МРНТИ 87.03.17 https://doi.org/10.26577/bb1083202615

Т.Б. Аймухан*, С.Т. Нуртазин, С.А. Манкибаева

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*e-mail: nilkemat@gmail.com

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИОННОГО РИСКА АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ИЛИЙСКОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИНДЕКСОВ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В статье представлена комплексная оценка деградационного риска аридных территорий Илийского района Алматинской области на основе спутниковых индексов Sentinel-2, продукционного показателя MODIS NPP и климато-гидрологических переменных ERA5-Land. Цель исследования заключалась в выявлении пространственного распределения риска деградации и определении связи состояния почвенно-растительного покрова с водными и температурными факторами за 2020–2025 гг. Интегральная карта риска построена по четырём нормализованным компонентам: NDVI, BSI, альбедо и VCI. Дополнительно проанализированы NPP за 2020–2024 гг., осадки, температура воздуха, скорость ветра, водный эквивалент снега и влажность почвы 0–28 см. Установлено, что классы высокого и очень высокого интегрального риска занимают 7318,9 км², или 88,91% территории, тогда как строгие hotspot-зоны составляют 24,7 км² (0,30%). Наиболее значимые связи выявлены между NPP и осадками май–сентябрь ($r = 0,954$; $p = 0,0118$), а также между NPP и влажностью почвы 0–28 см ($r = 0,962$; $p = 0,0087$). NDVI и VCI положительно связаны с водным эквивалентом снега, а NDVI отрицательно связан с температурой май–сентябрь. Критерий Манна–Уитни подтвердил, что hotspot-зоны имеют более низкие значения NPP и влажности почвы, чем фоновая территория. Полученные результаты показывают, что деградационный риск в районе формируется сочетанием снижения растительности, оголённости почвы, повышения отражательной способности поверхности и дефицита влаги.

Ключевые слова: Илийский район, деградация земель, NDVI, BSI, альбедо, VCI, NPP, ERA5-Land, влажность почвы, SWE, hotspot.

T.B. Aimukhan*, S.T. Nurtazin, S.A. Mankibaeva

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: nilkemat@gmail.com

Comprehensive assessment of degradation risk in the arid territories of the ili district based on satellite indices and climatic factors

This article presents a comprehensive assessment of degradation risk in the arid territories of the Ili district, Almaty region, based on Sentinel-2 satellite indices, MODIS NPP and ERA5-Land hydroclimatic variables. The aim of the study was to identify the spatial distribution of degradation risk and to determine how the condition of the soil-vegetation cover is related to moisture and temperature factors during 2020–2025. The integrated risk map was produced using four normalized components: NDVI, BSI, surface albedo and VCI. MODIS NPP for 2020–2024, precipitation, air temperature, wind speed, snow water equivalent and 0–28 cm soil moisture were used as additional explanatory variables. High and very high integrated risk classes occupy 7318.9 km², or 88.91% of the analysed area, whereas strict hotspot zones cover 24.7 km² (0.30%). The strongest significant relationships were found between NPP and May–September precipitation ($r = 0.954$; $p = 0.0118$) and between NPP and 0–28 cm soil moisture ($r = 0.962$; $p = 0.0087$). NDVI and VCI were positively associated with snow water equivalent, while NDVI showed a negative relationship with May–September temperature. The Mann–Whitney test confirmed that hotspot areas have lower NPP and soil moisture than non-hotspot areas. The results indicate that degradation risk is formed by the combined effects of reduced vegetation condition, increased soil exposure, higher surface reflectance and moisture deficit.

Keywords: Ili district, land degradation, NDVI, BSI, albedo, VCI, NPP, ERA5-Land, soil moisture, SWE, hotspot.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

Т.Б. Аймухан*, С.Т. Нуртазин, С.А. Манкибаева
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: nilkemat@gmail.com

Іле ауданының аридті аумақтарының деградациялық қаупін спутниктік индекстер мен климаттық факторлар негізінде кешенді бағалау

Мақалада Алматы облысының Іле ауданы аридті аумақтарының деградациялық қаупі Sentinel-2 спутниктік индекстері, MODIS NPP өнімділік көрсеткіші және ERA5-Land климаттық-гидрологиялық айнымалылары негізінде кешенді бағаланды. Зерттеудің мақсаты 2020–2025 ж. аралығында деградация қаупінің кеңістіктік таралуын анықтау және топырақ-өсімдік жамылғысының жағдайын ылғалдану мен температуралық факторлармен байланыстыра талдау болды. Интегралдық қауіп картасы төрт нормаланған компонент бойынша құрылды: NDVI, BSI, альбедо және VCI. Қосымша ретінде 2020–2024 ж. MODIS NPP, жауын-шашын, ауа температурасы, жел жылдамдығы, қардың су эквиваленті және 0–28 см топырақ ылғалдылығы қарастырылды. Нәтижелер жоғары және өте жоғары интегралдық қауіп кластары 7318,9 км² немесе аумақтың 88,91%-ын алатынын көрсетті, ал қатаң hotspot-аймақтар 24,7 км² (0,30%) болды. Ең айқын статистикалық байланыстар NPP мен мамыр-қыркүйек жауын-шашыны арасында ($r = 0,954$; $p = 0,0118$), сондай-ақ NPP мен 0–28 см топырақ ылғалдылығы арасында ($r = 0,962$; $p = 0,0087$) анықталды. NDVI және VCI қардың су эквивалентімен оң байланыс көрсетті, ал NDVI мамыр-қыркүйек температурасына кері тәуелді болды. Манн–Уитни критерийі hotspot-аймақтарда NPP және топырақ ылғалдылығы фондық аумаққа қарағанда төмен екенін растады. Зерттеу нәтижелері деградациялық қауіп өсімдік жамылғысының әлсіреуі, ашық топырақ үлесінің артуы, беткі шағылысудың жоғарылауы және ылғал тапшылығының біріккен әсерінен қалыптасатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: Ілеауданы, жердеградациясы, NDVI, BSI, альбедо, VCI, NPP, ERA5-Land, топырақылғалдылығы, SWE, hotspot.

Введение

Деградация земель является одной из ключевых экологических проблем аридных и полуаридных территорий, где дефицит влаги, повышение температуры и антропогенная нагрузка могут приводить к снижению продуктивности растительного покрова и росту доли оголённых поверхностей (IPCC, 2021; UNCCD, 2017). В районах с широким распространением пастбищных и слабо покрытых растительностью земель эти процессы проявляются особенно отчётливо.

Илийский район Алматинской области расположен в зоне, где природная аридность сочетается с сельскохозяйственным и инфраструктурным освоением. Поэтому для такой территории важна не только картографическая фиксация участков риска, но и оценка климатических факторов, влияющих на состояние почвенно-растительного покрова.

Дистанционное зондирование позволяет получать сопоставимые показатели состояния поверхности за длительный период и анализировать их пространственное распределение в единой среде обработки данных (Drusch et al., 2012; Gorelick et al., 2017). Индексы NDVI, BSI, альбедо и VCI отражают разные стороны деградационного риска: состояние растительности, степень оголённости почвы, отражательную способность и относительную обеспеченность растительного покрова влагой (Kogan, 1995; Liang, 2001; Rikimaru et al., 2002; Tucker, 1979).

Цель исследования – оценить пространственное распределение деградационного риска на территории Илийского района на основе спутниковых индексов и определить связь риска с климатическими и гидрологическими факторами за 2020–2025 гг.

Дистанционный мониторинг деградации земель

Деградация земель в аридных и полуаридных регионах рассматривается как комплексный процесс, связанный с изменением растительного покрова, водного режима, почвенной поверхности и продуктивности экосистем. В международной практике для оценки таких процессов всё чаще применяются спутниковые данные, поскольку они позволяют получать пространственно сопоставимые показатели на больших территориях и за длительные периоды наблюдений (IPCC, 2021; UNCCD, 2017). Для районов с пастбищной нагрузкой дистанционные индексы особенно полезны, так как они

фиксируют не только локальные очаги деградации, но и общий фон аридизации и ослабления растительности.

Спутниковые данные Sentinel-2 обладают высоким пространственным разрешением и набором спектральных каналов, достаточных для расчёта индексов растительности, оголённости почвы и отражательной способности поверхности (Drusch et al., 2012). Платформа GoogleEarthEngine обеспечивает массовую обработку архивов спутниковых и климатических данных и позволяет воспроизводимо рассчитывать многолетние композиты, временные ряды и тематические карты риска (Gorelick et al., 2017). Поэтому сочетание Sentinel-2, MODIS и ERA5-Land является методически оправданным для комплексного анализа деградационного риска.

Спектральные индексы состояния растительности и поверхности

NDVI является одним из наиболее распространённых индексов для оценки фотосинтетически активной растительности и широко применяется в мониторинге состояния растительного покрова (Tucker, 1979). В условиях аридных территорий низкие значения NDVI обычно указывают на разреженный растительный покров, снижение биомассы или усиление доли открытой поверхности. Однако NDVI отражает главным образом зелёную растительность и не всегда позволяет отделить влияние климата от влияния почвенно-поверхностных условий.

Для уточнения состояния поверхности в исследованиях деградации часто дополнительно используют индексы оголённости почвы. BSI основан на сочетании видимых, ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасного диапазонов и позволяет выделять открытые или слабо покрытые растительностью участки (Rikimaru et al., 2002). Включение BSI в интегральную оценку важно, потому что деградация пастбищ проявляется не только снижением зелёной биомассы, но и увеличением доли оголённой почвы.

Альбедо используется как характеристика отражательной способности поверхности. Повышенные значения альбедо могут быть связаны с сухими, светлыми и слабо покрытыми растительностью поверхностями, поэтому данный показатель дополняет NDVI и BSI при интерпретации деградационных процессов (Liang, 2001). VCI, в свою очередь, позволяет оценивать состояние растительности относительно диапазона её собственных значений за анализируемый период и применяется для выявления стрессового состояния растительности и засушливых условий (Kogan, 1995).

