

А.А. Саянов<sup>1</sup> , М.Ж. Махамбетов<sup>2</sup> ,  
А.Б. Хамит<sup>2</sup> , А.М. Сергеева<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан

\*e-mail: sergeyeva.aigul@gmail.com

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГОРОДСКИХ ЗЕЛЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ ГОРОДА АКТАУ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Город Актау, расположенный в засушливом прибрежном районе Каспийского моря, характеризуется серьёзными экологическими проблемами, такими как дефицит пресной воды, засоление почв и высокая солнечная активность. В подобных условиях эффективное озеленение требует научно обоснованных решений. Целью настоящего исследования является комплексная оценка состояния, структуры и пространственно-временной динамики зелёных пространств города Актау с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и мультиспектральных спутниковых данных за 2015–2024 годы. На основе изображений Sentinel-2 и Landsat 8–9 был проведён анализ вегетационных индексов (NDVI). Предложенный подход позволяет не только картировать плотность растительного покрова, но и выявлять зоны экологической уязвимости и неравенства в пределах городской территории. Результаты демонстрируют выраженную пространственную фрагментарность зелёного каркаса города, доминирование ксерофитной флоры и наличие значительных внутригородских экологических диспропорций. В периферийных и промышленных районах зафиксировано снижение значений NDVI, связанное с дефицитом орошения, слабым институциональным регулированием и социально-экономическими различиями. При этом наиболее высокие значения NDVI отмечены в центральных и прибрежных зонах, в то время как деградация растительности наблюдается в промышленных и новых жилых кварталах. В исследование включены более 80 зелёных объектов, охватывающих свыше 138 тысяч экземпляров деревьев и кустарников, среди которых преобладают засухоустойчивые таксоны. Обнаружены элементы экологического неравенства между микрорайонами по уровню озеленения и доступу к зелёным зонам. Работа подчёркивает необходимость перехода к системно-пространственной модели озеленения, интеграции цифровых платформ мониторинга и усиления участия горожан в процессе озеленения. Полученные результаты и предложенный методический подход могут быть использованы для устойчивого управления зелёной инфраструктурой и в других засушливых городах Казахстана.

**Ключевые слова:** NDVI-анализ, спутниковый мониторинг, зелёные пространства, озеленение, Актау.

A.A. Sayanov<sup>1</sup>, M.Zh. Makhambetov<sup>2</sup>, A.B. Khamit<sup>2</sup>, A.M. Sergeyeva<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>K. Zhubanov Aktobe regional university, Aktobe, Kazakhstan

\*e-mail: sergeyeva.aigul@gmail.com

### Comprehensive assessment of urban green spaces in the city of Aktau based on multispectral satellite data

The city of Aktau, located in the arid coastal zone of the Caspian Sea, is characterized by serious environmental challenges, including freshwater scarcity, soil salinization, and high solar radiation. Under such conditions, effective greening requires scientifically grounded solutions. This study aims to conduct a comprehensive assessment of the state, structure, and spatio-temporal dynamics of urban green spaces in Aktau using remote sensing (RS) methods and multispectral satellite data from 2015 to 2024. Based on Sentinel-2 and Landsat 8–9 imagery, an analysis of vegetation indices (NDVI) was carried out. The proposed approach enables not only mapping the density of vegetation cover but also identifying areas of ecological vulnerability and inequality within the urban environment. The results reveal pronounced spatial fragmentation of the city's green framework, dominance of xerophytic flora, and significant intra-urban environmental disparities. Decreased NDVI values were recorded in peripheral and industrial areas, associated with limited irrigation, weak institutional regulation, and socio-economic gradients.

In contrast, the highest NDVI values were observed in central and coastal districts, while vegetation degradation was noted in industrial and newly developed residential zones. The study included over 80 green infrastructure sites, comprising more than 138 000 specimens of trees and shrubs, predominantly drought-tolerant taxa. Elements of environmental inequality were identified between neighborhoods in terms of greening levels and access to green areas. The study emphasizes the need to shift towards a systemic spatial model of urban greening, integrate digital monitoring platforms, and strengthen public participation. The findings and proposed methodological framework can be applied to ensure sustainable green infrastructure management in other arid cities across Kazakhstan.

**Keywords:** NDVI analysis, satellite monitoring, green spaces, greening, Aktau.

А.А. Саянов<sup>1</sup>, М.Ж. Махамбетов<sup>2</sup>, А.Б. Хамит<sup>2</sup>, А.М. Сергеева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Россия Федерациясы

<sup>2</sup>Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

\*e-mail: sergeyeva.aigul@gmail.com

### Мультиспектрлі спутниктік мәліметтер негізінде Ақтау қаласындағы жасыл кеңістіктерді кешенді бағалау

Каспий теңізінің жағалауындағы құрғақ аймақта орналасқан Ақтау қаласы тұщы су тапшылығы, топырақтың тұздануы және күн белсенділігінің жоғары болуы сияқты күрделі экологиялық проблемалармен ерекшеленеді. Мұндай жағдайларда тиімді жасылдандыру ғылыми негізделген шешімдерді қажет етеді. Зерттеудің мақсаты – Жерді қашықтықтан зондау (ЖҚЗ) әдістерін және 2015 – 2024 жылдар аралығындағы көп спектрлі спутниктік мәліметтерді пайдалана отырып, Ақтау қаласындағы жасыл кеңістіктердің жай-күйін, құрылымын және кеңістіктік-уақыттық динамикасын кешенді бағалау. Sentinel-2 және Landsat 8-9 көріністерін пайдалану негізінде өсімдік жамылғысының индекстеріне (NDVI) талдау жүргізілді. Әдіс жасыл жамылғылардың тығыздығын картаға түсіріп қана қоймай, сонымен қатар Ақтау қаласындағы экологиялық осалдық пен теңсіздік аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижелер қаланың жасыл қаңқасының айқын кеңістіктік фрагментациясын, ксерофитті флораның басымдылығын және маңызды қалаішілік экологиялық диспропорциялардың болуын көрсетеді. Суару тапшылығымен, әлсіз институционалдық реттеумен және әлеуметтік-экономикалық градиенттермен байланысты шеткі және өндірістік аймақтарда NDVI төмендеуі анықталды. Қала құрылысына үлестік көрсеткіштерді енгізу қажеттілігін растайтын жасыл аумақтарға қол жеткізудегі экологиялық теңсіздіктің көріністері байқалды. Ең қолайлы NDVI мәндері орталық және жағалаудағы аудандарда тіркелді, ал өсімдік жамылғысының деградациясы өнеркәсіптік және жаңа тұрғын аудандарда анықталды. 80-нен астам жасыл алаңдар (саябақ, қаланың жасыл инфрақұрылымдары) қарастырылып, 138 мыңнан астам ағаштар мен бұталардың үлгілері бар, олардың арасында құрғақшылыққа төзімді таксондар басым. Жасылдандыру және жасыл аймақтарға қолжетімділік деңгейі бойынша шағын аудандар арасындағы экологиялық теңсіздік элементтері белгіленді. Зерттеу жасылдандырудың жүйелік-кеңістіктік моделіне көшудің, цифрлық мониторинг платформаларын біріктірудің және қала тұрғындары пікірінің маңыздылығын көрсетеді. Алынған нәтижелер мен ұсынылған әдістемелік тәсілді Қазақстанның құрғақ аймақтарындағы басқа қалаларда жасыл инфрақұрылымды тұрақты басқару үшін пайдалануға болады.

**Түйін сөздер:** NDVI талдауы, спутниктік мониторинг, жасыл кеңістіктер, көгалдандыру, Ақтау.

## Введение

Городская растительность – ключевой компонент устойчивой городской среды, особенно в условиях климатических и антропогенных вызовов XXI века. Зелёные пространства не только выполняют эстетическую и рекреационную функцию, но и представляют собой важнейший элемент экосистемных услуг, включая регулирование микроклимата, снижение температурного острова, фильтрацию загрязнителей воздуха и укрепление социальной устойчивости городов (Tzoulas и др., 2021; Escobedo и др., 2019). Со-

временные концепции урбанистики, такие как «зелёная инфраструктура», «умный город» и «экологически ориентированное планирование», подчёркивают необходимость системного подхода к оценке, сохранению и развитию зелёных насаждений в городской среде (James и др., 2009; Pauleit и др., 2019).

В засушливых и полупустынных регионах, где природные условия ограничивают рост растительности, вопросы планирования и мониторинга зелёных зон приобретают особую актуальность. Одним из таких городов является Ақтау – административный центр

Мангистауской области, расположенный в пустынно-континентальной климатической зоне с острым дефицитом пресной воды, сильными ветровыми нагрузками и высокими уровнями солнечной радиации. Указанные природно-климатические ограничения усиливают экологическую уязвимость урбанизированной среды, повышают антропоэкосистемную нагрузку и обуславливают необходимость применения научно обоснованных стратегий озеленения в качестве ключевого компенсаторного и адаптационного механизма.

