





Н.М. Темирбеков<sup>1</sup> , Д.О. Тамабай<sup>2\*</sup> , З.А. Тукенова<sup>3</sup> ,  
М.Н. Темирбекова<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Национальная инженерная академия РК, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

<sup>3</sup>Институт зоологии КН МНВО РК, Казахстан, г. Алматы

<sup>4</sup>Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Казахстан, Алматы

\*e-mail: dtamabay@gmail.com

## ФОРМИРОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА АЛМАТЫ МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Проблема загрязнения атмосферного воздуха города Алматы является одной из актуальных вопросов на сегодняшний день. В целях определения мнения экспертов и граждан города был проведен опрос населения города Алматы для оценки причин загрязнения атмосферного воздуха города и последствий, которые эти загрязнения влекут за собой. Проведена экспертная оценка на основе данных полученных в результате опроса для причин и последствия загрязнения воздуха.

Применены алгоритмы искусственного интеллекта с элементами машинного обучения для построения модели, определяющую связь между данными о причинах загрязнения и последствиями загрязнения атмосферного воздуха и проводится анализ по результатам исследования. Построен алгоритм реализации построения модели. Приведены результаты и метрические оценки разработанной модели. Результаты проведенного исследования показывают, что стационарные, передвижные источники и бытовые и промышленные отходы оказывают наибольшее влияние на здоровье населения и окружающую среду.

Данная работа направлена на разработку единой экосистемы сбора и обработки данных мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленных городов Казахстана с использованием современных систем мониторинга, математического моделирования и информационно-коммуникационных технологий.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферного воздуха, системный анализ, машинное обучение, экспертная оценка.

N. Temirbekov<sup>1</sup>, D. Tamabay<sup>2\*</sup>, Z. Tukenova<sup>3</sup>, M. Temirbekova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Academy of the RK, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

<sup>3</sup>Institute of Zoology of the Ministry of Higher Education and Science of the RK, Kazakhstan, Almaty

<sup>4</sup>Almaty University of power engineering and telecommunications named after G. Daukeev, Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: dtamabay@gmail.com

### Formation and identification of interrelations of causes and consequences of atmospheric air pollution in Almaty by methods of system analysis and artificial intelligence

The problem of air pollution in Almaty is one of the topical issues today. In order to determine the opinion of experts and citizens of the city, a survey of the population of Almaty was conducted to assess the causes of air pollution in the city and the consequences that these pollutants entail. An expert assessment was carried out based on the data obtained from the survey for the causes and consequences of air pollution.

Artificial intelligence algorithms with machine learning elements have been applied to build a model that determines the relationship between data on the causes of pollution and the consequences of atmospheric air pollution, and an analysis is carried out based on the results of the study. An algorithm for implementing the construction of the model is constructed. The results and metric estimates of the developed model are presented. The results of the study show that stationary, mobile sources and household and industrial waste have the greatest impact on public health and the environment.

This work is aimed at developing a unified ecosystem for collecting and processing air pollution monitoring data in industrial cities of Kazakhstan using modern monitoring systems, mathematical modeling and information and communication technologies.

**Key words:** atmospheric air pollution, system analysis, machine learning, expert assessment.

Н.М. Темирбеков<sup>1</sup>, Д.О. Тамабай<sup>2\*</sup>, З.А. Тукенова<sup>3</sup>, М.Н. Темирбекова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ҚР Ұлттық инженерлік академиясы, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>3</sup>ҚР ЖБҒМ ҒК Зоология институты, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>4</sup>Г. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан, Алматы қ.

\*e-mail: dtamabay@gmail.com

### **Алматы қаласының атмосфералық ауасының жүйелі талдау және жасанды интеллект әдістерімен ластануының себептері мен салдарларының өзара байланысын қалыптастыру және анықтау**

Алматы қаласының атмосфералық ауасының ластануы мәселесі бүгінгі таңда өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Сарапшылар мен қала азаматтарының пікірін айқындау мақсатында қаланың атмосфералық ауасының ластану себептерін және осы ластануларға әкеп соғатын салдарларды бағалау үшін Алматы қаласының тұрғындарына сауалнама жүргізілді. Ауаның ластануының себептері мен салдары үшін сауалнама нәтижесінде алынған мәліметтер негізінде сараптамалық бағалау жүргізілді.

