

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS / ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР / ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 63–71
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005>
UDC / УДК / ЭОЖ 81.93.21;

ENVIRONMENTAL VALUE ASSESSMENT METHODS FOR IT PROJECTS: A SYSTEMATIC REVIEW

*Y. Mukametali**

International University of Information Technologies, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Yernazar Mukametali — Master student of the Department of Information Systems, International University of Information Technologies
E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Y. Mukametali

Abstract. The assessment of the environmental value of IT projects is one of the most active interdisciplinary topics in modern project management, located at the intersection of environmental impact assessment (EIA), green-IT engineering and multi-criteria decision analysis (MCDA). The aim of this article is to systematise existing methods of environmental value assessment of projects and to identify the opportunities for their digitalisation in the management of IT projects. The research methodology is based on a structured literature review of 32 peer-reviewed publications (Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink, 2014–2025) and a comparative analysis of seven international and national standards (ISO 14001:2015, ISO 14040:2006 LCA, GRI 300-series, ESPOO Convention, Equator Principles, KZ Environmental Code 2021, Concept Green Economy RK 2050). The results demonstrate four dominant clusters of environmental assessment methods — qualitative (Leopold matrix, checklists), quantitative (LCA, carbon-footprint), MCDA-hybrid (AHP-TOPSIS, PROMETHEE) and AI-based (machine-learning surrogate models, NLP for EIA documents) — and reveal that the digital Leopold matrix combined with expert-augmented AI agents shows the highest applicability for IT projects (combined coverage index of 0.86 and operational maturity of 0.71). The paper specifies methodological requirements for a multidimensional environmental value model intended for an AI-augmented decision-support tool in IT-project management. The findings are relevant for academic researchers, environmental analysts, PMOs and government agencies working on green-IT initiatives in Kazakhstan and the EAEU region.

Keywords: environmental project, IT project, Leopold matrix, EIA, environmental value, multi-criteria assessment, AI agent, life cycle assessment, sustainable development

For citation: Mukametali Y. (2026). Environmental value assessment methods for IT projects: a systematic review // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 63–71. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (In Russ.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.



ИТ-ЖОБАЛАРДЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ҚҰНДЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУ ӘДІСТЕРІ: ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

Е. Мұқаметәлі*

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Мұқаметәлі Ерназар — «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының магистранты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Мұқаметәлі Ерназар

Аннотация. ИТ-жобалардың экологиялық құндылығын бағалау қазіргі заманғы жобаны басқарудың ең белсенді пәнаралық тақырыптарының бірі болып табылады, ол қоршаған ортаға әсерді бағалау (EIA), жасыл ИТ-инженерия және көпкритериалды талдау (MCDA) тоғысында орналасқан. Мақаланың мақсаты — жобалардың экологиялық құндылығын бағалаудың қолданыстағы әдістерін жүйелеу және оларды ИТ-жобаларды басқару шеңберінде цифрландыру мүмкіндіктерін айқындау. Әдіснама — Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink базаларынан 2014–2025 жылдары жарияланған 32 пирецензияланған еңбекті құрылымдық шолу және жеті халықаралық пен ұлттық стандартты салыстырмалы талдау. Нәтижелер экологиялық бағалау әдістерінің төрт басым кластерін көрсетеді: сапалы (Леопольд матрицасы, тізімдер), сандық (LCA, көміртегі ізі), MCDA-гибридтік (АНР-TOPSIS, PROMETHEE) және ЖИ-негізіндегі (machine-learning surrogate models, NLP EIA-құжаттарға). Цифрлық Леопольд матрицасы мен сараптамалық AI-агенттердің үйлесімі ИТ-жобаларға ең жоғары қолданылғыштықты көрсетеді (қамту индексі 0,86 және операциялық жетілдігі 0,71). Көпөлшемді экологиялық құндылық үлгісіне қойылатын әдіснамалық талаптар тұжырымдалды. Нәтижелер Қазақстандағы және ЕАЭО елдеріндегі жасыл ИТ-бастамаларды іске асырушы зерттеушілер, экологиялық сарапшылар, РМО-бөлімшелері мен мемлекеттік органдар үшін өзекті.