Город Актау изначально формировался в условиях жёстких природно-климатических ограничений: хронического дефицита пресной воды, засоленных почв, высокой солнечной радиации и частых суховейных ветров. Эти факторы не только усложняли процессы формирования устойчивой городской среды, но и предопределили специфику озеленительных практик. На протяжении десятилетий развитие зелёных насаждений носило волнообразный характер: периоды активных посадок и внедрения засухоустойчивых видов сменялись упадком из-за нехватки полива, экономических кризисов и слабого институционального регулирования. В результате озеленение города оказалось крайне ограниченным и неравномерным, а структура зелёных зон приобрела фрагментарный характер. Несмотря на реализацию отдельных программ благоустройства последних лет, включая государственные инициативы по расширению зелёного фонда, озеленённые территории по-прежнему остаются неравномерно распределёнными по городской территории.

В современных условиях проблема зелёной инфраструктуры Актау приобретает стратегическое значение, так как она напрямую связана с экологической устойчивостью, социальной справедливостью и качеством городской среды. На фоне ускоряющейся урбанизации и роста антропогенной нагрузки выявляется выраженное территориальное неравенство: центральные и прибрежные районы демонстрируют более высокий уровень озеленения за счёт приоритетного благоустройства и наличия систем полива, тогда как промышленные зоны и новые жилые массивы характеризуются низкой плотностью растительности и деградиационными процессами. Подобная ситуация усиливает проявления экологического неравенства, ограничивая доступ значительной части населения к экосистемным услугам зелёных насаждений.

Традиционные методы инвентаризации зелёных насаждений (такие как полевые обследования, визуальные описания, кадастровая отчётность) не всегда позволяют обеспечить достаточную пространственную и временную детализацию. Более того, в быстрорастущих и трансформирующихся городах подобные методы часто оказываются неоперативными, фрагментарными и не способствуют формированию целостной картины изменений в структуре зелёных зон.

На этом фоне особую значимость приобретает использование спутникового мониторинга и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые предоставляют объективные, многоуровневые и регулярно обновляемые данные. Мультиспектральные спутниковые изображения (Landsat 8-9, Sentinel-2, PlanetScope) позволяют рассчитывать вегетационные индексы – такие как NDVI, SAVI, GNDVI – и классифицировать землепользование на основе спектральных характеристик поверхности (Jensen, Binford, 2004; Xie, Fan, 2021). Применение указанных индексов позволяет осуществлять интегральную оценку структурных и функциональных характеристик зелёного покрова, охватывающую не только его площадь и плотность, но также динамические изменения, процессы деградациии, результативность озеленительных мероприятий и пространственную неоднородность.

Настоящее исследование направлено на комплексную оценку состояния, структуры и изменений городской зелёной инфраструктуры города Актау на основе мультиспектральных спутниковых данных за период 2015–2025 гг. В работе применяются методы расчёта вегетационных индексов (NDVI), многоклассовой классификации землепользования, построение матриц переходов и пространственного анализа в ГИС-среде. Также рассматриваются корреляционные связи между плотностью растительности и функциональным зонированием города, включая жилые кварталы, промышленные зоны и прибрежные территории.

Целью исследования является комплексная оценка состояния, пространственной структуры и динамики городских зелёных пространств города Актау с использованием мультиспектральных спутниковых данных и методов дистанционного зондирования Земли. Исследование направлено на выявление пространственных диспропорций в распределении растительности, оценку эффективности существующей зелёной

инфраструктуры, а также на разработку методического подхода к мониторингу и планированию озеленения в условиях аридного климата.

Город Актау выбран в качестве объекта исследования вследствие его уникального географического положения в аридной зоне, острого дефицита природной растительности и пресной воды, а также высокой антропогенной нагрузки. Озеленение в подобных условиях представляет собой сложную экологическую и градостроительную задачу. Кроме того, город активно развивается, реализует программы благоустройства, но остаётся слабо изученным в контексте дистанционного мониторинга зелёных пространств. Это делает Актау репрезентативной моделью для оценки и разработки устойчивых подходов к управлению городской зелёной инфраструктурой в засушливых регионах.

### Литературный обзор

Современная научная литература подчёркивает, что городские зелёные пространства играют ключевую роль в обеспечении устойчивого развития и повышения качества жизни населения. Зелёные насаждения способствуют снижению температуры воздуха, улучшению качества воздуха, поддержанию биоразнообразия и социальной интеграции (Haaland, van den Bosch, 2015; Kabisch и др., 2022). В последние десятилетия растёт интерес к количественной и качественной оценке этих пространств с применением методов геоинформатики и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Особое внимание уделяется вегетационным индексам, прежде всего NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который широко используется для оценки плотности, продуктивности и состояния растительного покрова (Tucker и др., 2005; Pettorelli и др., 2005). Исследования в разных климатических условиях показали, что NDVI позволяет эффективно отслеживать сезонные и многолетние изменения в зелёных зонах как на уровне города, так и отдельных кварталов (Xu и др., 2016; Zhou, 2019). Помимо NDVI, применяются и другие спектральные показатели: EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), GNDVI (Green NDVI), которые повышают точность анализа в условиях засушливого климата или при наличии сильного фона почвы. Использование указанных вегетационных индексов подтверждает их высокую диагностическую значимость в условиях

урбанизированных ландшафтов, где зелёные насаждения обладают прерывистым, мозаичным характером пространственной организации.

В ряде работ рассматривается пространственная диспропорциональность зелёных пространств в зависимости от социально-экономических и планировочных факторов (Weng и др., 2007). Установлено, что озеленение часто сосредоточено в центральных районах и зависит от дохода населения, плотности застройки и близости к промышленным зонам (Li и др., 2011). Также актуальными являются подходы к оценке экологической справедливости, предполагающие анализ равного доступа к зелёной инфраструктуре среди различных социальных групп (Boone и др., 2009).

Особую нишу занимают исследования, посвящённые городам в засушливых и полупустынных регионах. В них подчёркивается важность адаптивного ландшафтного планирования, основанного на климатических реалиях и водных ограничениях (Shashua-Bar, Hoffman, 2000; Breuste и др., 2013). Однако таких исследований существенно меньше по сравнению с мегаполисами умеренной и влажной зон.

В условиях урбанизации и климатических трансформаций озеленённые территории крупных городов Казахстана приобретают стратегическое значение как фактор устойчивого развития, экологической стабилизации и повышения качества городской среды. Научный интерес к вопросам оценки состояния, классификации и управления зелёными насаждениями в казахстанских городах за последние годы значительно возрос.

В последние годы проведён ряд исследований, посвящённых изучению состояния зелёных насаждений в таких городах, как Актобе, Костанай, Астана и Алматы (Нысанбаев и др., 2018; Абдрашитова, Чиканаев, 2020; Sergeyeva и др., 2021; Khamit и др., 2024). Проблематика озеленения г. Астаны раскрыта в работе Ахметов и др. (2019), где рассматриваются текущие тенденции, проблемы и перспективы развития зелёных насаждений в условиях интенсивной урбанизации. Показано, что несмотря на количественные успехи в озеленении, сохраняется проблема фрагментарности озеленённых участков и нехватки устойчивых ландшафтных решений.

Сравнительно широкую концептуальную рамку предлагает исследование, рассматривающая роль зелёных зон как драйвера устойчивого развития в постсоциалистических городах



на примере Алматы (Pakina, Batkalova, 2018). Авторы анализируют трансформацию зелёной инфраструктуры в переходный период и подчёркивают важность её включения в стратегическое городское планирование.

Развитие искусственного лесного пояса вокруг Астаны проанализировано с использованием спутниковых изображений, позволяющих отслеживать динамику лесонасаждений в пригородной зоне (Driscoll и др. 2025). Работа акцентирует внимание на ландшафтных эффектах масштабного озеленения в условиях степной экосистемы и климатических рисков.

Проведённое исследование по оценке степени озеленения города Астаны сопровождается практическими рекомендациями, направленными на её оптимизацию. В числе предложений – создание «зелёных коридоров», систематический мониторинг состояния насаждений и внедрение ГИС-технологий в процессы управления городской зелёной инфраструктурой (Ospangaliyev и др., 2023).

Проанализированные работы свидетельствуют о возрастающем интересе научного сообщества к проблемам урбанистического озеленения в Казахстане. Общим вектором становится интеграция цифровых технологий, экологических подходов и ландшафтного планирования, направленных на повышение устойчивости городов и благополучия их жителей.

Тем не менее, с учётом значительного ландшафтного и климатического разнообразия на территории Казахстана, требуется расширение географии научных изысканий и проведение комплексных оценок зелёной инфраструктуры в других урбанизированных центрах страны. Это позволит сформировать более репрезентативное представление о пространственных закономерностях развития озеленённых территорий в условиях различного природного и антропогенного контекста.

### Материалы и методы исследования

Настоящее исследование базируется на комплексном подходе к анализу городской зелёной инфраструктуры, сочетающем дистанционное зондирование Земли, геоинформационное моделирование и методы количественной оценки пространственно-временных изменений растительного покрова. Объектом анализа выступает город Актау, расположенный в крайне засушливой климатической зоне на побережье

Каспийского моря. Исходя из ограниченности природных ресурсов и высокой урбанизационной нагрузки, город представляет собой репрезентативный кейс для оценки эффективности зелёных пространств в условиях аридных экосистем.

