

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОГО РЕГИОНА: ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ, ПОДХОДЫ

В.Г. Сальников¹д.г.н., профессор, С.Е. Полякова¹к.г.н., доцент, А.А. Ульман¹к.г.н., доцент, А.М. Кауазов¹к.г.н., М.О. Турсумбаева¹Phd, Д.К. Кисебаев², Д.И. Миськив¹, Е.Е. Белдеубаев^{1*}, Г.Т. Мусралинова¹, С.О. Кожагулов¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²РГП «Казгидромет», г. Алматы, Казахстан

E-mail: yerkebulan.beldeubayev@kaznu.edu.kz

Рассмотрены основные подходы и методы исследования особенностей и условий загрязнения атмосферы на примере Западного Казахстана. Проведена классификация и группировка применяемых подходов по темам, методам, временным интервалам и другим релевантным критериям. Проведен анализ имеющейся информации об источниках и объемах выбросов в атмосферу, а также о системах мониторинга загрязнения воздушного бассейна. Показано, что для повышения эффективности системы управления качеством атмосферного воздуха целесообразно применение комплексного подхода с учетом влияния метеорологических факторов и синоптических условий, определяющих различные уровни загрязнения. Аналитический обзор современных методов моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе показал целесообразность применения статистических методов, интегрированных с глубоким машинным обучением и эйлеровой континуальной модели турбулентной диффузии. Полученные выводы позволят в дальнейшем использовать комплексный подход для совершенствования системы управления качеством атмосферного воздуха исследуемого региона.

Ключевые слова: экология, мониторинг, атмосферный воздух, источники загрязнения, загрязняющие вещества, метеорологические условия, моделирование, Западный Казахстан.

Поступила: 11.12.23

DOI: 10.54668/2789-6323-2024-113-2-128-149

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях стремительного развития общества, промышленности и технологий, вопросы экологии приобретают все большее значение и охватывают все аспекты жизнедеятельности ноосферы. Одним из ключевых аспектов экологического равновесия является качество атмосферного воздуха. Особенно актуальной становится проблема оценки качества воздуха в регионах с высокой промышленной активностью, где различные источники загрязнения оказывают серьезное воздействие на окружающую среду и здоровье населения.

Западный Казахстан является мировым лидером по запасам хрома, его объемы превышают 400 миллионов тонн. В недрах разведано 40 % общереспубликанских запасов титана и 55 % никеля (<https://qazindustry.gov.kz/>). В западном регионе

Казахстана сосредоточено более 90 % всех балансовых запасов углеводородов. В том числе 13466,9 млн. т геологических и 4457,3 млн. т извлекаемых запасов нефти, а также 1322,6 млрд. м³ свободного газа. При этом на Атыраускую область приходится 73 % запасов нефти, а на Западно-Казахстанскую - 62 % запасов свободного газа. На территории последней находится и 79 % конденсата, геологические запасы которого составляют 865,4 млн. т, а извлекаемые - 330,5 млн. т. С Западным регионом Казахстана также связана и большая часть прогнозных ресурсов, которые в целом по республике оцениваются в 12...15 млрд. т нефти и 7...8 трлн. м³ газа (<http://www.investkz.com/journals/38>). Здесь также расположены крупные месторождения золота, серебра, меди, цинка, кобальта, каолина, фосфоритов и нефтебитумных пород, а также сырья для производства строительных

материалов. Таким образом, регион Западного Казахстана обладает огромным экономическим и стратегическим значением для нашей республики. Однако, это также приводит к повышенному риску загрязнения окружающей среды, включая атмосферу, что создает угрозу для окружающей среды и здоровья населения. Создание актуальной информационной базы данных о загрязнении атмосферы Западно-Казахстанского региона и разработка методологических основ для оценки качества воздуха становится актуальной задачей не только для управления качеством окружающей среды, но и для обеспечения устойчивого развития региона. Мониторинг, анализ данных и их интерпретация, моделирование, раннее предупреждение о высоких уровнях загрязнения является методической основой для управления качеством атмосферного воздуха.

В свою очередь мониторинг является основным компонентом оценки качества атмосферного воздуха, который включает систематический сбор данных о загрязнителях воздуха в течение различных временных интервалов (Национальный доклад, 2021). Существует множество методов мониторинга уровня атмосферного загрязнения, каждый из которых предназначен для измерения конкретных загрязняющих веществ, таких как твердые частицы (ТЧ), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2), озон (O_3), угарный газ (CO) и летучие органические соединения (ЛОС) и др. Станции мониторинга стратегически размещены таким образом, чтобы регистрировать изменения уровня загрязняющих веществ в различных географических районах, в городской и сельской местности, а также вблизи источников загрязнения.

В основе анализа данных лежат критерии уровня загрязнения, которые определяются в соответствии с международными стандартами, рекомендациями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и национальными нормативными документами. Такие критерии обеспечивают основу для оценки санитарно-экологической обстановки и принятия соответствующих мер по улучшению качества воздуха. Также критически важен в управлении качеством

атмосферного воздуха учет неблагоприятных метеорологических условий из-за их прямого влияния на распространение и концентрацию загрязнителей. Ветер, температура, влажность и осадки могут значительно варьироваться, влияя на формирование атмосферных условий и соответственно на диффузию примесей в атмосфере. Комплексный учёт этих факторов необходим для оценки текущего состояния загрязнения атмосферы, корректировки выбранных прогностических моделей и разработки эффективных стратегий управления.

Моделирование качества воздуха дополняет процесс мониторинга и анализа данных, предоставляя прогностическую основу для оценки концентраций загрязняющих веществ в исследуемых регионах. Ключевыми аспектами моделирования играющими важную роль в изучении загрязнения атмосферы, являются: понимание динамики перемещения загрязнителей в атмосфере, их распространение, рассеивание и осаждение на земную поверхность; прогнозирование уровня загрязнения на основе текущих данных о выбросах загрязняющих веществ, метеорологических условиях и других факторах; оценка эффективности различных мер по снижению загрязнения воздуха; принятие обоснованных решений в области охраны окружающей среды и здравоохранения. В целом, математическое моделирование является мощным инструментом для изучения загрязнения воздуха, повышения осведомленности о его последствиях и разработки эффективных мер.

Особое значение моделирование приобретает для тех территорий, где отсутствуют регулярная сеть станций мониторинга.

Комплексный подход оценки качества атмосферного воздуха является междисциплинарным и опирается на принципы различных научных областей, включая науку об атмосфере, инженерной экологии, химии и статистики. Этот подход обеспечивает комплексное понимание процессов, влияющих на качество воздуха, начиная от физических и химических процессов в атмосфере и заканчивая методами анализа и интерпретации данных.

Взаимодействие различных научных дисциплин позволяет разрабатывать эффективные методы анализа, моделирования и управления качеством атмосферного воздуха, а также принимать обоснованные решения для сохранения здоровья человека и окружающей среды.

В настоящий момент в системах мониторинга применяются самые разнообразные методики, подходы, в частности стационарные лабораторные наблюдения, автоматизированные наблюдения с помощью датчиков с ежечасными данными, наряду с точечными наземными данными в городах, большое распространение приобретают геопространственные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как приземные, так и на различных высотах. Все эти системы наблюдения находятся как в руках государственного уполномоченного органа (РГП «Казгидромет») (Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан), так и в руках частных энтузиастов (проект А.Александрова) или станций мониторинга качества воздуха посольства США.

Цель статьи заключается в попытке систематизации и обобщения общих принципов, методов и подходов к мониторингу качества воздуха и его адаптация к Западно-Казахстанскому региону.

