

Оценка экологического состояния и антропогенного воздействия в бассейне реки Терис на основе данных ДЗЗ (Жамбылская область)

Құдайберген Қырғызбай^{1,2*}, Бақтыбек Дүйсебек¹, Талгат Усманов¹, Иса Рахметов^{1,3}, Ерболат Муқанов^{1,4}

¹Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан; kyrgyzbay.kudaibergen@kbtu-edu.kz; b.duisebek@kbtu.kz; talgat.usmanov@kbtu-edu.kz; issa.rakhmetov@kbtu.kz; yerbulat.mukanov@kbtu-edu.kz

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; kyrgyzbay.K@kaznu.kz

³Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан; issaraqmet@gmail.com

⁴Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; mukanov_yen@enu.kz

*Корреспонденция: kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com

Аннотация: В статье представлена пространственно-временная оценка экологического состояния и уровня антропогенного воздействия в бассейне реки Терис (Жамбылская область) на основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли за 2015-2025 гг. Информационной основой исследования послужили спутниковые данные Landsat 8 и 9 (Collection 2 Level 2), обработанные в среде Google Earth Engine с применением процедур атмосферной коррекции, маскирования облачности и нормализации спектральных показателей. Для количественной характеристики ключевых компонентов геосистем рассчитаны индексы NDVI (растительность), WET (влажностная компонента преобразования Tasseled Cap), LST (температура земной поверхности) и NDBSI (сухость и степень антропогенной трансформации). Интеграция стандартизированных индикаторов выполнена методом главных компонент с последующим формированием интегрального индекса экологического состояния RSEI.

Полученные результаты свидетельствуют о выраженной пространственной дифференциации и высокой межгодовой вариабельности экологических условий. В структуре территории на протяжении всего периода исследования доминируют классы «ниже среднего» и «средний», совокупная доля которых в большинстве лет превышает 70 %. Наибольшая доля класса «средний» зафиксирована в 2016 г. (56,88 %), тогда как в 2025 г. отмечено существенное расширение класса «высокий» (34,29 %), отражающее локальное улучшение экологического состояния. Зоны с низкими значениями RSEI занимают ограниченные площади (до 1,34 %), однако пространственно приурочены к участкам интенсивного землепользования и деградированных земель. Результаты непараметрического анализа показали отсутствие статистически значимых долговременных трендов для большинства классов RSEI,

Цитирование: Қырғызбай, Қ., Дүйсебек, Д., Усманов, Т., Рахметов, И., Муқанов, Е (2026). Оценка экологического состояния и антропогенного воздействия в бассейне реки Терис на основе данных ДЗЗ (Жамбылская область). Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия Химия. География. 155(2), 133-155. <https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-133-155>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Поступила: 16.03.2026
Исправлена: 22.05.2026
Принята: 8.06.2026
Опубликована: 30.06.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности экологических условий. Наиболее благоприятные экологические условия характерны для горных и пойменных ландшафтов, тогда как центральные и сельскохозяйственно освоенные районы демонстрируют пониженные интегральные показатели. Результаты исследования подтверждают методическую состоятельность RSEI как интегрального инструмента мониторинга динамики экологического состояния и оценки антропогенной нагрузки в пределах бассейновых геосистем полусушливых регионов.

Ключевые слова: RSEI; дистанционное зондирование Земли; антропогенное воздействие; экологическое состояние; бассейн реки Терис.

1. Введение

Деятельность человека, связанная с развитием цивилизации, процессами индустриализации и реализацией планов агропромышленного комплекса оказывает прямое воздействие на здоровье и жизнедеятельность человека (Liu Shiliang et al., 2018; J. Wang et al., 2018; Yue et al., 2019). Антропогенно обусловленные изменения растительного покрова приводят к трансформации пространственного распределения местообитаний, а также оказывают влияние на уровень биоразнообразия, ход экологических процессов и температурный режим земной поверхности, что в совокупности изменяет экологические условия и экосистемные функции (H. Wang et al., 2020; L. Wang et al., 2020). В результате данных процессов сформировался широкий спектр экологических проблем, включая опустынивание территорий, развитие почвенной эрозии, загрязнение окружающей среды и деградацию биоразнообразия. Указанные явления способствуют росту уязвимости окружающей среды, что имеет принципиальное значение для устойчивости условий жизнедеятельности человека (Wolters et al., 2016).

Оценка экологического качества окружающей среды (Ecological Environment Quality) имеет решающее значение для целей устойчивого развития (Hasan et al., 2025; Ning et al., 2020). Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года подчёркивает необходимость защищать, восстанавливать и устойчиво использовать наземные экосистемы, рационально управлять природными ресурсами и предотвращать деградацию земель и утрату биоразнообразия. Несмотря на частичный прогресс, Sustainable Development Goals Report 2024 отмечает, что деградация земель, потеря биоразнообразия и ухудшение качества экосистем остаются глобальными вызовами, требующими надежных методов мониторинга и оценки. Современные экологические инициативы также подчёркивают роль пространственных данных и дистанционного зондирования Земли как критического инструмента для количественной оценки состояния экосистем и динамики антропогенного воздействия (United Nations, 2024).

Современное развитие спутниковых систем наблюдения Земли предоставляет эффективные инструменты для мониторинга и управления экосистемами, обеспечивая получение надёжных индикаторов их состояния на локальном, региональном и глобальном уровнях (Willis, 2015). Анализ отражённого от земной поверхности электромагнитного излучения позволяет оценивать экологическую обстановку с использованием данных дистанционного зондирования, охватывая различные компоненты экосистем, включая почвенный покров, растительность и открытые водные объекты (De Araujo Barbosa et al., 2015; Kwok, 2018; Reza & Abdullah, 2011). В связи с этим технологии дистанционного зондирования получили широкое распространение в исследованиях экосистем и практике экологического управления (Kennedy et al., 2014; Xu et al., 2018). Результаты многочисленных работ подтверждают высокую эффективность методов дистанционного зондирования, основанных на применении различных индексов, таких как NDVI, LST, BI и NDBI (Hasan et al., 2025).

Широкоиспользуемый (Liu et al., 2025; Ning et al., 2020; Xu, 2013) дистанционно-зондируемый экологический индекс (Remote Sensing Ecological Index) RSEI предназначен для мониторинга и оценки регионального экологического состояния, а также объединяет нормализованный вегетационный индекс (NDVI), показатель влажности (WET), температуру земной поверхности (LST) и нормализованный индекс застроенных и оголённых поверхностей (NDBSI) с применением метода главных компонент (PCA) для оценки экологического состояния исследуемого региона (Yue et al., 2019).

Использование данного индекса позволяет оперативно выявлять и анализировать изменения экологических условий во времени (Wu et al., 2022). Проведённые исследования показали, что экологическая обстановка формируется под влиянием четырёх ключевых факторов: озеленённости, теплового состояния, сухости и влажности поверхности. Применение индекса RSEI дало возможность по-новому интерпретировать экологические изменения и выявить уязвимые зоны в ряде регионов (Yue et al., 2019). Поиск публикаций в базах Scopus, Web of Science и Google Scholar показывает, что применение индекса RSEI для оценки экологического состояния территорий Казахстана представлено ограниченным числом исследований, тогда как для бассейна реки Терис подобные работы практически отсутствуют. Целью данного исследования является оценка пространственно-временных изменений экологического состояния и антропогенной нагрузки в бассейне реки Терис на основе индекса RSEI.

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

Объектом исследования является бассейн реки Терис (рис. 1), расположенный в пределах Жуалынского района Жамбылской области и относящийся к бассейну реки Асы. Площадь бассейна реки Терис составляет 200 464,4 га (2 004,64 км²). Бассейн реки Терис расположен на юге Республики Казахстан, в пределах Жамбылской области, вблизи административной границы с Туркестанской областью, а также в непосредственной близости к государственным границам с Кыргызской Республикой и Республикой Узбекистан (рис. 1а). Географическое положение бассейна обуславливает его транзитный характер и важную роль в региональной водохозяйственной системе.

Река Терис берёт начало на юго-восточных склонах хребта Каратау и, сливаясь с рекой Куркереусу, формирует реку Асы. Длина реки составляет около 51 км, площадь водосборного бассейна – около 485 км². Питание реки преимущественно снегово-дождевое с участием подземных вод, а режим стока характеризуется выраженной сезонной неравномерностью. Основной объём стока формируется в весенне-летний период за счёт снеготаяния и атмосферных осадков в горных районах. Река активно используется для орошения сельскохозяйственных земель, а её гидрологический режим оказывает существенное влияние на пространственную дифференциацию растительного покрова и экологического состояния территории (Wikipedia contributors 2024a; 2024b)

Для визуализации территории исследования на рис. 1б использовалось спутниковое изображение Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, полученное из программы Copernicus Европейского космического агентства (ESA, 2024). На рисунке отчётливо выделяются сельскохозяйственные угодья, элементы транспортной инфраструктуры, а также участки естественной растительности и водные объекты. Разнородность земного покрова отражает интенсивное хозяйственное освоение равнинных и предгорных частей бассейна, тогда как в горных районах преобладают природные ландшафты с меньшей степенью антропогенного воздействия.

Цифровая модель рельефа бассейна реки Терис (рис. 1в) отражает выраженную высотную дифференциацию территории, обусловленную сочетанием горных, предгорных и равнинных форм рельефа. Абсолютные отметки высот в пределах бассейна варьируются от 866-1500 м над уровнем моря в северной и центральной частях и до 3000-3960 м в южной

горной зоне. Наибольшие высоты приурочены к южной части бассейна, где развиты расчленённые горные массивы с крутыми склонами и значительными перепадами высот (Farr et al., 2007).