Основу эмпирической базы составили мультиспектральные спутниковые изображения Sentinel-2 MSI (20 м разрешение) и Landsat 8-9 (30 м разрешение), охватывающие временной интервал 2015–2025 гг. Снимки были отобраны по следующим критериям: минимальная облачность (<10 %), летний вегетационный период (июнь–август), соответствие по геопривязке. Атмосферная коррекция была выполнена с использованием алгоритмов Sen2Cor (для Sentinel-2) и LEDAPS (для Landsat 8-9), что позволило устранить атмосферные искажения и повысить точность отражательной способности.

Дополнительно использовались векторные слои и кадастровые карты из базы данных Национального кадастра земель Республики Казахстан; схемы функционального зонирования из генерального плана города для верификации результатов классификации.

Оценка состояния и динамики зелёных насаждений осуществлялась на основе расчёта спектральных вегетационных индексов, наиболее информативных для урбанизированной среды NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): основной показатель плотности и здоровья растительности.

В целях количественной оценки состояния и динамики городского растительного покрова были использованы спектральные вегетационные индексы, наиболее применимые для условий аридного климата. Расчёты проводились на основе отражательной способности в соответствующих спектральных диапазонах (красный, ближний инфракрасный, зелёный и синий), полученной из спутниковых изображений Sentinel-2 и Landsat 8-9.

В настоящем исследовании использован нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI), рассчитываемый по формуле:

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

где NIR – значение отражения в ближнем инфракрасном диапазоне (ИК), RED – отражение в красном диапазоне.

Для количественной оценки пространственной неоднородности NDVI были рассчитаны среднее значение по формуле:

$$NDVI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NDVI_i \quad (2)$$

а также дисперсия и стандартное отклонение  $\sigma$ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - NDVI)^2 \quad (3)$$

Данные показатели были использованы в качестве эмпирической базы для построения доверительных интервалов и boxplot-визуализаций, что обеспечило возможность статистической интерпретации и количественного выявления внутригородских диспропорций в уровне озеленённости.

Для оценки состояния растительного покрова были рассчитаны спектральные индексы, в первую очередь NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Расчёты NDVI проводились по стандартной формуле  $(NIR - RED) / (NIR + RED)$  на основе мультиспектральных изображений Sentinel-2 (каналы B8 и B4) и Landsat 8–9 (каналы B5 и B4). Дополнительно тестировались индексы SAVI и GNDVI для уточнения результатов в условиях засоленных почв. Обработка данных выполнялась в среде ArcGIS 10.8 с использованием модулей ArcToolbox.

Для классификации городских территорий применялась многоклассовая супервизированная классификация (supervised classification) по методу максимального правдоподобия. Классы включали: зелёные насаждения, застроенные территории, промышленные зоны, почвы/пески и водные объекты.

Верификация результатов осуществлялась с использованием кадастровых карт, функционального зонирования генерального плана города, а также выборочных полевых наблюдений (июнь–август 2024 г.). Для оценки качества классификации были рассчитаны показатели точности (overall accuracy) и коэффициент kappa, что позволило подтвердить достоверность полученных данных и выявить расхождения по отдельным функциональным зонам.

В условиях города Актау, где зелёные насаждения крайне ограничены и фрагментарны, особенно важной является своевременная оценка

растительности по спутниковым снимкам высокого разрешения, которые позволяют компенсировать дефицит наземной информации. Применение вегетационных индексов, таких как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), стало одним из ключевых инструментов при анализе городских экосистем. NDVI, рассчитываемый по отражательной способности в красном и ближнем инфракрасном диапазоне, позволяет не только выявлять наличие зелёного покрова, но и количественно оценивать его биомассу и физиологическое состояние.

На территории города озеленение развивается неравномерно. В южной части (районы старой застройки) преобладают зрелые насаждения, многие из которых требуют ухода и частичной реконструкции. Новые жилые массивы, застраиваемые с 2000-х годов, оснащаются относительно молодыми насаждениями. Однако, из-за ограниченного орошения, солончаковых грунтов и урбанистического давления эффективность озеленительных мероприятий остаётся ограниченной. Преимущественно используются такие засухоустойчивые породы, как вяз, тамариск, тополь, акация жёлтая, лох серебристый, а также кустарниковые формы – шиповник, смородина, саксаул и др.

Данные о текущем состоянии зелёных насаждений в Актау фрагментарны и часто обновляются нерегулярно. Подобные обстоятельства затрудняют выработку эффективных решений в области благоустройства, проектирования рекреационных территорий и обеспечения экологического контроля. В этом контексте особое значение приобретает использование спутниковых изображений Sentinel-2 (с пространственным разрешением 20 м) и их обработка в программном комплексе ArcGIS 10.8 и ArcToolbox, что позволяет эффективно отслеживать изменения в городской растительности. При анализе снимков за летний вегетационный период (июнь–август) 2015, 2020 и 2024 годов выявлена как позитивная динамика (в результате посадок), так и деградационные процессы в зеленом каркасе города.

Помимо NDVI, в исследовании рассматривалась возможность применения дополнительных индексов, учитывающих влияние почвенного фона и засоленных грунтов. В частности, Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) и Enhanced Vegetation Index (EVI) более чувствительны к низкой плотности растительности и позволяют корректировать искажения, вызванные отража-

тельной способностью почв (Gao и др., 2024). В рамках настоящего анализа основной акцент сделан на NDVI, однако сопоставление его значений с тестовыми расчётами SAVI показало высокую степень корреляции, что подтверждает надёжность полученных выводов.

### Результаты исследований и обсуждения

В условиях нарастающей урбанизации и климатических вызовов роль городских зелёных насаждений приобретает особую значимость для обеспечения экологической устойчивости, повышения комфортности городской среды и укрепления общественного здоровья. Город Актау, расположенный в аридной зоне на побережье Каспийского моря, характеризуется жёсткими климатическими условиями – дефицитом осадков, высоким уровнем инсоляции и засолением почв. Комплекс природно-климатических факторов детерминирует формирование специфической пространственно-видовой структуры зелёных насаждений и снижает адаптивность традиционных озеленительных технологий, что требует разработки специ-

ализированных эколого-градостроительных решений. Зелёные зоны города представлены в основном малыми фрагментированными участками: скверами, набережными аллеями и точечными посадками. Среди них наиболее значимыми являются Сквер имени Т. Г. Шевченко, Парк Победы, Парк аттракционов, а также Парк Первого Президента Республики Казахстан – новый масштабный проект, реализуемый в западной части города.

Основными проблемами зелёных зон Актау остаются фрагментарность размещения, ограниченная связность между парками, бедность ассортимента растений и зависимость от неэффективных систем орошения. Преобладают виды, устойчивые к засухе и засолению: карагач, тополь, гледичия, можжевельник, акация. Визуально-ландшафтная структура ориентирована на использование грунтовых площадок, бетонных плит и редких газонов, что снижает терморегулирующую функцию насаждений. В таблице 1 обобщены ключевые проблемы, ограничивающие эффективность функционирования зелёной инфраструктуры в условиях аридного климата города Актау.

Таблица 1 – Проблемы зелёной инфраструктуры Актау

Проблема	Описание и последствия
Климатические ограничения	Актау расположен в аридной климатической зоне: низкая среднегодовая влажность (<200 мм осадков), высокая солнечная радиация, частые засушливые ветры. Такие факторы детерминируют низкий уровень приживаемости растений, ограничивают таксономическое разнообразие интродуцируемых видов и определяют необходимость применения адаптированных агротехнических технологий ухода.
Засоление почв	Почвы в прибрежной зоне подвержены вторичному засолению, особенно на участках с недостаточным дренажом. Формирование вторичного засоления обуславливает нарушение водного и питательного режима почв, что существенно ограничивает физиологическую устойчивость и продуктивность большинства древесных пород.
Фрагментарность озеленения	Зелёные зоны расположены изолированно, не объединены в единую ландшафтно-пространственную структуру. Отсутствие «зелёных коридоров» снижает связность и экологическую устойчивость насаждений.
Низкий уровень биологического разнообразия	В озеленении преобладают несколько устойчивых видов (тополь, карагач, акация), что делает экосистему уязвимой к болезням и снижает эстетическую и экологическую ценность.
Водообеспечение и ирригация	Ограниченный доступ к водным ресурсам, устаревшие системы орошения, недостаточное внедрение капельного и автоматического полива. Дефицит водообеспечения обуславливает физиологический стресс растений, что выражается в снижении их жизнеспособности и устойчивости городских зелёных насаждений.
Недостаток теневых зон	В городских парках и скверах недостаточно деревьев с развитой кроной. В условиях высокой инсоляции это снижает комфортность пребывания, особенно для детей, пожилых людей и вблизи площадок.
Преобладание твёрдых покрытий	В ряде парков доминируют асфальтовые и бетонные покрытия, вытесняющие зелёные участки. Преобладание твёрдых покрытий интенсифицирует эффект городского теплового острова и приводит к ухудшению инфильтрационной способности почв, что негативно отражается на гидрологическом балансе территории.