Ластану себептері мен атмосфералық ауаның ластану салдары туралы мәліметтер арасындағы байланысты анықтайтын модель құру үшін машиналық оқыту элементтері бар жасанды интеллект алгоритмдері қолданылды және зерттеу нәтижелері бойынша талдау жүргізілді. Модель құруды жүзеге асыру алгоритмі құрылды. Әзірленген модельдің нәтижелері мен метрикалық бағалары келтірілген. Зерттеу нәтижелері стационарлық, жылжымалы көздер мен тұрмыстық және өндірістік қалдықтар халықтың денсаулығы мен қоршаған ортаға үлкен әсер ететіндігін көрсетеді.

Бұл жұмыс қазіргі заманғы мониторинг жүйелерін, математикалық модельдеуді және ақпараттық-коммуникациялық технологияларды пайдалана отырып, Қазақстанның өнеркәсіптік қалаларының атмосфералық ауасының ластануы мониторингінің деректерін жинау мен өңдеудің бірыңғай экожүйесін әзірлеуге бағытталған.

**Түйін сөздер:** атмосфералық ауаның ластануы, жүйелік талдау, машиналық оқыту, сараптамалық бағалау.

## **Введение**

Город Алматы в Казахстане считается одним из наиболее загрязненных воздухом городов в Центральной Азии.

Согласно исследованию, проведенному в 2019 году, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в Алматы в несколько раз превышают установленные нормы [1].

В 2021 году Алматы был признан одним из самых загрязненных городов мира по индексу качества воздуха IQAir [2].

Группа казахстанских ученых более двадцати лет занимаются вопросами моделирования загрязнения воздуха в промышленных городах Казахстана [3-6].

Загрязнение воздуха является одной из главных экологических проблем Алматы, в особенности из-за высоких уровней PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>, которые превышают рекомендуемые нормы [7].

Загрязнение воздуха негативно влияет на здоровье жителей города, в связи с чем в Алматы растет количество заболеваний дыхательной системы, особенно у детей и пожилых людей [8], что в свою очередь влияет на уровень жизни населения и экономику города [9].

Статья [10] обобщает современные исследования о связи между загрязнением воздуха и раковыми заболеваниями людей. Она содержит данные о химических веществах в загрязненном воздухе, которые могут вызвать рак. Также авторы описывают раковые заболевания, связанные с загрязнением воздуха, и дают рекомендации по защите здоровья.

В работе [11] рассматривается воздействие загрязнения воздуха на здоровье человека и основные источники этого загрязнения. Она указывает на различные заболевания, связанные с загрязнением воздуха, такие как рак и респираторные заболевания, и описывает конкретные вещества, которые могут негативно влиять на

здоровье человека. Авторы статьи подчеркивают необходимость более тщательного контроля загрязнения воздуха и рекомендуют меры для снижения риска, такие как использование более экологически чистых технологий и продвижение общественного транспорта.

Каждый год в мире более 4 миллионов людей умирают от заболеваний, связанных с загрязнением воздуха [12], загрязнение воздуха является одной из ведущих причин преждевременной смерти, сокращая жизнь населения в среднем на 2 года [13].

Загрязнение воздуха является серьезной экономической проблемой, которая стоит мировой экономике миллиарды долларов каждый год. Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), затраты на лечение заболеваний, связанных с загрязнением воздуха, составляют до 1-2% ВВП многих стран [14].

Исследования и опросы населения и экспертов по загрязнению воздуха проводятся по всему миру, чтобы понять масштаб проблемы и ее влияние на жизнь в городах. Такие исследования и опросы помогают лучше понять проблему загрязнения воздуха в городах и определить пути решения. Они также помогают привлечь внимание общественности и властей к проблеме и побудить их к действиям, направленным на снижение загрязнения воздуха.

### Материалы и методы исследований

В статье [15] исследуется понимание ответственностью рисков загрязнения воздуха в городских средах. Исследование было проведено на основе данных из нескольких городов Великобритании с использованием методов, таких как групповые дискуссии и интервью. Авторы выяснили, что общественность воспринимает загрязнение воздуха как «локальный» риск, связанный с определенными местами в городе и признает его влияние на здоровье людей. Это может повлиять на разработку стратегий борьбы с загрязнением воздуха и на коммуникацию между правительством и общественностью в этой области.