Для достижения цели можно выделить основные задачи:

1. Рассмотреть основные текущие подходы и методы организации мониторинга Западно-Казахстанского региона.
2. Провести анализ современных критериев качества атмосферного воздуха.
3. Провести аналитический обзор современных методов математического анализа на основе использования машинного обучения, искусственного интеллекта и нейронных сетей,
4. Оценить возможности применения моделирования распространения поллютантов для более детального изучения пространственно-временных особенностей загрязнения атмосферы ЗКР.

Полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования системы мониторинга за состоянием

атмосферного воздуха и оптимизации процессов управления его качеством.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения современных подходов мониторинга и управления качеством атмосферного воздуха использованы данные Бюро национальной статистики Республики Казахстан и информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан за период с 2015 по 2021 годы. Использовались результаты исследования зарубежных и отечественных исследователей по данной тематике.

В работе использовались следующие методы и подходы:

- систематический анализ современных научных исследований по рассматриваемой тематике из высоко цитируемых баз данных;
- сопоставление различных точек зрения и методологий;
- процедурный обзор, позволяющий изучить и оценить применяемые современные методологии исследований, представленных в современных научных статьях;
- мета-анализа использовался для систематического объединения искомым данных из различных исследований для получения общих выводов и дальнейшего их применения;
- контент-анализа для выделения ключевых концепций исследования;
- методы метасинтеза, позволяющие синтезировать данные из различных качественных исследований для создания нового, обобщенного понимания предмета.

Перечисленные выше методы и подходы позволили авторам выделить наиболее значимые и перспективные тренды исследования загрязнения атмосферного воздуха Западно-Казахстанского региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В Западном Казахстане, обладающем богатыми природными ресурсами и развитой промышленностью, остро столкнулись с проблемами сохранения экологического баланса. Промышленные комплексы, энергетика и транспорт играют ключевую роль в экономике региона, однако, являются основными источниками выбросов

загрязняющих веществ в атмосферу.

В таблице 1 представлены данные Бюро национальной статистики Республики Казахстан (Бюро национальной статистики Республики Казахстан) о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников за период с 2015 по 2021 годы по четырем областям Западно-Казахстанского региона (ЗКР). В целом по региону годовые выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников составляют 359,9... 450,6 тыс. т. за рассматриваемый период. Наибольшие значения выбросов наблюдались с 2016 по 2018 гг. и составили 431,0...450,6 тыс. т. В 2020 году наблюдались минимальные значения (392,4 тыс. т.), а в 2021 году отмечается повышение выбросов на 1,7 %.

Вклад областей в общее загрязнение воздушного бассейна ЗКР различен. Так, наибольшее количество выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в 2021 г. приходится на Атыраускую (160,3 тыс.т.) и Актыбинскую (137,4 тыс.т.) области (таблица 1), что составляет 74,6 % от общего количества выбросов рассматриваемого региона. Загрязнение в Мангыстауской (75,2 тыс.т.) и Западно-Казахстанской (26,0 тыс.т.) областях в 2...6 раз меньше (соответственно). Эти различия в объемах выбросов не могут быть объяснены только различием количества источников загрязнения в соответствующих областях, а вероятнее всего связаны с природоохранными мероприятиями.

Таблица 1

Количество стационарных источников выбросов загрязняющих веществ и объем выбросов по областям ЗКР 2019...2021 гг.

Область	Количество стационарных источников, шт			Объем выбросов, тыс. т.		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Атырауская	25 548	28 654	28 904	164,5	154	160,3
Актыбинская	22 615	22 988	23 382	136,6	135,1	137,4
Мангыстауская	24 881	24 825	24 584	64,5	72,5	75,2
Западно-Казахстанская	11 619	11 735	11 958	41,2	30,8	26,0
ИТОГО	84 663	88 202	88 828	406,8	392,4	398,9

Важной составляющей системы управления качеством атмосферного воздуха, является мониторинг. Основная его цель заключается в раннем обнаружении и контроле уровня загрязнения воздуха, что позволяет принимать соответствующие меры для улучшения качества воздуха и защиты здоровья населения. Мониторинг также служит основой для разработки политики и стратегий по снижению выбросов загрязняющих веществ и соблюдению нормативов и стандартов качества воздуха.

В настоящее время уполномоченным государственным органом, осуществляющим мониторинг состояния атмосферного воздуха на территории Казахстана, является РГП «Казгидромет». При этом, согласно экологическому Кодексу РК РГП «Казгидромет» проводит мониторинг только в селитебной

зоне. Необходимо отметить, что мониторинг загрязнения атмосферы Западно-Казахстанский региона проводится на небольшом количестве станций наблюдения, из которых 7 являются станциями отбора проб в ручном режиме (РПНЗ), и 27 - станции наблюдения за загрязнением в автоматическом режиме (АПНЗ) (рисунок 1).

На автоматических станциях измерения загрязняющих веществ проводятся каждые 20 минут, в то время как на станциях ручного контроля пробы отбираются 3...4 раза в сутки (в 07:00, 13:00, 19:00, 01:00) в соответствии с установленной программой. Анализ пространственного распределения постов показывает, что они расположены преимущественно вблизи основных источников загрязнения атмосферы.

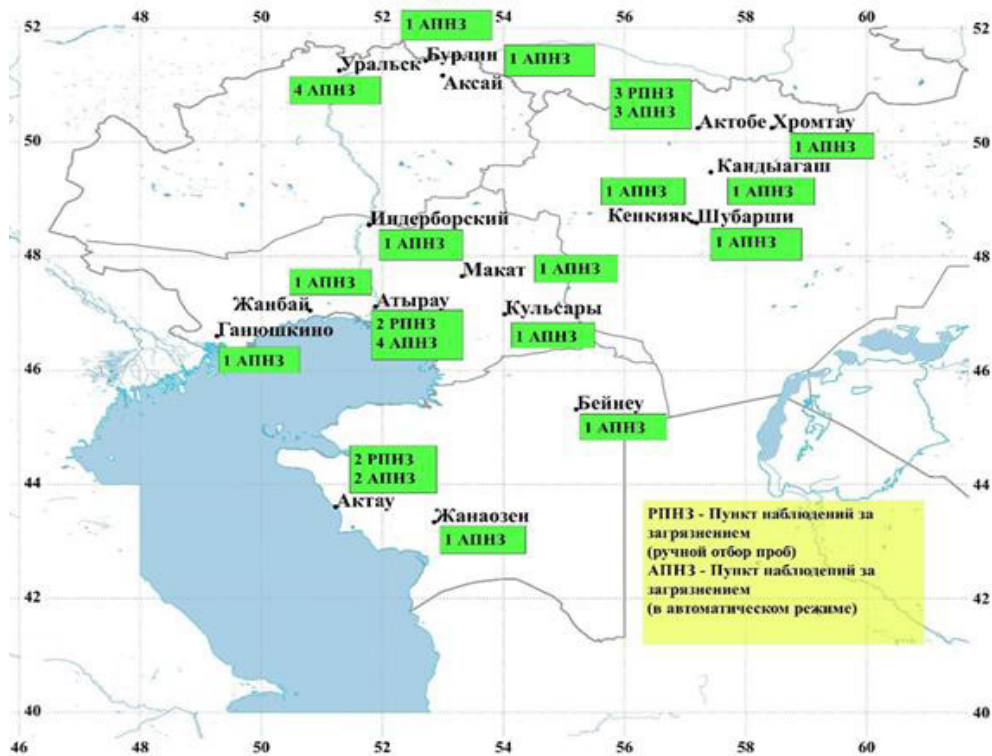


Рис.1. Расположение постов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в Западно-Казахстанском регионе

В таблице 2 представлен перечень станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха Западно-Казахстанского региона.