Продуктивность растительного покрова и климатические факторы

NPP отражает чистую первичную продукцию и является интегральной характеристикой продуктивности растительного покрова. В отличие от спектральных индексов Sentinel-2, продукт MODISNPP имеет более грубое пространственное разрешение, но непосредственно характеризует биологическую продуктивность растительности. Поэтому NPP целесообразно использовать как дополнительный независимый показатель, сопоставляемый с картами риска и климатическими факторами (Running&Zhao, 2019).

Климатические реанализы позволяют дополнить спутниковые индексы данными о водном и термическом режиме территории. ERA5-Land предоставляет согласованные ряды наземных переменных, включая осадки, температуру, ветер, снежный покров и влажность почвы, что делает его полезным источником для анализа факторов, влияющих на растительность и деградационный риск (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021). В аридных районах особенно важны сезонные осадки, водный эквивалент снега и влажность верхнего слоя почвы, поскольку они определяют доступность влаги в начале и во время вегетации.

Статистические подходы к оценке связей и трендов

Для проверки связи между климатическими факторами и спутниковыми индексами часто применяются корреляционные методы. Коэффициент Пирсона используется для оценки линейной связи, а коэффициент Спирмена – для ранговой связи, что особенно полезно при коротких временных рядах и возможной нелинейности отклика растительности (Pearson, 1895; Spearman, 1904). В настоящем исследовании оба подхода используются как взаимодополняющие.

Для оценки направленности временных изменений применяются непараметрические методы Манна-Кендалла и наклон Сена, которые не требуют нормальности распределения и устойчивы к выбросам (Kendall, 1975; Mann, 1945; Sen, 1968). Кроме того, для проверки различий между hotspot-зонами и фоновой территорией

применяется критерий Манна-Уитни, позволяющий сравнивать две независимые группы без предположения о нормальном распределении данных (Mann&Whitney, 1947). Такой подход позволяет перейти от картографического описания риска к статистической проверке различий между наиболее проблемными и фоновыми участками.

Таким образом, анализ публикаций, приведённый в составе введения, показывает, что наиболее обоснованным является комплексный подход, объединяющий спектральные индексы состояния поверхности, продукционный показатель NPP, климатические переменные ERA5-Land и непараметрические статистические методы. Такая схема позволяет оценить не только пространственное распределение деградационного риска, но и возможные климато-гидрологические факторы его формирования.

Материалы и методы исследования

Исходные данные

В исследовании использованы данные Sentinel-2 за вегетационные периоды 2020-2025 гг., годовой продукт MODISNPP за 2020-2024 гг., а также климатические показатели ERA5-Land. Sentinel-2 применялся для расчёта индексов состояния поверхности, MODISNPP – для оценки продуктивности растительного покрова, а ERA5-Land – для анализа осадков, температуры, ветра, снежного запаса и влажности почвы (Drusch et al., 2012; Muñoz-Sabater et al., 2021; Running&Zhao, 2019).

Таблица 1
Исходные данные и их назначение

Данные	Период	Разрешение/масштаб	Назначение
Sentinel-2 MSI	2020–2025	10–20 м	NDVI, BSI, альбедо, VCI, интегральный риск
MODIS MOD17A3HGF	2020–2024	500 м	NPP и риск по продуктивности
ERA5-Land	2020–2025	около 9–11 км	Осадки, температура, ветер, снег, влажность почвы
JRC Global Surface Water / MNDWI	период анализа	разное	Исключение водных объектов

Расчёт индексов и интегрального риска

Расчёт индексов выполнялся по сезонным композитам Sentinel-2 за май–сентябрь каждого года. Перед расчётами облачные и некорректные пиксели исключались, водные объекты дополнительно маскировались по данным JRC Global Surface Water и/или MNDWI. Для каждого года формировался вегетационный композит, после чего годовые слои 2020–2025 гг. агрегировались в среднее многолетнее значение для построения итоговых карт риска.

Использованные формулы индексов имели следующий вид: NDVI = (B8 – B4) / (B8 + B4), где B8 – ближний инфракрасный канал, B4 – красный канал Sentinel-2 (Tucker, 1979). Низкие значения NDVI интерпретировались как признак ослабленного растительного покрова и повышенного деградационного риска.

BSI рассчитывался как BSI = ((B11 + B4) – (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2)), где B2 – синий канал, B4 – красный, B8 – ближний инфракрасный, B11 – коротковолновый инфракрасный канал Sentinel-2. Повышенные значения BSI отражают увеличение доли открытой или слабо покрытой растительностью поверхности (Rikimaru et al., 2002).

Альбедо поверхности рассчитывалось по широкополосной аппроксимации: Albedo = 0,356B2 + 0,130B4 + 0,373B8 + 0,085B11 + 0,072B12 – 0,0018, где B12 – второй коротковолновый инфракрасный канал Sentinel-2. Повышенное альбедо рассматривалось как дополнительный индикатор сухих и оголённых поверхностей (Liang, 2001).

VCI рассчитывался как VCI = (NDVIi – NDVImin) / (NDVImax – NDVImin) × 100, где NDVIi – значение NDVI в рассматриваемом году, NDVImin и NDVImax – минимальное и максимальное значения NDVI за период 2020–2025 гг. Низкие значения VCI указывают на стрессовое состояние растительности относительно её собственного многолетнего диапазона (Kogan, 1995).

Для перехода от исходных индексов к единой шкале риска каждый показатель нормализо-

вался в диапазоне 0–1. Для индексов, где низкие значения означают высокий риск, применялась обратная нормализация: Risk = (Xmax – Xi) / (Xmax – Xmin). По этой схеме рассчитывались NDVI-risk и VCI-risk. Для индексов, где высокие значения означают высокий риск, применялась прямая нормализация: Risk = (Xi – Xmin) / (Xmax – Xmin). По этой схеме рассчитывались BSI-risk и Albedo-risk. Итоговый интегральный показатель определялся как среднее арифметическое четырёх нормализованных слоёв: Integrated risk = (NDVI-risk + BSI-risk + Albedo-risk + VCI-risk) / 4.

Hotspot-зоны выделялись по строгому условию одновременного превышения порога 0,75 по всем четырём слоям риска: NDVI-risk ≥ 0,75; BSI-risk ≥ 0,75; Albedo-risk ≥ 0,75; VCI-risk ≥ 0,75. Порог 0,75 выбран как граница верхней четверти нормированной шкалы 0–1 и соответствует классу очень высокого риска. Такой консервативный критерий позволяет выделить не весь фон неблагоприятных условий, а только устойчивые очаги, где одновременно проявляются ослабление растительности, высокая оголённость почвы, повышенное альбедо и низкий VCI. Поэтому площадь hotspot-зон зависит от выбранного порога и при более мягком значении была бы больше, а при более жёстком – меньше; в данной работе использован вариант, минимизирующий ложное отнесение фоновых участков к очагам риска.

Климатические показатели и статистический анализ

По данным ERA5-Land были рассчитаны годовые и сезонные осадки, среднегодовая и сезонная температура воздуха, скорость ветра, водный эквивалент снега, снегопад и влажность почвы. ERA5-Land использовался как согласованный реанализ наземных климатических и гидрологических переменных, что позволяет сопоставлять климатический фон с межгодовой динамикой спутниковых индексов (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021).

Связи между климатическими и биофизическими показателями оценивались с использованием коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена (Pearson, 1895; Spearman, 1904). В таблицах результатов отдельно приведены Pearson r и Spearman rho с соответствующими p-значениями. Направленность межгодовых изменений проверялась непараметрическим тестом Манна-Кендалла и наклоном Сена (Kendall, 1975; Mann, 1945; Sen, 1968). Для сравнения hotspot- и non-hotspot-зон применялся критерий Манна-Уитни (Mann & Whitney, 1947).

Выборки для критерия Манна-Уитни формировались в QGIS на основе случайных точек. Было создано 100 точек в пределах hotspot-зон и 100 точек в пределах non-hotspot-зон; для снижения пространственного автокоррелирования использовались минимальные расстояния между точками, заданные в метрической проекции UTM zone 43N (EPSG:32643). В анализ включались только независимые показатели, не использованные непосредственно при построении hotspot-карты: NPP, влажность почвы 0–28 см, SWE и температура май–сентябрь. Различие фактических n для NPP связано с тем, что часть точек попадала на пиксели NoData продукта MODIS NPP после маскирования водных объектов и границ растра; для остальных факторов количество наблюдений составило 100/100.

Результаты исследования и их обсуждение

Интегральный риск деградации

Интегральная карта риска показывает преобладание классов высокого и очень высокого риска. Класс высокого риска занимает 5587,2 км², или 67,87% анализируемой площади, а класс очень высокого риска – 1731,7 км², или 21,04%. В совокупности эти классы составляют 7318,9 км², или 88,91% территории. Низкий и умеренный риск занимают соответственно 405,3 км² и 507,8 км².

Hotspot-зоны деградационного риска

Строгие hotspot-зоны, выделенные по одновременному превышению порога риска 0,75 по NDVI, BSI, альбедо и VCI, занимают 24,7 км², или около 0,30% территории. Небольшая площадь очагов объясняется строгим критерием отбора: участок включался в hotspot только при одновременном проявлении всех неблагоприятных индикаторов.

Рисунок 1
Интегральный риск деградации на территории Илийского района по NDVI, BSI, альбедо и VCI за 2020–2025 гг.

