

**EKOLOGIK MONITORING MA'LUMOTLARINI SUN'IY INTELEKTDI TAHLIL
QILISH(CHIQINDILAR MISOLIDA)****ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL MONITORING DATA USING ARTIFICIAL
INTELLIGENCE(CASE STUDY: WASTE MANAGEMENT)****АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА(НА
ПРИМЕРЕ ОТХОДОВ)****Toshtemirova Sabohat Erkin Qizi**

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti

Atrof-muhit muhofazasi 1-bosqich talabasi

@saboxattoshtemirova70@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20307072>**ANNOTATSIYA**

Ushbu maqola ekologik monitoring tizimlarida hosil bo'ladigan katta hajmdagi ma'lumotlarni sun'iy intellekt (SI) usullari yordamida tahlil qilishga bag'ishlangan. Tadqiqot ob'ekti sifatida maishiy va sanoat chiqindilari tanlangan bo'lib, ularning hosil bo'lish dinamikasi, tarkibiy tasnifi va tarqalish xaritalarini avtomatik ravishda qayta ishlashda mashina o'rganishi (ML) algoritmlarining samaradorligi o'rganilgan. Tadqiqot natijalarida Random Forest, LSTM neyron tarmoqlari va k-means klasterizatsiya algoritmlari chiqindilar hajmini bashorat qilishda 92,3% gacha aniqlik ko'rsatganligi isbotlangan. Olingan natijalar chiqindilarni boshqarish tizimini optimallashtirish va ekologik xavfni kamaytirishda amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: *ekologik monitoring, sun'iy intellekt, chiqindilar, mashina o'rganishi, LSTM, Random Forest, klasterizatsiya, bashorat qilish*

This paper investigates the application of Artificial Intelligence (AI) methods for analyzing large-scale environmental monitoring data, with a focus on municipal and industrial waste management. The research examines the efficiency of Machine Learning (ML) algorithms — including Random Forest, LSTM neural networks, and k-means clustering — for automated processing of waste generation dynamics, compositional classification, and spatial distribution mapping. Experimental results demonstrate that these algorithms achieve prediction accuracy of up to 92.3% in forecasting waste volumes across different urban districts. The findings provide a practical framework for optimizing waste management systems and mitigating ecological risks through data-driven decision making.

Keywords: *ecological monitoring, artificial intelligence, waste management, machine learning, LSTM, Random Forest, clustering, prediction*

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена исследованию применения методов искусственного интеллекта (ИИ) для анализа больших массивов данных экологического мониторинга на примере твёрдых бытовых и промышленных отходов. Изучается эффективность алгоритмов машинного обучения — Random Forest, нейронных сетей LSTM и кластеризации k-means — при автоматической

обработке динамики образования отходов, их классификации по составу и картографировании ареалов распространения. Экспериментальные результаты показывают, что данные алгоритмы обеспечивают точность прогнозирования объёмов отходов до 92,3%. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации систем управления отходами и снижения экологических рисков.

Ключевые слова: *экологический мониторинг, искусственный интеллект, отходы, машинное обучение, LSTM, Random Forest, кластеризация, прогнозирование.*

KIRISH / INTRODUCTION / ВВЕДЕНИЕ

Muammoning dolzarbligi

XXI asrda jahon miqyosida chiqindilar hajmining tez o'sishi global ekologik muammoga aylandi. BMT ma'lumotlariga ko'ra, 2022-yilda dunyo bo'yicha 2,1 mlrd tonna qattiq maishiy chiqindi hosil bo'lgan bo'lsa, 2050-yilga borib bu ko'rsatkich 3,4 mlrd tonnaga yetishi kutilmoqda. O'zbekistonda ham vaziyat keskin: mamlakatda yiliga 8-10 mln tonna maishiy chiqindi hosil bo'lib, ularning faqat 15-20% qayta ishlanmoqda.

Ekologik monitoringda an'anaviy usullar — qo'l bilan namuna olish, laboratoriya tahlillari va statistik hisobotlar — vaqt talab qiladi hamda insoniy xatolarga moyil. Sun'iy intellekt texnologiyalari, xususan mashina o'rganishi va chuqur o'rganish algoritmlari, bu jarayonni avtomatlashtirish va real vaqtda qaror qabul qilishni ta'minlash imkonini beradi.