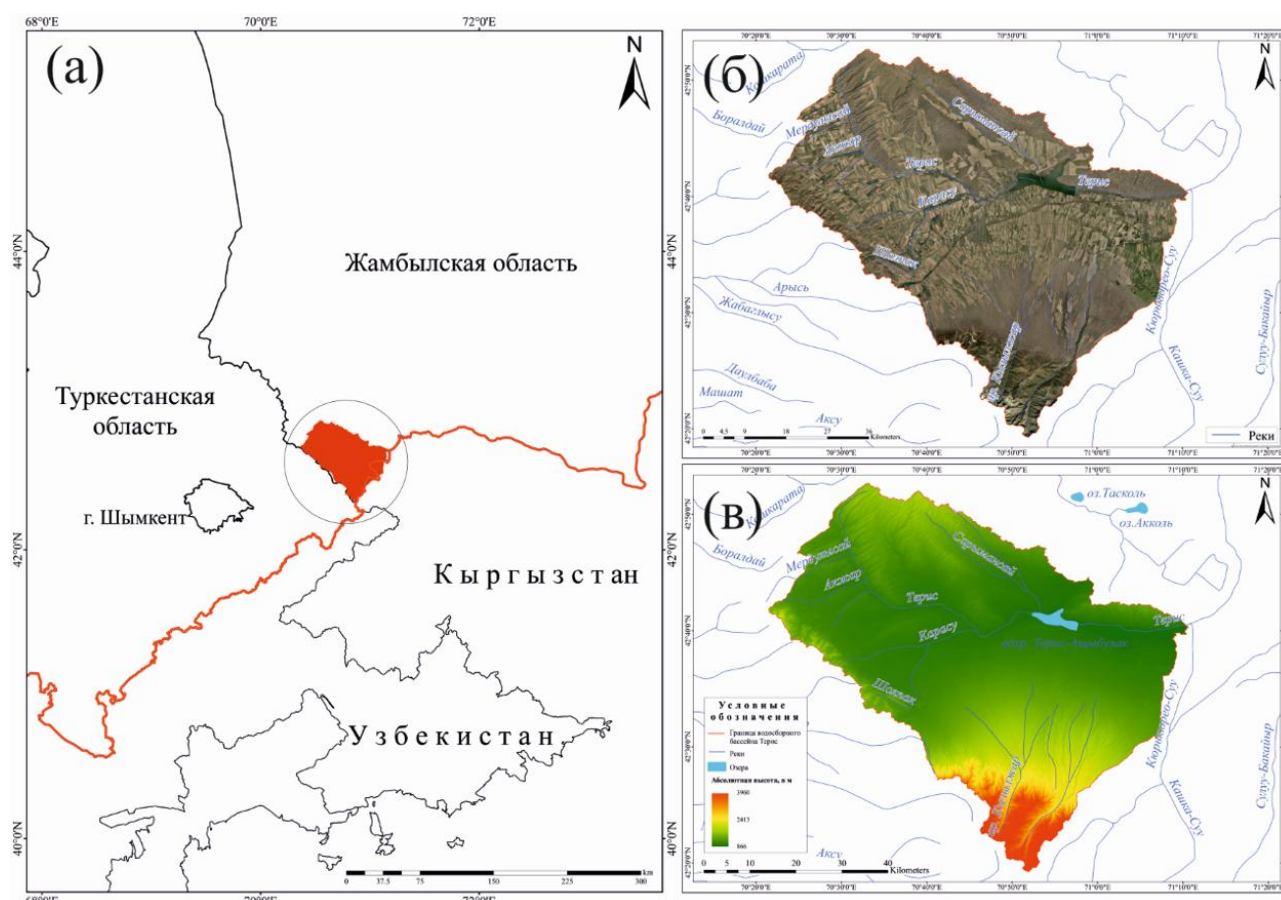


Рисунок 1. Географическое расположение (а), космический снимок (б) и цифровая модель рельефа (в) бассейна реки Терис

Основная площадь бассейна представлена территориями со средними высотами в диапазоне 1500-2500 м, что соответствует предгорным и низкогорным ландшафтам. Эти участки характеризуются более сглаженным рельефом и относительно благоприятными условиями для формирования растительного покрова и хозяйственного освоения. Северная и центральная части бассейна, где абсолютные высоты преимущественно не превышают 1200-1600 м, отличаются слабой расчленённостью поверхности и приурочены к равнинным и слабоволнистым формам рельефа (Mueller et al., 2014; K. Saparov et al., 2023).

2.2. Набор и технологии обработки данных дистанционного зондирования

Пространственные границы бассейна были заданы в виде векторного полигона и использованы в качестве области интереса (AOI) на всех этапах анализа. Полигональный слой водосборного бассейна реки Терис был сформирован на основе цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 30 м (Farr et al., 2007) с использованием гидрологических инструментов модуля Hydrology в среде ArcGIS. В процессе делинеации применялись процедуры заполнения локальных депрессий рельефа (Fill), определения направления стока (Flow Direction) и накопления стока (Flow Accumulation), что позволило выделить границы водосборной территории и русловую сеть бассейна (Esri, 2024). Выделение русловой сети выполнялось на основе порогового значения накопления стока, обеспечивающего корректное отображение основной гидрографической структуры бассейна и согласованность с топографическими картами.

Для уточнения и верификации конфигурации водосбора использовались топографическая карта масштаба 1: 200 000 (К-42-12, К-42-11, К-42-17, К-42-18) и спутниковые изображения высокого разрешения (ESA, 2024). Сопоставление гидрографической сети и особенностей рельефа позволило уточнить положение границ бассейна и минимизировать возможные геометрические несоответствия (рис. 2).

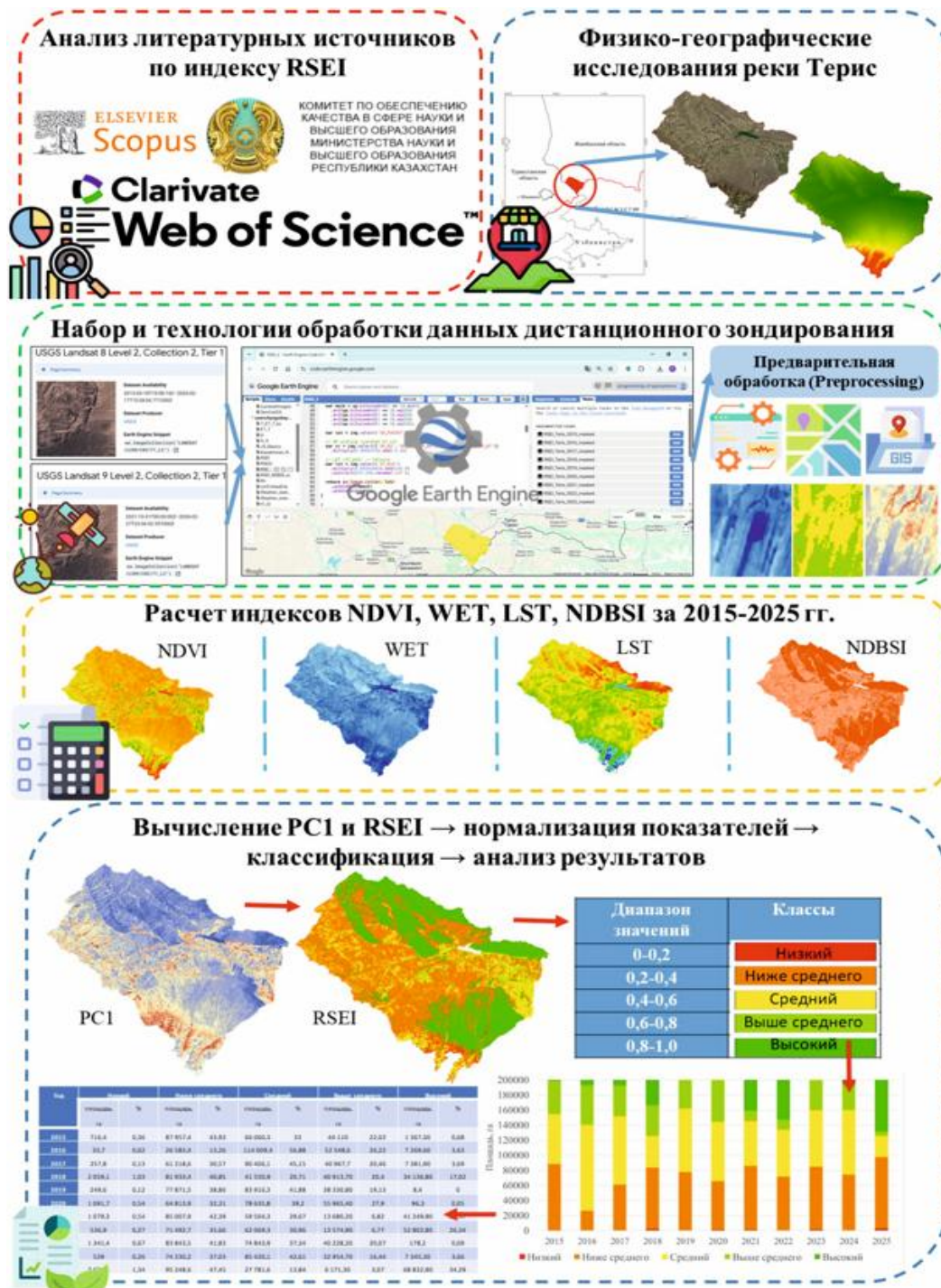


Рисунок 2. Алгоритм расчёта и анализа индекса RSEI на основе данных дистанционного зондирования Земли (2015–2025 гг.)

В работе использованы данные спутников Landsat 8 (OLI/TIRS) и Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2) коллекции Collection 2 Level-2 (Surface Reflectance и Surface Temperature), предоставляемые платформой Google Earth Engine (GEE - <https://code.earthengine.google.com>) (USGS, 2024b).

Анализ охватывает период с 2015 по 2025 гг., при этом для каждого года рассматривался вегетационный сезон с мая по сентябрь, что позволяет минимизировать влияние сезонных факторов и обеспечить сопоставимость межгодовых результатов.

Для снижения влияния атмосферных искажений и шумов применялась маска облаков, облачных теней и снежного покрова на основе битовой информации слоя QA_PIXEL, а также маска насыщенных пикселей QA_RADSAT. Дополнительно выполнялась фильтрация сцен по показателю общей облачности (CLOUD_COVER < 80). Процедура обработки осуществлялась в соответствии со стандартными этапами предварительной обработки, рекомендованными Геологической службой США (USGS) для продуктов Landsat Collection 2 Level-2 (USGS, 2024a). Отражательная способность поверхностных каналов была приведена к физическим значениям с использованием официальных коэффициентов масштабирования Landsat Collection 2. Температура земной поверхности (LST) рассчитывалась по тепловому каналу ST_B10 с переводом значений из кельвинов в градусы Цельсия. Для каждого года формировалось медианное композитное изображение (median composite), что позволило уменьшить влияние остаточной облачности, атмосферных шумов и аномальных спектральных значений отдельных сцен. Использование медианного композита обеспечивает получение статистически устойчивого представления спектральных характеристик земной поверхности и широко применяется при обработке многовременных спутниковых данных в среде Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

2.3. Расчет индекса RSEI

Анализ пространственно-временных изменений экологических условий и антропогенного воздействия оценивались с использованием карт экологического индекса RSEI, являющегося функцией четырех показателей: озеленённости, влажности, сухости и теплового состояния, которые полностью могут быть получены на основе данных дистанционного зондирования (Hasan et al., 2025; Yue et al., 2019):

$$RSEI = f(NDVI, Wet, LST, NDBSI) \quad (1)$$

На основе ежегодных композитных изображений были рассчитаны четыре ключевых показателя, лежащие в основе Remote Sensing Ecological Index (RSEI):

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель состояния и плотности растительного покрова, вычисляемый по красному (Red) и ближнему инфракрасному (NIR) каналам:

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (2)$$

2. WET (Tasseled Cap Wetness) – индекс влажности, отражающий водообеспеченность поверхности и рассчитываемый на основе преобразования Tasseled Cap с использованием коэффициентов для сенсора Landsat 8 OLI (Baig et al., 2014):

$$Wet_{OLI} = 0.1511_{\rho_{blue}} + 0.1973_{\rho_{green}} + 0.3283_{\rho_{red}} + 0.3407_{\rho_{nir}} - 0.7117_{\rho_{swir1}} - 0.4559_{\rho_{swir2}} \quad (3)$$

3. LST (Land Surface Temperature) – температура земной поверхности, характеризующая тепловое состояние ландшафта. LST характеризует тепловое состояние и используется в качестве индикатора локальных климатических изменений в ответ на изменения окружающей среды в модели PSR (Pressure–State–Response). Температура земной поверхности (LST) рассчитывалась на основе канала Surface Temperature ST_B10 продукта Landsat 8/9 Collection 2 Level-2. Значения ST_B10 были преобразованы в физические значения температуры с

использованием официальных коэффициентов масштабирования USGS (USGS, 2024a; USGS, 2024b), после чего температура была переведена из Kelvin в градусы Цельсия:

$$LST = (ST_{B10} * 0.00341802 + 149.0) - 273.15 \quad (4)$$

где ST_{B10} – канал температуры поверхности продукта Landsat 8/9 Collection 2 Level-2; 0.00341802 и 149.0 – коэффициенты масштабирования USGS; 273.15 – коэффициент перевода температуры из Kelvin в градусы Цельсия.