Түйін сөздер: экологиялық жоба, ИТ-жоба, Леопольд матрицасы, EIA, экологиялық құндылық, көпкритериалды бағалау, ЖИ-агент, өмірлік цикл талдау, тұрақты даму

Дәйексөздер үшін: Мұқаметәлі Е. (2026). ИТ-жобалардың экологиялық құндылығын бағалау әдістері: жүйелі шолу // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 63–71 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ИТ-ПРОЕКТОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Мұқаметәлі Ерназар*

Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com

Мұқаметәлі Ерназар — магистрант кафедры «Информационные системы», Международный университет информационных технологий

E-mail: yernazar.mukametali@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-1717-4886>.

© Мұқаметәлі Ерназар

Аннотация. Оценка экологической ценности ИТ-проектов является одной из наиболее активно развивающихся междисциплинарных тем в современном управлении

проектами, расположенной на стыке оценки воздействия на окружающую среду (Environmental Impact Assessment, EIA), green-IT инженерии и многокритериального анализа решений (MCDA). Цель статьи — систематизировать существующие методы оценки экологической ценности проектов и определить возможности их цифровизации в рамках управления ИТ-проектами. Методология исследования основана на структурированном литературном обзоре 32 рецензируемых публикаций (Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink, 2014–2025 гг.) и сравнительном анализе семи международных и национальных стандартов (ISO 14001:2015, ISO 14040:2006 LCA, GRI серия 300, Конвенция ESPOO, Equator Principles, Экологический кодекс РК 2021, Концепция «Зелёная экономика РК 2050»). Полученные результаты демонстрируют четыре доминирующих кластера методов экологической оценки: качественные (матрица Леопольда, чек-листы), количественные (LCA, углеродный след), MCDA-гибридные (АНР-TOPSIS, PROMETHEE) и ИИ-методы (surrogate-модели машинного обучения, NLP-анализ EIA-документов). Установлено, что комбинация цифровой матрицы Леопольда с экспертно-усиленным ИИ-агентом обеспечивает наивысшую применимость для ИТ-проектов: коэффициент покрытия 0,86 и операциональная зрелость 0,71. Сформулированы методологические требования к многомерной модели экологической ценности, предназначенной для интеграции в ИИ-инструмент поддержки принятия решений в управлении ИТ-проектами. Результаты адресованы исследователям, экологическим аналитикам, РМО-подразделениям и государственным органам Республики Казахстан и стран ЕАЭС, реализующим green-IT инициативы.

Ключевые слова: экологический проект, ИТ-проект, матрица Леопольда, EIA, экологическая ценность, многокритериальная оценка, ИИ-агент, оценка жизненного цикла, устойчивое развитие

Для цитирования: Мұқаметәлі Е. (2026). Методы оценки экологической ценности ИТ-проектов: систематический обзор // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 63–71. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.005> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Проблема комплексной оценки воздействия проектов на окружающую среду является классической в природоохранной деятельности и эколого-экономическом анализе, однако её перенос в плоскость управления ИТ-проектами потребовал существенной методологической адаптации. На протяжении более чем шестидесяти лет инструментарий оценки экологической ценности развивался в рамках процедур Environmental Impact Assessment (EIA), оформленных Национальным актом США об охране окружающей среды 1969 года (NEPA) и Конвенцией Эспо 1991 года (UN ECE, 1991). За это время сформировался устойчивый набор техник: матрица Леопольда (Leopold, 1971), методы наложения карт McNarg (1969), оценка жизненного цикла Life Cycle Assessment по ISO 14040:2006, расчёт углеродного следа по GHG Protocol. Все эти методы создавались для физических проектов — строительных, инфраструктурных, энергетических — и недостаточно адаптированы к специфике цифровых проектов.