Анализ показывает, что ручной отбор проб воздуха для последующего анализа в химической лаборатории осуществляется лишь на семи постах мониторинга, расположенных в Актобе (3 поста), Атырау (2 поста) и Актау (2 поста). В Западно-Казахстанской области наблюдения за концентрациями примесей проводится только с использованием автоматических станций

На большинстве станций мониторинга проводятся наблюдения за основными (пылевые частицы $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , NO_2) и специфическими или маркерными загрязнителями, например на многих пунктах измеряются концентрации сероводорода (H_2S), фенолами (CH_2O), различными углеводородами и т.д.

Первичная информация с сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха является основой для определения качества атмосферы. Определяется совокупностью его физических, химических и биологических свойств, которые отражают степень соответствия заданным гигиеническим и экологическим нормативам. Гигиенические нормативы качества атмосферного воздуха устанавливаются

критерии, определяющие максимально допустимое содержание вредных (загрязняющих) веществ в атмосфере. Эти нормативы обеспечивают отсутствие вредного воздействия на здоровье человека и окружающую среду.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что количество постов наблюдений за основными и специфическими компонентами атмосферного воздуха не дает возможность провести комплексный мониторинг для всей исследуемой территории.

Одним из наиболее часто используемых методов изучения загрязнения воздушного бассейна является расчет индексов и показателей качества воздуха. В таблице 3 приведены основные индексы, которые применяются в настоящее время в различных странах (Сальников В.Г., 2006; Adilet, 2021; IQAir, 2022; United States Air Quality Index (AQI) Live). При этом в основе всех критериев лежат нормированные значения загрязняющих веществ, имеющих страновую специфику. Так в Казахстане используются следующие индексы: стандартный (СИ), наибольшей повторяемости (НП), загрязнения атмосферы (ИЗА), параметр «Р». Анализ индексов показывает, что полученные значения характеризуют качество воздуха в локальной точке

(ограничиваясь ПНЗ). Соответственно эти индексы не дают полного охвата исследуемой территории. Поэтому для детального изучения качества воздуха необходимо совместное использование данных наземного и космического (<https://www.tropomi.eu/>) мониторинга.

Таблица 2

Сеть станций мониторинга РПНЗ и АПНЗ Западно-Казахстанского региона

Область	Город/ поселок	Пост	Категория поста	Измеряемые показатели**
Актюбинская	г. Актобе	ПНЗ №2	A*	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S
		ПНЗ №3	A	
		ПНЗ №6	A	
		ПНЗ №1	P*	пыль, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S, CH ₂ O, Cr
		ПНЗ №4	P	
		ПНЗ №5	P	
Атырауская	г. Хромтау	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	г. Кандыгагаш	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	п. Шубарши	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	п. Кенкияк	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	г. Атырау	ПНЗ №6	A	PM-2.5, PM-10, O ₃
Западно-Казахстанская	г. Атырау	ПНЗ №8	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO
		ПНЗ №9	A	PM-2.5, PM-10, CO, NO ₂ , NO, O ₃
		ПНЗ №10	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
		ПНЗ №1	P	пыль, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S, C ₆ H ₅ OH, NH ₃ , CH ₂ O, C ₆ H ₆ , CH ₃ , C ₈ H ₁₀ , C ₂ H ₆
		ПНЗ №5	P	пыль, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S, C ₆ H ₅ OH, NH ₃ , CH ₂ O
	г. Кульсары	ПНЗ №7	A	PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, O ₃ , NH ₃
	с. Жанбай	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	с. Макат	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	п. Индерборский	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
	п. Ганюшкино	ПНЗ №1	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , H ₂ S
Мангистауская	г. Уральск	ПНЗ №2	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S
		ПНЗ №3	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃
		ПНЗ №5	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S, O ₃
	г. Аксай	ПНЗ №4	A	CO, NO ₂ , NO
		ПНЗ №4	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S
		ПНЗ №7	A	SO ₂ , O ₃ , H ₂ S
Мангистауская	г. Актау	ПНЗ №5	A	SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S
		ПНЗ №6	A	PM-2.5, PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S, O ₃
		ПНЗ №3	P	пыль, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ SO ₄
		ПНЗ №4	P	пыль, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ SO ₄
	г. Жанаозен	ПНЗ №1	A	PM-10, CO, O ₃
		ПНЗ №2	A	PM-10, SO ₂ , CO, NO ₂ , NO, H ₂ S
		п. Бейнеу	ПНЗ №7	A

Примечание: * A – автоматического отбора проб за состоянием атмосферного воздуха; P – ручного отбора проб за состоянием атмосферного воздуха;

** PM-2,5 – взвешенные частицы диаметром 2,5 мкм; PM-10 – взвешенные частицы диаметром 10 мкм; SO₂ – диоксид серы, CO – оксид углерода, NO₂ – диоксид азота, NO – оксид азота, H₂S – сероводород, CH₂O – формальдегид, Cr – хром, O₃ – озон, C₆H₅OH – фенол, NH₃ – аммиак, C₆H₆ – бензол, CH₃ – толуол, C₈H₁₀ – этилбензол, C₂H₆ – ортоксилол, H₂SO₄ – серная кислота

Таблица 3

Современные индексы параметризации качества атмосферного воздуха

Название индекса	Страна	Описание	Метод расчета	Градации
Параметр «Р»	Казахстан, страны СНГ	Параметр Р определяется, как сумма отношений концентраций примесей к ПДК этой примеси. https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100023517	$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C}{\text{ПДК}}$ где, С - значение измеренной концентрации загрязняющего вещества (примеси) в воздухе, мг/м ³ , n - количество измерений примесей в городе по всем постам за все сроки наблюдений.	Градации параметра «Р» следующие: пониженный, повышенный, высокий, очень высокий. Границы градаций для каждого города РК индивидуальны и рассчитываются на основе многолетних данных. https://www.kazhydro met.kz/ru/ecology/ezhe dnevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-basseyna-nmu
Стандартный индекс (СИ)	Казахстан, страны СНГ	Наибольшая измеренная в городе максимальная разовая концентрация любого загрязняющего вещества, деленная на ПДК.	$q_i = C_i^* / \text{ПДК}_i$ $C_i^* - \text{значение максимальной или средней концентрации, ПДК}_i - \text{предельно-допустимая концентрация } i\text{-той примеси}$	Уровень загрязнения при: СИ >10, НП > 50%- очень высокий СИ – 5-10, НП – 20-49% -высокий СИ – 2-4, НП – 1-19% - повышенный СИ – 0-1, НП – 0% - низкий
Наибольшая повторяемость (НП)	Казахстан	Наибольшая повторяемость превышения разовыми концентрациями примеси ПДК (выражается в %).	$g = (m/n) \cdot 100\%$ где n - число наблюдений за рассматриваемый период, m - число случаев превышения разовыми концентрациями на посту.	
Индекс загрязнения атмосферы (ИЗА)	Казахстан, страны СНГ	Комплексный индекс загрязнения атмосферы, учитывающий несколько примесей (диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, фенол, формальдегид), представляющий собой сумму концентраций выбранных загрязняющих веществ в долях ПДК.	$\text{ИЗА}_5 = \sum (q_{\text{ср}} / \text{ПДК}_{\text{ср}})^{C_i}$ $C_i - \text{константа, принимающая значения } 1,7; 1,3; 1,0; 0,9 \text{ для соответствующих классов опасности веществ } 1, 2, 3, 4 \text{ и учитывающая степень вредности } i\text{-ой примеси к вредности } \text{SO}_2; q_{\text{ср}} - \text{среднее арифметическое значение среднесуточных концентраций, измеренных в течение года; ПДК}_{\text{ср}} - \text{значение допустимой среднесуточной вредного вещества.}$	Уровень загрязнения при ИЗА: <=5 - низкий 5-7 - повышенный высокий 7-14 - очень высокий >14 – экстремальный
Air quality index (AQI)	США	Числовая шкала, которая используется для измерения и оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха и его воздействия на здоровье людей.	$\text{AQI} = (I - B) / (M - B) * 100$ I - измеренное значение концентрации загрязнителя воздуха, B - нижний предел диапазона концентраций. Определяется как значение ПДК (предельно допустимой концентрации) загрязняющего вещества M - верхний предел диапазона концентраций. Определяется как значение ПДК загрязняющего вещества, умноженное на определенный коэффициент.	Качество воздуха при AQI: 0-50 - хорошее, 51-100 - приемлемое, 101-150 - умеренное, 151-200 - плохое, 201-300 - очень плохое, 301-500 - опасное.