4. Индекс NDBSI (Normalized Difference Built-up and Soil Index) использовался для характеристики сухости поверхности и степени антропогенной трансформации ландшафтов, включая застроенные и оголённые территории. Рост антропогенной нагрузки и расширение хозяйственно освоенных земель приводят к замещению естественного растительного покрова искусственными поверхностями и деградированными участками, что отражается в изменении спектральных характеристик земной поверхности.

В исследовании индекс NDBSI рассчитывался как среднее значение индекса оголённой почвы (BI) и индекса застроенных территорий (IBI):

$$NDBSI = (BI + IBI)/2 \quad (5)$$

Индекс оголённой поверхности (BI) определялся следующим образом (Rikimaru et al., 2002):

$$BI = \frac{(SWIR+RED)-(NIR + BLUE)}{(SWIR+RED)+(NIR + BLUE)} \quad (6)$$

где SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон; RED – красный диапазон; NIR – ближний инфракрасный диапазон; BLUE – синий диапазон спектра.

Индекс застроенных территорий (IBI) вычислялся по формуле (Xu, 2008):

$$IBI = \frac{NDBI - \frac{(NDVI + MNDWI)}{2}}{NDBI + \frac{(NDVI + MNDWI)}{2}} \quad (7)$$

где NDBI - индекс застроенных территорий; NDVI - нормализованный индекс растительности; MNDWI - модифицированный индекс водных объектов.

Для обеспечения сопоставимости показателей все индексы были нормализованы в диапазон от 0 до 1 с использованием минимальных и максимальных значений в пределах бассейна для каждого года. При этом направления индексов были приведены к единой интерпретации, где более высокие значения соответствуют лучшему экологическому состоянию: для LST и NDBSI использовалось инвертирование нормализованных значений. В результате был сформирован четырехканальный стек (NDVI, WET, LST, NDBSI), отражающий основные компоненты экологического состояния территории.

Интегральный индекс RSEI рассчитывался с использованием метода главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). На первом этапе было произведено вычисление ковариационной матрицы для нормализационного набора данных (стека), после чего определялись собственные значения и собственные векторы. Первая главная компонента (PC1), объясняющая наибольшую долю дисперсии исходных данных, была интерпретирована как интегральный показатель экологического состояния:

$$RSEI = 1 - PC[f(NDVI, Wet, LST, NDBSI)] \quad (8)$$

Для получения окончательного индекса RSEI значения PC1 были дополнительно нормализованы в диапазон от 0 до 1, где низкие значения соответствуют неблагоприятному экологическому состоянию и высокой антропогенной нагрузке, а высокие – более устойчивым и природно сохранным ландшафтам. Для каждого года были экспортированы растровые слои NDVI, WET, LST, NDBSI, PC1 и RSEI. Все данные сохранены с пространственным разрешением 30 м и использованы для последующего картографического, статистического и сравнительного анализа (Xu Hanqiu et al., 2017; Yue et al., 2019; Liu et al., 2025).

Таблица 1. Классы экологического состояния, выделенные по значениям индекса RSEI (Xu, 2013; Hasan et al., 2025)

Диапазон значений	Классы
0-0,2	Низкий
0,2-0,4	Ниже среднего
0,4-0,6	Средний
0,6-0,8	Выше среднего
0,8-1,0	Высокий

Для оценки статистической значимости межгодовой динамики площадей классов RSEI применялись непараметрический тест Манна–Кендалла (Mann, 1945; Kendall, 1975) и оценка наклона Сена (Sen, 1968). Данные методы широко используются при анализе временных рядов экологического состояния на основе данных дистанционного зондирования и позволяют выявлять наличие монотонных трендов без предположения о нормальности распределения данных.

Статистика Манна–Кендалла рассчитывалась следующим образом:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (9)$$

где x_j и x_k – значения временного ряда; n – число наблюдений; sgn – функция знака.
Для оценки интенсивности изменения показателей использовался наклон Сена:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \quad j > k \quad (10)$$

где Q_i – оценка наклона временного ряда; x_j , x_k – значения показателя в разные моменты времени. Положительные значения наклона Сена отражают тенденцию к увеличению показателя, отрицательные – к его снижению. Статистическая значимость выявленных трендов оценивалась по p -value двустороннего теста Манна–Кендалла при уровне значимости $p < 0.05$ (Yang et al., 2023; Aizizi et al., 2023; Liu et al., 2024).

3. Результаты

3.1. Пространственно-временная динамика вегетационного покрова по данным NDVI

Анализ пространственно-временной динамики вегетационного покрова бассейна реки Терис по данным индекса NDVI за 2015-2025 гг. (рис. 3) выявил выраженную территориальную дифференциацию и межгодовую изменчивость состояния растительности. NDVI, отражающий интенсивность фотосинтетической активности и плотность зелёной

биомассы, демонстрирует устойчивую зависимость от орографических условий, степени увлажнения и характера землепользования.

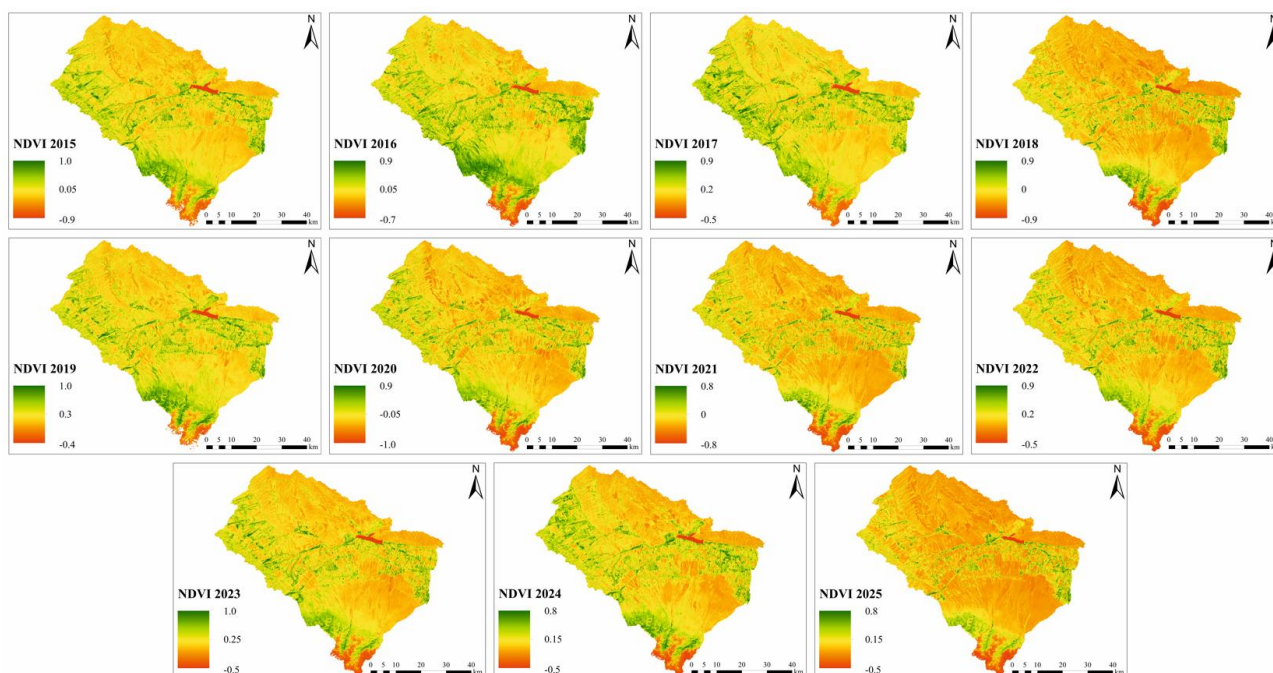


Рисунок 3. Пространственное распределение и межгодовая динамика вегетационного индекса растительности (NDVI) в бассейне реки Терис за 2015–2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения NDVI стабильно приурочены к северной и северо-западной частям бассейна, где распространены сельскохозяйственные угодья и участки с относительно благоприятным гидротермическим режимом. Центральная часть характеризуется мозаичным распределением индекса, что обусловлено сочетанием агроландшафтов, естественной степной растительности и различной интенсивности антропогенного освоения. Наиболее низкие значения NDVI фиксируются в южной части бассейна, представленной горными и предгорными территориями, где рельефная расчленённость, эрозионные процессы и локальный дефицит почвенного покрова ограничивают развитие устойчивой растительности.

Межгодовая динамика NDVI носит волнообразный характер. В период 2015–2017 гг. отмечалась относительная стабильность показателей с сохранением участков высокой биопродуктивности. В 2018 г. наблюдается снижение средних значений индекса, преимущественно в южных и центральных районах, что связано с климатическими колебаниями и засушливыми условиями. В 2019–2021 гг. фиксируется частичное восстановление растительного покрова, выраженное в увеличении площадей со средними и повышенными значениями NDVI. В 2022–2023 гг. усиливается пространственная неоднородность распределения индекса, что свидетельствует о возрастании контрастности между зонами интенсивного землепользования и зонами, менее подверженными хозяйственной деятельностью. В 2024–2025 гг. прослеживается тенденция к умеренному снижению интенсивности зелёных оттенков в ряде районов, что может указывать на усиление антропогенной нагрузки либо на влияние неблагоприятных климатических факторов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вегетационный покров бассейна реки Терис характеризуется высокой чувствительностью к природно-климатическим и антропогенным воздействиям. NDVI отражает как естественную орографическую зональность, так и трансформацию ландшафтов в результате хозяйственной деятельности, что подтверждает его значимость в структуре интегрального индекса RSEI и при оценке экологического состояния территории.

