УДК 332.14:502.131.1:004.9(575.172)

Реймова Г. П.

Независимый исследователь

Каракалпакское отделение Академии наук Республики Узбекистан

Республика Узбекистан, г. Нукус

ПРОСТРАНСТВЕННО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

Аннотация. *Исследование посвящено разработке пространственно-информационной модели поддержки устойчивого развития Каракалпакстана в условиях экологических преобразований Приаралья. Цель работы — сформировать воспроизводимую схему интеграции спутниковых, природно-ресурсных и социально-экономических показателей для территориального управления. На основе системного анализа предложены четырехблочная архитектура геоинформационной системы, порядок нормализации показателей и интегральный индекс эколого-экономической напряженности (IEETI). Разработана методическая матрица приоритизации природоохранных и инфраструктурных мер по трем уровням риска. Результаты имеют характер методологического проектирования и задают основу для последующего расчета индекса по районам и эмпирической проверки его точности.*

Ключевые слова: *устойчивое развитие; пространственно-информационная модель; геоинформационные системы; дистанционное зондирование Земли; экологическая уязвимость; интегральный индекс; Каракалпакстан.*

Reymova G. P.

Independent researcher

Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Nukus, Republic of Uzbekistan

SPATIAL INFORMATION MODEL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE REPUBLIC OF KARAKALPAKSTAN UNDER ENVIRONMENTAL TRANSFORMATIONS

Abstract. *This study develops a spatial information framework to support sustainable development in Karakalpakstan under the environmental transformations affecting the Aral Sea region. The objective is to establish a reproducible approach to integrating satellite-derived, environmental, and socioeconomic indicators for territorial decision-making. Based on a systems approach, the paper proposes a four-component GIS architecture, indicator normalization procedures, and an integrated environmental–economic tension index (IEETI). A methodological matrix is presented to link three indicative risk classes with targeted environmental and infrastructure policy responses. The findings represent a conceptual and methodological design rather than validated district-level estimates, and provide a basis for subsequent empirical implementation.*

Keywords: *sustainable development; spatial information model; geographic information systems; remote sensing; environmental vulnerability; composite index; Karakalpakstan.*

Annotatsiya. *Maqolada Orolbo‘yi hududidagi ekologik o‘zgarishlar sharoitida Qoraqalpog‘iston Respublikasining barqaror rivojlanishini qo‘llab-quvvatlovchi fazoviy-axborot modelini shakllantirish masalasi ko‘rib chiqildi. Tadqiqotning maqsadi sun’iy yo‘ldosh, tabiiy-resurs va ijtimoiy-iqtisodiy ko‘rsatkichlarni hududiy boshqaruvda birlashtirish uslubiyatini ishlab chiqishdan iborat. Geografik axborot tizimining to‘rt tarkibiy qismi hamda ekologik-iqtisodiy keskinlik integral indeksi (IEETI) taklif qilindi. Uchta shartli xavf darajasi bo‘yicha ustuvor chora-tadbirlar matritsasi shakllantirildi. Taklif qilingan yondashuv konseptual-uslubiy xususiyatga ega bo‘lib, tumanlar kesimida amaliy hisoblash va tekshirish uchun asos yaratadi.*

Kalit so‘zlar: *barqaror rivojlanish; fazoviy-axborot modeli; geografik axborot tizimi; masofadan zondlash; ekologik zaiflik; integral indeks; Qoraqalpog‘iston.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальные климатические изменения, сокращение доступных водных ресурсов и деградация земель повышают требования к пространственной обоснованности региональной политики. Концепция устойчивого развития предполагает согласование экономических, социальных и экологических целей; интеграция данных рассматривается как инструмент мониторинга их достижения [1]. Для регионов с резкими различиями природных условий усредненные административные показатели не всегда отражают локальную структуру экологических рисков.

Республика Каракалпакстан представляет особый случай территориального развития вследствие многолетних преобразований бассейна Аральского моря. Согласно материалам Всемирного банка, высохшее дно моря — пустыня Аралкум площадью порядка 60 тыс. км² — выступает источником солепылевых переносов и связанных с ними природных и социально-экономических воздействий [2, 3]. В этих

условиях управление водообеспеченностью, деградацией почв, состоянием растительного покрова и инфраструктурным развитием требует пространственно согласованных сведений.

Методологические основания пространственного анализа связаны с учетом географической взаимозависимости объектов, описанной У. Тоблером [4], проблемами пространственной агрегации, обсуждаемыми М. Гудчайлдом [5], и концепцией геопространственной информационной инфраструктуры Дж. Дангермонда и М. Гудчайлда [6]. В моделировании территориальных систем существенны также представления о сетях, потоках и взаимосвязи элементов, разработанные М. Батти [7]. Эти подходы дополняют традиционную региональную статистику географической локализацией процессов.