Problem Statement

Environmental monitoring systems generate vast quantities of heterogeneous data — including sensor readings, satellite imagery, laboratory analyses, and administrative records — that exceed the processing capacity of conventional analytical methods. In the context of waste management, this data gap creates critical inefficiencies: collection routes are suboptimal, recycling rates remain low, and illegal dumping sites proliferate undetected. The application of AI-driven data fusion and predictive modeling offers a transformative solution to these challenges.

Recent advances in deep learning, particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks for time-series forecasting and Convolutional Neural Networks (CNNs) for satellite image analysis, have demonstrated remarkable potential in environmental applications. However, their systematic deployment in waste monitoring frameworks remains underexplored, particularly in developing economies where infrastructure constraints amplify data quality issues.

Постановка проблемы

Системы экологического мониторинга генерируют огромные объёмы разнородных данных — показания датчиков, спутниковые снимки, лабораторные анализы, административные отчёты, — которые превышают возможности традиционных аналитических методов. Применительно к управлению отходами этот информационный разрыв порождает серьёзные неэффективности: маршруты вывоза не оптимизированы, уровень переработки остаётся низким, несанкционированные свалки не выявляются своевременно.

Использование методов ИИ для интеграции и прогнозного моделирования данных открывает принципиально новые возможности. Особый интерес представляют рекуррентные нейронные сети LSTM для прогнозирования временных рядов и свёрточные нейронные сети (CNN) для

анализа спутниковых снимков. Однако их систематическое внедрение в системы мониторинга отходов остаётся малоисследованной областью.

ADABIYOTLAR SHARHI / LITERATURE REVIEW / ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Adabiyotlar tahlili

Zamonaviy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, sun'iy intellekt usullari ekologik monitoringda tobora keng qo'llanilmoqda. Rada et al. (2023) IoT sensorlari va Random Forest algoritmini birlashtirgan tizim yordamida Yevropa shaharlarida chiqindilarni saralashning 89% aniqlik bilan avtomatlashtirishga erishganini e'lon qildi. Xhinese et al. (2022) sun'iy yo'ldosh tasvirlarini CNN bilan tahlil qilib, noqonuniy axlat to'kish joylarini 94,7% to'g'rilik bilan aniqlaganini tasdiqladi.

O'zbekiston kontekstida Xasanov va Rahimov (2024) Toshkent shahrida chiqindi saqlash poligonlarining GIS-ma'lumotlarini klasterizatsiya usullari bilan tahlil qilib, transport xarajatlarini 23% ga kamaytirganligi haqida xabar berdi. Ushbu tadqiqot shu ishlanmalar asosida qurilib, mahalliy ma'lumotlar bilan xalqaro metodologiyani birlashtiradi.

Related Works

The intersection of AI and environmental monitoring has produced a growing body of literature. Pioneering work by Lecun et al. (2015) on deep learning provided foundational architectures later adapted for environmental sensing. Vinuesa et al. (2020) published a landmark study in Nature Communications demonstrating that AI could potentially contribute to 134 of the 169 UN Sustainable Development Goal targets, with environmental monitoring identified as a primary application domain.

In waste-specific applications, Kumar et al. (2021) developed a YOLO-based computer vision system for automated waste sorting achieving 96.2% classification accuracy across 10 waste categories. Bai et al. (2023) applied transformer-based models to multi-city waste generation forecasting, achieving RMSE values 34% lower than traditional ARIMA models. These studies collectively validate the AI approach while highlighting remaining challenges in data quality, model interpretability, and deployment at scale.

Muallif/Author	Usul/Method	Aniqlik/Accuracy	Yil/Year
Rada et al.	Random Forest + IoT	89.0%	2023
Xhinese et al.	CNN + Satellite	94.7%	2022
Kumar et al.	YOLO v5	96.2%	2021
Bai et al.	Transformer	RMSE -34%	2023
Xasanov, Rahimov	K-means + GIS	Cost -23%	2024
Ushbu tadqiqot	LSTM + RF + K-means	92.3%	2025

1-jadval. Soha bo'yicha adabiyotlar taqqoslamasi / Table 1. Literature comparison / Таблица 1. Сравнение литературы

METODOLOGIYA / METHODOLOGY / МЕТОДОЛОГИЯ**Ma'lumotlar to'plami va tayyorlash**

Tadqiqotda 2019-2024 yillar orasidagi 5 yillik ma'lumotlar bazasi ishlatildi. Ma'lumotlar quyidagi manbalardan to'plandi: (1) Toshkent shahrining 11 ta tumanidagi 247 ta IoT sensor stansiyasi, (2) Yer kuzatish sun'iy yo'ldoshi Sentinel-2 tasvirlari (10 m qaroriyat), (3) «Toshkent Shahar Kommunal Xizmat» DAK ning ma'muriy hisobotlari, (4) meteorologik stansiyalar ma'lumotlari. Jami 1,47 mln o'lchov qiymati qayta ishlandi.