В работе [16] исследуется восприятие рисков, связанных с загрязнением воздуха, обществом. Авторы провели опрос 995 человек в Великобритании, чтобы оценить, как люди воспринимают риски, связанные с загрязнени-

ем воздуха в городах. Исследование показало, что большинство людей осознают риски, связанные с загрязнением воздуха, и считают их серьезными для здоровья. Однако, мало людей знают, какой уровень загрязнения является безопасным для здоровья, и что можно сделать, чтобы снизить риски. Авторы считают, что более широкая информационная кампания и активное вовлечение общества могут помочь повысить осведомленность и уменьшить риски, связанные с загрязнением воздуха в городах.

Согласно исследованиям отечественных и зарубежных ученых, которые занимались изучением качества воздуха в промышленных городах, имеется недостаток информации о загрязнении атмосферы. Эти исследования также подчеркивают важность проведения более детальных исследований [17-19].

Можно выделить несколько методов и подходов, используемых при исследовании атмосферного воздуха в научной литературе, среди которых методы искусственного интеллекта с использованием машинного обучения являются наиболее используемыми при работе с большим количеством данных.

В исследовательской работе [20] представлен алгоритм OSSO с использованием гибридной модели глубокого обучения для мониторинга загрязнения воздуха (OSSO HDLAPM) в окружающей среде.

В работе [21] разработаны пять моделей ML для решения проблемы классификации загрязнения воздуха. Во всех пяти моделях использовалась эффективная предварительная обработка данных и строгая оптимизация гиперпараметров.

Согласно работе [22], была протестирована модель двухступенчатой управляемой рекуррентной установки (TS-GRU) для мониторинга и оценки системы прогнозирования концентрации PM<sub>2.5</sub> с использованием данных ежедневных измерений.

Исследование в работе [23] сосредоточено на системах прогнозирования загрязнения воздуха на основе локализации для мониторинга умных городов в режиме реального времени.

В рамках данного исследования, с применением методики из работы [24], проводится опрос населения города Алматы для оценки причин загрязнения атмосферного воздуха го-

рода и последствий, которые эти загрязнения влекут за собой. Проведена экспертная оценка согласно схеме из работы [25], на основе данных полученных в результате опроса. Эти методики обобщены применением методов машинного обучения для определения связи между данными о причинах загрязнения и последствиями загрязнения атмосферного воздуха и проводится анализ по результатам исследования. Результаты показывают, что стационарные, передвижные источники и бытовые и промышленные отходы оказывают влияние на здоровье населения и окружающую среду.

### Результаты и их обсуждение

В данной работе группа ученых выполнили часть исследования, направленную на разработку единой экосистемы сбора и обработки данных мониторинга загрязнения атмосферного воздуха промышленных городов Казахстана с использованием современных систем мониторинга, математического моделирования и информационно-коммуникационных технологий.

#### 1. Разработка системного анализа для структурирования проблемы мониторинга примесей

Проблема присутствия примесей в атмосфере может иметь серьезное негативное влияние на технологические и эколого-гигиенические характеристики геосистемы. Эта проблема обусловлена различными факторами, включая промышленность, автотранспорт, бытовые выбросы и природные процессы.

Влияние примесей на окружающую среду и на организм человека может быть очень серьезным, включая проблемы с дыхательной системой, сердечно-сосудистой системой и даже раковыми заболеваниями. Кроме того, примеси могут влиять на погоду и климат, вызывая изменения температуры, осадков и состава атмосферы.

Для более эффективного решения проблемы мониторинга примесей, можно использовать системный анализ, который поможет структурировать

причины и последствия этой проблемы в виде «дерева». Это позволит более полно оценить взаимосвязь между факторами и выбрать наиболее эффективные методы борьбы с загрязнением атмосферы и защиты окружающей среды.

На рисунке 1 приведена структура причин и последствий структура причин и последствий формирования примесей в атмосфере и согласно этому дереву составлена анкета, состоящая из следующих вопросов:

Оцените влияние стационарных источников (строительных объектов, ТЭЦ, объекты инфраструктуры, т.д.) выбросов на атмосферный воздух города Алматы;

Оцените влияние передвижных источников (автомобилей, транспортных средств, т.д.) выбросов на атмосферный воздух города Алматы;

Оцените влияние бытовых и промышленных отходов на атмосферный воздух города Алматы;

Оцените влияние естественных источников загрязнения (метеорологические ситуации, т.д.) на атмосферный воздух города Алматы;

Оцените влияние температуры воздуха (нагревание воздуха) на загрязнение атмосферного воздуха города Алматы;