В то же время ИТ-проекты сами становятся источником значимого экологического воздействия: по данным Международного энергетического агентства (IEA, 2023), глобальное потребление электроэнергии центрами обработки данных в 2022 году составило около 460 ТВт·ч, или 1,7 % мирового потребления, и к 2030 году может вырасти до 800 ТВт·ч. Дополнительно ИТ-сектор формирует около 60 млн тонн электронных отходов ежегодно (UN Global E-Waste Monitor, 2024). Одновременно ИТ-проекты являются мощным инструментом снижения экологической нагрузки в других отраслях: умные счётчики, оптимизация логистики, точное земледелие, цифровые двойники.

Эта двойственность создаёт устойчивый исследовательский запрос: как количественно и многомерно оценивать экологическую ценность ИТ-проектов так, чтобы учитывать одновременно их собственный экологический след и эффект, оказываемый ими на сторонние процессы. Ответ требует синтеза методов природоохранной экспертизы (прежде всего матрицы Леопольда и LCA) с современными методами искусственного интеллекта, способными автоматизировать сбор и предобработку экологических данных, повысить воспроизводимость экспертных оценок и снизить трудоёмкость EIA-процедур.

Актуальность темы определяется тремя обстоятельствами. Во-первых, Экологический кодекс Республики Казахстан в редакции 2021 года и Концепция «Зелёная экономика 2050» (Указ Президента РК № 577 от 30.05.2013) предусматривают обязательность процедуры оценки воздействия на окружающую среду для широкого класса проектов, включая инвестиционно значимые ИТ-инициативы. Во-вторых, в академической литературе фиксируется устойчивый рост публикаций по green-ИТ и AI-augmented EIA: по данным Scopus, число статей по теме «AI + EIA» выросло с 41 в 2018 году до 312 в 2024 году. В-третьих, существующие методы оценки разработаны разрозненно и редко интегрированы в единый цифровой инструмент, пригодный к использованию РМО-подразделениями ИТ-компаний.

Объект исследования — оценка экологической ценности проектов в управлении ИТ-проектами. Предмет — методы и модели оценки экологической ценности, применимые к ИТ-проектам и допускающие цифровизацию. Цель статьи — систематизировать существующие методы оценки экологической ценности проектов и определить возможности их цифровизации в рамках управления ИТ-проектами, что соответствует первой задаче диссертации.

Задачи: (1) уточнить понятийный аппарат «экологическая ценность ИТ-проекта»; (2) выполнить классификацию существующих методов оценки и провести их сравнительный анализ; (3) проанализировать роль ИТ-решений (прежде всего цифровой матрицы Леопольда и ИИ-агентов) в экологической оценке; (4) сформулировать методологические требования к многомерной модели оценки экологической ценности ИТ-проектов.

Научная гипотеза. Цифровая трансформация классических процедур EIA — в первую очередь матрицы Леопольда — посредством её интеграции с многокритериальным анализом (MCDA) и ИИ-агентами автоматизированной оценки повышает полноту охвата экологической ценности ИТ-проектов и снижает трудоёмкость экспертной процедуры не менее чем в 3–5 раз при сохранении воспроизводимости результатов.

Значимость. Теоретический вклад — формирование единой типологии методов оценки экологической ценности ИТ-проектов и спецификация требований к многомерной модели и сопутствующему ИИ-агенту. Практическая значимость — возможность использования результатов исследования при разработке корпоративных и государственных инструментов экологической экспертизы цифровых инициатив.

Материалы и методы.

Методология работы опирается на принципы структурированного литературного обзора по PRISMA-2020 с дополнениями для предметной области экологической оценки. Поиск проводился в базах Scopus, ScienceDirect, MDPI, SpringerLink за период январь 2014 — апрель 2025 года с использованием логических запросов вида: TITLE-ABS-KEY (environmental impact assessment OR Leopold matrix OR life cycle assessment) AND (IT project OR "digital project OR green IT OR artificial intelligence).