Каждая страна находит и предлагает свои индексы и подходы по расчету искомой величины, при этом в основе всех критериев лежат нормированные значения загрязняющих веществ, имеющих страновую специфику. Следует отметить, что наиболее распространенным является Air quality index (AQI), который используется во многих странах (США, Китай, Индия, Европейские страны, Канада, Австралия и др.). Однако в каждой стране могут быть свои особенности и методики расчета индекса.

Решение задачи анализа и прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха в Западно-Казахстанском регионе затруднено рядом причин (Lawrence M.G., Rasch P.J., von Kuhlmann R., 2003; Li Q., Jiang J.H., Wu D.L., 2005), к которым можно отнести неопределенность метеорологических условий, сложность химических процессов, динамику изменения параметров выбросов от стационарных и особенно от передвижных источников, ограниченность данных, неоднородность задач и др., что требует совершенствования подходов к моделированию.

На сегодняшний день методы анализа и дальнейшего прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха можно разделить на три классические категории: статистические, численные и в последние годы методы искусственного интеллекта. Кроме того, сегодня в научном потенциале имеется и ряд гибридных моделей, которые могут улучшить точность прогноза (Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H., 2018; Волошин В.Г., 2013).

Статистические методы анализируют события, не обладая подробным пониманием механизмов изменений. Таким образом, этот метод не зависит от физических, химических или биологических процессов. Статистические прогнозы включают в себя как параметрические, так и непараметрические методы статистики. Параметрические модели представляют собой традиционные статистические модели, такие как линейная регрессия и анализ главных компонентов. В то время как непараметрические модели не ограничены определенной функциональной формой. Например, непараметрическая регрессия включает в себя модели нейронных сетей, регрессию гауссовских процессов и т.д. (Zhang, Y.; Bocquet, M.; Mallet, V, 2012; Shahraiyini H., Sodoudi S., 2016).

Наиболее известный из статистических методов анализа и прогнозирования является ре-

грессионный анализ. Это метод, который пытается определить взаимосвязь между зависимой переменной (уровень загрязнения воздуха) и одной или несколькими независимыми переменными (метеорологические факторы, транспортные потоки, промышленные выбросы и т.д.), соответственно метод основан на предположении, что существует линейная или нелинейная функция, которая связывает эти переменные.

Цель регрессионного анализа - оценить параметры этой функции и использовать ее для прогнозирования будущих значений зависимой переменной (Sykes, A.O., 1993; Mendenhall W., 2011).

Существует много типов регрессионных моделей, которые могут быть использованы и до сих пор находят свое применение в анализе и прогнозировании загрязнения воздуха (Волошин В.Г., 2013).

Так, линейная регрессия — это модель, которая предполагает, что зависимая переменная линейно связана с независимыми переменными. Данный тип модели прост в использовании и интерпретации, но может быть неадекватна для сложных данных. Примером использования линейной регрессии является модель, которая прогнозирует уровень загрязнения воздуха в Дели на основе температуры, влажности, скорости ветра и давления (Mohammad Ahmad, Weihsu Cheng, Zhao Xu, 2023; Vikas Singh, Shweta Singh, Akash Biswal, 2020).

Нелинейная регрессия определяет, что зависимая переменная нелинейно связана с независимыми переменными. Эта модель может быть более гибкой и точной, но также более сложной в оценке и интерпретации. Примером использования в научных метеорологических исследованиях нелинейной регрессии является модель, которая прогнозирует уровень загрязнения воздуха в Пекине на основе экспоненциальной функции от температуры, влажности, скорости ветра и давления (Chen Z. и др. 2018; Meng C. и др., 2019).

Множественная регрессия - модель, в которой зависимая переменная связана с несколькими независимыми переменными. Эта модель может учитывать влияние разных факторов на загрязнение воздуха, но также может быть зависима от проблемы мультиколлинеарности, когда независимые переменные сильно коррелируют друг с другом. В свою очередь когда мультиколлинеарность присутствует в модели, это может вызывать

следующие проблемы:

- Несостоятельные оценки параметров, т.е., мультиколлинеарность может сделать оценки параметров модели нестабильными и ненадежными.

- Завышенные стандартные ошибки, когда мультиколлинеарность приводит к увеличению стандартных ошибок коэффициентов регрессии, что затрудняет определение статистической значимости этих коэффициентов.

- Неоднозначность интерпретации - не всегда можно точно сказать, какие факторы действительно влияют на объект изучения, потому что эти факторы слишком похожи друг на друга.

Примером использования множественной регрессии является модель, которая была использована для прогноза уровня загрязнения воздуха в Мадриде с учетом температурных условий, влажности, скорости ветра, давления, солнечной радиации и осадков (Kai Wang и др., 2023; Elena Cerezuela-Escudero и др., 2023).

Регрессия с переменными сдвига - модель, в которой вводятся дополнительные переменные, отражающие изменения в структуре данных. Эта модель может улучшить качество прогноза, когда есть разрывы или скачки в данных. Примером регрессии с переменными сдвига является модель, которую разработали для прогноза уровня загрязнения воздуха в Нью-Йорке также при различных условиях температуры, влажности, скорости ветра, давления и переменных сдвига, которые учитывают сезонность, выходные дни и праздники (Shelby Zangari и др., 2020).

Регрессионный анализ имеет свои преимущества и недостатки. Среди преимуществ можно отметить простоту, интерпретируемость, низкую вычислительную сложность и возможность проверки гипотез. Среди недостатков можно отметить низкую гибкость, чувствительность к выбросам и мультиколлинеарности, а также необходимость выбора подходящей функции и проверки ее адекватности. Применение регрессионного анализа для территории ЗКР показал неустойчивые связи между выбросами и загрязняющими компонентами.

С целью минимизации недостатков статистических моделей в последние годы стали применяться комбинированные подхо-

ды, объединяющие их с методами машинного обучения. Примером такого подхода может служить модель Projection Pursuit (PP), которая является одним из методов прогнозирования загрязнения воздуха и предназначена для выявления сложных, нелинейных структур в данных. В отличие от многих статистических методов Projection Pursuit в своей основе не сет подход в формате - «анализ данных-моделирование-прогноз» (Deng, J.L., 1982). Основная идея этого метода заключается в том, чтобы выявить оптимальные проекции (проецирования) данных из высокоразмерного пространства в пространство меньшей размерности. Применение модели Projection Pursuit особенно полезно, когда данные содержат сложные взаимосвязи, которые трудно выявить с использованием традиционных методов.

