе, анализируя степень трансформации территории исследования, мы смогли учесть влияние только одного фактора естественного воздействия на растительный покров, это — природный пожар. Спектр естественных факторов, определяющих изменение спектральных свойств подстилающей поверхности, кроме пожаров, включает воздействие болезней леса и энтомофитов, вызывающих усыхание древостоев, отпад, ветровалы и т.д. Безусловно, последствия каждого из таких факторов имеют свои характерные проявления на материалах многоспектральной спутниковой съёмки (Барталев, Стыщенко, 2021; Лупян и др., 2022; Пономарёв и др., 2023) и их анализ также представляет самостоятельный интерес. Расширение исходных данных средним инфракрасным диапазоном (длина волны 2,11–2,29 мкм для Landsat-8 и 2,06–2,35 мкм для Landsat-7) и вычисление на их основе таких показателей как NBR/dNBR (*англ.* Differenced Normalized Burn Ratio) позволяет детализировать пожарное воздействие (Барталев, Стыщенко, 2021; Забродин, Пономарёв, 2023; Лупян и др., 2022) на уровне отдельных послепожарных полигонов. В то же время, как показано ранее (Якимов et al., 2021), информативность дешифровочных признаков нарушенности на основе данных NDVI ограничена сроком начальной сукцессии. По нашему мнению, это является причиной относительно низкого уровня связи аномалий ΔNDVI с площадью трансформации (см. рис. 4). В нашем случае послепожарный участок находится на 11-м году естественного восстановления. Следовательно, это объясняет низкую эффективность признаков NDVI для послепожарной территории и минимальные отклонения данного спектрального признака от фоновых значений. В то же время можно констатировать, что уровень аномалий ΔLST в этом случае остаётся значимо высоким (R^2 в диапазоне 0,67–0,70).

Заключение

Предложен подход оценки степени трансформации ландшафтов на основе обобщения спектральных характеристик в ячейках регулярной сетки. Степень трансформации растительного и почвенного покрова под воздействием природных и техногенных факторов описана в терминах относительных аномалий спектральных характеристик NDVI_i и LST_i , рассчитываемых как средние для каждой i -й ячейки сетки. Показано, что степень генерализации исходных данных, зависящая от линейного размера ячеек используемой регулярной сетки, не оказывает критического значения на результат.

Зафиксирована линейная связь между аномалиями показателей ΔLST и ΔNDVI и степенью природной/техногенной трансформации растительного и почвенного покрова рассматриваемой территории, которая характеризуется достоверностью (R^2) 0,31–0,81 для показателя ΔLST и на уровне 0,28–0,85 для показателя ΔNDVI .

При условии валидации и калибровки подхода на большем количестве тестовых территорий такие оценки спутниковыми средствами могут выполняться на районы интересов, для

которых экспертные знания о типифакторах, степени нарушенности и состоянии растительных покровов недоступны из внешних источников данных.

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 Красноярского научного центра (КНЦ) СО РАН в рамках государственного задания № FWES-2024-0023 (Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН) и FWES-2024-0027 (ФИЦ КНЦ СО РАН).

Литература

1. *Барталев С. А., Стыценко Ф. В.* Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // *Лесоведение*. 2021. № 2. С. 115–122. DOI: 10.31857/80024114821020029.
2. *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.
3. *Жиринов В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П.* Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения Сибирским шелкопрядом // *Лесоведение*. 2016. № 1. С. 3–14.
4. *Забродин А. Н., Пономарёв Е. И.* Оценка связи между степенью пожарного воздействия на растительность и мощностью теплоизлучения от пожара // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 166–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.
5. *Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В.* Спутниковый мониторинг природной среды при открытой разработке Олимпиадинского золоторудного месторождения // *Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013. № 1. С. 177–184.
6. *Лузян Е. А., Лозин Д. В., Балашов И. В. и др.* Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 217–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. *Пономарёв Е. И., Якимов Н. Д., Третьяков П. Д., Султсон С. М.* Оценка дефолиации темнохвойных древостоев после воздействия сибирского шелкопряда по дистанционным данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 4. С. 175–186. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-175-186.
8. *Пономарева Т. В., Ковалева Н. М., Пономарев Е. И., Малькевич В. В.* Оценка биоразнообразия на территории Олимпиадинского ГОКа «Полюс Красноярск» // *Горный журн.* 2020. № 10. С. 18–53. DOI: 10.17580/gzh.2020.10.02.
9. *Соромотин А. В., Бродт Л. В.* Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки Landsat // *Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование*. 2018. Т. 4. № 1. С. 37–49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49.
10. *Carlson T. N., Ripley D. A.* On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote sensing of Environment*. 1997. No. 62(3). P. 241–252. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
11. *Hagner O., Reese H.* A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 110. No. 4 P. 438–444. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.017.
12. *Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(1). Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
13. *Meng X., Cheng J., Zhao S. et al.* Estimating land surface temperature from Landsat-8 data using the NOAA JPSS enterprise algorithm // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 2. Article 155. DOI: 10.3390/rs11020155.
14. *Ponomareva T. V., Litvintsev K. Y., Finnikov K. A. et al.* Soil Temperature in disturbed ecosystems of Central Siberia: Remote sensing data and numerical simulation // *Forests*. 2021. V. 12. No. 8. Article 994. DOI: 10.3390/f12080994.
15. *Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al.* The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: First results // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. V. 3. No. 8. Article 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
16. *Warrens J.* Cohen's kappa is a weighted average // *Statistical Methodology*. 2011. V. 6. No. 1. P. 67–79. DOI: 10.1016/j.stamet.2011.06.002.
17. *Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V.* Satellite data in thermal range for natural and technogenic ecosystems monitoring // *E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2021)*. 2021. V. 333. Article 02017. DOI: 10.1051/e3sconf/202133302017.