Оцените влияние влажности воздуха на загрязнение атмосферного воздуха города Алматы;

Оцените влияние характера движения воздуха на загрязнение атмосферного воздуха города Алматы;

Оцените влияние загрязнения атмосферного воздуха города Алматы на рост энергозатрат (электрозатраты, потребление нефтепродуктов, т.д.) в производстве;

Оцените влияние загрязнения атмосферного воздуха города Алматы на снижение выхода годных изделий (изделия, признанные годными по результатам испытаний и контроля);

Оцените влияние загрязнения атмосферного воздуха города Алматы на здоровье населения;

Оцените влияние загрязнения атмосферного воздуха города Алматы на окружающую среду;

Оцените влияние загрязнения атмосферного воздуха города Алматы на сельское хозяйство.



Рисунок 1 – Структура причин и последствий формирования примесей в атмосфере, представленная в виде дерева

Для оценки формулировки проблем, их приоритетности, а также их причин и последствий была использована 5-ти балльная шкала, согласно которой эксперты могут выставить оценку в анкетах. Всего было опрошено 105 респондентов, включая 30 экспертов в области экологии.

Такой подход к оценке проблем позволяет получить объективную информацию о приоритетности проблем и определить наиболее критические ситуации, которые требуют наиболее срочного внимания. Эксперты из кафедры ЮНЕСКО по устойчивому развитию КАЗНУ им. аль-Фараби, кафедры экологии АУЕС им. Г. Даукеева, ТОО «Экосервис-С», НИИ «Географии и экологии» и др., имеющие большой опыт работы в данной области, предоставили

более точные оценки. Дальнейший системный анализ, основанный на знаниях и опыте большой работы повышает точность оценки проблем и их приоритетности.

Таким образом, использование 5-ти балльной шкалы для оценки формулировок проблем, их приоритетности, а также их причин и последствий, с последующим опросом экспертов в области экологии, является эффективным способом оценки и управления экологическими проблемами. Использована формула усреднения  $s_{п} = 1/n \sum_{i=1}^n s_i$ , где  $s_{п}$  – среднее значение оценок причин или последствий,  $s_i$  – 5-ти балльные значения оценок респондентов причин или последствий, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка экспертами причин и последствий проблемы, связанной с присутствием примесей в атмосфере

Формулировка причин проблемы	Оценка в баллах
<b>Техногенные</b>	
1	2
влияние стационарных источников выбросов (строительных объектов, ТЭЦ, объекты инфраструктуры, т.д.)	4.182
влияние передвижных источников выбросов (автомобилей, транспортных средств, т.д.)	4.423
влияние бытовых и промышленных отходов	3.875

1	2
<b>Метеорологические</b>	
влияние естественных источников загрязнения (метеорологические ситуации, т.д.)	3.288
влияние температуры воздуха	3.182
влияние влажности воздуха	3.153
влияние характера движения воздуха	3.634
<i>Формулировка последствий проблемы</i>	<i>Оценка в баллах</i>
<b>Техногенные</b>	
Рост энергозатрат в производстве	3.615
Снижение выхода годных изделий	3.163
<b>Социально-экологические</b>	
Ущерб здоровью населения	4.288
Ущерб окружающей среде	4.25
Ущерб сельскому хозяйству	3.673

Технологические аспекты проблемы загрязнения в атмосфере зависят от источников выбросов, как передвижных (оценка – 4.423 балла) и стационарных (оценка – 4.182 балла), так и бытовых и промышленных отходов (оценка – 3.875 балла). А также от метеоусловий (оценка – 3.288 балла), температуры (оценка – 3.182 балла), влажности (оценка – 3.153 балла) и характера движения воздуха (оценка – 3.634 балла).

В г. Алматы производства микроэлектроники организовано в ПИТ «Алатау», фармацевтические препараты выпускает АО «Нобел АФФ» и др. Для этих производств необходимы чистые помещения.

Присутствие вторичных примесей в атмосфере влияет на энергозатраты на подготовку воздуха для чистых помещений (оценка – 3.615 балла) и на процент выхода годных изделий (оценка – 3.163 балла). Чтобы контролировать эти показатели и уменьшить негативное воздействие вторичных примесей на здоровье населения (оценка – 4.288 балла), окружающую среду (оценка – 4.25 балла) и сельскому хозяйству (оценка – 3.673 балла), необходимо предусмотреть возможность обнаружения и измерения вторичных примесей в системе мониторинга.