Ключевые моменты модели Projection Pursuit (PP) можно описать следующим образом:

- Проецирование данных. Основная задача состоит в том, чтобы автоматически выбрать такие проекции данных, которые максимизируют определенный целевой критерий. Этот целевой критерий обычно связан с выявлением интересных, неочевидных структур в данных.

- Нелинейность и сложные структуры. В отличие от традиционных статистических методов, которые часто предполагают линейные взаимосвязи, модель PP спроектирована для обнаружения нелинейных отношений и сложных структур в данных.

- Эксплоративный анализ данных. PP часто используется в качестве инструмента для исследования данных, выявления новых закономерностей и получения выводов, особенно в тех случаях, когда структура данных может быть сложной и трудно понимаемой.

Модель PP очень хорошо подходит для анализа сложных взаимосвязей между различными переменными, например такими как метеорологические условия, выбросы загрязняющих веществ и качество воздуха. Таким образом, модель Projection Pursuit является гибким и мощным инструментом для анализа и прогнозирования загрязнения воздуха, который может учитывать нелинейные и сложные зависимости между переменными. Предполагается,

что именно эта модель будет являться базовой при первичном анализе взаимосвязи факторов и исследуемого явления в ЗКР.

Другим мощным инструментом в исследованиях качества атмосферного воздуха, который в последние годы нашел широкое применение, является метод анализа главных компонент (Principal Components Analysis, PCA). PCA позволяет снизить размерность данных, выделить основные факторы и идентифицировать наиболее значимые переменные, влияющие на загрязнение воздуха.

Одним из ключевых преимуществ использования PCA является его способность выявлять структуру в многомерных наборах данных, что особенно важно в контексте анализа атмосферного загрязнения. Уменьшая количество предикторных переменных и преобразуя их в новые переменные, (они называются главными компонентами (Mishra, D.; Goyal, P., 2015), данный метод сохраняет максимально возможную дисперсию исходных данных, таким образом, такое преобразование исходных переменных позволяет выделить наиболее значимые факторы, в нашем случае - источники загрязнения, сезонные изменения, или географические особенности.

Применение PCA в моделировании загрязнения воздуха также является хорошей основой в процессе разработки эффективных стратегий управления качеством воздуха и принятию мер по улучшению экологической ситуации (Lu W.Z. и др., 2003).

Метод анализа главных компонент является мощным инструментом для анализа данных, однако имеет свои ограничения:

– PCA чувствителен к масштабированию данных. Различные масштабы переменных могут исказить результаты анализа, поскольку PCA будет учитывать переменные с большими значениями с большим весом.

– Иногда интерпретация главных компонент может быть неочевидной, особенно если в данных присутствует большое количество компонентов. Определение, какие именно переменные вносят наибольший вклад в каждую главную компоненту, может быть сложным.

– PCA не учитывает временную структуру данных. Если временные зависимости важны для анализа, PCA может не справиться с этой задачей.

– PCA может быть чувствителен к выбросам в данных. Одиноким аномальным

значения могут сильно влиять на результаты анализа. Кроме того, PCA склонен учитывать вариации в данных, в том числе и случайные шумы. Это может привести к тому, что некоторые компоненты будут недостаточно информативными.

– PCA приводит к сокращению размерности данных, что может привести к потере части информации, особенно если малочисленные главные компоненты не являются существенными для анализа.

В связи с развитием, в последние годы, машинного обучения и внедрением искусственного интеллекта (ИИ) новую жизнь приобрели вероятностные статистические модели (Крамарева Л.С., Андреев А.И., Блощинский В.Д., 2019). Возможность обрабатывать достаточно быстро и точно большие объемы накопленных за многие десятилетия метеорологических данных, а также подключая большие массивы данных по параметрам загрязнения с космических снимков позволяет строить вероятностные модели полей концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Формирования единой совокупности полей загрязнения с учетом множественности агентов загрязнения на следующем этапе позволяет строить ряд прогностических вероятностных моделей на базе апостериорной вероятности, т.е. модели, основанные на байесовском подходе (Shankar Subramaniam, Naveenkumar Raju, Abbas Ganesan, 2022;

A. Alimissis, Kostas Philippopoulos, Chris Tzanis, 2018; Tanisha Madan, Shreddha Sagar, Deepali Virmani, 2020; Huixiang Liu, Qing Li, Dongbing Yu, 2019).

Модели, основанные на байесовском подходе, имеют ряд значимых преимуществ:

1. Учёт неопределённости - учитывает неопределенность в данных и параметрах модели. Вместо того чтобы давать точечные оценки параметров, он предоставляет их распределение вероятностей, что позволяет более реалистично отображать наши знания о данных.

2. Интеграция априорных знаний - позволяет интегрировать априорные знания или предположения о параметрах модели.

3. Гибкость в управлении сложностью модели - обеспечивает возможность построения сложных моделей, которые могут учитывать различные источники неопределенности и быть более гибкими в случае изменения структуры модели.

4. Обновление модели с учетом новых данных - способствует обновлению модели с учётом новых данных, пересматривая априорное распределение параметров.

5. Учёт различных источников неопределенности - учитывает различные источники неопределенности, включая случайность данных, ограниченность выборки, структуру модели и т.д.

В целом, байесовский подход обеспечивает более гибкие, адаптивные и информативные модели, которые могут учитывать сложные аспекты данных и приносить больше пользы в реальных задачах прогнозирования, классификации и принятия решений, а это именно то, что необходимо сегодня в экологических исследованиях (Katharine M. Banner, Kathryn M. Irvine, Thomas J. Rodhouse, 2021).

С появлением машинного обучения и внедрением в научных поиск нейронных сетей процесс моделирования экологически неблагоприятных процессов претерпел значительные изменения. Способность нейронных сетей обрабатывать большие массивы сложных нелинейных зависимостей делает их привлекательным инструментом для задач прогнозирования.

Выделяют следующие архитектуры нейронных сетей (Обухов А.Д., Краснянский М.Н., 2019) которые используются в прогнозировании загрязнения атмосферного воздуха:

– Рекуррентные нейронные сети (RNN) - подходят для прогнозирования временных рядов, включая данные о качестве воздуха. Они способны учитывать временные зависимости и последовательности в данных.

– Сверточные нейронные сети (CNN) - используются для анализа изображений, но они также могут быть применены к прогнозированию качества воздуха, особенно если данные содержат пространственные шаблоны или структуры.

– Глубокие нейронные сети (DNN) - представляют собой многослойные нейронные сети, которые могут быть эффективны в анализе сложных данных о загрязнении воздуха, предсказывая концентрации различных загрязнителей.

– Гибридные модели - комбинации различные типы нейронных сетей с классическими методами статистического анализа или физическими моделями атмосферы.

– LSTM (Long Short-Term Memory) - специальный тип рекуррентных нейронных

сетей, который учитывает долгосрочные зависимости в данных. Они часто применяются в прогнозировании временных рядов, таких как временные данные о качестве воздуха.

Эти различные архитектуры нейронных сетей предоставляют инновационные способы анализа и прогнозирования данных о загрязнении воздуха, в зависимости от характеристик и особенностей набора данных, а также требований конкретной задачи прогнозирования.