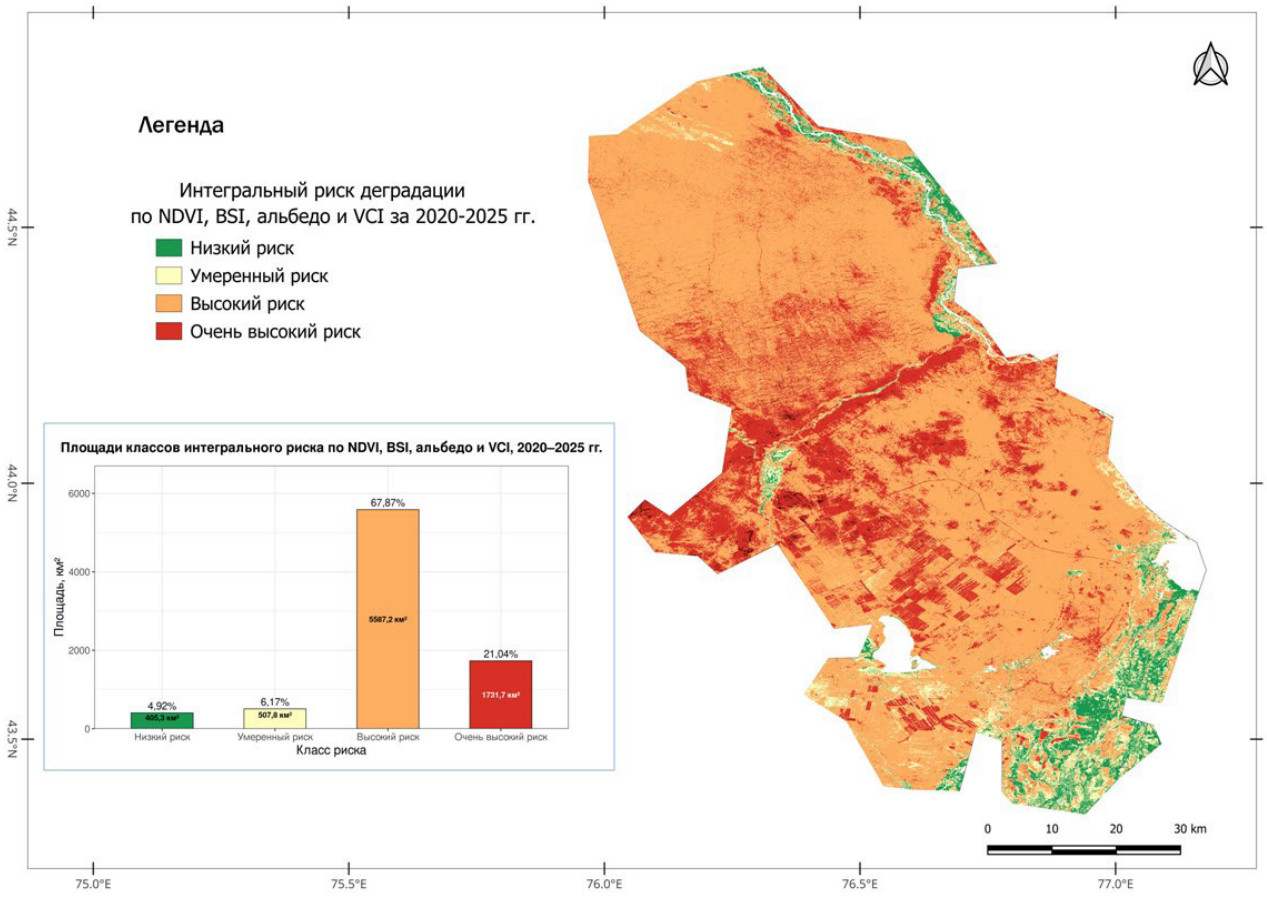
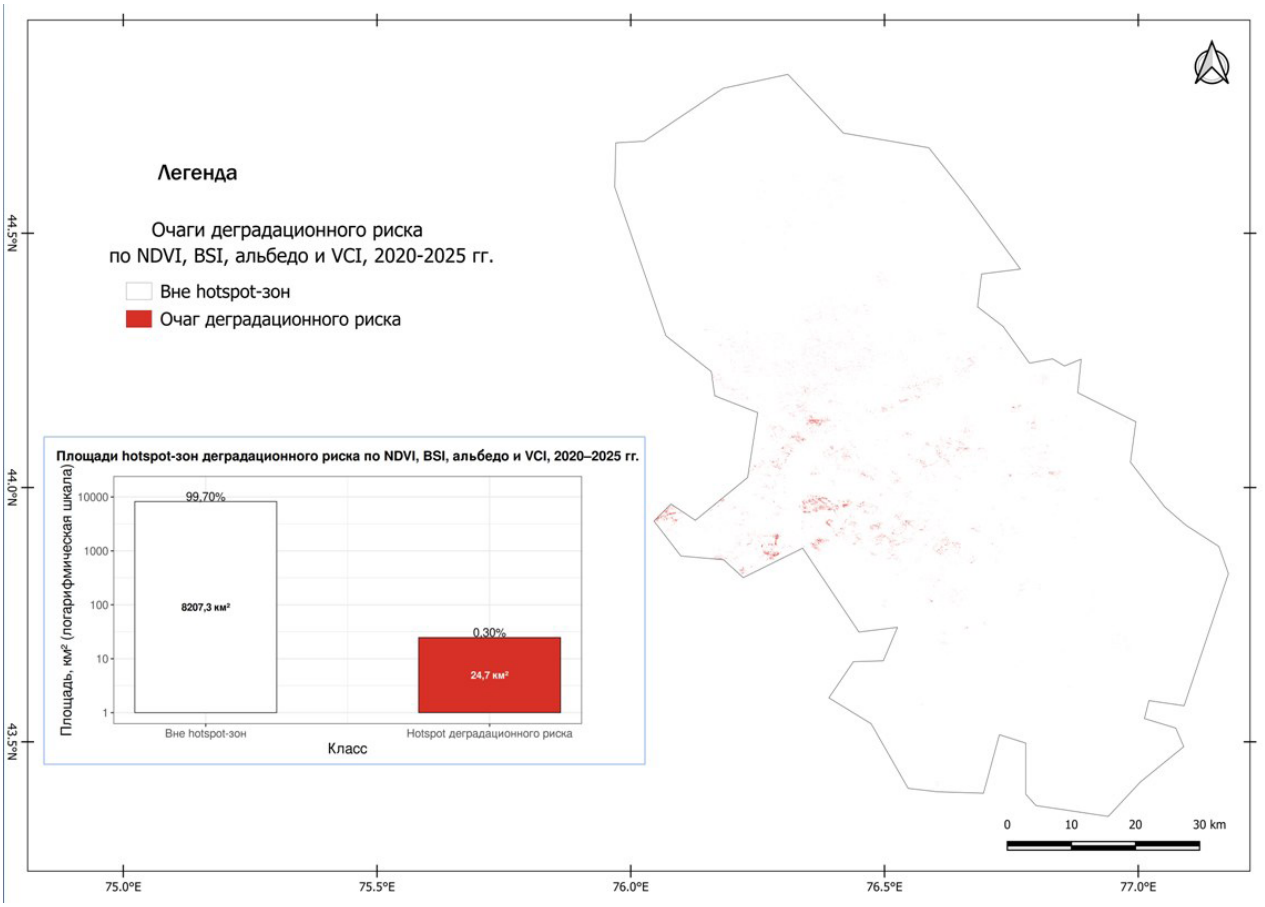


Таблица 2
Площади классов интегрального риска

Класс	Площадь, км²	Доля, %
Низкий риск	405,3	4,92
Умеренный риск	507,8	6,17
Высокий риск	5587,2	67,87
Очень высокий риск	1731,7	21,04

Рисунок 2

Hotspot-зоны деградационного риска по NDVI, BSI, альбедо и VCI за 2020–2025 гг.



NPP как дополнительный продукционный индикатор

NPP использовался как дополнительный показатель продуктивности растительного покрова за 2020–2024 гг. Из-за более грубого пространственного разрешения MODIS этот показатель не включался в основную интегральную карту Sentinel-2, а применялся для сопоставления с общими закономерностями деградационного риска.

По NPP большая часть анализируемой территории относится к классам высокого и очень высокого риска. Высокий риск занимает 3356,0 км², или 43,91%, а очень высокий риск – 4281,0 км², или 56,01%. Умеренный риск составляет 6,5 км², или 0,09%, а низкий риск практически не выявлен.

Суммарная площадь классов NPP составляет около 7643,5 км², что меньше площади, полученной при классификации интегрального риска Sentinel-2 (около 8232,0 км²). Это несоответствие объясняется различиями пространственного разрешения и маскирования данных: интегральный риск рассчитывался по Sentinel-2, тогда как NPP основан на MODIS 500 м. При расчёте NPP часть граничных пикселей, водных объектов и пикселей NoData была исключена из анализа. Поэтому доли классов NPP следует интерпретировать относительно действительной площади валидных MODIS-пикселей, а не как полную административную площадь района.

Рисунок 3
Риск деградации по NPP на территории Илийского района за 2020–2024 гг.

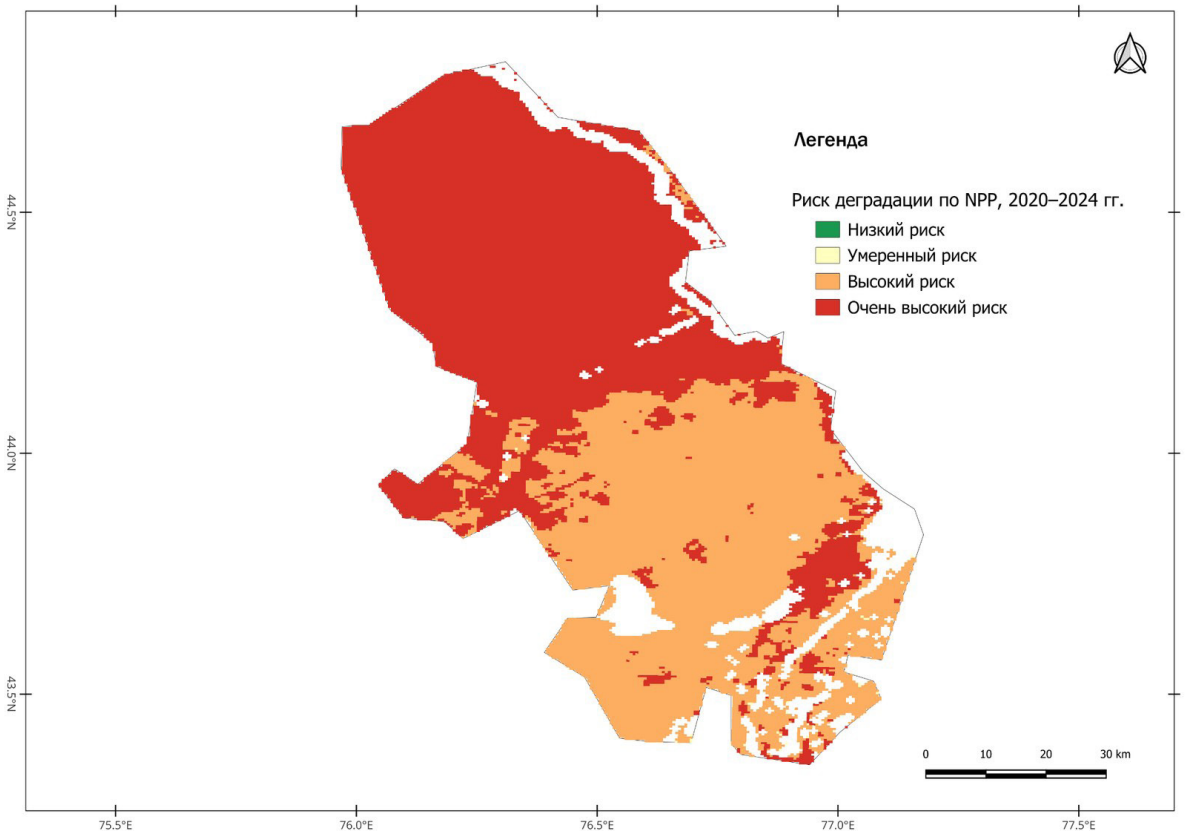


Рисунок 4
Распределение площадей классов риска по NPP за 2020–2024 гг. Ось Y представлена в логарифмическом масштабе