## 2. Применение алгоритма машинного обучения для выявления взаимосвязи между факторами загрязнения и их воздействием на атмосферный воздух

Применение технологии машинного обучения становится все более актуальным в современном мире, особенно в области экологии и охраны окружающей среды. Одним из примеров

применения машинного обучения в экологических исследованиях является выявление связи между причинами загрязнения и последствиями загрязнения атмосферного воздуха.

Выявляется связь между собранными данными о различных факторах, которые могут влиять на загрязнение воздуха, такие как количество выбросов от стационарных и передвижных источников, погодные условия и другие и данными о последствиях, которые возникают из-за загрязнения воздуха.

Алгоритмы машинного обучения могут помочь определить, какой источник выбросов является основным виновником загрязнения воздуха в конкретном районе, и как изменения погодных условий влияют на уровень загрязнения. Такой подход позволяет более эффективно контролировать загрязнение атмосферы и принимать меры для его снижения, что является важной задачей в борьбе за чистую и здоровую окружающую среду.

В рамках построения модели связи между причинами и последствиями загрязнения воздуха были рассмотрены следующие входные данные: стационарные источники ( $X_1$ ), передвижные источники ( $X_2$ ) и бытовых и промышленных отходы ( $X_3$ ), также метеоусловия ( $X_4$ ), температура ( $X_5$ ), влажность ( $X_6$ ) и характер движения воздуха ( $X_7$ ).

В качестве выходных данных были использованы энергозатраты ( $Y_1$ ), выход годных изделий ( $Y_2$ ), здоровье населения ( $Y_3$ ), окружающая среда ( $Y_4$ ) и сельское хозяйство ( $Y_5$ ). Для выявления связи между входными и выходными данными применяется метод случайного леса.

## 2.1 Метод случайного леса

Деревья принятия решений (decision tree) являются универсальными алгоритмами машинного обучения, которые применимы при решении задач регрессии. Деревья принятия решений также являются фундаментальными компонентами метода случайных лесов, которые входят в число наилучших алгоритмов машинного обучения.

Пусть при построении дерева решений данные в узле  $m$  будут представлены в виде  $Q_m$  с образцами  $N_m$ . Для каждого разделения кандидатов  $\theta = (j, t_m)$  состоящих из функции  $j$  и порога  $t_m$ , данные разделяются на подмножества

$$Q_m^{left}(\theta) = \{(x, y) | x_j \leq t_m\}$$

и  $Q_m^{right}(\theta) = Q_m \setminus Q_m^{left}(\theta)$ .

Качество кандидата разделения узла  $m$  вычисляется с использованием функции потерь  $H$ , выбор которых зависит от решаемой задачи

$$G(Q_m, \theta) = \frac{N_m^{left}}{N_m} H(Q_m^{left}(\theta)) + \frac{N_m^{right}}{N_m} H(Q_m^{right}(\theta)),$$

параметры, которые минимизируют  $G(Q_m, \theta)$ , определяются как

$$\theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} G(Q_m, \theta).$$

Для задачи регрессии определяются параметры

$$H(Q_m) = \frac{1}{N_m} \sum_{y \in Q_m} (y - \bar{y}_m)^2,$$

$$\bar{y}_m = \frac{1}{N_m} \sum_{y \in Q_m} y$$

где  $\bar{y}_m$  – среднее значение узла,  $H(Q_m)$  – функция потерь.

## 2.2 Алгоритм реализации

В качестве инструментов были использованы аналитические пакеты numpy, matplotlib, pandas, seaborn, scikit-learn и keras языка программирования Python.

Алгоритм реализации состоит из следующих этапов:

- 1) Подготовка и введение входных данных.
- 2) Выявление связи между параметрами. Сделать это можно рассчитав коэффициенты корреляции для всех столбцов.
- 3) Разбиение исходных данных на 2 подвыборки: тестовую и обучающую.
- 4) Для построения модели в данном исследовании был применен метод случайного леса (RFR).
- 5) Меры оценки моделей введены с помощью коэффициента детерминации ( $R^2$ ), MSE и MAE оценок.
- 6) Проведен анализ результатов и выводы.