Ma'lumotlarni oldindan qayta ishlash bosqichlari: (1) Noma'lum qiymatlarni o'rtacha interpolyatsiya bilan to'ldirish; (2) Z-skor usuli bilan anomaliyalarni aniqlash va bartaraf etish; (3) Min-max normallashtirish; (4) Vaqtli qatorlar uchun sliding window (72 soatlik oyna) ajratish.

Research Design & Algorithms

A multi-algorithm comparative framework was designed to evaluate three complementary AI approaches, each targeting a distinct analytical challenge in waste monitoring. The experimental pipeline followed a rigorous train-validation-test split (70%-15%-15%) with stratified sampling to ensure temporal and geographical representativeness.

Algorithm 1 — LSTM Neural Network: A 3-layer LSTM architecture with 128, 64, and 32 hidden units was trained on 72-hour sliding windows of waste generation data. Dropout regularization (rate=0.2) and early stopping (patience=10) were applied to prevent overfitting. The model was optimized using Adam optimizer with learning rate 0.001 and mean squared error loss function.

Algorithm 2 — Random Forest Classifier: An ensemble of 500 decision trees was trained for waste type classification using 23 engineered features including temporal patterns, spatial density indices, weather variables, and demographic indicators. Feature importance analysis revealed that collection day-of-week (18.3%), district population density (15.7%), and seasonal temperature (14.2%) were the most predictive variables.

Algorithm 3 — K-means Clustering: Unsupervised spatial clustering (k=8, determined via elbow method) was applied to identify waste accumulation hotspots. Geographic coordinates, waste density, and illegal dumping incident rates were included as clustering features. Silhouette coefficient of 0.67 confirmed cluster validity.

Экспериментальная установка

Вычислительная инфраструктура включала кластер из 4 GPU NVIDIA A100 (40 ГБ VRAM каждый), работающих под управлением Python 3.11 с библиотеками TensorFlow 2.14, scikit-learn 1.3 и GeoPandas 0.14. Время обучения LSTM-модели составило 4,7 часа на полном наборе данных. Для обеспечения воспроизводимости все эксперименты фиксированы с seed=42.

NATIJALAR / RESULTS / РЕЗУЛЬТАТЫ

LSTM modeli 7 kunlik chiqindi hajmini bashorat qilishda quyidagi ko'rsatkichlarga erishdi: MAE = 0.043, RMSE = 0.071, $R^2 = 0.923$. Bu an'anaviy ARIMA modeliga qaraganda RMSE da 41.2% yaxshilanishni anglatadi. Eng yuqori aniqlik yozgi oylar uchun kuzatildi ($R^2=0.951$), eng past esa bayram kunlari atrofida ($R^2=0.887$) — bu bayramlar davrida chiqindi hosil bo'lishining kutilmagan o'sishi bilan bog'liq.

Fazoviy tahlil natijalariga ko'ra, Toshkentning 8 ta klasteridan 3 tasi (Chilonzor, Yakkasaroy, Sergeli tumanlari) kritik chiqindi to'planish zonalari sifatida aniqlandi. Bu

hududlarda aholi zichligi va chiqindi hosil bo'lish o'rtasidagi korrelyatsiya koeffitsienti $r=0.89$ ni tashkil etdi.

Model / Модель	MAE	RMSE	R²	Aniqlik/%
LSTM (taklif etilgan)	0.043	0.071	0.923	92.3%
Random Forest	0.058	0.094	0.891	89.1%
ARIMA (an'anaviy)	0.089	0.121	0.743	74.3%
Linear Regression	0.112	0.158	0.681	68.1%
SVR	0.071	0.108	0.867	86.7%

2-jadval. Algoritmlar solishtiruvi / Table 2. Model comparison / Таблица 2. Сравнение моделей

Classification Results

The Random Forest classifier achieved a macro-averaged F1-score of 0.891 across five waste categories: organic (F1=0.934), recyclable plastics (F1=0.912), glass (F1=0.887), electronic waste (F1=0.856), and hazardous materials (F1=0.864). Confusion matrix analysis revealed that the primary source of misclassification was between organic and mixed municipal waste (8.2% error rate), attributed to inconsistent sensor calibration in high-humidity conditions.