Проблема исследования состоит в отсутствии единой описанной процедуры, которая объединяла бы экологические данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), сведения об использовании водных и земельных ресурсов и социально-экономические показатели на сопоставимом пространственном уровне. Цель статьи — разработка концептуальной пространственно-информационной модели (ПИМ) устойчивого развития Каракалпакстана и формализация механизма территориальной приоритизации управленческих решений. Задачи: определить структуру исходных данных, предложить интегральный индекс эколого-экономической напряженности, описать порядок его интерпретации и сформулировать ограничения последующей эмпирической проверки.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено как системно-методологическое проектирование с использованием сравнительного анализа научных подходов к геоинформационной инфраструктуре, многокритериальной

оценке и территориальному мониторингу. Объектом моделирования являются административные территории Республики Каракалпакстан, а предметом — механизм сопряжения экологических и социально-экономических показателей для поддержки решений. Представленный материал описывает алгоритм и архитектуру системы; массивы районных наблюдений, результаты калибровки и оценка прогностической точности не представлены и не выдаются за выполненные расчеты.

2.1. Информационная основа модели

Предусмотрены четыре взаимосвязанных функциональных блока. Первый блок содержит мультиспектральные снимки Sentinel-2, Landsat и MODIS, климатические данные ERA5-Land и цифровые модели рельефа. Второй блок объединяет статистические и кадастровые данные по административным единицам, включая водопотребление, состояние мелиоративной сети, занятость, доходы и характеристики хозяйственной деятельности. Третий блок предназначен для расчета индикаторов, пространственной агрегации и анализа динамики. Четвертый блок формирует картографические отчеты и сценарии управленческих мер.

Для описания динамики растительного покрова может применяться нормализованный разностный индекс растительности NDVI [8]. При анализе водного состояния растительности применим индекс NDWI в определении Б. Гао [9]; его следует отличать от одноименного индекса выделения открытой воды. Спектральные показатели засоления подлежат выбору с учетом типа почвы и обязательной наземной проверке. Для предотвращения ошибочной интерпретации индикаторы должны рассчитываться на сопоставимых сезонных интервалах, с маскированием облачности и контролем числа пригодных наблюдений.

Пространственное согласование предполагает приведение данных к единой системе координат, проверку границ административных единиц,

согласование временных периодов и учет различий масштаба. Пиксельные показатели агрегируются по районам после оценки качества наблюдений, а экономические показатели относятся к тем же территориям и периодам. Пространственную автокорреляцию можно оценивать индексом Морана I; при выявлении зависимости соседних территорий следует учитывать ее в дальнейшем регрессионном анализе.

2.2. Конструирование интегрального индекса

Для интеграции разноразмерных показателей предлагается индекс эколого-экономической напряженности $IEETI_i$, где i обозначает административную территорию. Каждый компонент предварительно приводится к интервалу от 0 до 1; для показателей, где большее значение соответствует благоприятному состоянию, направление шкалы инвертируется. Тогда повышение итогового индекса однозначно означает повышение напряженности.

$$IEETI_i = 0{,}35 \times EnvRisk_i + 0{,}30 \times WaterDef_i + 0{,}20 \times SocVuln_i + 0{,}15 \times (1 - EconCap_i),$$

где $EnvRisk_i$ — агрегированная экологическая опасность (деградация земель, состояние растительного покрова и засоление);

$WaterDef_i$ — дефицит водных ресурсов;

$SocVuln_i$ — социальная уязвимость;

$EconCap_i$ — экономический потенциал и способность территории адаптироваться. Коэффициенты 0,35; 0,30; 0,20; 0,15 составляют исходную экспертную конфигурацию, а не результат документированного опроса специалистов. При практической апробации их необходимо уточнить, например с помощью метода анализа иерархий Т. Саати, с проверкой согласованности оценок и анализом чувствительности [10].

Преобразование показателя x в нормализованное значение z для фиксированного периода осуществляется по правилу $z = (x - x_{min})/(x_{max} -$

x_{min}), если рост x соответствует возрастанию риска. Для показателей благополучия применяется 1 − z. При равенстве x_{max} и x_{min} показатель исключается из сравнения или получает заранее установленное нейтральное значение. Границы нормализации должны определяться единообразно для всех сопоставляемых районов и периодов, иначе динамика индекса может отражать изменение шкалы, а не ситуации на местности.