Используя LSTM метод получены достаточно интересные данные, позволяющие в пределах ЗКР выявить территории, в которых вероятность встреч максимальных концентраций наибольшая.

Для выявления взаимосвязи распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от источников выбросов и метеорологических условий кроме статистических методов, нейронных сетей и машинного обучения применяются методы математического моделирования (Svozilík V., Svozilíková Krakovská A., Bitta J., 2021), которые стали надежным инструментом при научных и прикладных исследованиях (Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H.).

Математические модели загрязнения воздуха классифицированы в соответствии с различными критериями (Волошин В.Г., 2013; Guideline on air quality models; Leelossy A. и др., 2014; Старченко А.В. и др., 2022) и приведены в таблице 4.

Одной из наиболее известных систем моделирования, использующая методику гауссова факела, является AERMOD, которая основана на рассеивании загрязняющих веществ с учетом структуры турбулентности пограничного слоя атмосферы и концепции масштабирования (Aermod implementation guide, 2023). Модель AERMOD учитывает загрязнение от трех типов факелов (основного, косвенного, проникающего), способная обрабатывать как приземные, так и надземные источники, а также работать в условиях простого и сложного рельефа местности (Melo A., Santos J.M., Mavroidis I., 2012). Модель гауссова факела широко используется в различных программных продуктах для моделирования загрязнения атмосферы, включая CALINE4, HIWAY2, CAR-FMI, AEROPOL, ADMS5 и другие (Рашевский Н.М., 2019). В VSB - Техническом университете Остравы (VSB-TUO) разработана супер компьютерная

система аналитического дисперсионного моделирования (ADMOS), использующая методологию SYMOS'97 для математического моделирования загрязнения воздуха. Эта методика способна оценить степень за-

грязнения атмосферного воздуха газами и твердыми загрязняющими веществами, выбрасываемыми точечными, линейными и площадными источниками (Svozilík V. и др., 2021).

Таблица 4

Классификация моделей математического моделирования

Критерий	Классификация	Описание
Природа модели	физические;	отражают физические законы и параметры реальных объектов
	эмпирические;	основаны на экспериментальных данных, без явного описания физических законов
	аналитические;	имеют аналитические решения, часто используют уравнения и математические методы
Виды переменных	дискретные;	описывают системы с дискретными состояниями и переменными
	непрерывные;	описывают системы с непрерывными переменными
Времени применения	статические;	описывают систему в конкретный момент времени, без учета временных изменений
	динамические;	учитывают изменения системы во времени, представляя динамику процесса
Степень детализации	простые;	упрощенные, часто используемые для общего представления системы
	сложные;	учитывают больше деталей и факторов для более точного описания системы
Степень определенности	детерминистические;	предсказывают результаты с высокой степенью уверенности
	стохастические	учитывают случайные факторы и предсказывают вероятностные результаты
Пространственный и временной масштаб	локальные;	временной масштаб от нескольких минут до несколько часов, пространственный масштаб от нескольких десятков метров до нескольких десятков километров
	региональные;	временной масштаб от нескольких часов до нескольких дней, пространственный масштаб от нескольких десятков до нескольких сотен километров
	глобальные (трансграничные);	временной масштаб более недели, пространственный масштаб от нескольких сотен до нескольких тысяч километров
Описания процесса диффузии	гауссовы;	распределение определяется двумя параметрами - средним (математическим ожиданием) и стандартным отклонением.
	лагранжевы;	применение лагранжевых уравнений для описания системы
	эйлеровы	рассматриваются уравнения, связанные с дифференциальным и интегральным исчислением

Модель лагранжева облака представляет собой последовательность облаков, внутри каждого из которых загрязняющее вещество имеет определенное распределение, что позволяет учитывать нестационарность процесса во времени и пространстве, изменения направления ветра, сложный рельеф местности и химические трансформации вещества. Данный подход гибче, чем принцип гауссова факела, так как он точнее отражает физическую сущность рассеивания в атмосфере.

Существует несколько программных реализаций модели лагранжева облака:

1. Модельная система высокого разрешения GRAMM/GRAL (<https://gral.tugraz.at/>) - подходит для условий слабого ветра и сложного рельефа, учитывает влияние зданий на рассеивание загрязняющих веществ (Recommendations when using the GRAL/GRAMM modelling system, 2020).

2. Модель загрязнения воздуха TAPM CSIRO - предназначена для прогнозирования метеорологических параметров и концентрации загрязняющих веществ (Hurley P., 2008).

Одним из примеров реализации модели лагранжева облака является CALPUFF (California Puff Model) - многослойная, нестационарная, Лагранжа-Гауссова модель распространения загрязняющих веществ (CALPUFF Modeling System, 2019; Kim G. и др., 2020).

Эйлерова континуальная модель турбулентной диффузии основана на предположении, что турбулентные потоки могут быть описаны с помощью уравнений Навье-Стокса. В этой модели турбулентная диффузия представляет собой процесс перемешивания частиц вещества в турбулентном потоке. Этот процесс приводит к распределению вещества в пространстве в результате хаотического движения турбулентных вихрей (Волошин В.Г., 2013; Marchuk G.I., 1986; Пененко В.В., Алоян А.Е., 1985).

Существенным преимуществом эйлерова континуального подхода по сравнению с моделью лагранжева облака является использование балансных уравнений одного типа для обеих фаз, что позволяет применять единый алгоритм решения всей системы уравнений. В целом, данные методы моделирования дополняют друг друга: каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, а следовательно, свои области применения. Лагранжев метод подходит для неравновесных течений (крупные инерци-

онные частицы, разреженные дисперсные среды), а эйлеров - эффективен в условиях, близких к равновесным (например, мелкие малоинерционные частицы, концентрированные дисперсные среды). Эффективность эйлеровых моделей для расчета газодисперсных течений в трубах и струйных потоках, в частности, подтверждается научными исследованиями (Дробышевский Н.И. и др., 2009).

В настоящее время существует множество моделей, предназначенных для расчета концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы вблизи промышленных источников. Данные модели отличаются по уровню сложности и решаемым задачам, среди них можно выделить: ISC (США), ADMS (Англия), AERMOD (Канада, США), SILAM (Финляндия), MARS (Греция), DISPERSION21 (Швеция), EURAD (Германия), MERCURE (Франция), MILORD (Италия), SLP-2D (Испания), OPS (Нидерланды) и другие (Волошин В.Г., 2013).

Еще одно различие основано на временном масштабе: краткосрочные и долгосрочные модели. Краткосрочные модели применяются для оценки кратковременных эпизодов, характеризующихся высокими уровнями загрязнения воздуха, а долгосрочные модели проводят моделирование на длительный период (1 год), чтобы обеспечить оценку среднегодового значения для сравнения со стандартами качества воздуха.

Современные технологии прогнозирования загрязнения воздуха базируются на разработке региональных моделей атмосферы. Эти модели учитывают текущее состояние атмосферы, процессы рассеивания и осаждения основных загрязняющих веществ, включая воздействие автотранспорта. Примером такой системы в Европе является Enviro-HIRLAM (Environment – High Resolution Limited Area Model). Данная система представляет собой комбинированную модель численного прогноза погоды и атмосферного химического переноса, которая учитывает перенос и дисперсию загрязняющих веществ, химические процессы в атмосфере, динамику и осаждение аэрозолей, а также метеорологические параметры (Baklanov A и др., 2017).