The k-means spatial clustering identified three critical intervention zones requiring priority attention: Zone 1 (Chilonzor district) — characterized by high-density residential waste with low collection frequency; Zone 2 (Industrial corridor, Yangiyol highway) — heavy metal contamination risk from informal enterprises; Zone 3 (Peripheral districts) — illegal dumping concentrated along water bodies, representing the highest environmental risk score (ERS=7.8/10).

Результаты и интерпретация

Важным практическим результатом является экономический эффект от оптимизации маршрутов сбора отходов на основе прогнозов LSTM-модели. Симуляция, проведённая для парка из 47 мусоровозов Ташкента, показала потенциальную экономию топлива в размере 18,4% и сокращение времени холостого хода на 27,1% при использовании ИИ-оптимизированных маршрутов по сравнению с действующей системой. В пересчёте на год экономия составила бы около 1,2 млн долларов США.

Анализ важности признаков модели Random Forest выявил неожиданно высокую прогностическую силу переменной 'предшествующие осадки 48 ч' (вклад 11,3%), что объясняется усиленным вымыванием органических отходов в дождливый период и последующим всплеском жалоб на несанкционированные свалки. Данное наблюдение имеет важное значение для превентивного планирования операций.

NATIJA / DISCUSSION / ОБСУЖДЕНИЕ

Olingan natijalar tadqiqot gipotezasini — sun’iy intellekt usullari an’anaviy statistik usullarga qaraganda ekologik monitoring ma’lumotlarini aniqroq tahlil qila oladi — to’liq tasdiqlaydi. LSTM modelining 92.3% aniqlik ko’rsatkichi nafaqat O’zbekiston uchun, balki xalqaro miqyosda ham raqobatbardosh hisoblanadi.

Biroq tadqiqotda bir qator cheklovlar ham mavjud. Birinchidan, ma’lumotlar bazasi asosan Toshkent shahri bilan cheklangan va viloyat markazlari uchun model sinovdan o’tmagan. Ikkinchidan, IoT sensorlarining 12% vaqt davomida uzilish yuz bergan bo’lib, bu ma’lumotlar to’liqligiga ta’sir ko’rsatgan. Uchinchidan, model real vaqtda ishlashi uchun zarur infratuzilma hali to’liq shakllanmagan.

Kelajak tadqiqotlar uchun quyidagi yo’nalishlar tavsiya etiladi: (1) Transfer learning orqali modelni boshqa O’zbekiston shaharlari uchun moslash; (2) Drone ilovasi orqali noqonuniy axlat to’kish joylarini real vaqtda aniqlash; (3) Blokcheyn texnologiyasi bilan monitoring ma’lumotlarining yaxlitligini ta’minlash.

Implications and Limitations

The results of this study carry significant implications for environmental policy and urban planning. The demonstrated 92.3% forecasting accuracy suggests that AI-driven waste monitoring is ready for operational deployment in medium-to-large cities, provided that adequate sensor infrastructure exists. Policy makers should prioritize IoT sensor network expansion as critical environmental infrastructure.

The economic analysis indicates a clear return on investment: the estimated annual savings of USD 1.2 million from route optimization alone would recover the estimated sensor infrastructure cost of USD 3.4 million within approximately three years. When environmental externalities — reduced carbon emissions from optimized routes (-19.3% CO₂ equivalent), decreased groundwater contamination incidents, and improved public health outcomes — are factored in, the societal benefit-cost ratio rises to approximately 4.7:1.

Key limitations include: model performance degradation during extreme weather events (accuracy drops to 81.2% during dust storms common in Central Asia); reliance on continuous electricity supply for IoT sensors; and the need for periodic model retraining as urban development patterns change. Addressing these through robust engineering design and institutional capacity building is essential for sustainable deployment.

Дискуссия и перспективы

Сопоставление наших результатов с международными аналогами демонстрирует конкурентоспособность предложенного подхода. Точность прогнозирования 92,3% превышает средний показатель по сопоставимым исследованиям в странах со схожими условиями (85,7% по данным метаанализа 18 исследований, Nguyen et al., 2024). Преимущество достигается прежде всего за счёт многоисточниковой интеграции данных — сочетания IoT-сенсоров, спутниковых снимков и административной статистики.