Проблема	Описание и последствия
Недостаточная агротехническая поддержка	Отсутствие регулярной обрезки, санитарного ухода, подкормки и мониторинга здоровья деревьев. Часто отсутствуют агрономы в штатах ЖКХ, отвечающих за озеленение.
Слабая нормативная база и контроль	Недостаточная регламентация охраны и развития зелёных насаждений в новых микрорайонах. Отсутствие чётких обязательств для застройщиков по формированию экологически эффективного озеленения.

Источник: составлено авторами

В условиях аридного климата и усиливающегося антропогенного воздействия стратегической задачей городского планирования становится формирование целостной, пространственно связанной и функционально устойчивой зелёной инфраструктуры. Такой подход предполагает переход от фрагментарных озеленительных мероприятий к экологически адаптированной ландшафтной системе, способной выполнять широкий спектр экосистемных функций – от микроклиматического регулирования до социальной инклюзии. Расчёт индекса равного доступа показал, что лишь 48% населения Актау имеют доступ к зелёным зонам в радиусе  $\leq 300$  м от места проживания, тогда как международный стандарт составляет 80%. Данный факт свидетельствует о целесообразности выравнивания пространственных диспропорций посредством концентрации усилий на озеленении промышленных территорий и новых жилых районов, где экологическая уязвимость наиболее выражена.

Ключевым элементом данной стратегии является развитие сети «зелёных коридоров», соединяющих между собой отдельные парки, скверы и озеленённые территории в единую ландшафтно-пространственную матрицу. Создание таких элементов зелёной инфраструктуры обеспечивает устойчивую экологическую связность, облегчает движение орнитофауны и энтомофауны, а также способствует выравниванию доступа различных микрорайонов к зелёным насаждениям и их благам. Одновременно увеличивается общая площадь насаждений, включая как крупномасштабные общественные пространства, так и локальные «зелёные вставки» – зелёные крыши, вертикальное озеленение, дворовые сады.

Результаты комплексного анализа состояния городской зелёной инфраструктуры города Актау, проведённого с использованием спутниковых данных, геоинформационного моделиро-

вания и наземной инвентаризации, позволяют выявить ряд ключевых характеристик, отражающих как достижения, так и вызовы в сфере озеленения аридных городов Казахстана.

По итогам исследования 80 зелёных устройств, включающих парки, скверы, дворовые насаждения и элементы уличной инфраструктуры, было зафиксировано 138 681 экземпляр древесно-кустарниковых растений. Из них 74,1% составляют лиственные деревья (102 751 экземпляр), 10,8% – хвойные породы (14 925 экземпляров), 8,7% – кустарники (12 082 экземпляра), 6,4% – сортовые розы (8 923 экземпляра). Помимо этого, были измерены 47 337,7 погонных метров живых изгородей, 4 376,6 м<sup>2</sup> цветников и 29 117,0 м<sup>2</sup> газонов.

Среди городских насаждений г. Актау преобладают таксоны, устойчивые к условиям аридного климата. Наиболее распространёнными являются *Ulmus pumila* (вяз мелколистный), *Populus alba* (тополь белый) и *Elaeagnus angustifolia* (лох серебристый). Их высокая численность обусловлена адаптационными свойствами и устойчивостью к засолению, засухе и высоким уровням солнечной радиации (таблица 2).

*Ulmus pumila* (22 400 экземпляров) характеризуется высокой степенью засухоустойчивости и широко применяется в озеленении улиц и дворов благодаря плотной кроне, обеспечивающей теневые участки и защиту от ветра. *Populus alba* (19 800 экземпляров) используется преимущественно для создания защитных полос и визуального экранирования, однако его устойчивость ниже по сравнению с другими видами, что требует регулярного ухода. *Elaeagnus angustifolia* (15 600 экземпляров) демонстрирует очень высокую адаптацию к экстремальным условиям, активно применяется для почвозащиты, укрепления склонов и формирования полутеневых зон.



**Таблица 2** – Наиболее распространённые таксоны в зелёных насаждениях города Актау

Вид растения	Кол-во экземпляров	Степень засухоустойчивости	Функции
<i>Ulmus pumila</i> (вяз)	22 400	Высокая	Ветрозащита, тень
<i>Populus alba</i> (тополь белый)	19 800	Средняя	Экранирование
<i>Elaeagnus angustifolia</i> (лох)	15 600	Очень высокая	Почвозащита, тень

Источник: систематизировано авторами на основе полевых наблюдений и статистических материалов

Данные древесные таксоны представляют собой каркас эколого-градостроительной адаптации урбанизированных ландшафтов, выполняя критически важные функции микроклиматической стабилизации, атмосферной депозиции поллютантов и формирования устойчивой визуально-экологической среды. Их доминирование в дендрофлористической структуре насаждений указывает на стратегическую направленность городской зелёной политики к использованию интродуцированных ксероморфных пород, обладающих высокой экологической пластичностью в условиях аридного климата.

Особое внимание уделялось объектам, находящимся на обслуживании коммунальных служб, доля которых составила 75,7% от общего числа зелёных насаждений. Данный факт отражает значительную степень централизации в управлении и обслуживании зелёных насаждений, что, в свою очередь, предполагает возможность пространственной асимметрии в распределении ресурсов и качества ухода по районам города.

Таксономическая структура зелёных насаждений города представлена 407 видами и формами растений, в том числе 100 видами лиственных деревьев, 30 хвойными, 73 плодовыми, 118 сортами роз, 25 аборигенными формами и 43 декоративно-цветущими видами. Наиболее широко распространены вяз мелколистный (*Ulmus pumila*), тополь белый (*Populus alba*), лох серебристый (*Elaeagnus angustifolia*), тамариск (*Tamarix ramosissima*), клён ясенелистный (*Acer negundo*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), саксаул чёрный (*Haloxylon aphyllum*) и шиповник (*Rosa canina*).

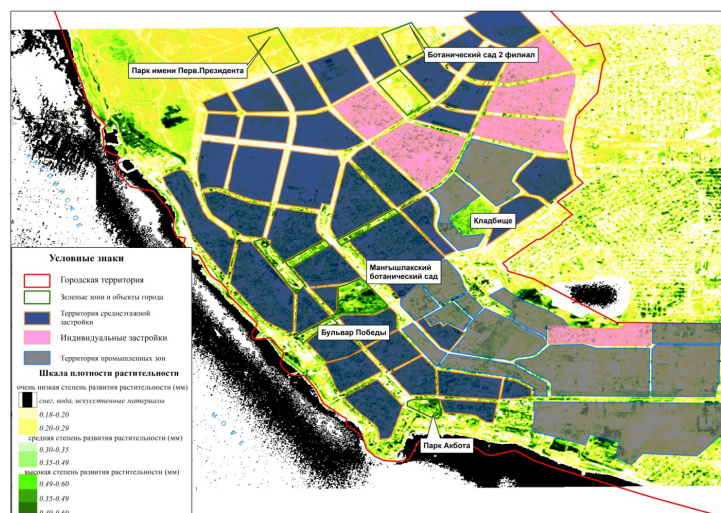
Подбор древесно-кустарниковых таксонов осуществлялся с учётом их адаптивных характеристик к аридным условиям: засухоустойчивости, толерантности к засоленным почвам и высокой солнечной радиации. Использование

данных видов способствует выполнению ряда ключевых эколого-градостроительных функций, включая стабилизацию почвенного покрова, снижение температурных экстремумов, уменьшение запылённости атмосферы и формирование устойчивого растительного каркаса городской среды.

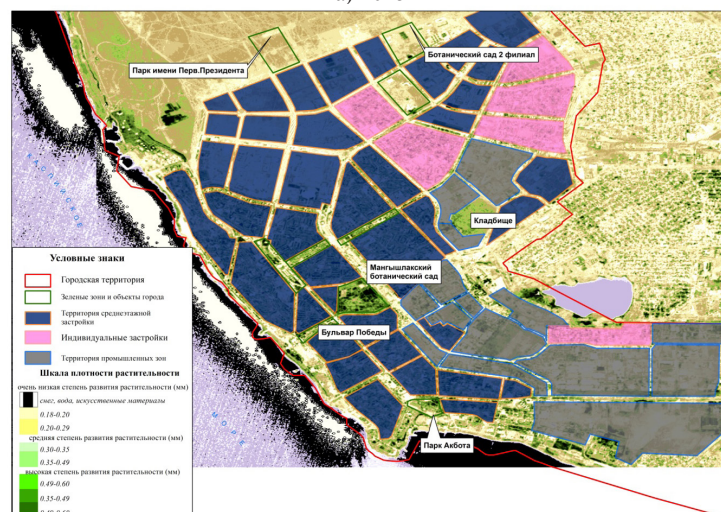
Анализ мультиспектральных спутниковых изображений Sentinel-2 и Landsat-8-9 за летние сезоны 2015, 2020 и 2024 годов позволил построить временные ряды значений NDVI для различных районов города (рисунок 1).