Таблица 1. Логика формирования компонентов IEETI

Компонент / вес	Потенциальные исходные показатели	Направление роста риска
EnvRisk / 0,35	Тренд NDVI; индикаторы засоления; доля деградированных земель	Снижение растительности, усиление деградации
WaterDef / 0,30	Водообеспеченность; перебои подачи; доступ к безопасной воде	Увеличение недостатка воды
SocVuln / 0,20	Безработица; уязвимость доходов; доступность услуг	Повышение социальной уязвимости
EconCap / 0,15	Диверсификация экономики; инвестиции; обеспеченность инфраструктурой	Уменьшение экономического потенциала

В таблице 1 приведен состав индекса, подлежащий уточнению по доступности статистики и проверяемости спутниковых показателей. Показатели должны иметь документированные источники, единицы измерения, периодичность обновления и правила работы с пропущенными значениями. Для районных сравнений рекомендуется сохранять архив входных данных и версию весов.

2.3. Проверка устойчивости и аналитическая интерпретация

Предлагаемая проверка включает сопоставление дистанционных индексов с наземными измерениями, повторный расчет при изменении весов, пространственную проверку устойчивости районных рангов и анализ влияния недостающих данных. Для будущей регрессионной части необходимо указывать период, число наблюдений, спецификацию модели, процедуру оценки пространственной зависимости и доверительные

интервалы. До получения районного массива не допускается интерпретация сценарных допущений как установленной корреляции или причинного эффекта.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Архитектура пространственно-информационной модели

Основным результатом работы является разработанная функциональная схема ПИМ. На уровне хранения данных предусматривается пространственная база PostGIS с версионированием административных границ и атрибутов; на уровне подготовки и проверки — обработка спутниковых изображений и пространственные операции в среде QGIS; на уровне публикации — картографические сервисы и информационная панель для органов управления. Технологии рассматриваются как варианты реализации предлагаемой архитектуры, а не как уже введенная в эксплуатацию государственная система.

Рабочий цикл включает: получение и контроль качества данных; расчет спектральных и статистических показателей; пространственное объединение по административным единицам; формирование IEETI; картографическую визуализацию уязвимости; сопоставление альтернативных сценариев; выдачу рекомендаций. Преимуществом подобной структуры является возможность прослеживать путь от первичного индикатора до управленческого решения и обновлять отдельные модули независимо от других.

3.2. Матрица пространственных приоритетов

Вторым результатом является предложенная нормативно-методическая классификация итогового индекса на три диапазона. Границы IEETI ниже 0,45; от 0,45 до 0,75; выше 0,75 служат первоначальной схемой интерпретации и должны уточняться при калибровке по фактическому распределению районных оценок.

Приведенные в таблице 2 территории обозначают возможные направления анализа, но не являются результатом рассчитанного районирования.

Таблица 2. Предлагаемая интерпретация IEETI и направления политики

Класс / условие	Территориальный контекст (примеры)	Приоритетные меры
Высокая напряженность IEETI > 0,75	Зоны вблизи осушенного дна Арала; для первичного анализа — Муйнакский район	Лесомелиорация, контроль пылевых переносов, устойчивое локальное водоснабжение
Повышенная напряженность 0,45 ≤ IEETI ≤ 0,75	Районы с орошаемыми землями и водохозяйственными ограничениями; примеры — Шуманайский, Чимбайский	Повышение эффективности водопользования, мелиорация, противосолевые мероприятия
Относительная устойчивость IEETI < 0,45	Более диверсифицированные экономические центры; для анализа — г. Нукус и прилегающие территории	Ресурсосберегающие технологии, экологическая инфраструктура, зеленая урбанизация

Территориальные примеры в таблице 2 нельзя понимать как фактическое присвоение районов классам: такая классификация потребует численных значений всех компонентов и оценки неопределенности. После расчета следует публиковать не только класс территории, но и исходные составляющие IEETI, чтобы избежать принятия решений по одному агрегированному показателю.

3.3. Прикладные сценарии использования

Третьим результатом является логика сопоставления пространственных рисков с инструментами региональной политики. Для Приаралья особенно значимы агролесомелиорация и восстановление земель: международные и национальные программы рассматривают озеленение осушенного дна Арала как одно из направлений снижения экологических рисков [2, 11]. Пространственная модель позволяет задавать очередность обследований, сопоставлять потенциальные участки и

оценивать результативность выполненных мероприятий, не подменяя полевую проверку.