Variation in spectral indices in the context of natural and technogenic transformations of landscapes

N. D. Yakimov^{1,2}, E. I. Ponomarev^{2,3}, T. V. Ponomareva^{2,3}

¹ Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia

E-mail: evg@ksc.krasn.ru

³ Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia

We investigated the variability of spectral indices calculated from Landsat data for areas with signs of natural and technogenic transformations of vegetation and ground cover. An analysis of relative deviation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Temperature (LST) indicators from the background values due to changes in the condition of the underlying surface covers was carried out. A classification of significant type-factors of transformation was produced for the territory of the Olimpiadinsky mining and processing plant (North Yenisei Region, Krasnoyarsk Krai), which is characterized by the signs of natural (wildfires) and man-made (mining) impacts for the period of 2000–2023. The degree of transformation of vegetation and ground cover under the influence of both natural and technogenic factors was described in terms of relative anomalies of the spectral indices Δ LST and Δ NDVI, calculated as the average for each cell of a regular network in the study area. A linear relationship was recorded between the anomalies of the Δ LST and Δ NDVI and the degree of natural/technogenic transformation of the vegetation and ground cover with a reliability of 0.31–0.81 for the thermal anomalies Δ LST and at the level of 0.28–0.85 for the vegetation anomalies Δ NDVI. It has been established that the degree of generalization of the initial data, depending on the size of the regular network cells used, does not affect critically the result of analyzing the state of the territory using the proposed method.

Keywords: factors of technogenic and natural transformation, vegetation, ground cover, spectral indices, NDVI, LST

Accepted: 26.06.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-131-140

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Assessment of forest-stand destruction by fires based on remote-sensing data on the seasonal distribution of burned areas, *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, Vol. 14, pp. 711–716, DOI: 10.1134/S1995425521070027.
2. 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, Vol. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
3. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Edlina S. P., Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth injury, *Lesovedenie*, 2016, No. 1, pp. 3–14 (in Russian).
4. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Dependence assessment between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 166–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-166-175.
5. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gornyy V. I. et al., Satellite monitoring of natural environment at Olimpiada gold open-cut mine, *J. Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 160–166, DOI: 10.1134/S106273914901019X.
6. Loupian E. A., Lozin D. V., Balashov I. V. et al., Study of the dependence of forest fire damage degree on burning intensity based on satellite monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 217–232 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232.
7. Ponomarev E. I., Yakimov N. D., Tretyakov P. D., Sultson S. M., Estimation of defoliation features in dark coniferous tree stands after the impact of Siberian silk moth according to remote data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 4, pp. 175–186 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-175-186.
8. Ponomareva T. V., Kovaleva N. M., Ponomarev E. I., Malkevich V. V., Biodiversity assessment in the area of Olimpiada mining and processing plant, Polyus Krasnoyarsk, *Gornyy zhurn.*, 2020, No. 10, pp. 18–53 (in Russian), DOI: 10.17580/gzh.2020.10.02.

9. Soromotin A. V., Brodt L. V., Monitoring of vegetation cover during the development of oil and gas fields according to the Landsat multispectral survey data, *Tyumen State University Herald, Natural Resource Use and Ecology*, 2018, Vol. 4, No. 1, pp. 37–49 (in Russian), DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49.
10. Carlson T. N., Ripley D. A., On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote sensing of Environment*, 1997, No. 62(3), pp. 241–252, DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
11. Hagner O., Reese H., A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 110, No. 4, pp. 438–444, DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.017.
12. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A. et al., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(1), Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
13. Meng X., Cheng J., Zhao S. et al., Estimating land surface temperature from Landsat-8 data using the NOAA JPSS enterprise algorithm, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 2, Article 155, DOI: 10.3390/rs11020155.
14. Ponomareva T. V., Litvintsev K. Y., Fennikov K. A. et al., Soil temperature in disturbed ecosystems of Central Siberia: Remote sensing data and numerical simulation, *Forests*, 2021, Vol. 12, No. 8, Article 994, DOI: 10.3390/f12080994.
15. Potapov P., Hansen M. C., Pickens A. et al., The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: First results, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, Vol. 3, No. 8, Article 56903, DOI: 10.3389/frsen.2022.856903.
16. Warrens J., Cohen's kappa is a weighted average, *Statistical Methodology*, 2011, Vol. 6, No. 1, pp. 67–79, DOI: 10.1016/j.stamet.2011.06.002.
17. Yakimov N. D., Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Satellite data in thermal range for natural and technogenic ecosystems monitoring, *E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2021)*, 2021, Vol. 333, Article 02017, DOI: 10.1051/e3sconf/202133302017.