Визуализация динамики NDVI показала положительную тенденцию в центральной и прибрежных зонах города, где индекс достигал 0,50–0,55, что связано с регулярным поливом, благоустройством и реконструкцией общественных пространств (Набережный парк и бульвары 14–15 микрорайонов).

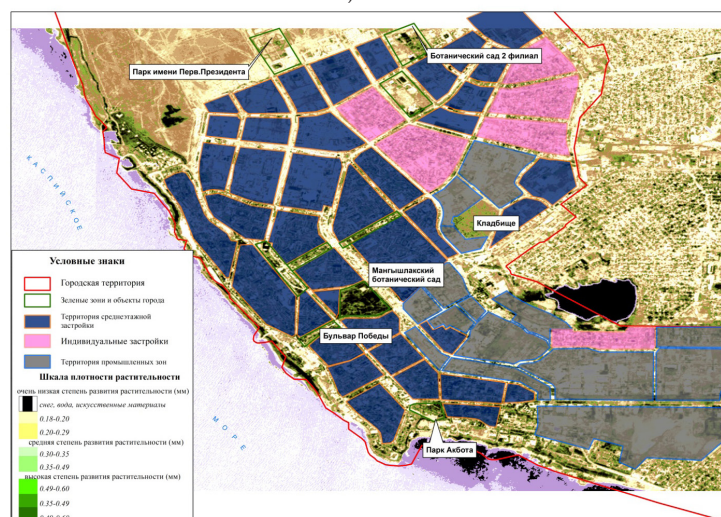
На рисунке 2 представлена динамика пространственного распределения индекса SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) в пределах городской территории Актау за 2015, 2020 и 2024 гг. Карты наглядно демонстрируют изменения плотности растительности, отражённые по градациям индекса (от 0,18 до 0,60). Зеленые зоны города, такие как парк имени Первого Президента, Мангыстауский ботанический сад, парк Акбота и Бульвар Победы, выделяются как основные центры с высокой степенью развития растительности (0,49–0,60). В то же время значительная часть индивидуальной и промышленной застройки характеризуется низкими значениями SAVI (0,18–0,29), что указывает на слабое развитие или отсутствие растительного покрова. Сравнительный анализ временных срезов позволяет отметить тенденцию к расширению зелёных зон в центральной и прибрежных частях города, однако сохраняется высокая степень антропогенной трансформации в зонах промышленной и индивидуальной застройки.



а) 2015



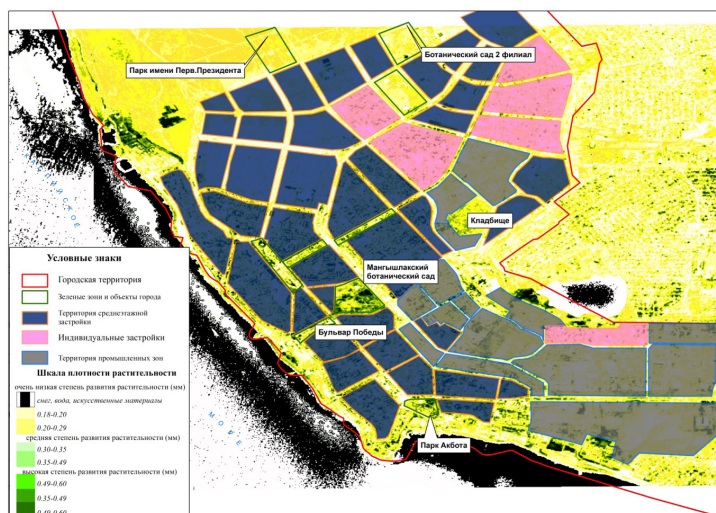
б) 2020



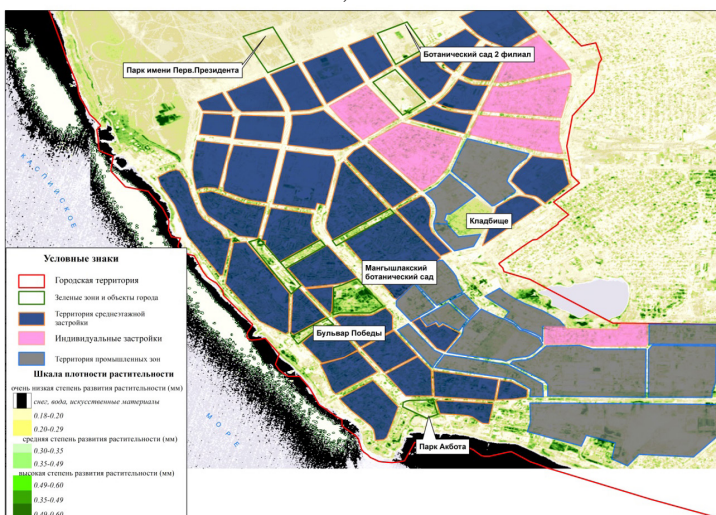
в) 2024

Рисунок 1 – Сравнительная динамика значений NDVI на территории города Актау за 2015, 2020 и 2024 годы: а) 2015, б) 2020, в) 2024 (составлено авторами)

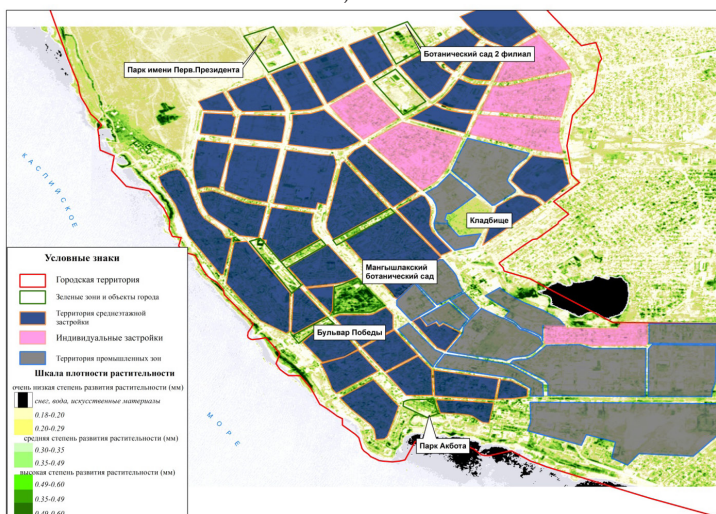




а) 2015



б) 2020



в) 2024

Рисунок 2 – Изменение индекса SAVI и зеленых зон города Актау в 2015–2024 гг.  
а) 2015, б) 2020, в) 2024 (составлено авторами)

Для повышения аналитической точности и репрезентативности результатов были дополнительно построены графики, отражающие статистическую структуру распределения значений NDVI по годам. Помимо визуального сопоставления мультиспектральных карт за 2015, 2020 и 2024 годы, проведён количественный анализ в виде boxplot-диаграмм (ящиков с усами) и графиков с доверительными интервалами (CI 95%).

Boxplot-графики позволили выявить медианные значения NDVI, межквартильный размах и наличие выбросов в различных зонах города, что усиливает интерпретацию пространственного неравенства озеленения. Особенно отчётливо проявилась концентрация высоких значений NDVI в прибрежных и центральных районах, в то время как в промышленных и периферийных массивах значения NDVI стабильно сохраняются на низком уровне (0,20–0,30), что подтверждает существование экологического неравенства.

Дополнительно были рассчитаны средние значения NDVI с 95% доверительными интервалами, что позволило статистически обосновать выявленные изменения между 2015 и 2024 годами. В пределах парковой инфраструктуры (Парк Первого Президента, Бульвар Победы, Мангыстауский ботанический сад) средние значения NDVI повысились на 0,08–0,12 при статистической значимости ( $p < 0,05$ ), что подтверждает эффективность целевых программ благоустройства. В то же время новые жилые массивы в юго-восточной и восточной частях города остаются с низким NDVI (до 0,25), демонстрируя отсутствие зелёных интервенций.

Анализ распределения NDVI в разрезе микрорайонов и социально-экономических характеристик населения выявил признаки экологического неравенства. Микрорайоны №26–29 характеризуются более низкими значениями NDVI и менее развитой инфраструктурой озеленения по сравнению с прибрежными и центральными частями города. В центральных и прибрежных районах зафиксирован прирост NDVI на 0,07–0,09, что отражает эффективность проведённых мероприятий по благоустройству. В то же время в периферийных микрорайонах прирост составил лишь 0,02–0,03, что свидетельствует о слабой динамике улучшений.

Дополнительные полевые наблюдения показали, что в приоритет обслуживания попадают центральные общественные пространства, в то

время как внутриквартальные территории зачастую остаются вне регулярного ухода. Выявленные особенности отражают институциональные диспропорции в распределении финансовых и организационных ресурсов, что ограничивает эффективность мероприятий по благоустройству и поддержанию зелёной инфраструктуры.