После удаления дубликатов и применения критериев отбора (язык — английский, русский, казахский; цитируемость ≥ 3 для статей старше трёх лет; обязательное наличие методологического описания) из 487 первоначальных записей было оставлено 32 рецензируемых публикации. Дополнительно проанализированы семь международных и национальных стандартов: ISO 14001:2015 «Environmental management systems», ISO 14040:2006 «Life cycle assessment — Principles and framework», GRI 300-я серия

(Environmental Standards), Конвенция Эспо 1991 года, Equator Principles 4 (2020), Экологический кодекс Республики Казахстан 2021 года, Концепция «Зелёная экономика РК 2050».

Аналитическая процедура состояла из трёх этапов. На первом этапе по каждому источнику фиксировались: тип метода (качественный / количественный / гибридный / ИИ-усиленный), охватываемые компоненты окружающей среды (атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера, антропосфера), степень формализации (вербальная, табличная, математическая), уровень автоматизации (ручная, табличный калькулятор, веб-приложение, ИИ-агент). На втором этапе методы группировались в кластеры; на третьем этапе кластеры сравнивались по двум интегральным признакам: индексу покрытия (Coverage Index, CI) и операциональной зрелости (Operational Maturity, OM).

Coverage Index определялся как доля учитываемых компонентов окружающей среды от пяти возможных: $CI = m/5$. Operational Maturity — экспертно по шкале [0; 1] на основе четырёх критериев: формализация алгоритма (0,25), стандартизация индикаторов (0,25), наличие программной реализации (0,25), наличие практических кейсов (0,25). Триангуляция выполнялась за счёт сопоставления данных научных публикаций с нормативными документами и техническими отчётами IEA, GRI, UN ECE; Cohen's kappa между двумя кодировщиками = 0,84.

Понятие «экологическая ценность проекта». Термин «environmental value of a project» вошёл в академический оборот в середине 1990-х годов в работах Costanza с соавторами по экосистемным услугам (Costanza, 1997: 254). В управлении проектами концепция получила развитие в работах Silvius (2017: 1483), Marcelino-Sádaba (2015: 110), Bertoni (2020: 6), которые рассматривают экологическую ценность как одно из измерений общей ценности проекта наряду с экономическим и социальным. Применительно к ИТ-проектам экологическая ценность определяется как «совокупный вклад проекта в сохранение и улучшение состояния окружающей среды на всех этапах его жизненного цикла, измеряемый по нескольким компонентам окружающей среды и сопровождаемый достаточно низким собственным экологическим следом» (авторская формулировка).

Матрица Леопольда. Метод, предложенный Лютером Леопольдом и соавторами в 1971 году для нужд Геологической службы США (Leopold et al., 1971), стал одним из наиболее распространённых инструментов EIA. Матрица представляет собой двумерную таблицу размерности 100×88: по горизонтали — типы проектных воздействий (100 категорий: строительство, эксплуатация, утилизация), по вертикали — компоненты окружающей среды (88 категорий: качество воздуха, почвы, биологическое разнообразие). На пересечениях эксперты проставляют две оценки в диапазоне [1; 10]: величину воздействия (Magnitude) и его значимость (Importance). Итоговая экологическая оценка проекта складывается из произведений $M \times I$ по всем ячейкам с возможностью разложения по компонентам и видам воздействий. Несмотря на возраст метода, его актуальность не снизилась: в обзоре Pavlickova (2013: 8) показано, что матрица Леопольда остаётся базовым инструментом EIA в 40 % процедур в странах ОЭСР.

Сильные стороны матрицы Леопольда — наглядность, отсутствие требования к высокому уровню формализации, лёгкость коммуникации с не-экспертами. Слабые стороны — субъективность оценок Magnitude и Importance, отсутствие количественных единиц измерения, ограниченная сравнимость между проектами. Эти слабости частично преодолеваются в современных «расширенных» версиях матрицы: weighted Leopold matrix (с весами компонентов), fuzzy Leopold matrix (с нечёткими оценками), digital Leopold matrix (с программной поддержкой и автоматизированным агрегированием).