## 2.3 Проверка данных на мультиколлинеарность

Были выполнены проверки на мультиколлинеарность в отношении данных о загрязнении атмосферного воздуха, как для входных, так и для выходных данных. Мультиколлинеарность характеризуется сильной взаимосвязью между несколькими независимыми переменными в модели регрессии, что может привести к искажению результатов анализа и уменьшению точности оценок коэффициентов регрессии.

При проверке мультиколлинеарности, согласно рисунку 2, для параметров входных данных было обнаружено, что параметры  $X_4$  и  $X_5$ ,  $X_5$  и  $X_6$ ,  $X_6$  и  $X_7$  имеют среднюю корреляцию, что может быть приемлемо при построении модели. Остальные параметры имеют значения близкие к нулю, такая корреляция допускается при построении модели.

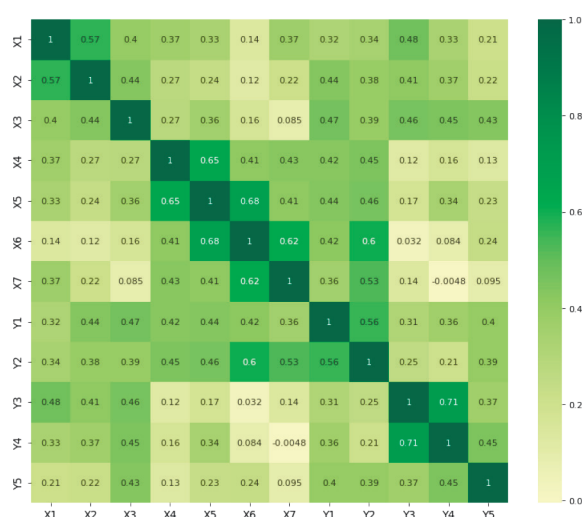


Рисунок 2 – Результаты проверки на мультиколлинеарность входных и выходных данных

## 2.4 Оценка качества модели

Для оценки эффективности метода машинного обучения рассматриваются такие

параметры, как коэффициент детерминации ( $R^2$ ), средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя квадратичная ошибка (MSE).

Таблица 2 – Коэффициент детерминации ( $R^2$ )

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
Тренировочные	0.8735	0.9883	0.971	0.9602	0.9484
Тестовые	0.899	0.9754	0.9263	0.9247	0.9047

Таблица 3 – Средняя квадратичная ошибка (MSE)

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
Тренировочные	0.1247	0.0129	0.0229	0.0253	0.0562
Тестовые	0.0983	0.0291	0.0595	0.0506	0.0798

Таблица 4 – Средняя абсолютная ошибка (MAE)

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>
Тренировочные	0.1667	0.0713	0.0786	0.0838	0.1255
Тестовые	0.1906	0.1211	0.1525	0.1401	0.1912

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) отражает долю дисперсии, которую модель объясняет, и модель считается высококачественной, когда значение  $R^2$  близко к единице.

При построенной модели коэффициент детерминации близок единице как для тренировочных, так и для тестовых данных.

MSE и MAE (таблицы 3 и 4, соответственно) применялись для количественной оценки оши-

бок обучения, которые должны быть близки к нулю. При использованном методе случайного леса (RFR) и низкие показатели MSE и MAE, что является показателем точности модели.

## 1.5 Анализ и вывод результатов

С учетом оценок качества моделей и мультиколлинеарности для последствий, возникающих



из-за загрязнения атмосферного воздуха были построены следующие пять модели, описывающие влияние причин загрязнений воздуха

$$y_1 = 0.093x_1 + 0.127x_2 + 0.154x_3 + 0.14x_4 + 0.123x_5 + 0.194x_6 + 0.167x_7,$$

$$y_2 = 0.096x_1 + 0.1x_2 + 0.068x_3 + 0.115x_4 + 0.083x_5 + 0.391x_6 + 0.144x_7,$$

$$y_3 = 0.23x_1 + 0.13x_2 + 0.21x_3 + 0.097x_4 + 0.066x_5 + 0.127x_6 + 0.125x_7,$$

$$y_4 = 0.23x_1 + 0.095x_2 + 0.17x_3 + 0.106 + 0.132x_5 + 0.123x_6 + 0.138x_7,$$

$$y_5 = 0.094x_1 + 0.048x_2 + 0.241x_3 + 0.16x_4 + 0.18x_5 + 0.132x_6 + 0.142x_7.$$

По результатам полученных моделей, наибольшее влияние на рост энергозатрат в производстве ( $Y_1$ ) оказывают влажность воздуха и характер движения воздуха. Это можно объяснить тем, что в производственных помещениях, где необходимо поддерживать определенную температуру и влажность, используется кондиционирование воздуха. Если воздух слишком влажный, кондиционер будет потреблять больше энергии для удаления избыточной влаги из воздуха, что увеличит энергозатраты. Если воздух сильно перемешивается или имеет большую скорость, это может привести к большим потерям тепла через вентиляционные отверстия и двери, что повысит затраты на обогрев.