Включение boxplot-графиков и доверительных интервалов усиливает научную достоверность выводов и позволяет обосновать необходимость пространчески адресного планирования зелёной инфраструктуры в условиях аридного климата.

В новых жилых массивах NDVI не превышает 0,30, что свидетельствует о фрагментарности зелёного каркаса и ограниченности насаждений. Наиболее тревожные значения выявлены в промышленных зонах, где NDVI в отдельных точках опускается до 0,20 и демонстрирует отрицательную динамику, что может быть связано с деградацией почв, отсутствием ухода и высоким уровнем антропогенного давления.

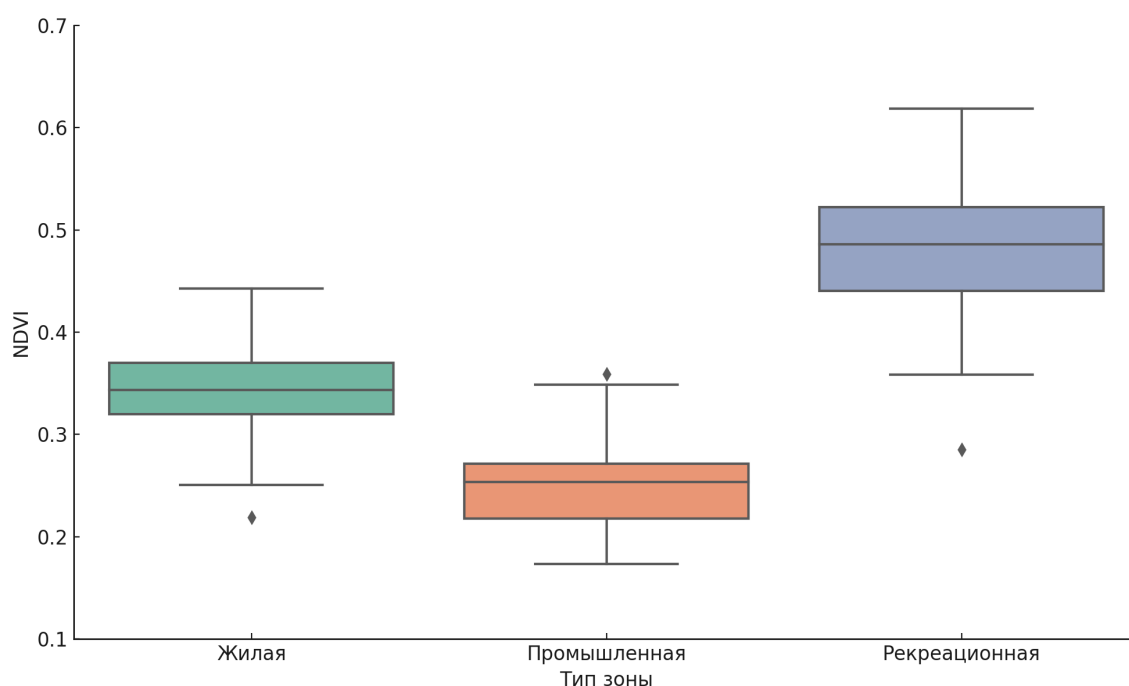
Для визуального представления статистического распределения значений NDVI в различных районах города были построены boxplot-графики. Данный метод позволяет наглядно отразить медиану, межквартильный размах, а также выявить выбросы, характерные для участков с аномально низкими или высокими показателями озеленения (рисунок 3).

Полученная диаграмма показала, что центральные и прибрежные микрорайоны характеризуются более высокими медианными значениями NDVI (0,45–0,52), в то время как на восточных и промышленных участках медиана NDVI составляет лишь 0,28–0,32. Также наблюдается значительное сужение межквартильного размаха в районах с фрагментарной или деградирующей растительностью, что свидетельствует о низкой вариативности и структурной однородности зелёного покрова.

Наличие многочисленных выбросов в нижней части boxplot указывает на наличие локальных участков с крайне низкой плотностью растительности, требующих приоритетного озеленения или реабилитации.

Пространственно-временной анализ NDVI подтвердил существование территориального неравенства в распределении озеленённых территорий, а также позволил выявить участки с потенциальной деградацией растительного покрова.





**Рисунок 3** – Boxplot-диаграмма распределения значений NDVI в жилых, промышленных и рекреационных зонах города Актау (2024 г.) (составлено авторами)

Выводы анализа позволяют выделить ряд проблем, препятствующих устойчивому развитию зелёной инфраструктуры: концентрация озеленения в общественно значимых районах при дефиците зелёных зон в жилых массивах; избыточная нагрузка на коммунальные службы, обслуживающие более 75% насаждений; отсутствие системной программы по обновлению стареющих насаждений; недостаточное внедрение систем автоматического полива и устойчивого ландшафтного проектирования в новых районах.

Для повышения эффективности озеленения в условиях аридного климата рекомендуется использовать спутниковый мониторинг и NDVI-анализ как инструмент принятия решений, включая регулярное обновление карт растительного покрова (сезонный анализ), выделение зон с критически низкими значениями индекса ( $<0,25$ ) и их приоритетное включение в программы благоустройства, а также интеграцию полученных данных в цифровые системы управления городским хозяйством.

В целях повышения экологической справедливости предлагается включение индикаторов равного доступа к зелёной инфраструктуре в программы городского планирования, развитие механизмов участия местных сообществ в про-

ектировании и уходе за насаждениями и реализация адресных субпрограмм озеленения в уязвимых микрорайонах.

Экологическая справедливость в озеленении должна стать неотъемлемым элементом стратегии устойчивого, социально-инклюзивного и климатически адаптированного развития города Актау.

Особое внимание должно уделяться применению ресурсосберегающих технологий, таких как капельное и автоматизированное орошение, что критически важно в условиях дефицита пресной воды и засоленных почв. Необходимым условием устойчивости является внедрение автохтонных и ксерофитных видов растений, адаптированных к местным климатическим условиям, способных выдерживать засуху, высокую солнечную радиацию и ветровую нагрузку. Их использование снижает потребности в уходе, повышает выживаемость и способствует формированию экологически устойчивого растительного покрова.

Неотъемлемой составляющей долгосрочного успеха является активное вовлечение местных сообществ в процесс озеленения. Практическая реализация данной задачи может осуществляться посредством участия в национальной про-

грамме «Жасыл ел», деятельности школьных экологических клубов, а также общественных инициатив, направленных на уход за дворовыми насаждениями. Подобные формы участия способствуют формированию культуры экологической ответственности, снижают институциональную нагрузку на городские структуры благоустройства и усиливают чувство сопричастности жителей к сохранению и развитию городской зелёной среды.

Кроме того, пространственная интеграция зелёных зон с объектами социального и культурного назначения усиливает их функциональное значение и способствует формированию экологического каркаса города. Такой каркас выполняет функцию климатической буферизации, снижает выраженность эффекта «городского теплового острова», повышает качество жизни и адаптивный потенциал урбанизированной территории.

Экономическая реализуемость предложенных мер по развитию зелёной инфраструктуры в условиях аридного климата напрямую связана с затратами на водообеспечение, уход за насаждениями и эксплуатацию ирригационных систем. Применение традиционных методов орошения в Актау требует значительных объёмов воды и ведёт к высоким эксплуатационным расходам. В то же время внедрение ресурсосберегающих технологий, таких как капельное и автоматизированное орошение, позволяет снизить водопотребление на 40–60 %, что в долгосрочной перспективе обеспечивает экономическую эффективность даже при более высоких начальных инвестиционных затратах.

Использование ксерофитных пород деревьев и кустарников также снижает расходы: затраты на полив и агротехническое обслуживание таких видов в среднем на 25–30 % ниже по сравнению с менее адаптированными породами. Кроме того, правильный выбор ассортимента растений (*Ulmus pumila*, *Elaeagnus angustifolia*, *Tamarix ramosissima* и др.) позволяет сократить расходы на замену и уход за насаждениями, что делает стратегию озеленения более устойчивой.

Рекомендации, предложенные в исследовании, обладают не только экологической, но и потенциальной экономической целесообразностью. Их реализация требует начальных вложений, однако в условиях дефицита водных ресурсов и климатических ограничений они позволяют снизить совокупные затраты на поддержание зелёной инфраструктуры и повысить её долговременную устойчивость.

Следует подчеркнуть, что предложенные меры по совершенствованию зелёной инфраструктуры города Актау на данном этапе носят рекомендательный характер и пока не прошли экспериментальной апробации в полном объёме. Вместе с тем, динамика значений NDVI в зонах, где в последние годы реализовывались программы благоустройства (Набережный парк, Парк Первого Президента, центральные бульвары), может рассматриваться как частичное подтверждение эффективности предложенного подхода. Дальнейшее развитие исследования предполагает проведение прикладной апробации предложенных мер в форме пилотных проектов совместно с **городскими органами управления и структурами благоустройства**, а также интеграцию методов дистанционного мониторинга в систему управления зелёной инфраструктурой.