Оценка жизненного цикла (LCA). Метод, формализованный в ISO 14040:2006, рассматривает экологическую нагрузку продукта или проекта на всех этапах: добыча сырья, производство, использование, утилизация. LCA включает четыре фазы: определение цели и области исследования (Goal & Scope), инвентаризация (Life Cycle Inventory, LCI), оценка

воздействия (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), интерпретация. Для ИТ-проектов LCA особенно важна на этапе оценки экологической нагрузки оборудования и инфраструктуры (data centers, сетевое оборудование, пользовательские устройства). Однако классический LCA трудоёмок: типовое исследование занимает 3–6 месяцев экспертной работы и требует доступа к LCI-базам данных (Ecoinvent, GaBi).

Расчёт углеродного следа. Согласно методологии GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard, 2015), выбросы парниковых газов разделяются на три области: Scope 1 — прямые выбросы организации; Scope 2 — косвенные выбросы от потребления электроэнергии; Scope 3 — прочие косвенные выбросы (включая поставщиков и пользователей). Для ИТ-проектов наиболее значимы Scope 2 (потребление электроэнергии серверов) и Scope 3 (производство и утилизация оборудования). Coefficient-based методы расчёта стандартизированы и легко поддаются автоматизации.

MCDA-гибридные методы. Методы многокритериального анализа применяются для интеграции разнородных экологических индикаторов в единый показатель. Наиболее распространены АНР-TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE, fuzzy АНР. По данным Cinelli (2021: 75), в исследованиях экологической оценки доля АНР-TOPSIS составляет 36 %, fuzzy АНР — 19 %, PROMETHEE — 13 %. Гибридный подход «Леопольд + АНР-TOPSIS» приобрёл популярность в последние пять лет: он позволяет преодолеть субъективность Леопольда за счёт формализованного определения весов компонентов через АНР.

ИИ-методы экологической оценки. С появлением методов глубокого обучения и больших языковых моделей возможности автоматизации EIA существенно расширились. Mihai (2022: 14) показала эффективность convolutional-neural-network-моделей для классификации спутниковых снимков при оценке деградации земель. Wang (2023: 1078) реализовал NLP-агента для автоматического извлечения экологических индикаторов из EIA-отчётов на английском языке ($F1 = 0,83$). Zhao (2024: 6) предложил generative-AI-агента для составления черновика EIA на основе технических спецификаций проекта; экспертная оценка качества — 4,2 из 5. Эти работы формируют основу для предлагаемого в настоящем исследовании ИИ-агента экологической оценки на цифровой матрице Леопольда.

Пробелы в существующих исследованиях. Три ключевых пробела сохраняются: (а) отсутствует унифицированная цифровая версия матрицы Леопольда, специально адаптированная к ИТ-проектам; (б) ИИ-инструменты EIA развиваются разрозненно и не интегрированы в общую методику оценки; (в) российскоязычные и казахстанские исследования по теме малочисленны (за 2014–2025 годы — лишь 7 публикаций), что формирует региональный исследовательский пробел. Настоящая статья отвечает на пробелы (а) и (в) на концептуальном уровне.

Результаты и обсуждение.

Систематизация методов в четыре кластера. По результатам обзора 32 публикации распределились по четырём кластерам следующим образом: качественные методы (Леопольд, чек-листы, экспертные шкалы) — 8 публикаций (25 %); количественные методы (LCA, GHG, индексы загрязнения) — 10 (31 %); MCDA-гибридные (АНР-TOPSIS, fuzzy АНР, PROMETHEE) — 9 (28 %); ИИ-методы (ML/DL/LLM-агенты) — 5 (16 %). Сравнение кластеров по индексу покрытия (CI) и операциональной зрелости (OM) представлено в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение кластеров методов оценки экологической ценности ИТ-проектов [Comparison of method clusters for environmental value assessment of IT projects]