3.2. Пространственные особенности и динамика влажностного режима поверхности (WET)

Анализ пространственно-временной динамики индекса влажности поверхности (WET), рассчитанного на основе преобразования Tasseled Cap (рис. 4), позволил выявить особенности распределения влагообеспеченности территории бассейна реки Терис в 2015-2025 гг. Индекс WET отражает степень увлажнённости почвенно-растительного покрова и является одним из ключевых положительных компонентов интегрального индекса RSEI, поскольку характеризует состояние водного режима экосистем.

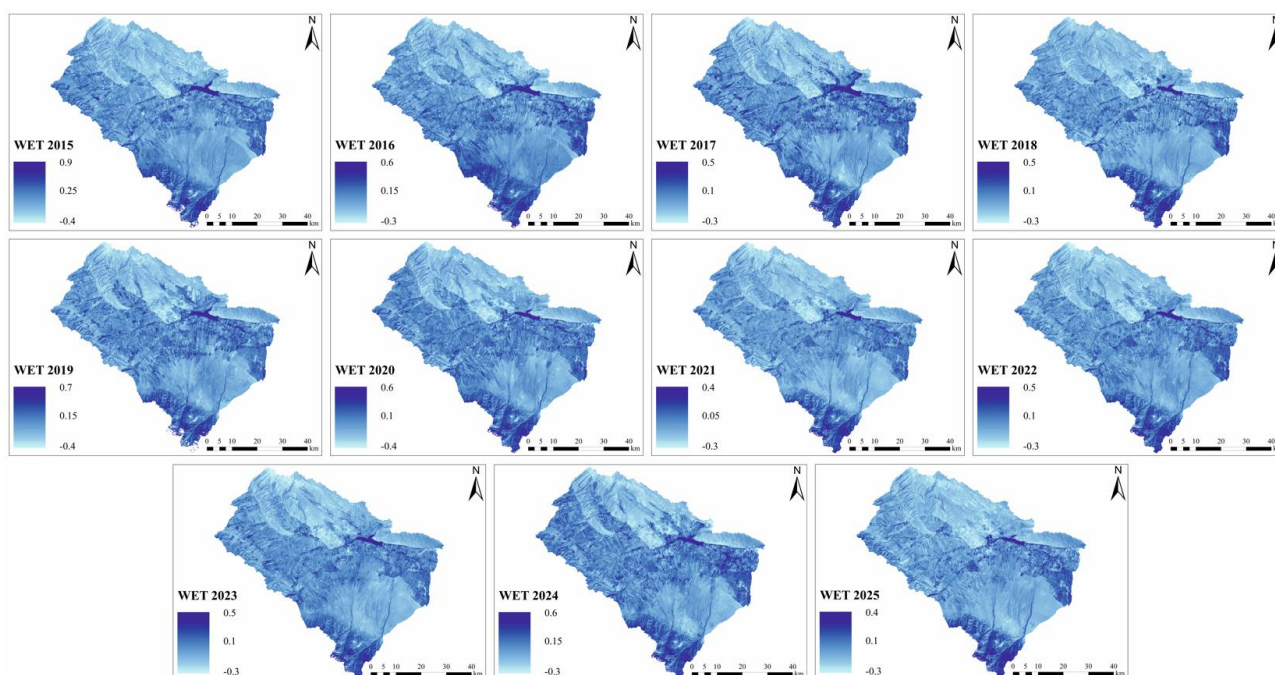


Рисунок 4. Пространственное распределение и межгодовая динамика индекса влажности поверхности (WET) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения WET стабильно приурочены к русловой сети, прибрежным зонам и участкам с развитым сельскохозяйственным землепользованием, где наблюдается повышенная влажность почв и интенсивное орошение. Особенно чётко выражены зоны повышенных значений в северо-восточной части бассейна вдоль водотоков и водохранилища, что свидетельствует о влиянии гидрографической структуры на формирование локальных центров увлажнения. Центральная часть бассейна характеризуется умеренными значениями индекса, отражающими смешанный тип землепользования и сезонную зависимость влагообеспеченности. Наиболее низкие значения WET фиксируются в южных и юго-западных районах, представленных горными и предгорными ландшафтами, где рельефная расчленённость, поверхностный сток и ограниченная мощность почвенного покрова способствуют снижению накопления влаги.

Межгодовая динамика индекса демонстрирует относительную стабильность пространственного рисунка при варьировании интенсивности значений. В 2015-2017 гг. отмечаются сравнительно высокие показатели увлажнённости, что проявляется в более выраженных тёмно-синих оттенках на картах. В 2018 г. наблюдается некоторое снижение средних значений индекса, что может быть связано с изменением климатических условий или уменьшением объёмов влагонакопления. В 2019-2020 гг. фиксируется частичное восстановление уровня влажности, особенно в долинных участках. В 2021 г. прослеживается снижение интенсивности показателей, тогда как в 2022-2024 гг. влажностный режим вновь стабилизируется с сохранением пространственной структуры распределения. В 2025 г.

отмечается умеренное снижение значений индекса в отдельных частях бассейна, что может свидетельствовать о повышении засушливости или усилении антропогенной нагрузки.

В целом индекс WET отражает устойчивую зависимость влагообеспеченности от гидрографической сети, рельефа и характера землепользования. Пространственная конфигурация индекса остаётся относительно стабильной во времени, однако интенсивность показателей чувствительна к межгодовым климатическим колебаниям и хозяйственной деятельности. В структуре RSEI компонент влажности играет компенсирующую роль по отношению к тепловому и сухостному факторам, повышая интегральную оценку экологического состояния территорий с благоприятным водным режимом.

3.3. Изменение теплового состояния земной поверхности по данным LST

Анализ пространственно-временной динамики температуры земной поверхности (LST) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг. (рис. 5) позволил выявить выраженную орографическую и антропогенную обусловленность теплового режима территории. Индекс LST отражает интенсивность нагрева подстилающей поверхности и является отрицательным компонентом в структуре интегрального индекса RSEI, поскольку значительное повышение температуры, как правило, связано с деградацией растительного покрова, снижением влажности и усилением антропогенной трансформации ландшафтов.

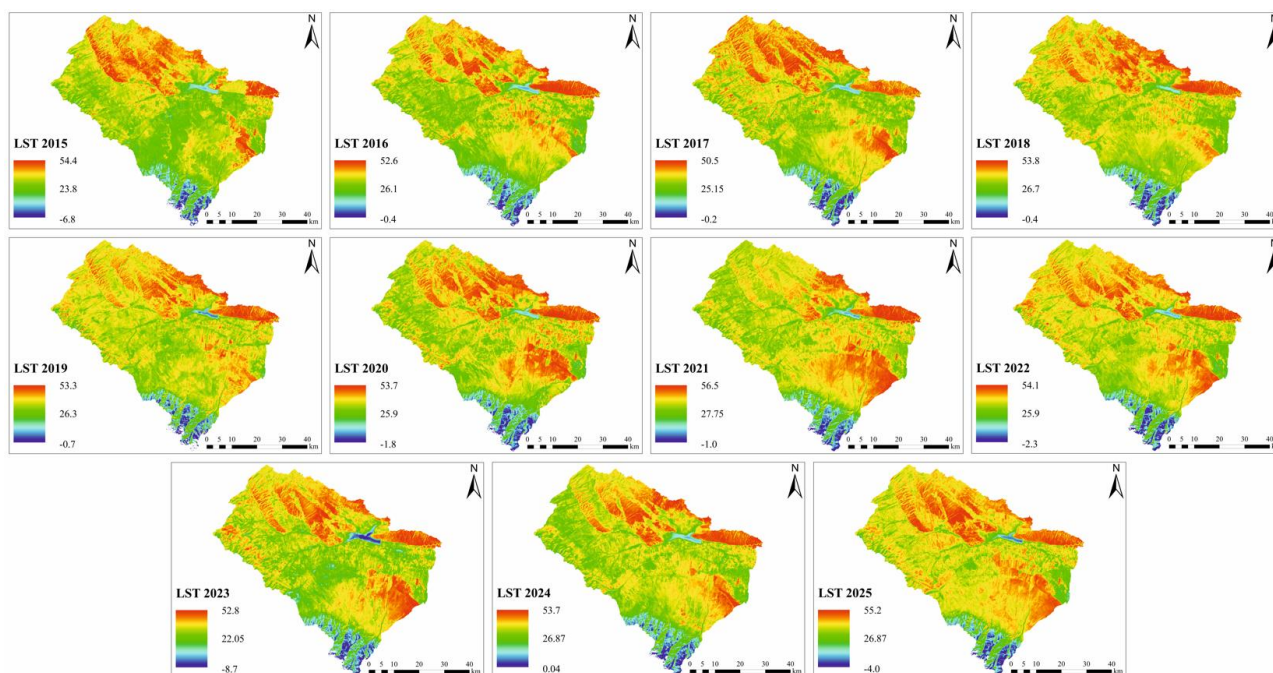


Рисунок 5. Пространственное распределение и межгодовая динамика температуры земной поверхности (LST) в бассейне реки Терис за 2015-2025 гг.

В пространственном отношении наиболее высокие значения LST устойчиво приурочены к северной и северо-восточной частям бассейна, а также к открытым участкам с разреженной растительностью и сельскохозяйственными угодьями. Эти зоны характеризуются повышенной инсоляцией и меньшей способностью поверхности к испарительному охлаждению. Центральная часть бассейна демонстрирует умеренные значения температуры, что связано с сочетанием растительного покрова и мозаичной структурой землепользования. Наиболее низкие значения LST стабильно фиксируются в южной горной части бассейна, где высотная зональность, большая мощность растительного покрова и повышенная влажность способствуют снижению температур поверхности.

Межгодовая динамика LST свидетельствует о колебательном характере теплового режима. В 2015-2017 гг. температурные показатели остаются относительно умеренными при

сохранении чёткой пространственной дифференциации. В 2018–2020 гг. наблюдается усиление температурных контрастов, особенно в северных и восточных районах, что может быть связано с засушливыми условиями и интенсификацией землепользования. В 2021 г. фиксируются одни из наиболее высоких значений температуры за анализируемый период, что свидетельствует о повышенной тепловой нагрузке на экосистемы. В 2022–2023 гг. отмечается некоторое снижение экстремальных значений, однако сохраняется устойчивая зона повышенного нагрева в сельскохозяйственных и открытых ландшафтах. В 2024–2025 гг. вновь прослеживается усиление тепловых аномалий в отдельных районах бассейна, что может указывать на продолжающееся влияние климатических факторов и антропогенного воздействия.

В целом пространственная конфигурация LST остаётся стабильной, однако интенсивность температурных показателей демонстрирует чувствительность к межгодовым климатическим вариациям и изменениям структуры землепользования. Повышенные значения LST коррелируют с пониженными показателями NDVI и WET, что подтверждает взаимосвязь теплового, влажностного и биопродуктивного состояния территории. В структуре RSEI компонент LST выполняет функцию индикатора теплового стресса и деградационных процессов, снижая интегральную оценку экологического состояния в зонах с повышенной температурой поверхности.