Многие страны используют разработанную в США систему моделирования WRF-Chem (Weather Research and Forecasting), которая обеспечивает одновременное моделирование выбросов, переноса, смешивания и

химического преобразования газовых примесей и аэрозолей в сочетании с метеорологическими процессами (Srivastava I. и др., 2020; Grell, G. и др., 2005; Powers J.G и др., 2017). Наряду с WRF-Chem широко используется модель многомасштабного качества воздуха CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System), которая представляет собой комплексную систему моделирования качества воздуха с множеством загрязнителей, разработанную и поддерживаемую Управлением исследований и разработок Агентства по охране окружающей среды США (Hu J. и др., 2016; Shahrokhishahraki N. и др., 2022; Giovannini L. и др., 2020).

Модель SILAM (System for Integrated modeling of Atmospheric composition) используется для моделирования и прогнозирования

качества воздуха. Модель применима как на региональном, так и на глобальном уровне, отличается высокой адаптивностью, способной обрабатывать данные о различных типах атмосферных загрязнителей и включает инструменты для оценки здоровья и экологических рисков, что делает её особенно полезной для прикладных задач и планирования экологической политики.

Национальная гидрометеорологическая служба Казахстана размещает текущие и прогнозные данные качества атмосферного воздуха Республики Казахстан (http://ecodata.kz:3838/app_dem_visual/) на базе модели SILAM (<https://silam.fmi.fi/roux/KAZ/>) при поддержке Финского метеорологического института (рисунок 2).

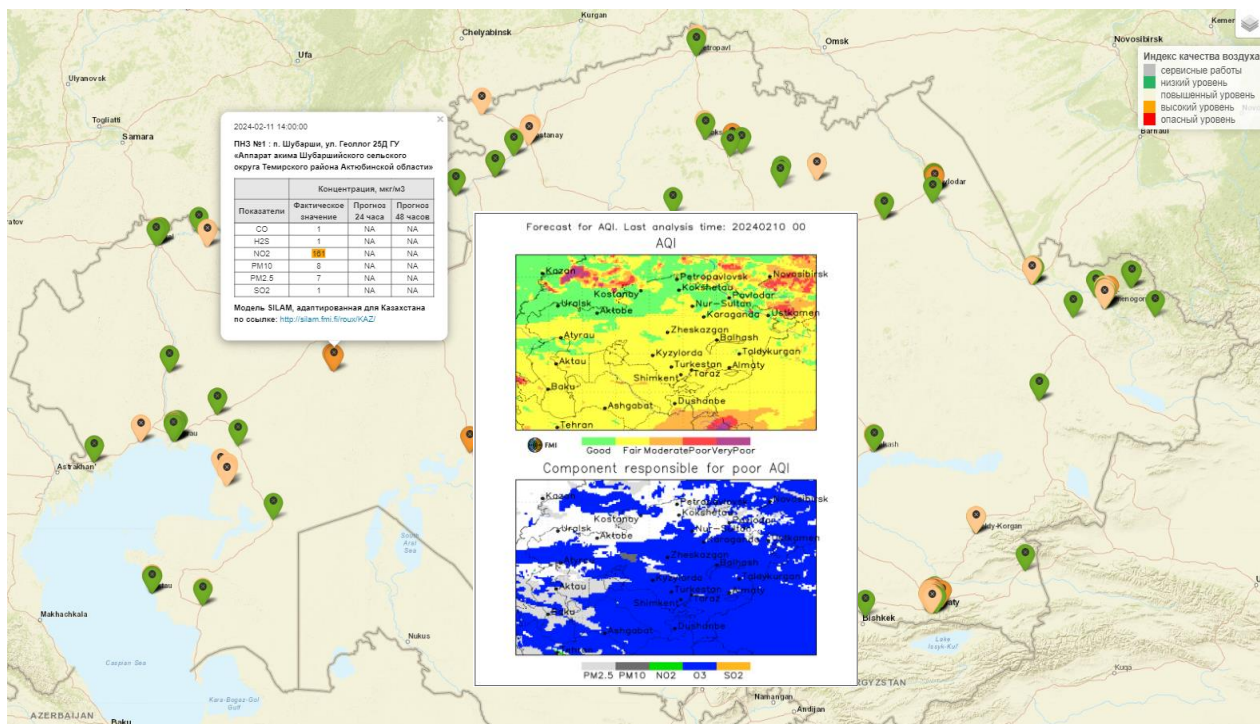


Рис.2. Текущие и прогнозные данные качества атмосферного воздуха Республики Казахстан (https://www.kazhydromet.kz/ru/interactive_cards)

Текущие данные по качеству воздуха представлены в виде фактических концентраций загрязняющих веществ по ПНЗ, прогнозные данные представлены на 24 и 48 часов. Кроме того, можно посмотреть распространение загрязняющих веществ по территории Казахстана в режиме реального времени.

Использование SILAM сопряжено с некоторыми ограничениями: распространение ЗВ учитывается в слое, а не на конкретной поверхности, результаты моделирования в значительной степени зависят от качества

входных данных (Sofiev M. и др., 2014).

Проведенный анализ современных математических моделей показал, что одной из передовых инструментальных систем для моделирования качества воздуха в исследуемом регионе является модель WRF-Chimere, которая объединяет прогноз погоды и химическое моделирование в одной системе, что позволяет точно оценивать воздействие метеорологических условий на распространение и трансформацию загрязнителей. Модель учитывает страновые кадастровые данные загрязнения

по секторам экономики из глобальной базы данных EDGAR (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>). EDGAR предоставляет независимые оценки выбросов используя международную статистику и последовательную методологию МГЭИК.

WRF-Chimere легко интегрируется с различными наборами данных о выбросах и метеорологии, что упрощает адаптацию модели под конкретные исследовательские нужды региона исследования. Эффективность модели в прогнозировании последствий внедрения различных мер по контролю за загрязнением делает Chimere ценным инструментом для планирования экологической политики.

Модель представляет значительную ценность для научного сообщества и политиков, предоставляя надежные данные для принятия обоснованных решений в области экологии и управления качеством атмосферного воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует, что мониторинг качества атмосферного воздуха Западно-Казахстанского региона представляет собой один из важнейших аспектов управления качеством окружающей среды.

При этом очевидно, что исследуемый регион сталкивается со значительными проблемами в отношении качества воздуха. Недропользование, промышленная деятельность, транспорт, методы ведения сельского хозяйства и природные факторы способствуют выбросам различных загрязняющих веществ, включая твердые частицы, оксиды азота, диоксид серы, аммиак, летучие органические соединения и др. Эти загрязняющие вещества не только ухудшают качество воздуха, но и создают серьезные риски для здоровья человека, экосистем и климата.

Учитывая незначительный охват изучаемой территории сетью наземного мониторинга, которая преимущественно концентрируется вокруг областных центров и крупных промышленных предприятий для уточнения пространственно-временных особенностей качества атмосферного воздуха на всей территории ЗКР использовались технологии мониторинга загрязнения с помощью дистанци-

онного зондирования. Что дает возможность осуществлять мониторинг атмосферного загрязнения на всей территории ЗКР включая труднодоступные и отдаленные районы. Спутниковые системы способны детектировать различные типы загрязняющих веществ, что позволяет получить комплексное представление о качестве воздуха и его динамики.

Сочетание дистанционного зондирования, наземных станций государственной сети мониторинга, автоматических станций производственного мониторинга, моделирования качества воздуха с применением методов машинного обучения и искусственного интеллекта предлагает комплексный подход к оценке динамики качества воздуха ЗКР.