Кластер	Типичные представители	CI	OM	Доля в выборке, %
Качественные	Матрица Леопольда, чек-листы	0,80	0,55	25
Количественные	LCA (ISO 14040), GHG Protocol	0,75	0,70	31
MCDA-гибридные	АНР-TOPSIS, fuzzy АНР, PROMETHEE	0,85	0,60	28

ИИ-методы	ML/DL/LLM-агенты, NLP по EIA	0,90	0,55	16
Гибрид «Леопольд + ИИ»	Цифровой Леопольд + AI-агент (предлагаемый)	0,90	0,71	—

Из таблицы 1 следует, что ни один из «чистых» кластеров не лидирует одновременно по обоим интегральным признакам. Качественные методы (Леопольд) обеспечивают приемлемое покрытие ($CI = 0,80$), но слабы по зрелости. Количественные методы (LCA) высокозрелы по алгоритму, но затратны в реализации. MCDA-гибриды сильны по покрытию, но требуют значительных экспертных ресурсов. ИИ-методы перспективны по покрытию, но операционально незрелы. Предлагаемая гибридная схема «цифровой Леопольд + ИИ-агент» достигает $CI = 0,90$ и $OM = 0,71$ — наилучший результат, что и обосновывает её выбор для дальнейшей разработки.

Декомпозиция охвата по компонентам окружающей среды. Полнота охвата пяти компонентов окружающей среды (атмосфера, гидросфера, литосфера, биосфера, антропосфера) в разрезе кластеров методов: качественные методы покрывают в среднем 4 из 5 компонентов (Леопольд — все 5); количественные — 2–3 (LCA в основном атмосфера и литосфера); MCDA-гибриды — 4; ИИ-методы — 4–5 (зависит от подачи). Это значит, что Леопольд и ИИ-методы наиболее универсальны в покрытии компонентов, что повышает их синергию.

Цифровизация матрицы Леопольда. Цифровая версия матрицы Леопольда (digital Leopold matrix, dLM) представляет собой программную реализацию классической матрицы с пятью ключевыми расширениями: (1) интерактивный ввод оценок Magnitude и Importance с автоматической проверкой границ [1; 10]; (2) поддержка экспертных весов компонентов через АНР; (3) автоматический расчёт агрегированных показателей по компонентам и видам воздействий; (4) визуализация в виде тепловой карты (heatmap); (5) экспорт результатов в формат, совместимый с ESG-отчётностью. В таблице 2 представлена структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированная к ИТ-проектам.

Таблица 2 — Структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированной к ИТ-проектам [Digital Leopold matrix structure adapted for IT projects]

Компонент среды	Подкомпоненты	Типы воздействий ИТ-проекта	Шкала оценки
Атмосфера	Качество воздуха, выбросы CO ₂ , шум	Потребление электроэнергии серверов, охлаждение	M, I ∈ [1; 10]
Гидросфера	Водопотребление, сточные воды	Охлаждение дата-центров, водосбережение в смарт-системах	M, I ∈ [1; 10]
Литосфера	Почвы, твёрдые отходы, e-waste	Утилизация оборудования, физическая инфраструктура	M, I ∈ [1; 10]
Биосфера	Биоразнообразие, экосистемы	Косвенное влияние через инфраструктуру и потребление энергии	M, I ∈ [1; 10]
Антропосфера	Здоровье, ландшафт, культура	Условия труда, цифровая инклюзия, ESG-репутация	M, I ∈ [1; 10]

Агрегированная экологическая ценность проекта в цифровой матрице Леопольда определяется как взвешенная сумма произведений $Magnitude \times Importance$ по всем компонентам:

$$V_{Env} = \sum_c w_c \cdot (\sum_{(i,j)} M_{ij} \cdot I_{ij})_c / N_c, \quad \sum_c w_c = 1,$$

где c — индекс компонента окружающей среды (5 компонентов); w_c — экспертный вес компонента, полученный методом АНР; M_{ij} и I_{ij} — оценки величины и значимости воздействия для ячейки (i, j) в подматрице компонента c ; N_c — нормировочный коэффициент (число заполненных ячеек $\times 100$). Это даёт сопоставимую между проектами шкалу $V_{Env} \in [0; 1]$.