3.4. Пространственно-временные изменения сухости и антропогенной трансформации ландшафтов (NDBSI)

Анализ пространственно-временной динамики индекса NDBSI (Normalized Difference Built-up and Soil Index) в бассейне реки Терис за 2015–2025 гг. позволил выявить особенности распределения сухости поверхности и степени антропогенной трансформации ландшафтов. Индекс NDBSI интегрирует показатели застроенных территорий (NDBI) и оголённых почв (SI), отражая долю открытых, малопродуктивных и техногенно нарушенных поверхностей. В структуре RSEI данный показатель относится к негативным факторам и интерпретируется как индикатор экологического давления: увеличение его значений свидетельствует о росте сухости, деградационных процессов растительного покрова и усилении антропогенной нагрузки.

В пространственном отношении повышенные значения NDBSI устойчиво приурочены к северной и северо-восточной частям бассейна, а также к районам с развитым сельскохозяйственным использованием и фрагментированной структурой землепользования. Эти территории характеризуются преобладанием открытых почв, распаханых земель и разреженной растительности, что обуславливает более высокие значения индекса. Центральная часть бассейна демонстрирует умеренные значения, отражающие мозаичное сочетание сельскохозяйственных угодий и участков с сохранённым растительным покровом. Минимальные значения NDBSI фиксируются преимущественно в южной горной зоне, где плотный растительный покров и более высокая влажность способствуют снижению показателя сухости.

Межгодовая динамика индекса указывает на относительную устойчивость пространственной структуры сухости при вариациях интенсивности значений. В 2015–2018 гг. наблюдается равномерное распределение повышенных значений по большей части бассейна, что может быть связано с климатическими условиями засушливого типа и активным использованием земель. В 2019–2021 гг. прослеживаются локальные колебания индекса, особенно в центральных и восточных районах, отражающие изменение состояния почвенного покрова и сельскохозяйственной нагрузки. В 2022–2025 гг. сохраняется тенденция к повышенным значениям в северной части бассейна, тогда как горные территории остаются относительно стабильными и менее подверженными антропогенной трансформации.

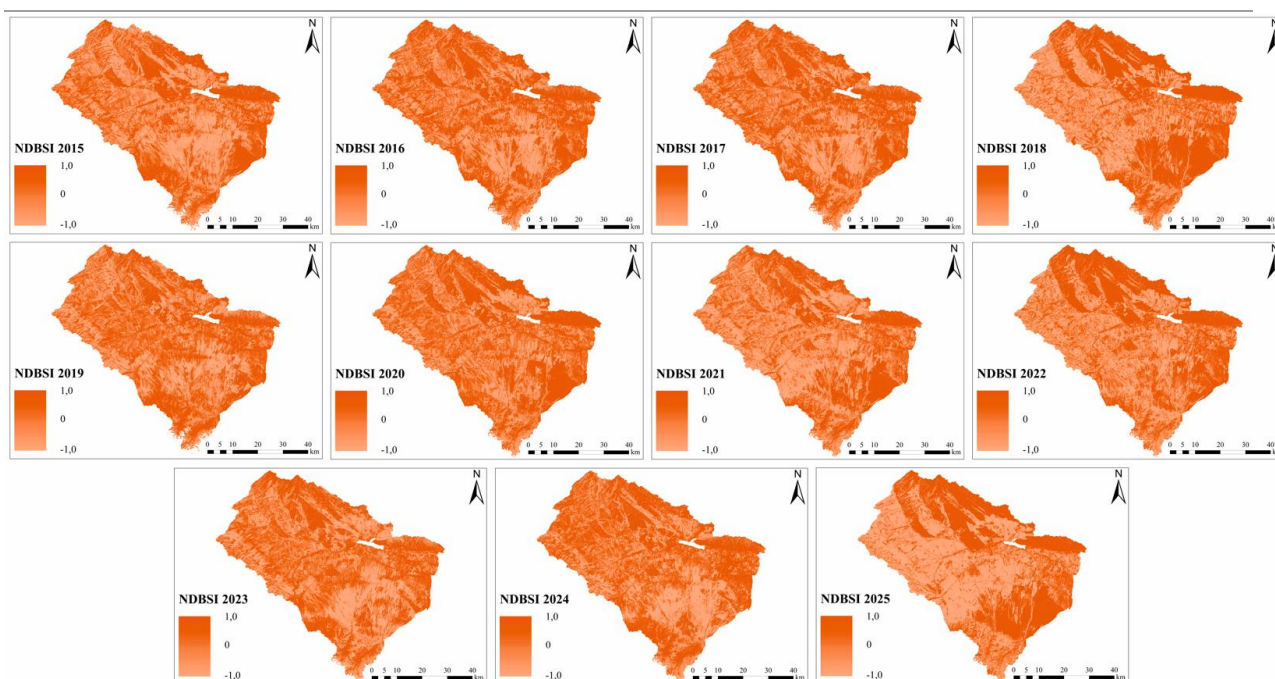


Рисунок 6. NDBSI (2015-2025)

Сопоставление NDBSI с другими компонентами RSEI показывает его обратную корреляцию с NDVI и WET: участки с высокой сухостью и оголёнными почвами характеризуются пониженной биопродуктивностью и меньшей влажностью поверхности. В совокупности это подтверждает, что NDBSI эффективно отражает процессы деградации земель, снижение растительного покрова и рост антропогенной нагрузки. Таким образом, индекс NDBSI является ключевым индикатором пространственно-временных изменений сухости и трансформации ландшафтов в пределах бассейна реки Терис и играет важную роль в формировании интегральной оценки экологического состояния по индексу RSEI.

3.5. Пространственно-временная динамика интегрального экологического состояния по индексу RSEI

Анализ пространственно-временной динамики первой главной компоненты (PC1), полученной методом главных компонент при интеграции NDVI, WET, LST и NDBSI, позволяет оценить совокупное влияние природных и антропогенных факторов на экологическое состояние бассейна реки Терис в 2015–2025 гг (рис. 7). Первая главная компонента аккумулирует наибольшую долю дисперсии исходных нормализованных показателей и отражает интегральный экологический градиент: более высокие значения соответствуют лучшему состоянию среды (высокая биопродуктивность и влажность при низкой температуре и сухости), тогда как пониженные значения характеризуют участки с повышенной антропогенной нагрузкой и деградацией ландшафтов.

В пространственном отношении положительные значения PC1 преимущественно приурочены к южной горной части бассейна и отдельным участкам северо-западной территории, где сохраняется более высокий уровень растительного покрова и благоприятный гидротермический режим. Отрицательные значения концентрируются в центральных и северо-восточных районах, характеризующихся более выраженной сельскохозяйственной освоенностью, фрагментацией ландшафтов и повышенными показателями сухости и температуры поверхности. Таким образом, PC1 чётко отражает морфоструктурную дифференциацию территории и различия в интенсивности антропогенного воздействия.

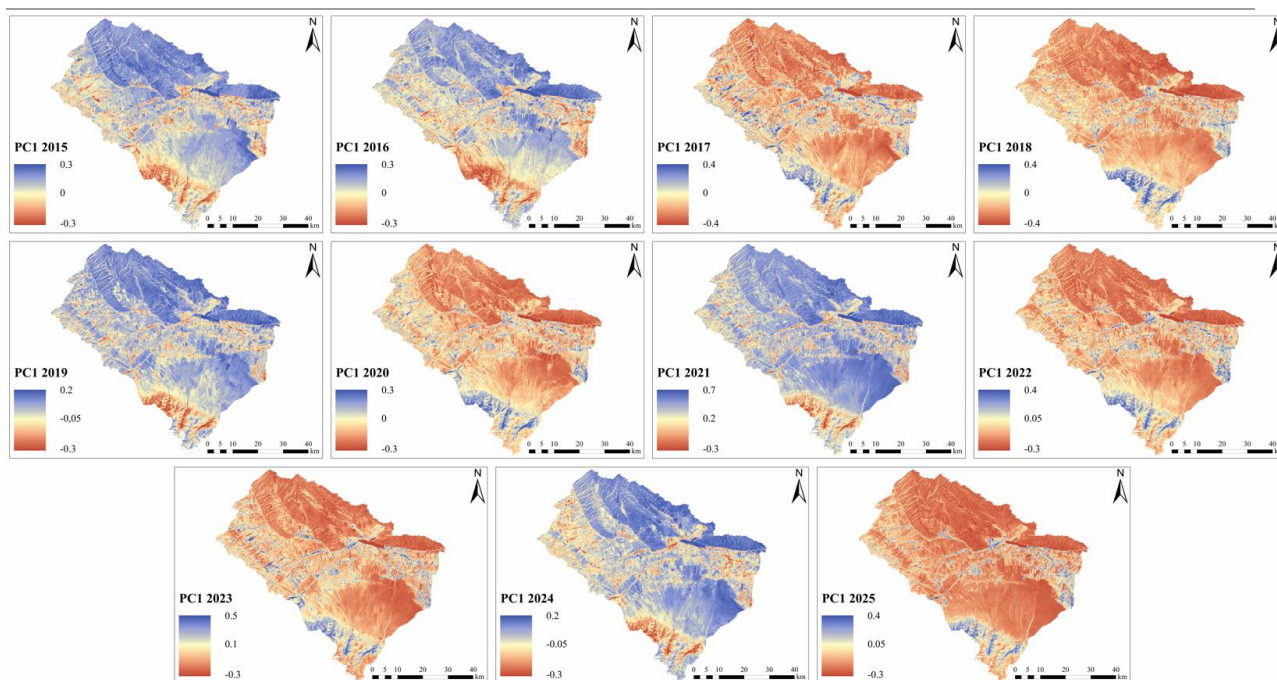


Рисунок 7. PC1 (2015-2025)

Межгодовая динамика PC1 демонстрирует чередование фаз относительного улучшения и ухудшения экологического состояния. В 2015–2016 гг. положительные значения доминируют в северной и центральной частях бассейна, что указывает на сравнительно благоприятные условия. В 2017–2018 гг. отмечается расширение зон с отрицательными значениями, особенно в северных районах, что может свидетельствовать о росте сухости и температурной нагрузки. В 2019 г. наблюдается частичное восстановление положительных значений, тогда как 2020 г. характеризуется усилением негативных тенденций в центральной части бассейна. В 2021 г. фиксируется выраженное улучшение интегральных показателей, отражённое в расширении зон с высокими значениями PC1, однако в 2022–2023 гг. вновь прослеживается преобладание отрицательных значений. В 2024 г. отмечается стабилизация и локальное улучшение экологического состояния, тогда как в 2025 г. наблюдается тенденция к снижению интегральных показателей в северной и центральной частях бассейна.