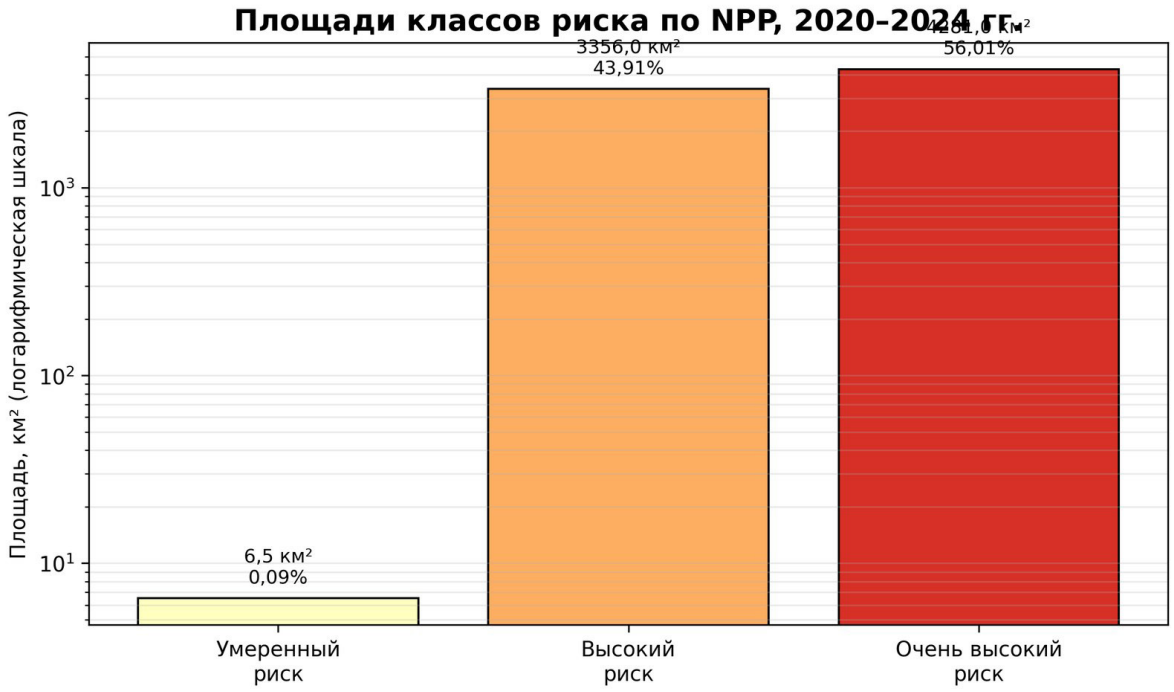


Рисунок 5
Динамика среднего NPP Илийского района за 2020–2024 гг.



Осадки и продуктивность растительности

Годовые и вегетационные осадки ERA5-Land изменялись неравномерно. Максимум годовых осадков отмечен в 2024 г. – 411,4 мм, минимум – в 2025 г. – 254,6 мм. Осадки за май–сентябрь также достигли максимума в 2024 г. – 121,7 мм, а минимум был в 2021 г. – 74,1 мм.

Корреляционный анализ показал статистически значимую положительную связь между NPP и осадками за май–сентябрь: r = 0,954 при p = 0,0118. Это указывает на важную роль сезонного увлажнения в формировании продуктивности растительного покрова.

Рисунок 6
Динамика годовых и вегетационных осадков ERA5-Land в Илийском районе за 2020–2025 гг.

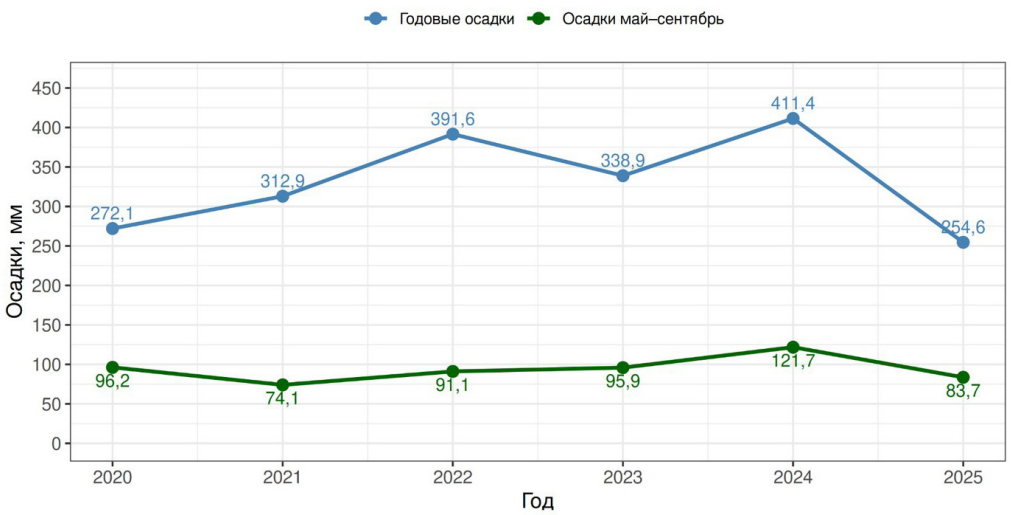


Рисунок 7
Пространственное распределение средних осадков за май–сентябрь за 2020–2025 гг. по данным ERA5-Land

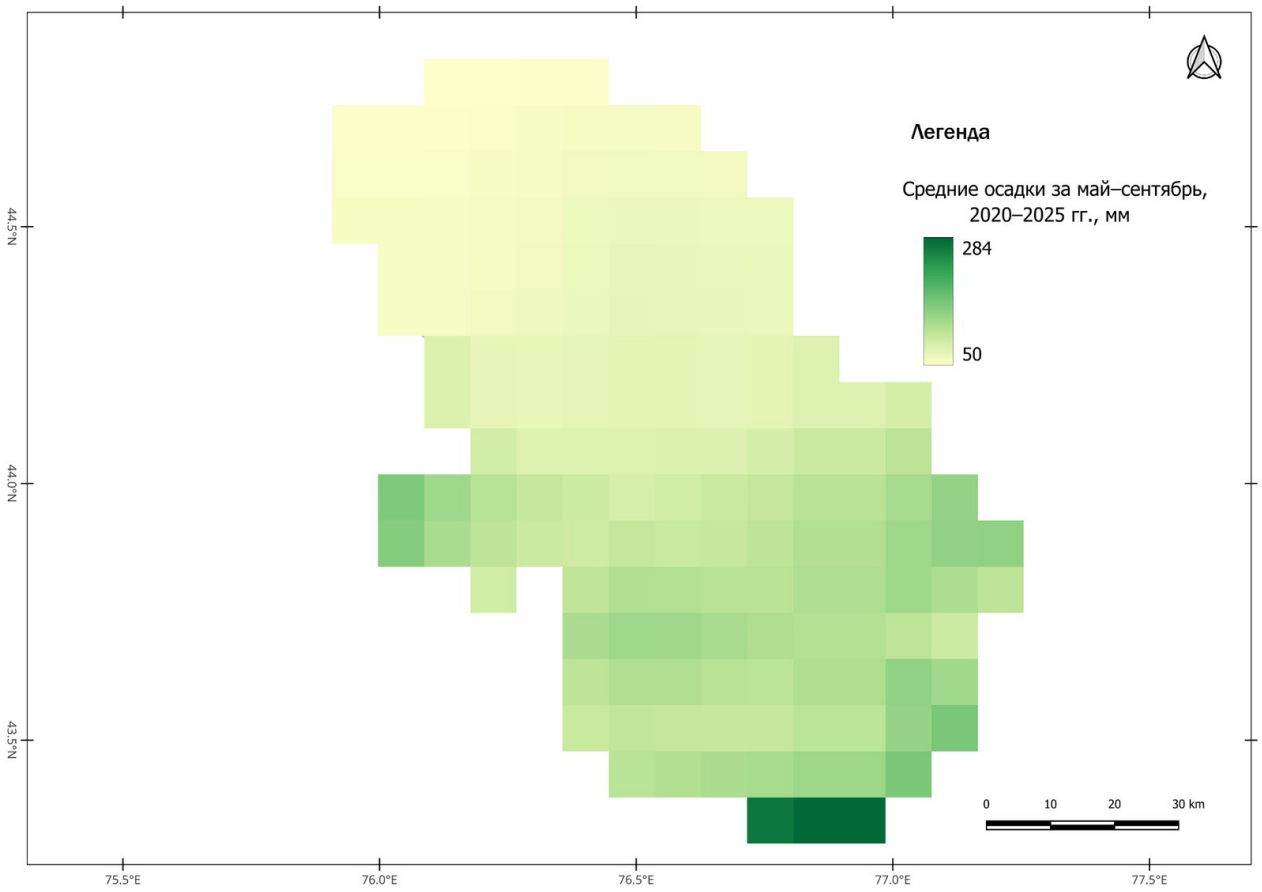
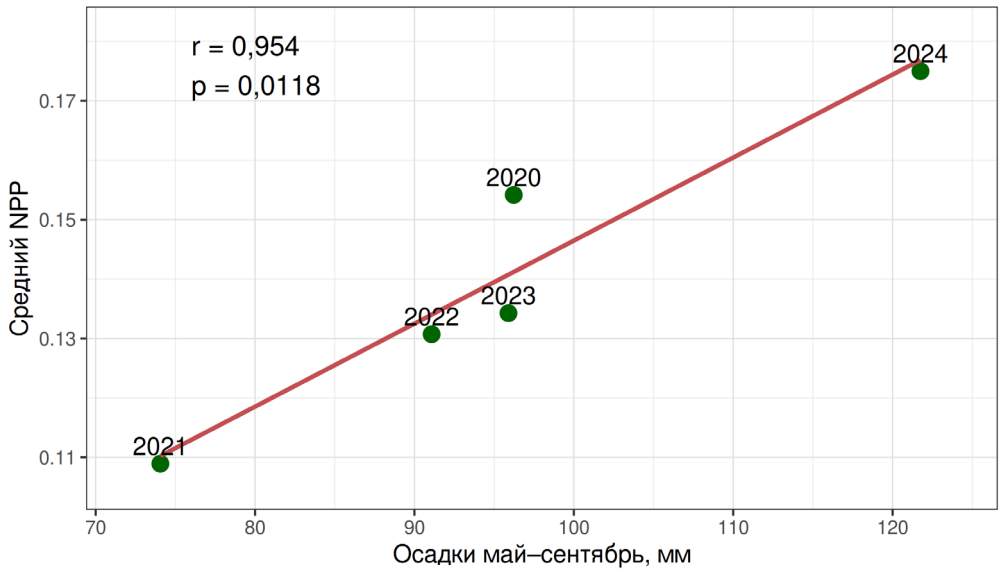