На снижение выхода годных изделий ( $Y_2$ ) больше влияния оказывают температура и влажность воздуха, эти факторы снижают производство годных изделий, так как в производственных помещениях могут произойти химические реакции из-за этих факторов.

На здоровье населения ( $Y_3$ ) влияние оказывают стационарные, передвижные источники и бытовые и промышленные отходы. Выбросы углекислого газа, диоксида серы и азотных оксидов из данных источников загрязнения могут вызывать заболевания дыхательных путей, а высокие уровни озона могут повысить риск астмы.

На окружающую среду ( $Y_4$ ) большее влияние оказывают стационарные, передвижные источники загрязнения и бытовые и промышленные отходы. Большие количества различных вредных веществ, которые выходят из данных источников, такие как углекислый газ, оксиды

азота и серы, тяжелые металлы и другие токсичные вещества могут проникать в почву, воду и атмосферу, и вызывать различные проблемы, такие как кислотные дожди, изменения климата и другие.

Таким образом, вышеуказанные причины могут оказывать серьезное влияние на окружающую среду, и необходимы меры для уменьшения их воздействия на экосистемы, сохранения природных ресурсов и защиты здоровья людей.

### Заключение

Исходя из экспертной оценки выводится, что наиболее значимыми причинами загрязнения воздуха оказались стационарные и передвижные источники загрязнения и последствия, которые подвергаются наибольшему влиянию это здоровье населения и окружающая среда.

Отмечается, что методы машинного обучения показали хорошие качественные результаты, выявив связи между причинами и последствиями загрязнения воздуха. Результаты анализа метода машинного обучения показывают, что стационарные и передвижные источники загрязнения и бытовые и промышленные отходы оказывают значительное влияние на здоровье населения и окружающую среду. Поэтому, необходимо разработать и внедрить меры для уменьшения влияния указанных источников загрязнения на экосистемы, сохранения природных ресурсов и защиты здоровья людей. Это может включать в себя использование более эффективных технологий, более строгие стандарты и нормы для загрязнителей, а также более эффективную утилизацию бытовых и промышленных отходов. Такие меры могут помочь минимизировать отрицательное воздействие на окружающую среду и обеспечить более здоровое будущее населения.

### Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства высшего образования и науки Республики Казахстан (грант № BR18574148 «Развитие геоинформационных систем и мониторинга объектов окружающей среды»).