Полученные результаты подтверждают, что PC1 эффективно интегрирует разнонаправленные компоненты экологической среды и служит основой для формирования индекса RSEI. Пространственная структура PC1 отражает как природно-географические особенности (высотную поясность и климатическую дифференциацию), так и степень хозяйственного освоения территории. Таким образом, анализ PC1 позволяет выявить ключевые зоны экологической уязвимости и определить направления дальнейшего мониторинга и управления природопользованием в пределах бассейна реки Терис.

Анализ пространственно-временной динамики площадного распределения классов RSEI в бассейне реки Терис за 2015–2025 гг. (рис. 8-9; табл. 3) подтверждает выраженную неоднородность экологического состояния территории и его высокую межгодовую вариабельность. Во все годы структура индекса формируется преимущественно классами «ниже среднего» и «средний», совокупная доля которых варьирует от 61,37 % (2025 г.) до 80,71 % (2019 г.).

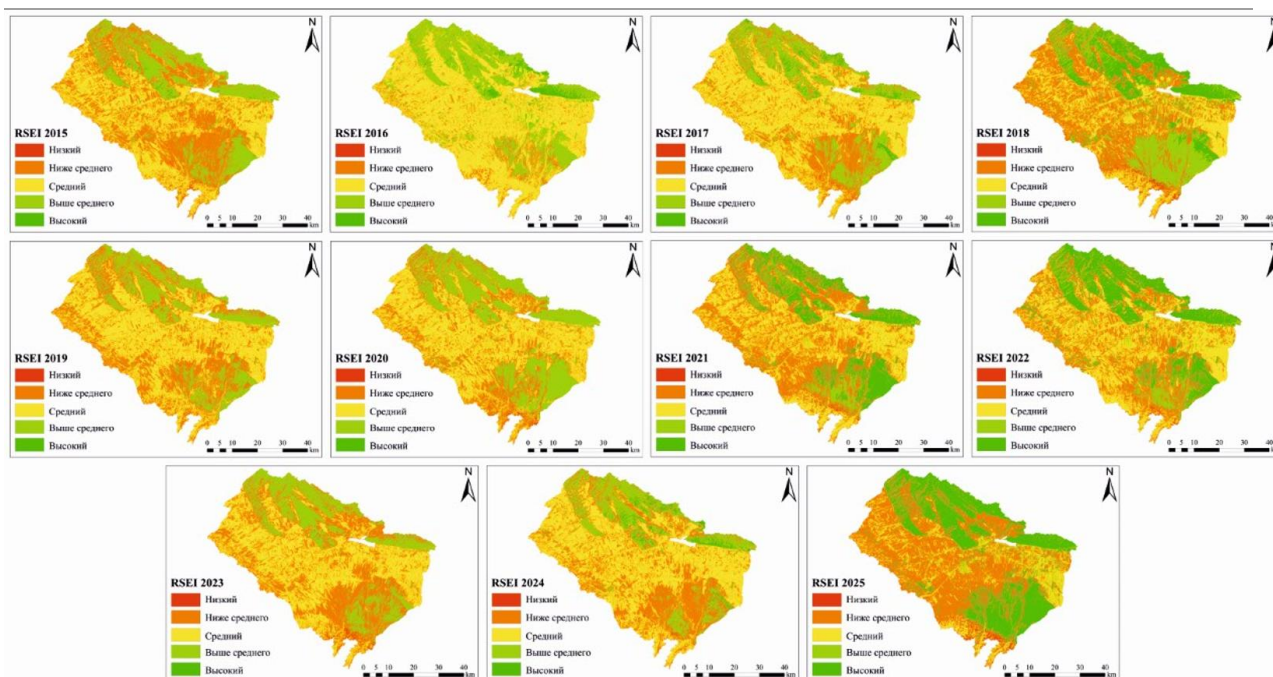


Рисунок 8. RSEI (2015-2025)

Класс «ниже среднего» в большинстве лет занимает наибольшие площади. В 2015 г. его доля составила 43,88 % (87 957,4 га), в 2018 г. – 40,87 % (81 933,4 га), в 2021 г. – 42,41 % (85 007,9 га), а максимальное значение зафиксировано в 2025 г. – 47,51 % (95 248,6 га). Минимальная доля отмечена в 2016 г. – 13,26 % (26 583,4 га), что связано с перераспределением территории в пользу класса «средний». Пространственно данные участки приурочены к центральной и южной частям бассейна и характеризуются фрагментарным распространением. Их доминирование отражает зоны интенсивного сельскохозяйственного освоения и пастбищной нагрузки, что подтверждает связь пониженных значений RSEI с антропогенной трансформацией ландшафтов.

Класс «средний» демонстрирует наибольшую межгодовую амплитуду изменений. Его максимальная доля зафиксирована в 2016 г. – 56,87 % (114 009,4 га), высокие значения также отмечены в 2017 г. – 45,15 % (90 406,1 га), 2019 г. – 41,86 % (83 916,3 га) и 2024 г. – 42,61 % (85 420,1 га). Минимальное значение наблюдается в 2025 г. – 13,86 % (27 781,6 га), что свидетельствует о перераспределении площади в сторону крайних классов. Пространственный анализ показывает, что расширение этого класса сопровождается формированием более сбалансированного водно-теплового режима и относительной стабилизацией растительного покрова.

Классы «выше среднего» и «высокий» занимают меньшие площади, однако их динамика имеет принципиальное диагностическое значение. Доля класса «выше среднего» колеблется от 3,08 % (6 171,3 га) в 2025 г. до 27,85 % (55 826,7 га) в 2020 г. Значительные площади также зафиксированы в 2016 г. – 26,22 % (52 548,6 га) и в 2015 г. – 22,03 % (44 110 га). Класс «высокий» демонстрирует резкие колебания: в 2015 г. его доля составляла 0,81 % (1 620,3 га), в 2016–2017 гг. – около 3,6–3,8 %, в 2018 г. – 16,96 % (34 007,3 га), в 2019–2020 гг. практически отсутствовал (0,05 %), затем резко увеличился в 2021 г. до 20,55 % (41 129,7 га), в 2022 г. – до 26,33 % (52 790,6 га), и достиг максимума в 2025 г. – 34,29 % (68 564,4 га). Пространственно эти территории локализованы в пойменных зонах, орошаемых землях и в горных районах с устойчивым растительным покровом.

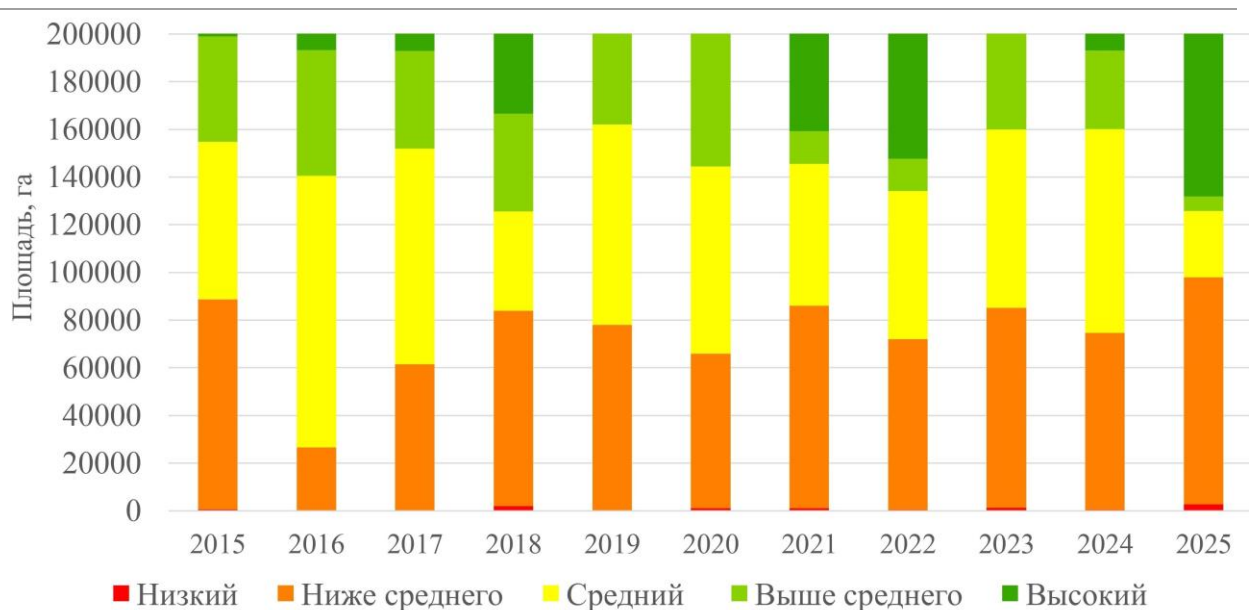


Рисунок 9. Динамика изменения площадей классов RSEI

Класс «низкий» во все годы занимает минимальные площади, однако его динамика отражает формирование очагов неблагоприятного экологического состояния. Минимальное значение зафиксировано в 2016 г. – 0,02 % (33,7 га), тогда как в 2018 г. его доля увеличилась до 1,03 % (2 059,1 га), в 2020–2021 гг. составляла 0,54 %, а в 2025 г. достигла максимума – 1,35 % (2 698,5 га). Пространственно данные участки представлены локальными очагами, совпадающими с зонами интенсивного землепользования и деградированных земель, что указывает на формирование участков повышенной экологической уязвимости.

Таблица 2. Площадное распределение классов RSEI по годам в бассейне реки Терис

Год	Низкий		Ниже среднего		Средний		Выше среднего		Высокий	
	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%	площадь, га	%
2015	716,4	0,36	87 957,40	43,88	66 060,30	32,95	44 110,00	22	1 620,30	0,81
2016	33,7	0,02	26 583,40	13,26	114 009,40	56,87	52 548,60	26,21	7 289,30	3,64
2017	257,8	0,13	61 218,60	30,54	90 406,10	45,1	40 967,70	20,44	7 614,20	3,8
2018	2 059,10	1,03	81 933,40	40,87	41 550,90	20,73	40 913,70	20,41	34 007,30	16,96
2019	249,6	0,12	77 871,50	38,85	83 916,30	41,86	38 330,80	19,12	96,2	0,05
2020	1 091,70	0,54	64 813,90	32,33	78 635,80	39,23	55 826,70	27,85	96,3	0,05
2021	1 079,30	0,54	85 007,90	42,41	59 504,30	29,68	13 680,20	6,82	41 192,70	20,55
2022	536,9	0,27	71 492,70	35,66	62 069,30	30,96	13 574,90	6,77	52 790,60	26,33
2023	1 341,40	0,67	83 843,50	41,82	74 843,90	37,34	40 228,20	20,07	207,4	0,1
2024	529	0,26	74 230,20	37,03	85 420,10	42,61	32 954,70	16,44	7 330,40	3,66
2025	2 698,50	1,35	95 248,60	47,51	27 781,60	13,86	6 171,30	3,08	68 564,40	34,2

В целом экологическое состояние бассейна реки Терис характеризуется мозаичностью и высокой динамичностью. Наиболее благоприятными по интегральным показателям можно считать 2021–2022 и 2025 гг., когда суммарная доля классов «выше среднего» и «высокий»

достигала 27,37 %, 33,10 % и 37,28 % соответственно. Наиболее напряжённая экологическая ситуация отмечена в 2015, 2018 и 2023 гг., когда совокупная доля классов «низкий» и «ниже среднего» достигала 44,24 %, 41,90 % и 42,49 % соответственно.