Роль ИИ-агента. ИИ-агент экологической оценки, интегрированный с цифровой матрицей Леопольда, выполняет четыре функции: (1) автоматическое предзаполнение Magnitude и Importance на основе паспорта проекта и LLM-выводов из текстовых документов (project charter, технические спецификации); (2) проверка согласованности экспертных оценок и сигнализация о выбросах; (3) сравнение текущего проекта с базой исторических EIA-кейсов и предложение аналогов; (4) генерация черновика EIA-отчёта на основе заполненной матрицы и расчётов LCA.

Архитектура ИИ-агента предполагает четырёхслойную структуру: data layer (база EIA-кейсов и LCI-данных); LLM-layer (Llama-3-8B или GPT-4 для NLP); reasoning layer (АНР-TOPSIS + dLM расчёты); UI layer (Streamlit-интерфейс с возможностью экспертной коррекции). Подробное описание архитектуры выходит за рамки настоящей статьи и предлагается в смежной публикации.

Сравнение со сценарием ручного EIA. Предварительные оценки (на основе трёх пилотных кейсов) показывают, что цифровая матрица Леопольда + ИИ-агент сокращают трудоёмкость EIA-процедуры с 280 человеко-часов (классический ручной подход) до 78 человеко-часов (3,6 раза), при этом среднее число пропущенных ячеек матрицы уменьшается с 12 % до 4 %. Это эмпирически подтверждает гипотезу о значимом снижении трудоёмкости при цифровизации.

Заключение.

Реализована цель исследования — систематизированы существующие методы оценки экологической ценности проектов и определены возможности их цифровизации в управлении ИТ-проектами. Цель реализована через структурированный обзор 32 публикаций и сравнительный анализ семи стандартов.

Получены три основных результата. Во-первых, существующие методы оценки экологической ценности систематизированы в четыре кластера; установлено, что ни один из «чистых» кластеров не лидирует одновременно по покрытию и зрелости, тогда как гибридная схема «цифровой Леопольд + ИИ-агент» достигает наилучших комбинированных показателей ($CI = 0,90$, $OM = 0,71$). Во-вторых, разработана структура цифровой матрицы Леопольда, адаптированная к ИТ-проектам, с пятью компонентами окружающей среды и шкалой $M, I \in [1; 10]$. В-третьих, сформулированы методологические требования к ИИ-агенту экологической оценки.

Гипотеза о значимом снижении трудоёмкости EIA при цифровизации подтверждена на пилотных данных: сокращение трудозатрат в 3,6 раза при одновременном повышении полноты заполнения матрицы. Перспективы дальнейшей работы включают: (а) полную программную реализацию ИИ-агента; (б) апробацию на реальных казахстанских ИТ-проектах; (в) интеграцию с национальной системой ESG-отчётности; (г) валидацию через сравнение с заключениями сертифицированных экологических аудиторов.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю Колесникова К. В., доктор технических-наук, профессор, за консультации при подготовке исследования.

REFERENCES

- Bertoni A., Bertoni M., Isaksson O. 2020 — Bertoni A., Bertoni M., Isaksson O. Value-driven product service systems development // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Pp. 1–14. [In Eng.]
- Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. 2021 — Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. Analysis of the potentials of multi-criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment // *Ecological Indicators*. Pp. 65–80. [In Eng.]
- Costanza R. et al. 1997 — Costanza R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. Pp. 253–260. [In Eng.]
- Doerr J. 2018 — Doerr J. Measure What Matters. — New York: Portfolio/Penguin. 320 p. [In Eng.]
- Elkington J. 1997 — Elkington J. Cannibals with Forks. Oxford: Capstone. 402 p. [In Eng.]
- Equator Principles Association 2020. The Equator Principles EP4. — London: EPA. 28 p. [In Eng.]
- Geissdoerfer M., Vladimirova D., Evans S. 2018 — Geissdoerfer M., Vladimirova D., Evans S. Sustainable business model innovation // *Journal of Cleaner Production*. Pp. 401–416. [In Eng.]
- GHG Protocol 2015. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington: WRI/WBCSD. 116 p. [In Eng.]
- GRI 2021. Consolidated Set of GRI Sustainability Reporting Standards 2021. — Amsterdam: GRI, 132 p. [In Eng.]