Рисунок 8
Связь среднего NPP с осадками за май–сентябрь в Илийском районе за 2020–2024 гг.



Температурный фактор

Среднегодовая температура воздуха за 2020–2025 гг. изменялась от 10,8 до 12,6 °C, а температура за май–сентябрь – от 22,7 до 24,5°C. Тест Манна–Кендалла показал статистически значимый рост среднегодовой температуры (τ = 0,733; p = 0,0388; наклон Сена = 0,214 °C/год).

Рисунок 9

Динамика среднегодовой и вегетационной температуры ERA5-Land в Илийском районе за 2020–2025 гг.

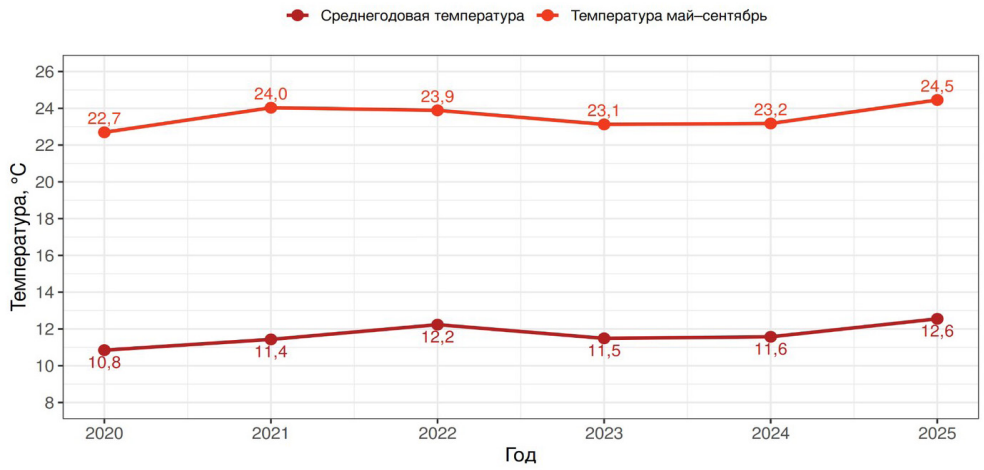
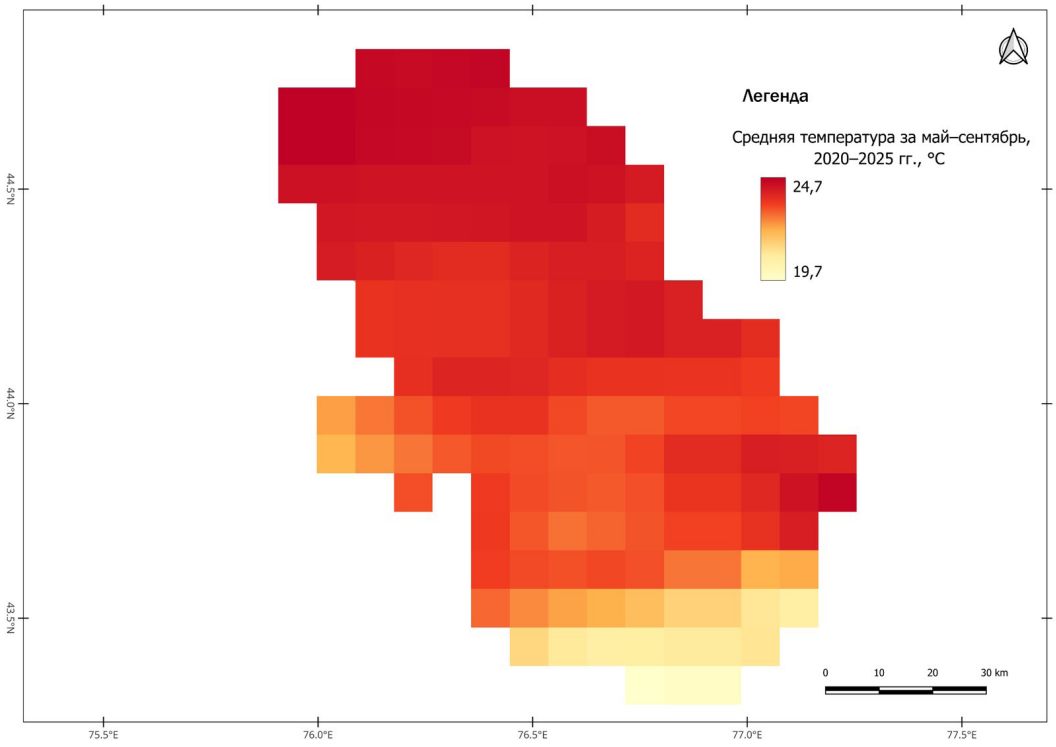


Рисунок 10

Пространственное распределение средней температуры воздуха за май–сентябрь за 2020–2025 гг. по данным ERA5-Land



Повышение температуры связано с ухудшением состояния растительности: для NDVI получена значимая отрицательная корреляция с температурой май–сентябрь (r = -0,820; p = 0,0457), а для VCI – сильная отрицательная связь, близкая к статистически значимой (r = -0,804; p = 0,0541). Одновременно температура положительно связана с альбедо и BSI, что отражает усиление сухости поверхности.

Скорость ветра

Скорость ветра рассматривалась как дополнительный фактор, способный усиливать иссушение поверхности и дефляционные процессы. По данным ERA5-Land средняя скорость ветра за май–сентябрь варьировала от 0,86 до 1,15 м/с. Связи ветра с NPP, NDVI и VCI имеют отрицательное направление, но статистически значимыми не являются.

Рисунок 11

Связь среднего NPP с температурой май–сентябрь за 2020–2024 гг.

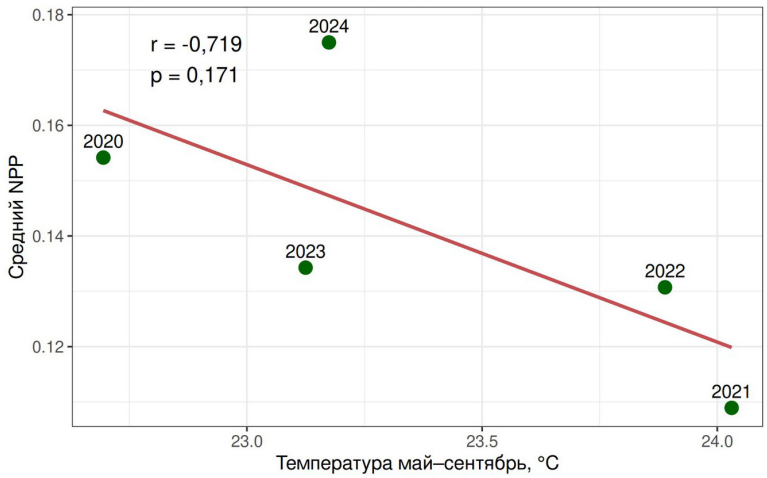


Рисунок 12

Пространственное распределение средней скорости ветра за май–сентябрь за 2020–2025 гг. по данным ERA5-Land