Результаты непараметрического теста Манна–Кендалла и оценки наклона Сена показали отсутствие статистически значимых трендов для большинства классов RSEI ($p > 0,05$), что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности над устойчивыми долговременными изменениями. Вместе с тем для класса «выше среднего» выявлен статистически значимый отрицательный тренд ($\tau = -0,60$; $p = 0,01$), отражающий сокращение площади территорий с относительно благоприятным экологическим состоянием (табл. 4).

Таблица 3. Результаты теста Манна–Кендалла и оценки наклона Сена для временных рядов площадей классов RSEI

Класс RSEI	Kendall's τ	p-value	Sen's slope	Интерпретация
Низкий	0,33	0,16	0,042	статистически незначимый рост
Ниже среднего	0,27	0,283	0,949	статистически незначимый рост
Средний	-0,27	0,283	-1,620	статистически незначимое снижение
Выше среднего	-0,60	0,01	-1,230	статистически значимое снижение
Высокий	0,33	0,16	1,495	статистически незначимый рост

4. Обсуждение

Применение интегрального индекса RSEI для оценки экологического состояния бассейна реки Терис соответствует современным методологическим подходам, широко представленным в публикациях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Методика RSEI, предложенная Ху и соавторами, основана на интеграции ключевых компонентов поверхности – растительности (NDVI), влажности (WET), температуры поверхности (LST) и сухости/антропогенной нагрузки (NDBSI) – путём применения метода главных компонент (PCA) для получения единой оценки экологического качества (Xu et al., 2019).

Результаты исследования бассейна Терис выявляют доминирование классов «ниже среднего» и «средний» в структуре экологического состояния, что согласуется с выводами (Zhang et al., 2021), которые показали, что подобные категории отражают зоны умеренного нарушения природной среды при устойчивой хозяйственной нагрузке.

Высокая межгодовая изменчивость RSEI также найдена в работах по оценке экологической динамики в условиях климатической изменчивости. Исследования демонстрируют, что сезонность и фенологические колебания растительности оказывают существенное влияние на значения индекса, что подчёркивает необходимость унификации временных интервалов при сравнительных исследованиях (Maimaitituersun et al., 2025; Zhang et al., 2021).

Несмотря на широкое применение и относительную простоту расчётов, индекс RSEI обладает рядом ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Во-первых, RSEI чувствителен к природно-ландшафтным условиям, не связанным непосредственно с антропогенным воздействием (Tang et al., 2024).

Во-вторых, RSEI не позволяет однозначно разделить вклад природных факторов и антропогенной деятельности, поскольку он отражает интегральное состояние ландшафта без выделения причинно-следственных факторов. Это особенно важно для территорий с выраженной природной неоднородностью, таких как горно-предгорные регионы.

Третье ограничение связано с зависимостью результатов от временного интервала анализа и сезонности данных. Различия в гидрологическом режиме, климатические колебания и межгодовая изменчивость фенологии растительности могут приводить к изменению значений индекса, если даты съёмки не сопоставимы по сезонам. Maimaitiusersun et al. (2025) подчёркивают, что это может приводить к ошибочному выводу о долгосрочных тенденциях, если не учитывать сезонный компонент.

Кроме того, RSEI чувствителен к способу нормализации и параметрам PCA. Поскольку интегральный индекс формируется на основе первой главной компоненты, его значение может варьироваться в зависимости от набора исходных показателей, статистических характеристик выборки и границ анализируемой территории, что осложняет прямое сравнение между разными регионами и исследованиями.

Наконец, индекс RSEI, будучи интегральной оценкой, не включает социально-экономические и управленческие параметры (плотность населения, структура землепользования, меры охраны природы), что ограничивает его применение для причинно-следственного анализа изменений экологического состояния. В отличие от концептуальных моделей PSR или DPSIR (Driving forces–Pressure–State–Impact–Response), RSEI не отражает конкретные драйверы изменений, а предоставляет лишь обобщённую картину устойчивости или напряжённости экосистемных процессов.

Следует отметить, что интерпретация причин выявленных пространственно-временных изменений основывается преимущественно на анализе спутниковых индексов и пространственных закономерностей без прямого привлечения независимых климатических и социально-экономических данных. Поэтому выводы о роли антропогенных и климатических факторов носят вероятностный характер. В дальнейшем целесообразна интеграция данных о количестве осадков, температурных аномалиях и структуре землепользования для более детального анализа факторов динамики RSEI.

5. Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что экологическое состояние бассейна реки Терис в 2015-2025 гг. характеризуется выраженной пространственной дифференциацией и высокой межгодовой изменчивостью. На основе интегрального индекса RSEI выявлено доминирование территорий с умеренно пониженным и средним уровнем экологического качества, формирующих основной фоновый тип ландшафтов бассейна.

Определено, что пониженные значения экологического состояния пространственно приурочены к центральным и сельскохозяйственно освоенным районам, где фиксируются повышенные значения сухости поверхности и тепловой нагрузки при сниженных показателях растительного покрова и влажности. В то же время горные и пойменные территории характеризуются более благоприятными экологическими условиями, что подтверждается повышенными значениями NDVI и WET и пониженными значениями LST и NDBSI.

Установлена значительная межгодовая вариабельность площадей классов RSEI. Максимальная доля класса «средний» зафиксирована в 2016 г. (56,87 %), тогда как в 2025 г. отмечено существенное увеличение площади класса «высокий» (34,20 %), отражающее локальное улучшение экологического состояния. Зоны с критически низкими значениями индекса занимают ограниченные площади (до 1,35 %), однако их пространственная локализация совпадает с участками интенсивного землепользования и деградированных земель.

Результаты непараметрического анализа Манна-Кендалла и оценки наклона Сена показали отсутствие статистически значимых трендов для большинства классов RSEI, что свидетельствует о преобладании межгодовой вариабельности над устойчивыми долговременными изменениями. Вместе с тем для класса «выше среднего» выявлен статистически значимый отрицательный тренд, отражающий сокращение площади территорий с относительно благоприятным экологическим состоянием.

Полученные результаты подтверждают высокую информативность индекса RSEI для выявления пространственных контрастов экологического состояния, анализа его динамики и оценки экологически уязвимых территорий в пределах бассейновых геосистем полузасушливых регионов.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - Қ.Қ., Т.У., Е.М.; методология - Қ.Қ., Б.Д., Т.У.; программное обеспечение - Қ.Қ., Т.У.; валидация - Қ.Қ., Т.У.; формальный анализ - Қ.Қ.; исследование - Қ.Қ., Е.М.; ресурсы - Қ.Қ.; курирование данных - Қ.Қ., Т.У.; написание – подготовка оригинального черновика - Қ.Қ., Б.Д., Т.У., И.Р., Е.М.; написание – рецензирование и редактирование - Қ.Қ.; визуализация - Қ.Қ.; руководство - Қ.Қ.; администрирование проекта - Қ.Қ.; получение финансирования - Қ.Қ., Б.Д., Т.У., И.Р., Е.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи».

8. Информация об авторах

Қырғызбай, Құдайберген – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; доцент-исследователь кафедры картографии и геоинформатики, факультет географии и природопользования, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; kyrgyzbay.kudaibergen@kbtu-edu.kz, kyrgyzbay.K@kaznu.kz, kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4279-6436>

Дүйсебек, Бақтыбек – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; b.duisebek@kbtu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2596-4936>

Усманов, Талгат – научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; talgat.usmanov@kbtu-edu.kz, <https://orcid.org/0009-0005-1882-4272>

Рахметов, Иса – научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан, 050010; issa.rakhmetov@kbtu.kz, issaraqmet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6269-7734>

Муқанов, Ерболат – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахстанско-Британский технический университет (КБТУ), улица Толе Би, 59, Алматы, Казахстан, 050000; старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; yerbulat.mukanov@kbtu-edu.kz, mukanov_yen@enu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-3132-6388>

9. Финансирование: Исследование выполнено в рамках проекта программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан «Инновации снижения последствий наводнений-засух с гидрогеологическими стратегиями управляемого пополнения водоносных горизонтов для Жамбылской, Алматинской, Жетысуской, Абайской и Восточно-Казахстанской областей» (ИРН: BR27197639).

10. Благодарности: Авторы выражают благодарность платформе Google Earth Engine за предоставление доступа к архивам данных дистанционного зондирования Земли и вычислительным ресурсам, использованным при обработке и анализе спутниковых данных. Особая признательность выражается программе Landsat (NASA/USGS) за открытые данные

спутников Landsat 8 и Landsat 9, которые послужили основой для расчёта экологических индексов и формирования временных рядов.

11. Конфликты интересов: нет конфликта интересов

12. Список литературы

1. Aizizi, Y., Kasimu, A., Liang, H., Zhang, X., Wei, B., Zhao, Y., & Ainiwaer, M. (2023). Evaluation of ecological quality status and changing trend in arid land based on the remote sensing ecological index: A case study in Xinjiang, China. *Forests*, 14(9), 1830. <https://doi.org/10.3390/f14091830>
2. Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>
3. Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data: The TM tasseled cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(3), 256–263. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1984.350619>
4. De Araujo Barbosa, C. C., Atkinson, P. M., & Dearing, J. A. (2015). Remote sensing of ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 52, 430–443. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.01.007>
5. European Space Agency. (2024). *Sentinel-2 mission*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
6. Esri. (2024). *An overview of the Hydrology tools: ArcGIS Desktop Documentation*. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>
7. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
9. Hasan, M. M., Ferdous, M. T., Talha, M., Mojumder, P., Roy, S. K., Zim, M. N. F., Akter, M. M., Nasher, N. M. R., Hasher, F. F. B., Boltiziar, M., & Zhran, M. (2025). Analyzing ecological environmental quality trends in Dhaka through remote sensing based ecological index (RSEI). *Land*, 14(6), 1258. <https://doi.org/10.3390/land14061258>
10. Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
11. Kennedy, R. E., Andréfouët, S., Cohen, W. B., Gómez, C., Griffiths, P., Hais, M., Healey, S. P., Helmer, E. H., Hostert, P., Lyons, M. B., Meigs, G. W., Pflugmacher, D., Phinn, S. R., Powell, S. L., Scarth, P., Sen, S., Schroeder, T. A., Schneider, A., Sonnenschein, R., & Zhu, Z. (2014). Bringing an ecological view of change to Landsat-based remote sensing. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 339–346. <https://doi.org/10.1890/130066>
12. Kwok, R. (2018). Ecology’s remote-sensing revolution. *Nature*, 556(7699), 137–138. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-03924-9>
13. Liu, P., Wen, T., Han, R., & Wu, S. (2025). Study on RSEI changes using remote sensing and Markov-FLUS modeling approach. *Sustainability*, 17(22), 10267. <https://doi.org/10.3390/su172210267>
14. Liu, S., Liu, L., Wu, X., Hou, X., Zhao, S., & Liu, G. (2018). Quantitative evaluation of human activity intensity on the regional ecological impact studies. *Acta Ecologica Sinica*, 38(19). <https://doi.org/10.5846/stxb201711172048>