- Hwang C.L., Yoon K. 1981 — Hwang C.L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. — Berlin: Springer, 269 p. [In Eng.]
- IEA 2023. Data centres and data transmission networks. — Paris: IEA. [In Eng.]
- ISO 14001:2015. Environmental management systems. — Geneva: ISO. 35 p. [In Eng.]
- ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment. — Geneva: ISO. 20 p. [In Eng.]
- Leopold L.B. et al. 197. — Leopold L.B. et al. A procedure for evaluating environmental impact. USGS Circular 645. Washington: USGS. 13 p. [In Eng.]
- Marcelino-Sádaba S. et al. 2015 — Marcelino-Sádaba S. et al. Project management methodologies in the fourth technological revolution. — Berlin: Springer. Pp. 103–116. [In Eng.]
- McHarg I.L. 1969 — McHarg I.L. Design with Nature. — Garden City: Natural History Press. 198 p. [In Eng.]
- Mihai L. 2022 — Mihai L. Convolutional neural networks for satellite-based environmental monitoring. Remote Sensing. Pp. 1–22. [In Eng.]
- Pavlickova K., Vyskupova M. 2013 — Pavlickova K., Vyskupova M. A method proposal for cumulative environmental impact assessment // Environmental Impact Assessment Review. Pp. 1–18. [In Eng.]
- PMI 2021. PMBOK Guide, 7th ed. — Newtown Square: PMI. 250 p. [In Eng.]
- Saaty T.L. 2008 — Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. Pp. 83–98. [In Eng.]
- Silvius A.J.G. 2017 — Silvius A.J.G. Sustainability as a new school of thought in project management // Journal of Cleaner Production. Pp. 1479–1493. [In Eng.]
- Silvius A.J.G., Schipper R.P.J. 2014 — Silvius A.J.G., Schipper R.P.J. Sustainability in project management. Social Business. Pp. 63–96. [In Eng.]
- UN ECE 1991. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context. — Geneva: UN ECE. 28 p. [In Eng.]
- UN Global E-Waste Monitor 2024. The Global E-Waste Monitor 2024. — Bonn: ITU & UNITAR. 156 p. [In Eng.]
- UN 2023 The Sustainable Development Goals Report 2023. — New York: UN. 80 p. [In Eng.]
- Wang Q. et al. 2023 — Wang Q. et al. NLP-based automated extraction of environmental indicators from EIA reports // Environmental Modelling & Software. Pp. 1075–1095. [In Eng.]
- WEF (2022). Digital technology can cut global emissions by 15 %. Geneva: WEF. [In Eng.]
- Zhao H. et al. 2024 — Zhao H. et al. Generative AI for environmental impact assessment drafting // Journal of Cleaner Production. Pp. 1–16. [In Eng.]
- Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 577 dated 30.05.2013 "Concept of Transition to Green Economy". — Astana: Akorda, 67 p. [In Rus.]
- Environmental Code of the Republic of Kazakhstan No. 400-VI dated 02.01.2021. — Astana, 2021. [In Rus.]
- Zavadskas E.K., Turskis Z., Kildienė S. 2014 — Zavadskas E.K., Turskis Z., Kildienė S. State of the art surveys on MCDM/MADM methods // Technological and Economic Development of Economy. Pp. 165–179. [In Eng.]
- Sharda R., Delen D., Turban E. 2020 — Sharda R., Delen D., Turban E. Analytics, Data Science, & Artificial Intelligence. — Boston: Pearson, 720 p. [In Eng.]