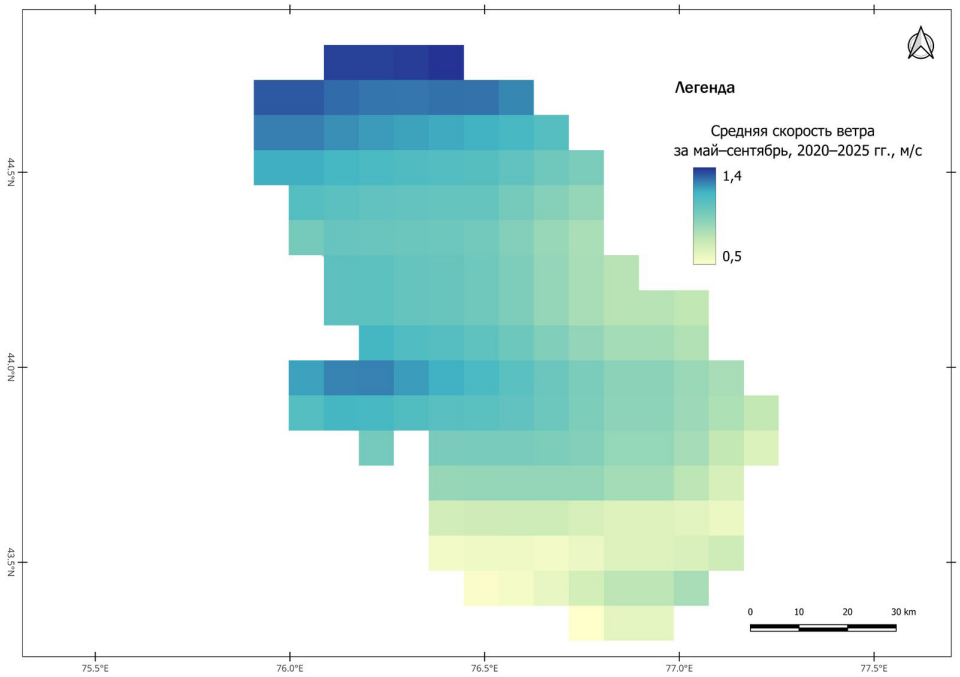
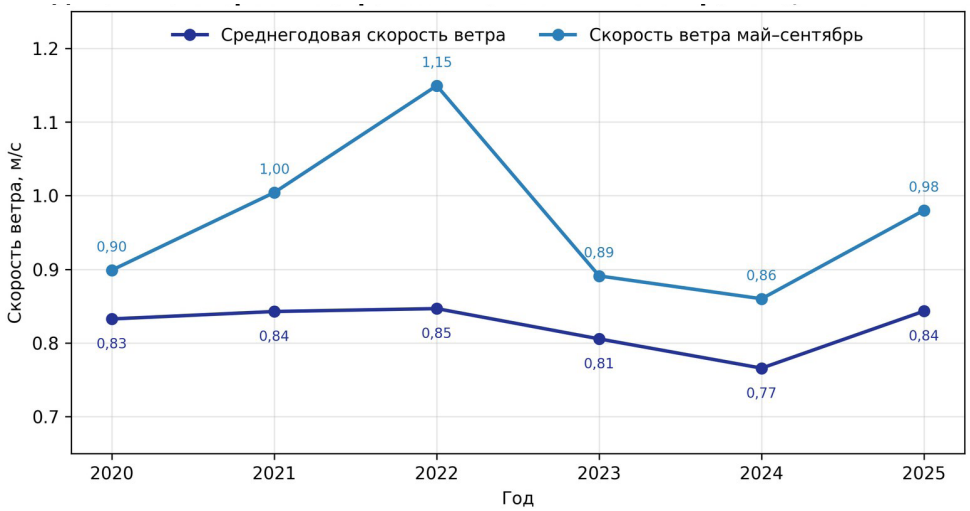


Рисунок 13

Динамика скорости ветра ERA5-Land в Илийском районе за 2020–2025 гг.



Снежный покров и водный эквивалент снега

Снежные показатели рассматривались как фактор предвегетационного увлажнения. Наиболее высокие значения SWE отмечены в 2020 г. (8,45 мм) и 2024 г. (7,77 мм), а минимальное значение – в 2022 г. (1,62 мм). Суммарный снегопад за ноябрь–март достиг максимума в 2024 г. – 85,8 мм.

Рисунок 14

Пространственное распределение среднего снегопада за ноябрь–март за 2020–2025 гг. по данным ERA5-Land

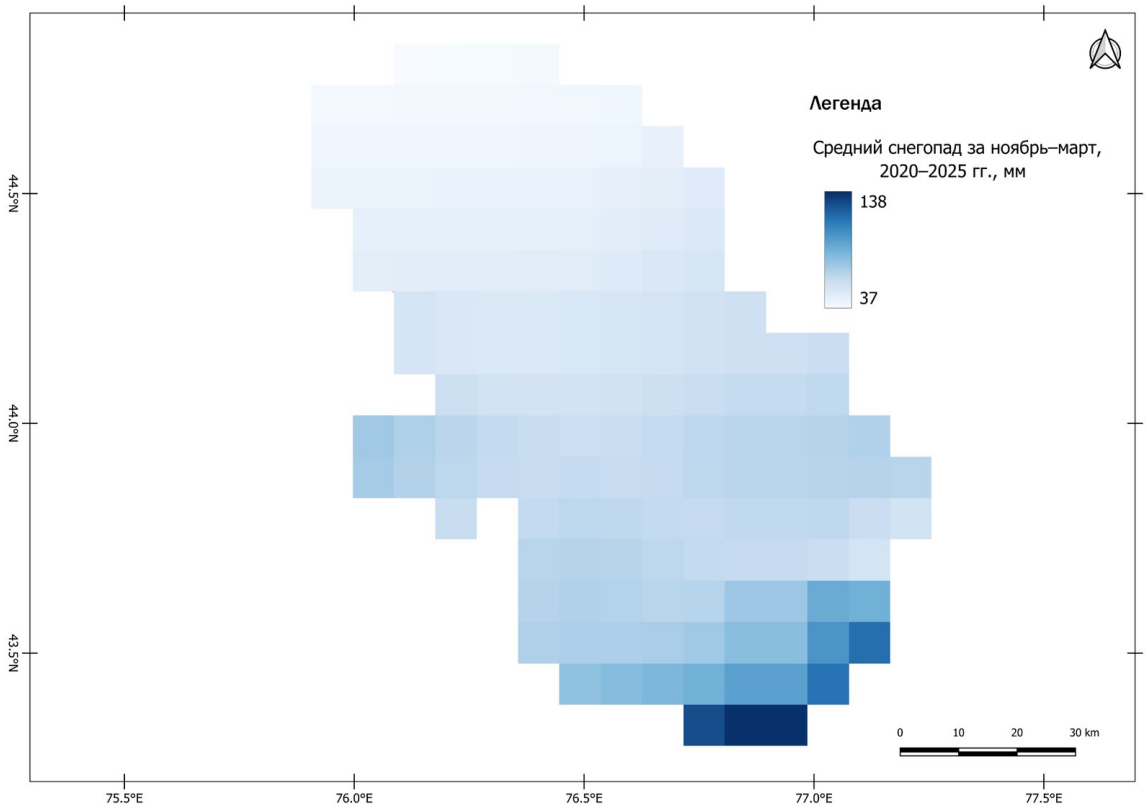
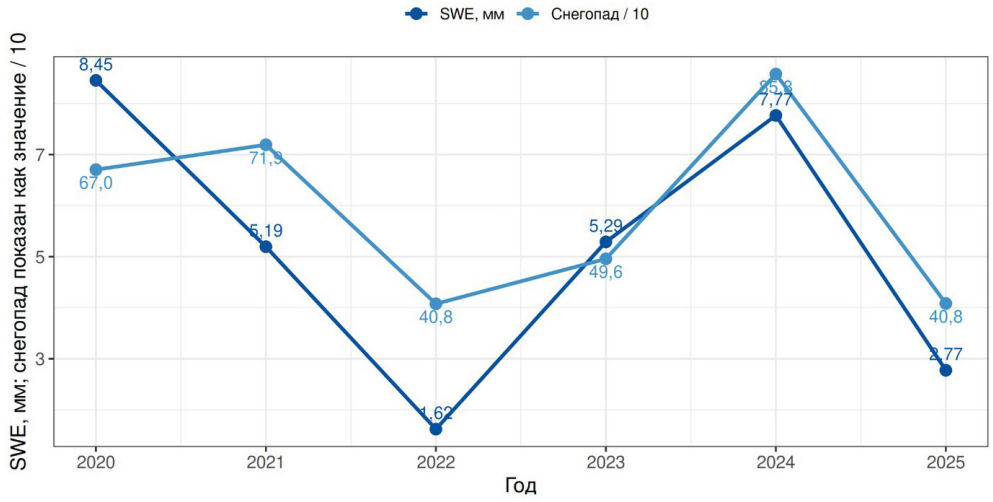


Рисунок 15

Динамика снежных показателей ERA5-Land в Илийском районе за 2020–2025 гг. Примечание: снегопад показан как значение, делённое на 10



SWE статистически значимо связан с NDVI ($r = 0{,}854$; $p = 0{,}0304$) и VCI ($r = 0{,}860$; $p = 0{,}0279$). Это подтверждает роль зимне-весеннего запаса влаги в формировании состояния растительного покрова последующего вегетационного периода.

Рисунок 16

Связь среднего NDVI с водным эквивалентом снега за ноябрь–март за 2020–2025 гг.

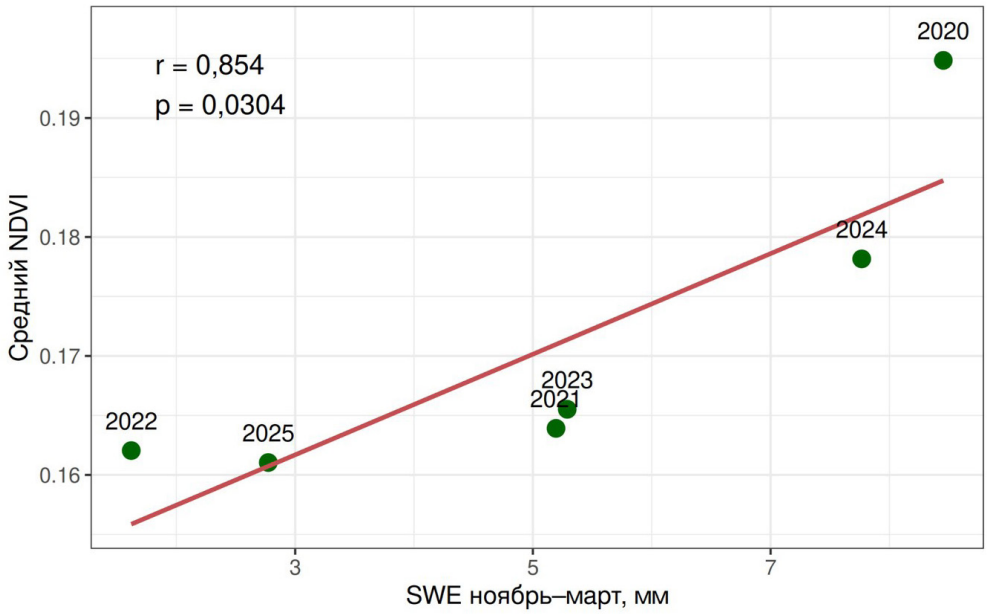
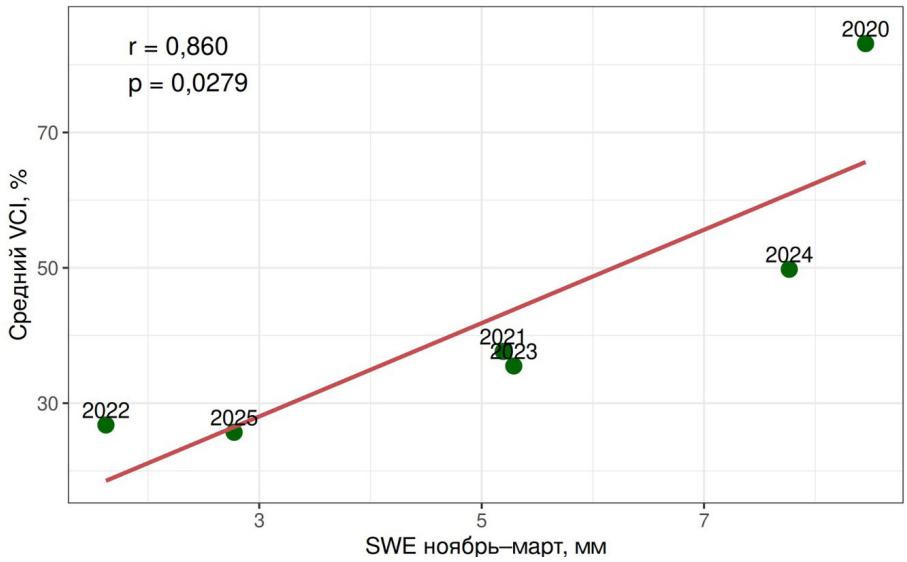