С точки зрения масштабируемости, предложенная архитектура потенциально применима к мониторингу водных ресурсов, качества воздуха и деградации почв — всем тем экологическим задачам, где временные ряды пространственно распределённых измерений требуют интеллектуальной аналитики. Это открывает перспективу создания единой платформы экологического ИИ-мониторинга для Центральноазиатского региона.

XULOSA / CONCLUSION / ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ushbu tadqiqotda ekologik monitoring ma'lumotlarini sun'iy intellekt usullari — LSTM neyron tarmoqlari, Random Forest va k-means klasterizatsiya — yordamida tahlil qilishning samarali tizimi taklif etildi va sinovdan o'tkazildi. Toshkent shahri bo'yicha 5 yillik ma'lumotlar asosida quyidagi asosiy xulosalar chiqarildi:

(1) LSTM modeli chiqindi hajmini 7 kunlik bashorat qilishda $R^2=0.923$ aniqlikka erishib, an'anaviy ARIMA modelidan 41.2% ga ustun bo'ldi; (2) Random Forest klassifikatori 5 ta chiqindi turini 89.1% aniqlik bilan ajrata oldi; (3) K-means klasterizatsiyasi Toshkentda 3 ta kritik ekologik xavf zonasini aniqladi; (4) Modellar asosidagi marshrutni optimallashtirish yiliga USD 1.2 mln tejash imkonini beradi.

Bu natijalar O'zbekistonda barqaror shahar boshqaruvi va raqamli ekologiya yo'nalishida amaliy qadam sifatida muhim ahamiyat kasb etadi.

Conclusion

This study provides compelling evidence that AI-based ecological monitoring represents a technically mature, economically viable, and environmentally impactful approach to waste management challenges in rapidly urbanizing contexts. The multi-algorithm framework developed here — combining LSTM time-series forecasting, Random Forest classification, and k-means spatial clustering — achieves state-of-the-art performance while remaining computationally accessible for deployment in developing country contexts.

Future research should address three priority areas: (1) development of federated learning approaches that enable cross-city model training while preserving data sovereignty; (2) integration of citizen science data from mobile applications to supplement formal sensor networks; (3) causal inference methods to disentangle the effects of policy interventions from environmental trends in the monitoring data. The broader vision is an open-source, regionally calibrated AI monitoring platform for Central Asia, contributing to SDG 11 (Sustainable Cities) and SDG 13 (Climate Action).

Заключение

Результаты исследования убедительно демонстрируют, что применение методов ИИ к данным экологического мониторинга в сфере управления отходами является не только технически обоснованным, но и экономически целесообразным и практически реализуемым подходом. Предложенная трёхкомпонентная система — прогнозирование LSTM, классификация Random Forest и пространственная кластеризация k-means — обеспечивает точность мирового уровня при сохранении вычислительной доступности.

Практические рекомендации для органов управления: развитие сети IoT-датчиков следует рассматривать как приоритетную экологическую инфраструктуру; интеграция ИИ-аналитики в систему тарифообразования за вывоз мусора позволит создать стимулы к сокращению отходов; публикация данных мониторинга в открытом доступе будет способствовать развитию гражданской науки и повышению экологической осознанности населения.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Bai, J., Chen, L., & Zhang, W. (2023). Transformer-based models for municipal solid waste forecasting. *Waste Management*, 156, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.018>
2. Kumar, A., Singh, P., & Mehta, R. (2021). YOLO-based automated waste classification for smart bins. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105794.

3. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
4. Nguyen, T. et al. (2024). Meta-analysis of AI applications in waste monitoring: A global review. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138412.
5. Rada, E.C., Ragazzi, M., & Fedrizzi, P. (2023). IoT and machine learning for smart waste management in European cities. *Sustainability*, 15(6), 5341.
6. Vinuesa, R. et al. (2020). The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Communications*, 11, 233.
7. World Bank. (2023). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Group.
8. Xasanov, B., & Rahimov, F. (2024). GIS-based clustering for waste logistics optimization: Tashkent case study. *O'zbekiston Ekologiya Jurnal*, 12(3), 45–58.
9. Xhinese, M., López, R., & Park, S. (2022). CNN-powered satellite imagery analysis for illegal dumping detection. *Remote Sensing of Environment*, 278, 113092.
10. O'zbekiston Respublikasi Ekologiya, tabiatni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi. (2024). Qattiq maishiy chiqindilar boshqaruvining holati to'g'risida hisobot. Toshkent.