15. Liu, Y., Zhou, T., & Yu, W. (2024). Analysis of changes in ecological environment quality and influencing factors in Chongqing based on a remote-sensing ecological index mode. *Land*, 13(2), 227. <https://doi.org/10.3390/land13020227>
16. Maimaitiusersun, A., Yang, H., Aobuliaisun, N., Maimaitiaili, K., & Chenyu, O. (2025). Assessing subtle changes in arid land river basin ecological quality: A study utilizing the PIE engine platform and RSEI. *Ecological Indicators*, 170, 113035. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113035>
17. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
18. Mueller, L., Saparov, A., & Lischeid, G. (Eds.). (2014). *Novel measurement and assessment tools for monitoring and management of land and water resources in agricultural landscapes of Central Asia*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5>
19. Ning, L., Jiayao, W., & Fen, Q. (2020). The improvement of ecological environment index model RSEI. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(11), 403. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05414-7>
20. Reza, M. I. H., & Abdullah, S. A. (2011). Regional index of ecological integrity: A need for sustainable management of natural resources. *Ecological Indicators*, 11(2), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.08.010>
21. Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). *Tropical forest cover density mapping*. ITTO Technical Report.
22. Saparov, K. T., Shakhantayeva, Z. R., & Yeginbayeva, A. Y. (2023). System of hydrographic terms of the Zhambyl region. *Journal of Geography, Politics and Society*, 13(4), 40–48. <https://doi.org/10.26881/jpgs.2023.4.04>
23. Saparov, K., Shakhantayeva, Z., & Yeginbayeva, A. (2023). Reflection of the names of artificial and natural water sources in the study of microhydronyms of Zhambyl region. *Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series*, 143(2), 79–89. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-143-2-79-89>
24. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
25. Tang, Q., Hua, L., Tang, J., Jiang, L., Wang, Q., Cao, Y., Wang, T., & Cai, C. (2024). Advancing ecological quality assessment in China: Introducing the ARSEI and identifying key regional drivers. *Ecological Indicators*, 163, 112109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112109>
26. Main Administration of Geodesy and Cartography of the USSR. (n.d.). *Topographic map at a scale of 1:200,000: Sheets K-42-11, K-42-12, K-42-17, K-42-18*. <https://maps.vlasenko.net/smtm200/k-42-12.jpg>
27. United Nations. (2024). *Sustainable Development Goals Report 2024*. United Nations. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/>
28. U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
29. U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide*. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-collection-2-level-2-science-product-guide>
30. Wang, H., Tang, L., Qiu, Q., & Chen, H. (2020). Assessing the impacts of urban expansion on habitat quality by combining the concepts of land use, landscape, and habitat in two urban agglomerations in China. *Sustainability*, 12(11), 4346. <https://doi.org/10.3390/su12114346>
31. Wang, J., Lin, Y., Zhai, T., He, T., Qi, Y., Jin, Z., & Cai, Y. (2018). The role of human activity in decreasing ecologically sound land use in China. *Land Degradation & Development*, 29(3), 446–460. <https://doi.org/10.1002/ldr.2874>
32. Wang, L., Tian, F., Wang, X., Yang, Y., & Wei, Z. (2020). Attribution of the land surface temperature response to land-use conversions from bare land. *Global and Planetary Change*, 193, 103268. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103268>
33. Wikipedia contributors. (2024). *Teris River*. Wikipedia. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Терис_\(река\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Терис_(река))

34. Wikipedia contributors. (2024). *Asy River*. Wikipedia. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Асы_\(река\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Асы_(река))
35. Willis, K. S. (2015). Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. *Biological Conservation*, 182, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.006>
36. Wolters, M. L., Sun, Z., Huang, C., & Kuenzer, C. (2016). Environmental awareness and vulnerability in the Yellow River Delta: Results based on a comprehensive household survey. *Ocean & Coastal Management*, 120, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.009>
37. Wu, S., Gao, X., Lei, J., Zhou, N., Guo, Z., & Shang, B. (2022). Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index. *Journal of Arid Land*, 14(1), 14–33. <https://doi.org/10.1007/s40333-022-0057-1>
38. Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
39. Xu, H. (2013). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 7853–7862. <https://doi.org/10.5846/stxb201208301223>
40. Xu, H., Wang, M., Shi, T., Guan, H., Fang, C., & Lin, Z. (2018). Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological Indicators*, 93, 730–740. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.055>
41. Xu, H., Wang, Y., Guan, H., Shi, T., & Hu, X. (2019). Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 11(20), 2345. <https://doi.org/10.3390/rs11202345>
42. Xu, H., Shi, T., Wang, M., & Lin, Z. (2017). Land cover changes in the Xiong'an New Area and a prediction of ecological response to forthcoming regional planning. *Acta Ecologica Sinica*. <https://doi.org/10.5846/stxb201705210941>
43. Yang, H., Yu, J., Xu, W., Wu, Y., Lei, X., Ye, J., Geng, J., & Ding, Z. (2023). Long-time series ecological environment quality monitoring and cause analysis in the Dianchi Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 148, 110084. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110084>
44. Yue, H., Liu, Y., Li, Y., & Lu, Y. (2019). Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. *IEEE Access*, 7, 51295–51311. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911627>
45. Zhang, T., Yang, R., Yang, Y., Li, L., & Chen, L. (2021). Assessing the urban eco-environmental quality by the remote-sensing ecological index: Application to Tianjin, North China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 475. <https://doi.org/10.3390/ijgi10070475>

Жерді қашықтықтан зондтау деректерінің негізінде Теріс өзенінің бассейніндегі экологиялық жағдайды және антропогендік әсерді бағалау (Жамбыл облысы)

Құдайберген Қырғызбай, Бақтыбек Дүйсебек, Талгат Усманов, Иса Рахметов, Ерболат Муканов

Аңдатпа: Мақалада 2015-2025 жылдардағы Жерді қашықтықтан зондтаудың көпжылдық деректері негізінде Теріс өзені бассейнінің (Жамбыл облысы) экологиялық жағдайы мен антропогендік әсер ету деңгейінің кеңістіктік-уақыттық бағалауы ұсынылған. Зерттеудің ақпараттық негізіне Google Earth Engine ортасында атмосфералық түзету коэффициенттерін, бұлттылықтан тазарту және спектрлік көрсеткіштерді қалыпқа келтіруді қолдану арқылы анықталған Landsat 8 және 9 (Collection 2 Level 2) ғарыштық түсірілімдері жатады. Геожүйелердің негізгі компоненттерін сандық сипаттау үшін NDVI (өсімдік жамылғысы), WET (Tasseled Cap конверсиясының ылғалдылық компоненті), LST (жер бетінің

температурасы) және NDBSI (құрғақтық және антропогендік трансформация дәрежесі) индекстері есептеледі. Стандартталған индикаторлардың интеграциясы негізгі компоненттер әдісімен жүзеге асырылып, RSEI экологиялық жағдайының интегралды индексі қалыптасты. Алынған нәтижелер айқын кеңістіктік дифференциацияны және экологиялық жағдайлардың жоғары жылдық өзгергіштігін көрсетеді. Зерттеу кезеңінде аумақтың құрылымында «ортадан төмен» және «орта» сыныптар басым болып, жиынтық үлесі көптеген жылдары 70 %-дан асады. «Орта» класының ең үлкен үлесі 2016 жылы тіркелген (56,88 %), ал 2025 жылы экологиялық жағдайдың жергілікті жақсаруын көрсететін «жоғары» класының айтарлықтай артуы (34,29 %) анықталды. RSEI мәндері төмен аймақтар шектеулі аумақтарды қамтып (1,34 % дейін), қарқынды жер пайдалану және тозған жерлер учаскелерімен шектелген.

Ең қолайлы экологиялық жағдайлар таулы және жайылмалы ландшафттарға тән, ал орталық және ауыл шаруашылығы дамыған аудандар интегралдық көрсеткіштердің төмендеуін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері RSEI индексінің экологиялық жағдай динамикасын бақылауда және жартылай құрғақ аймақтардың бассейндік геожүйелеріндегі антропогендік жүктемені бағалауда интегралдық құралы ретіндегі әдістемелік жоғары нәтижелерге ие екендігін айқындайды.

Түйін сөздер: RSEI; Жерді қашықтықтан зондтау; антропогендік әсер; экологиялық жағдай; Теріс өзенінің бассейні.

Assessment of ecological condition and anthropogenic impact in the Teris River basin based on remote sensing data (Zhambyl region)

Kudaibergen Kyrgyzbay, Baktybek Duisebek, Talgat Usmanov, Isa Rakhmetov, Yerbolat Mukanov

Abstract: The paper presents a spatiotemporal assessment of the ecological state and the level of anthropogenic impact in the Teris River basin (Zhambyl region) based on long-term data from remote sensing for 2015-2025. The information basis of the study was the satellite data of Landsat 8 and 9 (Collection 2 Level 2), processed in the Google Earth Engine environment using atmospheric correction procedures, cloud masking and normalization of spectral indicators. To quantify the key components of geosystems, the NDVI (vegetation), WET (moisture component of the Tasseled Cap transformation), LST (temperature of the Earth's surface) and NDBSI (dryness and degree of anthropogenic transformation) indices were calculated. The integration of standardized indicators was carried out using the principal component method, followed by the formation of an integrated environmental status index (RSEI).

The results obtained indicate a pronounced spatial differentiation and high interannual variability of environmental conditions. Throughout the entire study period, the structure of the territory was dominated by the «below average» and «average» classes, the combined share of which exceeded 70 % in most years. The largest share of the «medium» class was recorded in 2016 (56.88%), while in 2025 there was a significant expansion of the «high» class (34.29 %), reflecting a local improvement in the environmental condition. Zones with low RSEI values occupy limited areas (up to 1.34 %), but are spatially confined to areas of intensive land use and degraded lands.

The most favorable environmental conditions are typical for mountainous and floodplain landscapes, while central and agriculturally developed areas show reduced integral indicators. The results of the study confirm the methodological viability of RSEI as an integral tool for monitoring the dynamics of the ecological state and assessing anthropogenic load within the basin geosystems of semi-arid regions.

Keywords: RSEI; remote sensing; anthropogenic impact; ecological condition; Teris River basin.