Рисунок 17

Связь среднего VCI с водным эквивалентом снега за ноябрь–март за 2020–2025 гг.

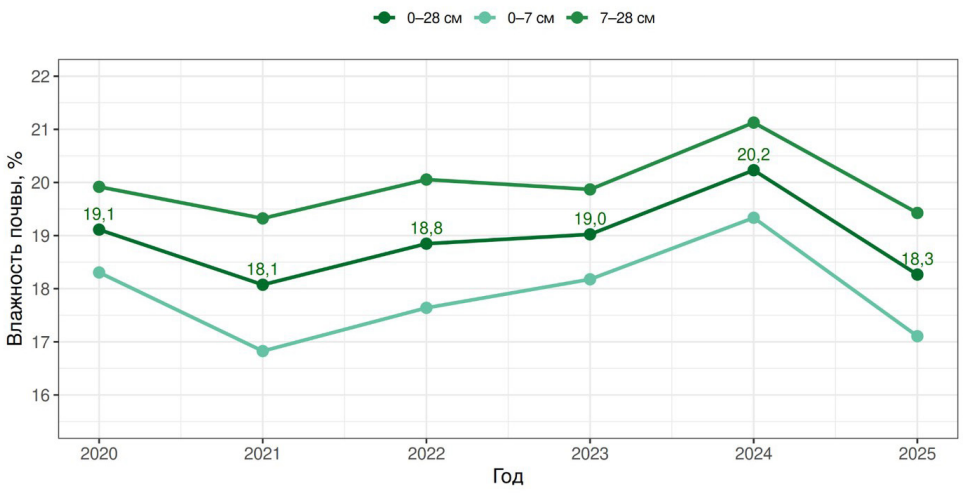


Влажность почвы

Влажность почвы ERA5-Land была рассчитана для слоёв 0–7 см, 7–28 см и усреднённого слоя 0–28 см за май–сентябрь. Средняя влажность почвы 0–28 см была минимальной в 2021 г. (18,1%) и максимальной в 2024 г. (20,2%).

Рисунок 18

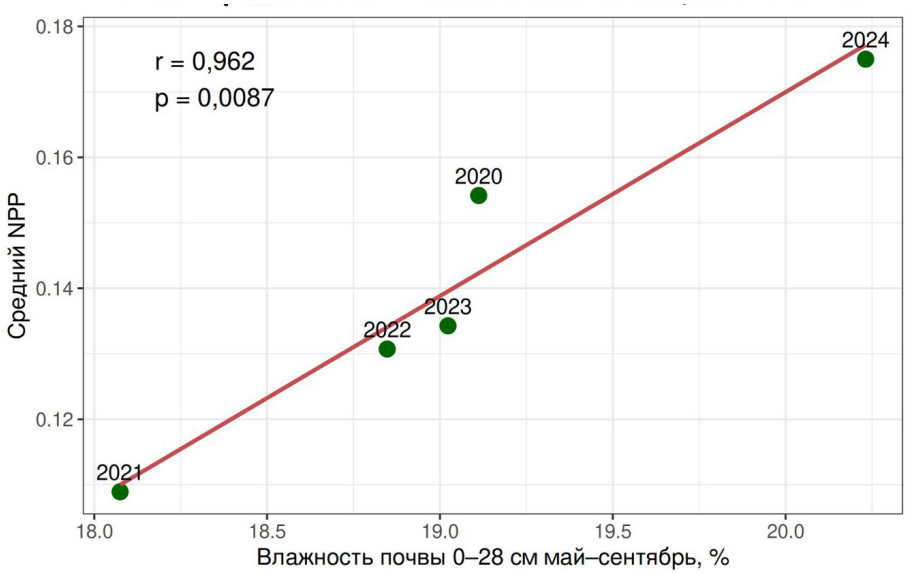
Динамика влажности почвы ERA5-Land в Илийском районе за май–сентябрь 2020–2025 гг.



Наиболее сильная связь выявлена между влажностью почвы 0–28 см и NPP: r = 0,962 при p = 0,0087. Это является одним из наиболее значимых статистических подтверждений роли влагообеспеченности верхнего почвенного слоя в формировании продуктивности растительности.

Рисунок 19

Связь среднего NPP с влажностью почвы 0–28 см за май–сентябрь за 2020–2024 гг.



Обобщение корреляционного и трендового анализа

Сводная таблица показывает, что наиболее устойчивые связи связаны с водным режимом: NPP положительно связан с осадками и влажностью почвы, а NDVI и VCI – с водным эквивалентом снега. В таблице представлены как коэффициенты Пирсона, отражающие линейную связь, так и коэффициенты Спирмена, характеризующие ранговую согласованность показателей. Температурный фактор имеет преимущественно отрицательную связь с показателями состояния растительности и положительную связь с альбедо и BSI.

Таблица 3

Основные корреляционные связи климатических и биофизических показателей

Пара показателей	n	Pearson r (p)	Spearman rho (p)	Интерпретация
NPP – осадки май–сентябрь	5	0,954 (p=0,0118)	1,000 (p=0,0000)	сильная положительная, значимая
NPP – влажность почвы 0–28 см	5	0,962 (p=0,0087)	1,000 (p=0,0000)	сильная положительная, значимая
NDVI – SWE ноябрь–март	6	0,854 (p=0,0304)	0,943 (p=0,0048)	сильная положительная, значимая
VCI – SWE ноябрь–март	6	0,860 (p=0,0279)	0,886 (p=0,0188)	сильная положительная, значимая
NDVI – температура май–сентябрь	6	-0,820 (p=0,0457)	-0,886 (p=0,0188)	сильная отрицательная, значимая
VCI – температура май–сентябрь	6	-0,804 (p=0,0541)	-0,714 (p=0,1108)	сильная отрицательная, близкая к значимой
Альбедо – температура май–сентябрь	6	0,735 (p=0,0961)	0,600 (p=0,2080)	положительная тенденция
BSI – температура май–сентябрь	6	0,552 (p=0,2565)	0,657 (p=0,1562)	положительная, незначимая

Таблица 4
Тест Манна–Кендалла и наклон Сена

Показатель	τ	p	Наклон Сена/год	Направление
Годовые осадки	0,200	0,5730	12,981	рост
Осадки май–сентябрь	0,067	0,8510	2,399	рост
Среднегодовая температура	0,733	0,0388	0,214	рост, значимый
Температура май–сентябрь	0,333	0,3476	0,120	рост
NDVI	-0,333	0,3476	-0,00187	снижение
BSI	0,467	0,1885	0,00256	рост
Альбедо	0,600	0,0909	0,00161	рост
VCI	-0,467	0,1885	-4,900	снижение
NPP	0,400	0,3272	0,00894	рост

Сравнение hotspot и non-hotspot зон

Для проверки различий между hotspot-зонами и фоновой территорией был применён критерий Манна-Уитни. В анализ включены только независимые показатели, не использованные при построении hotspot-карты: NPP, влажность почвы 0–28 см, SWE и температура май–сентябрь. На первом этапе в QGIS были сформированы две выборки случайных точек: 100 точек в hotspot-зонах и 100 точек вне hotspot-зон. Затем для каждой точки были извлечены значения соответствующих растров. Для NPP после исключения NoData осталось 98 наблюдений в hotspot-зонах и 86 наблюдений вне hotspot-зон; для остальных факторов объём выборок составил 100/100. Результаты показали, что hotspot-зоны статистически значимо отличаются по NPP и влажности почвы.

Таблица 5
Результаты критерия Манна–Уитни для hotspot и non-hotspot зон

Показатель	n hotspot	n non-hotspot	Среднее hotspot	Среднее non-hotspot	p	Вывод
NPP	98	86	0,1333	0,1450	0,0057	ниже в hotspot
Влажность почвы 0–28 см	100	100	16,4001	18,8457	0,0339	ниже в hotspot
SWE ноябрь–март	100	100	4,6267	5,5687	0,5283	различия незначимы
Температура май–сентябрь	100	100	23,5211	23,4321	0,2011	различия незначимы

Полученные результаты показывают, что деградационный риск на территории Илийского района формируется не одним фактором, а сочетанием состояния растительного покрова, оголённости почвы, отражательной способности поверхности и климато-гидрологических условий. Интегральная карта отражает общий фон риска, тогда как hotspot-анализ выделяет наиболее устойчивые очаги, где одновременно проявляются неблагоприятные значения всех четырёх индикаторов. Поэтому высокая доля классов высокого и очень высокого риска должна интерпретироваться как фоновая напряжённость аридной территории, а не как равномерная степень деградации каждого участка.