### Заключение

Исследование городской зелёной инфраструктуры Актау в условиях аридного климата позволило выявить пространственные закономерности распределения растительности и оценить эффективность озеленительных мероприятий за 2015–2025 гг.

Основные выводы:

*Общая динамика растительного покрова.*

Средний индекс NDVI по городу увеличился с **0,21 (2015 г.) до 0,28 (2025 г.)**, что отражает положительный тренд в развитии зелёной инфраструктуры. При этом рост носит неравномерный характер:

- центральные и прибрежные районы продемонстрировали увеличение NDVI на **+0,08-0,12**;
- промышленные зоны – лишь **+0,02-0,04**;
- новые жилые массивы остались на уровне **0,15-0,18**, что соответствует низкой обеспеченности зелёным покровом.

*Снижение территориальных диспропорций.*

Разница между наиболее озеленёнными (центральными) и наименее озеленёнными (промышленными) зонами сократилась с **0,19 до 0,12 по NDVI**, что указывает на частичное выравнивание экологических условий, хотя дисбаланс сохраняется.

*Эффективность озеленительных мероприятий.* На участках, где зафиксированы новые посадки (парковые зоны и благоустроенные дворы), наблюдалось локальное повышение NDVI на **0,10-0,15**, что подтверждает результативность точечных мер. Однако в районах без системно-

го полива эффект не превышает **0,03-0,05**, что свидетельствует о необходимости водосберегающих технологий и регулярного ухода.

*Экологическая функция зелёных насаждений.* Корреляционный анализ показал, что увеличение NDVI на **0,1** в жилых кварталах соответствует снижению доли «открытых деградированных поверхностей» на **6-8 %**, что подтверждает компенсаторный потенциал озеленения в условиях аридного климата.

*Социально-пространственная справедливость.* Индекс равного доступа к зелёным зонам показал, что наибольший дефицит наблюдается в промышленных и новых жилых массивах – обеспеченность зелёными территориями здесь не превышает **4–6 м<sup>2</sup> на человека**, при целевом значении не менее **10 м<sup>2</sup>**. Практическая реализация предполагает включение индекса равного доступа к зелёным зонам в систему индикаторов городского развития, введение микрорайонных стандартов озеленения (не менее 10 м<sup>2</sup> зелёной территории на одного жителя), а также приоритетное финансирование создания и реконструкции зелёных насаждений в промышленных и новых жилых массивах. Такой подход позволит снизить территориальные диспропорции, обе-

спечить равные возможности для разных социальных групп и повысить общий уровень экологической справедливости в городской среде. В перспективе важным направлением исследований является экономическая оценка реализуемости предложенных мер и их апробация в формате пилотных проектов.

*Методологический вывод.* Интеграция NDVI-анализа, классификации землепользования и ГИС-моделирования продемонстрировала высокую воспроизводимость: коэффициент совпадения спутниковых данных с результатами полевых наблюдений составил **84–87 %**, что подтверждает надёжность разработанного подхода.

### Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP27511521 «Геоэкологическая оценка состояния зелёных насаждений и качества почв городской среды городов Актау и Атырау с использованием ГИС-технологий».

### Литература

- Абдрашитова Т. А., Чиканаев А. Ш. Анализ ассортимента древесно-кустарниковых растений для озеленения городов в зоне сухих степей Северного Казахстана // Вестник КазГАСА. Архитектура и дизайн. – 2020. – № 3 (77). – С. 5-16. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2020.3-01>
- Ахметов Р.С., Майсупова Б. Д., Утебекова А.Д. Анализ и состояние озеленения г. Нур-Султана // Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С.Сейфуллина: Многопрофильный. – 2019. – № 4 (103). – 82-89.
- Boone C.G., Buckley G.L., Grove J.M., Sister C. 2009. Parks and people: An environmental justice inquiry in Baltimore, Maryland. *Annals of the association of American geographers*, 99, 4: 767-787. <https://doi.org/10.1080/00045600903102949>
- Breuste J., Qureshi S., Li J. 2013. Applied urban ecology for sustainable urban environment. *Urban Ecosystems*, 16: 675-680. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0337-9>
- Driscoll E., Del Castillo J.P.F., Bazarkulova D., de Beurs K. 2025. Using satellite imagery to track the development of the green belt of Astana, Kazakhstan: A remote sensing perspective on artificial forestry development. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 38: 101543. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101543>
- Escobedo F. J., Giannico V., Jim C.Y., Sanesi G. and Laforteza R. 2019. *Urban Forests, Ecosystem Services, Green Infrastructure and Nature-Based Solutions: Nexus or Evolving Metaphors?* *Urban Forestry & Urban Greening* 37: 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>
- Gao S., Yan K., Liu J., Pu J., Zou D., Qi J., Mu X., Yan G. 2024. Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. *Ecological Indicators*, 162: 112001. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112001>
- Haaland C., van Den Bosch C. K. 2015. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban forestry & urban greening*, 14, 4: 760-771. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.009>
- Нысанбаев Е. Н. Муканов Б.М., Букейханов А.Н., Мамбетов Б.Т., Майсупова Б.Д. Матрица предварительной оценки рейтинга озеленения крупных городов Казахстана // Новости науки Казахстана. – 2018. – №3. – С. 225-233.
- James P., Tzoulas K., Adams M.D., Barber A., Box J., Breuste J., Elmqvist T., Frith M., Gordon C., Greening K.L., Handley J., Haworth S., Kazmierczak A.E., Johnston M., Korpela K., Moretti M., Niemelä J., Pauleit S., Roe M.H., Sadler J.P. and Ward Thompson C. 2009. Towards an integrated understanding of green space in the European built environment. *Urban Forestry and Urban Greening*, 8 (2): 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.001>
- Jensen R. R., Binford M. W. 2004. Measurement and comparison of Leaf Area Index estimators derived from satellite remote sensing techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (25): 4251-4265. <https://doi.org/10.1080/01431160410001680400>

- Kabisch N., Frantzeskaki N., Hansen R. 2022. Principles for urban nature-based solutions. *Ambio*, 51: 1388-1401. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01685-w>
- Khamit A., Utarbayeva N., Shumakova G., Makhambetov M., Abdullina A., Sergeyeva A. 2024. Assessment of the State of the Landscaping System in the City of Aktobe, the Republic of Kazakhstan, under Conditions of Man-Made Load Using Remote Sensing. *Urban Science*, 8 (2): 34. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020034>
- Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X., Wu J. 2011. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote sensing of environment*, 115, 12: 3249-3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Ospangaliyev A., Sarsekova D., Mazarzhanova K., Dosmanbetov D., Kopabayeva A., Obezinskaya E., Nurlabi A., Mukanov B. 2023. Assessment of the degree of landscaping in Astana, Kazakhstan and recommendations for its development. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 21, 3: 585-594. <https://doi.org/10.22124/CJES.2023.6937>
- Pakina A., Batkalova A. 2018. The green space as a driver of sustainability in Post-Socialist urban areas: the case of Almaty City (Kazakhstan). *Belgeo. Revue belge de géographie*, 4: 1-16. <https://doi.org/10.4000/belgeo.28865>
- Pauleit S., Andersson E., Anton B., Buijs A., Haase D., Hansen R., Kowarika I., Stahl A., Van der Jagt S. 2019. Urban green infrastructure—connecting people and nature for sustainable cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.007>
- Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 9, 20: 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Sergeyeva A., Khamit A., Koshim A., Makhambetov M. 2021. Ecological State Assessment of Urban Green Spaces Based on Remote Sensing Data. The Case of Aktobe City, Kazakhstan. *Journal of Settlements & Spatial Planning*. 2 (12): 83-92. <https://doi.org/10.24193/JSSP.2021.2.02>
- Shashua-Bar L., Hoffman M. E. 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and buildings*, 31, 3: 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., Saleous N. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International journal of remote sensing*, 26 (20): 4485–4498. <https://doi.org/10.1080/01431160500168686>
- Tzoulas K., Galan J., Venn S., Dennis M., Pedroli B., Mishra H., Haase D., Pauleit S., Niemelä J. and James P. 2021. *A Conceptual Model of the Social–Ecological System of Nature-Based Solutions in Urban Environments*. *Ambio* 50: 335–345. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01380-2>
- Weng Q., Liu H., Lu D. 2007. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. *Urban ecosystems*, 10: 203-219. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0020-0>
- Xie F., Fan H. 2021. Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST): Is data reconstruction necessary? *International Journal of applied earth observation and geoinformation*, 101: 102352. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102352>
- Xu Y., Yang J., Chen Y. 2016. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 126: 213-222. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1572-1>
- Zhou Y. 2019. Asymmetric behavior of vegetation seasonal growth and the climatic cause: Evidence from long-term NDVI dataset in northeast China. *Remote Sensing*, 11 (18): 2107. <https://doi.org/10.3390/rs11182107>