### Литература

1. Kerimray A., Kenesov B. and Karaja F. “Trends and health impacts of major urban air pollutants in Kazakhstan.” *Air waste management*. (2019). Assoc. 69: pp. 1331-1347. doi: 10.1080/10962247.2019.1668873.
2. The most polluted countries in the world IQAir in 2021—rating PM2.5 | *AirVisual*. (2021) URL: <https://www.airvisual.com/world-most-polluted-countries>
3. Temirbekov N.M, Malgazhdarov E.A., Temirbekova A.N. “Simulation transformation of harmful substances in the atmosphere” *International Eurasian Conference on Mathematical Sciences and Applications*. Sarajevo; Bosnia and Herzegovina, (2013) august 26-29. – 435 p.
4. Temirbekov A.N., Danaev N.T., Malgazhdarov E.A. “Modeling of Polutants in the Atmosphere Based on Photochemical Reactions” *Eurasian chemico-technological journal. The International Higher Education Academy of Sciences*. (2014) Vol. 16. № 1. pp. 61-71.
5. Temirbekov N.M., Wojcik W., Adikanova, S., Malgazhdarov Y.A., Madiyarov M.N., Myrzagaliyeva A.B., Junisbekov M., Pawłowski L. “Probabilistic and statistical modelling of the harmful transport impurities in the atmosphere from motor vehicles, [Probabilistyczne i statystyczne modelowanie rozprzestrzeniania się w atmosferze szkodliwych zanieczyszczeń z pojazdów silnikowych].” *Rocznik Ochrona Srodowiska*, (2017) Volume 19, p. 795-808 .
6. Temirbekov A.N., Urmashv B.A., Gromaszek K. “Investigation of the stability and convergence of difference schemes for the three-dimensional equations of the atmospheric boundary layer” *International Journal of Electronics and Telecommunications*. (2018.) Vol.64, № 3. pp. 391-396.
7. Air Quality and Health Impacts of Air Pollution in Almaty, Kazakhstan. *National Center for Biotechnology Information*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7949061/>
8. Akishev, G., Tsembelev, A., & Smagulova, A. “Air pollution and respiratory health in Almaty city, Kazakhstan.” *International Journal of Environmental Health Research*, (2020) Vol. 30(5), pp. 526-539.
9. Ambient air pollution: Health impacts. *World Health Organization*. (2020). URL: [https://www.who.int/health-topics/ambient-air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/ambient-air-pollution#tab=tab_1)
10. Turner, M.C., Andersen, Z.J., Baccarelli, A.A., Diver, W.R., Gapstur, S.M., Pope, C.A., Prada, D., Samet, J.M., Thurston, G.D., & Cohen, A.J. “Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations.” *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, (2020) Vol. 70, pp. 460 – 479.
11. Kelly, F.J., & Fussell, J.C. “Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk.” *Environmental Geochemistry and Health*, (2015). Vol. 37, pp. 631 – 649.
12. National Institute of Environmental Health Science, USA. URL: <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution/index.cfm>
13. World Health Organization <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/air-pollution>
14. World Health Organization (WHO). Air pollution and child health: prescribing clean air. (2018) URL: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-18-01>
15. Bickerstaff, K., & Walker, G.A. “Public understandings of air pollution: the localisation of environmental risk.” *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, (2001). Vol. 11, pp. 133-145.
16. Saksena, Sumeet. “Public Perceptions of Urban Air Pollution Risks. Risk.” *Hazards & Crisis in Public Policy*. (2011).Vol. 2. 10.2202 pp. 1944-4079.
17. Municipal Energy Efficiency Plan for the City of Almaty. *World Bank*. (2017) URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/855641510934183633/pdf/121463-ESM-P130013-PUBLIC-KEEPAlmatyEEPlanNovengfinal.pdf>, Last Access: August 2019.
18. World Bank. Towards Cleaner Industry and Improved Air Quality Monitoring in Kazakhstan. (2013) URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/132151468047791898/Towards-cleaner-industry-and-improved-airquality-monitoring-in-Kazakhstan>
19. Committee of Statistics of the Ministry of national economy of the Republic of Kazakhstan. Passenger car transport (2022) URL: <http://old.stat.gov.kz/getImg?id=ESTAT099960>
20. Ashit Kumar Dutta, Jenyfal Sampson, Sultan Ahmad, T. Avudaiappan, Kanagaraj Narayanasamy, Irina V. Pustokhina and Denis A. Pustokhin “Hybrid Deep Learning Enabled Air Pollution Monitoring in ITS Environment” *Computers, Materials & Continua* (2022) Vol. 72(1), pp.1157-1172.
21. Mohd Anul Haq “SMOTEDNN: A Novel Model for Air Pollution Forecasting and AQI Classification” *Computers, Materials & Continua* (2022) Vol. 71(1), pp. 1403-1425.
22. Muhammad Zulqarnain, Rozaida Ghazali, Habib Shah, Lokman Hakim Ismail, Abdullah Alsheddy and Maqsood Mahmud “A Deep Two-State Gated Recurrent Unit for Particulate Matter (PM2.5) Concentration Forecasting” *Computers, Materials & Continua* (2022) Vol. 71(2), pp. 3051-3068.
23. K. S. Bhuvaneshwari, J. Uma, K. Venkatachalam, Mehedi Masud, Mohamed Abouhawwash and T. Logeswaran “Gaussian Support Vector Machine Algorithm Based Air Pollution Prediction” *Computers, Materials & Continua* (2022) Vol. 71(1), pp. 683-695.
24. Komarov V.F., Volkova L.V., Pirogov V.I. “Problem-oriented methodology for analyzing and solving organizational and economic problems” *ECO*, (2008) No. 7, pp. 107 – 109 (in Russian)
25. Litvak B.G. Expert assessments and decision-making. Moscow: *Patent*, (1996) 274 p. (in Russian)