Полученная картина в целом согласуется с результатами региональных исследований по Иле-Балхашскому бассейну. Так, в рабо-

те Bissenbayeva et al. (2025) для более крупной территории Иле-Балхашского региона также показано широкое распространение средних, высоких и очень высоких степеней деградации, а для оценки использовались NDVI, альбедо, LST, NPP и климатические факторы. Сходство состоит в том, что в обоих случаях участки повышенного риска связаны с разреженной растительностью, высоким отражением поверхности и аридными условиями. Различие связано с масштабом анализа: в настоящем исследовании рассмотрен только Илийский район и применён строгий hotspot-критерий по четырём нормированным индексам Sentinel-2.

Доля высокого и очень высокого риска в настоящей работе оказалась значительной, что объясняется природной спецификой района. Илийский район относится к аридным и полуаридным ландшафтам юго-восточного Казахстана, где естественно распространены пустынные и полупустынные сообщества, а растительный покров часто имеет разреженный характер. Поэтому результаты следует трактовать с учётом ботанико-географического фона территории: низкие значения NDVI не всегда означают антропогенную деградацию, но в сочетании с повышенными BSI, альбедо и низким VCI они указывают на повышенную вероятность деградационного риска (Рачковская и др., 2003).

Связь продуктивности растительности с осадками и влажностью почвы подтверждает лимитирующую роль влагообеспеченности в условиях Илийского района. Положительная корреляция NPP с осадками май–сентябрь и влажностью почвы 0–28 см показывает, что продуктивность растительного покрова быстро реагирует на изменение водного режима. Это соответствует общим представлениям о функционировании аридных экосистем, где именно доступность влаги является главным ограничивающим фактором для биомассы, сезонного восстановления и устойчивости растительности (IPCC, 2021; UNCCD, 2017).

Значимая связь NDVI и VCI с водным эквивалентом снега показывает, что для территории исследования важны не только осадки вегетационного периода, но и предвегетационный запас влаги. SWE отражает количество воды, заключённой в снежном покрове, и не является показателем испарения. Его положительная связь с NDVI и VCI указывает на то, что зимне-весеннее увлажнение может создавать стартовые условия для развития растительности в начале сезона. Это особенно важно для пастбищных и пустынно-степных ландшафтов, где весенняя влага часто определяет дальнейшее состояние растительного покрова.

Температурный фактор проявляет обратную связь с NDVI и VCI, а также положительную связь с альбедо и BSI. Такая направленность согласуется с результатами аналогичных исследований аридных территорий: рост температуры усиливает испарительный спрос атмосферы, ускоряет иссушение верхнего слоя почвы и может приводить к снижению зелёной биомассы. В то же время связь температуры с NPP оказалась менее однозначной, что может объясняться коротким временным рядом, различиями между разрешением MODIS и Sentinel-2, а также локальной неоднородностью землепользования.

Сравнение hotspot- и non-hotspot-зон с использованием критерия Манна-Уитни усиливает интерпретацию полученной карты. Hotspot-зоны оказались статистически значимо отличными не только по индексам, использованным для их выделения, но и по независимым показателям: сниженной продуктивности NPP и меньшей влажности почвы. Это означает, что выделенные очаги не являются только результатом формальной классификации по спектральным индексам, а имеют самостоятельное экологическое содержание, связанное с худшей влагообеспеченностью и меньшей продуктивностью.

Практическое значение результатов заключается в возможности использовать интегральную карту и hotspot-слой для предварительного ранжирования участков, требующих полевой проверки. В первую очередь внимание следует уделять территориям, где совпадают низкий NDVI и VCI, повышенный BSI и альбедо, а также низкие значения NPP и влажности почвы. Такие участки могут рассматриваться как приоритетные для мониторинга пастбищной нагрузки, оценки состояния почвы, уточнения видового состава растительности и планирования мер по снижению деградационного риска.

Вместе с тем результаты следует интерпретировать с учётом ограничений. ERA5-Land имеет более грубое пространственное разрешение, чем Sentinel-2, а MODIS NPP представлен с разрешением 500 м, поэтому прямое сопоставление всех слоёв возможно только как обобщённый пространственно-статистический анализ. Кроме того, временной ряд 2020–2025 гг. относительно короткий для устойчивого вывода о долгосрочных трендах. В дальнейших исследо-

ваниях целесообразно расширить период наблюдений, добавить почвенные показатели SoilGrids и полевые данные для верификации выделенных hotspot-зон.

Заключение

На основе спутниковых индексов Sentinel-2, показателя MODIS NPP и климато-гидрологических данных ERA5-Land выполнена комплексная оценка деградационного риска на территории Илийского района за 2020–2025 гг. Основная интегральная карта построена по четырём компонентам – NDVI, BSI, альбедо и VCI, которые отражают состояние растительности, степень оголённости почвы, отражательную способность поверхности и относительное состояние растительного покрова.

Установлено, что классы высокого и очень высокого интегрального риска занимают 7318,9 км², или 88,91% анализируемой территории. Это указывает на выраженную экологическую напряжённость аридных ландшафтов района. При этом строгие hotspot-зоны занимают только 24,7 км², или 0,30% территории, поскольку они выделены по одновременному превышению порога риска 0,75 для всех четырёх индексов. Такой подход позволяет отделить общий фон риска от наиболее устойчивых очагов, требующих приоритетной проверки.

Климатический анализ показал, что наиболее информативными факторами являются показатели влагообеспеченности. NPP статистически значимо связан с осадками за май–сентябрь и влажностью почвы 0–28 см, а NDVI и VCI – с водным эквивалентом снега за ноябрь–март. Это подтверждает, что продуктивность и состояние растительного покрова в Илийском районе во многом определяются не только количеством осадков в период вегетации, но и запасом влаги, сформированным в зимне-весенний период.

Температурный фактор имеет преимущественно неблагоприятное направление связи: рост температуры за май–сентябрь сопровождается снижением NDVI и VCI, а также тенденцией к повышению альбедо и BSI. Это указывает на усиление сухости поверхности и увеличение роли открытой почвы при более тёплых условиях. Ветер в данном исследовании не показал статистически значимых связей с основными индексами, однако он может усиливать локальные дефляционные процессы на участках с разреженной растительностью.

Критерий Манна-Уитни подтвердил, что hotspot-зоны отличаются от фоновой территории по независимым показателям. В пределах hotspot-зон выявлены статистически значимо более низкие значения NPP и влажности почвы 0–28 см. Следовательно, выделенные очаги деградационного риска отражают не только спектральные особенности поверхности, но и реальные различия в продуктивности и водном режиме верхнего почвенного слоя.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные карты и статистические результаты могут использоваться для предварительного экологического районирования, выбора участков полевых обследований и мониторинга пастбищной нагрузки. Наиболее приоритетными для дальнейшей проверки являются зоны, где совпадают высокий интегральный риск, hotspot-признаки, низкий NPP и пониженная влажность почвы. В дальнейшем исследование целесообразно дополнить почвенными характеристиками SoilGrids, расчётом SQI, более длинным временным рядом и полевыми геоботаническими наблюдениями для уточнения причин деградации и разработки практических мер восстановления.

Благодарности

Авторы выражают благодарность разработчикам открытых геопространственных данных Sentinel-2, MODIS, ERA5-Land, JRCGlobalSurfaceWater и GoogleEarthEngine за предоставление инфраструктуры и архивов данных.

Вклад авторов

Аймухан Т.Б.: концептуализация, методология, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, программное обеспечение, визуализация, написание – первоначальный вариант; Нуртазин С.Т.: концептуализация, методология, научное руководство, валидация, написание – рецензирование и редактирование; Манкибаева С.А.: методология, валидация, научное руководство, написание – рецензирование и редактирование.

Литература

Bissenbayeva, S., Salmurzauly, R., Tokbergenova, A., Zhengissova, N., & Xing, J. (2025). Assessment of degraded lands in the Ile-Balkhash region, Kazakhstan. *Frontiers in Earth Science, 12*, Article 1453994. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1453994

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

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

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146*(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.

Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research, 15*(11), 91–100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment, 76*(2), 213–238. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, 13*(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics, 18*(1), 50–60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data, 13*, 4349–4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London, 58*, 240–242.

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature, 540*, 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584

Rachkovskaya, E. I., Volkova, E. A., & Khramtsov, V. N. (Eds.). (2003). *Botanicheskaya geografiya Kazakhstana i Sredney Azii (v predelakh pustynnoy oblasti) [Botanical geography of Kazakhstan and Central Asia (within the desert region)]*. Boston-Spektr.

Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology, 43*(1), 39–47.

Running, S. W., & Zhao, M. (2019). *MOD17A3HGF MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly L4 global 500m SIN grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association, 63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology, 15*(1), 72–101. https://doi.org/10.2307/1412159

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

United Nations Convention to Combat Desertification. (2017). *The global land outlook*.

Сведения об авторах:

Аймухан Таргын Болатулы (корреспондент-автор) – магистрант Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: nilkemat@gmail.com).

Нуртазин Сабыр Темиргалиевич – д. б. н., профессор, старший преподаватель Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: nurtazin.sabir@gmail.com).

Манкибаева Сандугаш Аманжоловна – магистр, старший преподаватель Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sandugash.mankibaeva@kaznu.edu.kz).

Information about the authors:

Aimukhan Targyn (corresponding author) – Master's student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nilkemat@gmail.com).

Nurtazin Sabir – Doctor of Biological Sciences, professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurtazin.sabir@gmail.com).

Mankibaeva Sandugash – Master of Science in Biology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sandugash.mankibaeva@kaznu.edu.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Аймухан Тарғын Болатұлы (кореспонденттік автор) – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің магистранты (Алматы, Қазақстан, e-mail: nilkemat@gmail.com).

Нуртазин Сабыр Темиргалиевич – б.г.д., профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: nurtazin.sabir@gmail.com).

Манкибаева Сандугаш Аманжоловна – магистр, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: sandugash.mankibaeva@kaznu.edu.kz).

Поступило 21 января 2026 года
Принято 15 сентября 2026 года