Таблица 3. Управленческие сценарии, поддерживаемые предлагаемой моделью

Направление	Проверяемые данные	Выходной продукт
Лесомелиорация	Динамика покрова, почвы, ветровой режим, сохранность посадок	Карта приоритетных участков и мониторинга
Водная безопасность	Обеспеченность водой, потери, состояние каналов, засоление	Карта дефицита и перечень участков обследования
Аграрная адаптация	NDVI, влажность, структура посевов, водоподача	Сценарная оценка уязвимости угодий
Инвестиционная политика	IEETI и компоненты, инфраструктура, доступность услуг	Карта ограничений и вариантов размещения

Идея цифрового двойника Приаралья может рассматриваться как последующий этап развития платформы: он должен объединять архив измерений, актуальные снимки, сценарные модели и обратную связь с хозяйственными решениями. Однако утверждения о способности прогнозировать конкретное сокращение урожайности, доходов или миграцию населения допустимы лишь после построения и независимой проверки соответствующих моделей. Наличие спутниковых индексов само по себе не доказывает экономическую причинность.

3.4. Ограничения и условия практического внедрения

Предложенный интегральный индекс чувствителен к выбору базового периода, единиц нормализации, способу агрегации и экспертным весам. Региональная неоднородность может приводить к тому, что агрегированные оценки скрывают локальные очаги уязвимости; поэтому их необходимо сопровождать картами исходных факторов. Особого внимания требуют пространственная неоднозначность границ, сезонная несопоставимость спутниковых снимков, влияние облачности, ошибки наземной статистики и разная частота обновления ведомственных данных.

Исследование имеет концептуальный характер. В нем не приводятся исходные районные таблицы, рассчитанные значения IEETI, результаты пространственной регрессии либо статистически подтвержденные зависимости между NDVI и сельскохозяйственной продуктивностью. Соответственно, модель пока следует рассматривать как воспроизводимую методическую разработку; статус эмпирически верифицированного инструмента возможен после получения данных, расчета и внешней проверки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена структура пространственно-информационной модели устойчивого развития Республики Каракалпакстан, связывающая дистанционное зондирование Земли, геопространственные базы, социально-экономические показатели и поддержку управленческих решений. В отличие от изолированного отраслевого мониторинга, модель предусматривает согласование показателей во времени и пространстве и документируемую процедуру формирования итогового индекса.

Формализован интегральный индекс эколого-экономической напряженности IEETI с четырьмя компонентами: экологические риски, водный дефицит, социальная уязвимость и экономический потенциал. Для сохранения интерпретируемой шкалы экономическая составляющая включена в виде величины (1 − EconCap). Представленная система весов и трехуровневая классификация имеют исходный методический характер и требуют дальнейшей экспертной и статистической калибровки.

Практическое применение предполагает поэтапное формирование региональной базы данных, апробацию индекса по административным районам, проверку устойчивости результатов, а затем использование карт для приоритизации лесомелиоративных, водохозяйственных и инфраструктурных мероприятий. Развитие платформы до уровня

цифрового двойника возможно только при организации регулярного обновления информации, верификации моделей и институциональной координации пользователей.

Перспективным направлением является эмпирическая проверка предложенного подхода на многолетних рядах ДЗЗ, кадастровых материалах и официальной статистике. Это позволит оценить объясняющую и прогностическую способность IEETI, уточнить границы классов и определить условия обоснованного применения индекса в региональной политике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1. New York: United Nations, 2015. URL: https://sdgs.un.org/2030agenda (дата обращения: 02.11.2026).

2. World Bank. Greening the Desert: The Role of Landscape Restoration in Uzbekistan’s Battle Against Sand and Dust Storms. 04.12.2024. URL: https://www.worldbank.org/en/news/feature/2024/12/04/greening-the-desert-the-role-of-landscape-restoration-in-uzbekistan-s-battle-against-sand-and-dust-storms (дата обращения: 02.11.2026).

3. World Bank. Environment Program in Central Asia. 29.06.2025. URL: https://www.worldbank.org/en/brief/2025/06/29/climate-and-environment-program-in-central-asia (дата обращения: 02.11.2026).

4. Tobler W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region // Economic Geography. 1970. Vol. 46 (suppl.). P. 234–240. DOI: 10.2307/143141.

5. Goodchild M. F. The Openshaw effect // International Journal of Geographical Information Science. 2022. Vol. 36, No. 9. P. 1697–1698. DOI: 10.1080/13658816.2022.2102637.

6. Dangermond J., Goodchild M. F. Building geospatial infrastructure // Geo-Spatial Information Science. 2020. Vol. 23, No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1080/10095020.2019.1698274.

7. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge, MA: MIT Press, 2013. 520 p.

8. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. NASA SP-351. 1974. P. 309–317. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614 (дата обращения: 02.11.2026).

9. Gao B.-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, No. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

10.Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

11.Агентство лесного хозяйства Республики Узбекистан. На высохшем дне Аральского моря реализуются перспективные проекты. 06.10.2025. URL: https://gov.uz/ru/urmon/news/view/91246 (дата обращения: 02.11.2026).