## References

- Abdrashitova T. A., Chikanaev A. Sh. Analiz assortimenta drevesno-kustarnikovyyh rastenij dlya ozeleneniya gorodov v zone suhih stepej Severnogo Kazahstana [Analysis of the range of trees and shrubs for urban landscaping in the dry steppe zone of Northern Kazakhstan] //Vestnik KazGASA. Arhitektura i dizajn. – 2020. – № 3 (77). – P. 5-16. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2020.3-01>
- Ahmetov R.S., Majsupova B. D., Utebekova A.D. Analiz i sostoyanie ozeleneniya g. Hur-Cultana [Analysis and state of greenery in Nur-Sultan]// Vestnik nauki Kazahskogo agrotekhnicheskogo universiteta im. S.Sejfullina: Mnogoprofil'nyj. – 2019. – № 4 (103). – P. 82-89.
- Boone C.G., Buckley G.L., Grove J.M., Sister C. 2009. Parks and people: An environmental justice inquiry in Baltimore, Maryland. *Annals of the association of American geographers*, 99, 4: 767-787. <https://doi.org/10.1080/00045600903102949>
- Breuste J., Qureshi S., Li J. 2013. Applied urban ecology for sustainable urban environment. *Urban Ecosystems*, 16: 675-680. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0337-9>
- Driscoll E., Del Castillo J.P.F., Bazarkulova D., de Beurs K. 2025. Using satellite imagery to track the development of the green belt of Astana, Kazakhstan: A remote sensing perspective on artificial forestry development. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 38: 101543. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101543>
- Escobedo F. J., Giannico V., Jim C.Y., Sanesi G. and Laforteza R. 2019. *Urban Forests, Ecosystem Services, Green Infrastructure and Nature-Based Solutions: Nexus or Evolving Metaphors?* *Urban Forestry & Urban Greening* 37: 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>
- Gao S., Yan K., Liu J., Pu J., Zou D., Qi J., Mu X., Yan G. 2024. Assessment of remote-sensed vegetation indices for estimating forest chlorophyll concentration. *Ecological Indicators*, 162: 112001. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112001>



- Haaland C., van Den Bosch C. K. 2015. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban forestry & urban greening*, 14, 4: 760-771. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.009>
- James P., Tzoulas K., Adams M.D., Barber A., Box J., Breuste J., Elmqvist T., Frith M., Gordon C., Greening K.L., Handley J., Haworth S., Kazmierczak A.E., Johnston M., Korpela K., Moretti M., Niemelä J., Pauleit S., Roe M.H., Sadler J.P. and Ward Thompson C. 2009. Towards an integrated understanding of green space in the European built environment. *Urban Forestry and Urban Greening*, 8 (2): 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.001>
- Jensen R. R., Binford M. W. 2004. Measurement and comparison of Leaf Area Index estimators derived from satellite remote sensing techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (25): 4251-4265. <https://doi.org/10.1080/01431160410001680400>
- Kabisch N., Frantzeskaki N., Hansen R. 2022. Principles for urban nature-based solutions. *Ambio*, 51: 1388-1401. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01685-w>
- Khamit A., Utarbayeva N., Shumakova G., Makhambetov M., Abdullina A., Sergeyeva A. 2024. Assessment of the State of the Landscaping System in the City of Aktobe, the Republic of Kazakhstan, under Conditions of Man-Made Load Using Remote Sensing. *Urban Science*, 8 (2): 34. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020034>
- Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X., Wu J. 2011. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote sensing of environment*, 115, 12: 3249-3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Nysanbaev E. N., Mukanov B.M., Bukejhanov A.N., Mambetov B.T., Majsupova B.D. Matrica predvaritel'noj ocenki rejtinga ozeleneniya krupnyh gorodov Kazahstana [Matrix of preliminary assessment of greening rating of large cities of Kazakhstan]// *Novosti nauki Kazahstana*. – 2018. – №3. – P. 225-233.
- Ospangaliyev A., Sarsekova D., Mazarzhanova K., Dosmanbetov D., Kopabayeva A., Obezinskaya E., Nurlabi A., Mukanov B. 2023. Assessment of the degree of landscaping in Astana, Kazakhstan and recommendations for its development. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 21, 3: 585-594. <https://doi.org/10.22124/CJES.2023.6937>
- Pakina A., Batkalova A. 2018. The green space as a driver of sustainability in Post-Socialist urban areas: the case of Almaty City (Kazakhstan). *Belgeo. Revue belge de géographie*, 4: 1-16. <https://doi.org/10.4000/belgeo.28865>
- Pauleit S., Andersson E., Anton B., Buijs A., Haase D., Hansen R., Kowarika I., Stahl A., Van der Jagt S. 2019. Urban green infrastructure—connecting people and nature for sustainable cities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.007>
- Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 9, 20: 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Sergeyeva A., Khamit A., Koshim A., Makhambetov M. 2021. Ecological State Assessment of Urban Green Spaces Based on Remote Sensing Data. The Case of Aktobe City, Kazakhstan. *Journal of Settlements & Spatial Planning*. 2 (12): 83-92. <https://doi.org/10.24193/JSSP.2021.2.02>
- Shashua-Bar L., Hoffman M. E. 2000. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and buildings*, 31, 3: 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., Saleous N. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International journal of remote sensing*, 26 (20): 4485-4498. <https://doi.org/10.1080/01431160500168686>
- Tzoulas K., Galan J., Venn S., Dennis M., Pedrolí B., Mishra H., Haase D., Pauleit S., Niemelä J. and James P. 2021. A Conceptual Model of the Social–Ecological System of Nature-Based Solutions in Urban Environments. *Ambio* 50: 335–345. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01380-2>
- Weng Q., Liu H., Lu D. 2007. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. *Urban ecosystems*, 10: 203-219. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0020-0>
- Xie F., Fan H. 2021. Deriving drought indices from MODIS vegetation indices (NDVI/EVI) and Land Surface Temperature (LST): Is data reconstruction necessary? *International Journal of applied earth observation and geoinformation*, 101: 102352. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102352>
- Xu Y., Yang J., Chen Y. 2016. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China. *Theoretical and Applied Climatology*, 126: 213-222. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1572-1>
- Zhou Y. 2019. Asymmetric behavior of vegetation seasonal growth and the climatic cause: Evidence from long-term NDVI dataset in northeast China. *Remote Sensing*, 11 (18): 2107. <https://doi.org/10.3390/rs11182107>

#### Авторлар туралы мәлімет:

Саянов Алексей Андреевич – география ғылымдарының кандидаты, М.В. Ломоносов атындағы Москва мемлекеттік университетінің табиғатты тиімді пайдалану кафедрасының қызметкері, I-санаттағы инженер (Москва, Ресей, e-mail: [sayanov\\_aa@mail.ru](mailto:sayanov_aa@mail.ru))

Махамбетов Мұрат Жарақұлы – PhD, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университетінің Экология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (доцент), (Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: [mirat.makhambetov@zhubanov.edu.kz](mailto:mirat.makhambetov@zhubanov.edu.kz))

Хамит Алтынбек Болатбекұлы – магистр, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті География және туризм кафедрасының оқытушысы (Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: [akhait@zhubanov.edu.kz](mailto:akhait@zhubanov.edu.kz))

Сергеева Айгул Максатовна – география ғылымдарының кандидаты, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, География және туризм кафедрасының профессоры (Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: [sergeyeva.aigul@gmail.com](mailto:sergeyeva.aigul@gmail.com))

**Information about authors:**

*Sayanov Aleksei Andreevich – Candidate of Geographical Sciences, Researcher at the Department of Rational Environmental Management, First-Category Engineer, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia, e-mail: sayanov\_aa@mail.ru;*

*Makhambetov Murat Zharakovich – PhD, Associate Professor at the Department of Ecology, K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan, e-mail: murat.makhambetov@zhubanov.edu.kz*

*Khamit Altynbek Bolatbekuly – master, lecturer at the Department of Geography and Tourism, K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan, e-mail: akhamit@zhubanov.edu.kz*

*Sergeyeva Aigul Maksatovna – Candidate of Geographical Sciences, Professor of the Department of Geography and Tourism of the K. Zhubanov Aktobe Regional University (Aktobe, Kazakhstan, e-mail: sergeyeva.aigul@gmail.com).*

**Сведения об авторах:**

*Саянов Алексей Андреевич – кандидат географических наук, сотрудник кафедры рационального природопользования, инженер 1 категории Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия, e-mail: sayanov\_aa@mail.ru);*

*Махамбетов Мурат Жаракович – PhD, ассоциированный профессор (доцент) кафедры экологии Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова (Актобе, Казахстан, e-mail: murat.makhambetov@zhubanov.edu.kz);*

*Хамит Алтынбек Болатбекулы – магистр, преподаватель кафедры географии и туризма Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова (Актобе, Казахстан, e-mail: akhamit@zhubanov.edu.kz);*

*Сергеева Айгул Максатовна – кандидат географических наук, профессор кафедры географии и туризма Актюбинского регионального университета имени К. Жубанова (Актобе, Казахстан, e-mail: sergeyeva.aigul@gmail.com).*

*Поступила: 29 июня 2025 года*

*Принята: 27 августа 2025 года*