Моделирование качества воздуха с применением нейронных сетей и искусственного интеллекта позволяет более качественно прогнозировать будущие тенденции и сценарии возможного загрязнения воздушного бассейна в условиях социально-экономического развития Западно-Казахстанского региона.

Достижения в области диверсификации источников информации о качестве атмосферного воздуха, анализа данных и информационно-коммуникационных технологий предлагают инновационные решения для мониторинга в режиме реального времени, визуализации данных. Кроме того, международное сотрудничество и партнерства могут способствовать обмену знаниями, наращиванию потенциала и передаче технологий, позволяя региону использовать глобальный опыт и ресурсы для решения местных проблем с качеством воздуха.

Интеграция результатов мониторинга в экологическую политику ЗКР, инициативы в области регионального планирования и стратегии устойчивого развития может способствовать синергизму и совместным выгодам между секторами экономики. Уделяя приоритетное внимание переходу на экологически чистую энергетику, инвестициям в зеленую инфраструктуру и мерам по предотвращению загрязнения, регион может одновременно улучшить качество воздуха, укрепить здоровье населения и смягчить последствия изменения климата.

Комплексный подход для совершенствования системы управления качеством

атмосферного воздуха позволит минимизировать риски негативных последствий. В связи с этим, в 2023 году указом Президента Республики Казахстан утверждена Стратегия достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882122). Авторы благодарят анонимных рецензентов и редакционную коллегию журнала за конструктивные замечания, предложения и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2021 год. – Электронный ресурс: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/383692?lang=ru> (дата обращения 15.01.2024 г.).
2. Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан. – Электронный ресурс: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyu-informacionnyu-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy> (дата обращения 24.01.2024 г.).
3. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. – Электронный ресурс: <https://stat.gov.kz/ru/> (дата обращения 10.01.2024 г.).
4. Сальников В.Г. Эколого-климатический потенциал Казахстана. - Алматы: Казак университети, 2006. - 230 с.
5. Adilet, 2021. Environmental code of the Republic of Kazakhstan. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100023517> (дата обращения 15.01.2024 г.).
6. IQAir, 2022a. World's Most Polluted Countries & Regions (Historical Data 2018-2021). – URL: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>
7. United States Air Quality Index (AQI) Live. – URL: <https://www.aqi.in/us/dashboard/united-states>
8. Lawrence M.G., Rasch P.J., von Kuhlmann R., Williams J., Fischer H., de Reus M., Lelieveld J., Crutzen P.J., Schultz M., Stier P., Huntrieser H., Heland J., Stohl A., Forster C., Elbern H., Jakobs H., Dickerson R.R. Global chemical weather forecasts for field campaign planning: predictions and observations of large-scale features during MINOS, CONTRACE and INDOEX // Atmospheric Chemistry & Physics. – 2003. – V. 3. – №1. – P. 267-289. <https://doi.org/10.5194/acp-3-267-2003>
9. Li Q., Jiang J.H., Wu D.L., Read W.G., Livesey N.J., Waters J.W., Zhang Y., Wang B., Filipiak M.J., Davis C.P., Turquety S., Wu S., Park R.J., Yantosca R.M., Jacob D.J. Convective outflow of South Asian pollution: A global CTM simulation compared with EOS MLS observations // Geophysical Research Letters. – 2005. – V. 32. – №14. – DOI: 10.1029/2005GL022762
10. Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H. Mesoscale modelling for meteorological and air pollution application. Anthem Press, 2018. 376 p.
11. Волошин В.Г. Динамическая модель загрязнения атмосферы с метеорологическим препроцессором. – Одесса: Экология, 2013. – 296 с.
12. Zhang, Y.; Bocquet, M.; Mallet, V.; Seigneur, C.; Baklanov, A. Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status. Atmos. Environ. 2012, 60, p. 632–655.
13. Taheri Shahraiyani, H.; Sodoudi, S. Statistical Modeling Approaches for PM10 Prediction in Urban Areas; A Review of 21st-Century Studies. Atmosphere 2016, 7, 15.
14. Sykes, A.O. An Introduction to Regression Analysis. Am. Stat. 1993, 61, 101.
15. Mendenhall, W. Second Course in Statistics, A: Regression Analysis. Int. J. Gynaecol. Obstet. Off. Organ. Int. Fed. Gynaecol. Obstet. 2011, 78 (Suppl. 1), 1–5.
16. Mohammad Ahmad, Weihu Cheng, Zhao Xu, Abdul Kalam Outlier Detection of Air Quality for Two Indian Urban Cities Using Functional Data Analysis, Open Journal of Air Pollution, 2023, 12, 79-91.
17. Vikas Singh a, Shweta Singh, Akash Biswal, Amit P. Kesarkar, Suman Mor, Khaiwal Ravindra Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. Environmental Pollution 266 (2020).
18. Chen Z., Zhuang Y., Xie X., Chen D., Cheng N., Yang L., Li R. Understanding long-term variations of meteorological influences on ground ozone concentrations in Beijing During 2006–2016 // Environmental Pollution. – 2019. – V. 245. – P. 29–37. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.10.117.
19. Meng C., Cheng T., Gu X., Shi S., Wang W., Wu Y., Bao F. Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 656. – P. 977–985. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.365
20. Kai Wang, · Chengxiu Ling · Ying Chen · Zhengjun Zhang Spatio-temporal joint modelling on moderate and extreme air pollution in Spain, Environmental and Ecological Statistics (2023) 30:601–624.
21. Elena Cerezuela-Escudero, Juan Manuel Montes-Sanchez, Juan Pedro Dominguez-Morales · Lourdes Duran-Lopez1 · Gabriel Jimenez-Moreno A systematic comparison of different machine learning models for the spatial estimation of air pollution, Applied Intelligence, 2023.
22. Shelby Zangari, Dustin T. Hill, Amanda T. Charette, Jaime E. Mirowsky Air quality changes in New York City during the COVID-19 pandemic. Science of The Total Environment, Volume 742, 10 November 2020, 140496. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140496>.
23. Deng, J.L. Control problems of grey system. Syst. Control Lett. 1982, 1, 288–294.
24. Mishra, D.; Goyal, P. NO2 forecasting models Agra. Atmos. Pollut. Res. 2015, 6, 99–106.
25. Lu W.Z., Wang W.J., Wang X.K., Xu Z.B., Leung A.Y.T. Using improved neural network model to analyze RSP, NOx and NO2 levels in urban air in Mong Kok, Hong Kong Environmental Monitoring and Assessment, 87 (2003), p. 235-254.
26. Крамарева Л.С., Андреев А.И., Блощинский В.Д., Кучма М.О., Давиденко А.Н., Пустатинцев И.Н., Шамилова Ю. А., Холодов Е.И., Королёв С.П. Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии // Вычислительные технологии. – 2019. – Т. 24. – № 6. – С. 50-59.

27. Shankar Subramaniam, Naveenkumar Raju, Abbas Ganesan, Nithyaprakash Rajavel, Maheswari Chenniappan, Chander Prakash Alokesh Pramanik, Animesh Kumar Basak and Saurav Dixit Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review, *Sustainability*, 2022. – URL: <https://doi.org/10.3390/su14169951>.
28. A. Alimissis, Kostas Philippopoulos, Chris Tzani, Despina Deligiorgi Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models, *Atmospheric Environment*, Volume 191, October 2018, Pages 205-213.
29. Tanisha Madan, Shreddha Sagar, Deepali Virmani Air Quality Prediction using Machine Learning Algorithms –A Review. Published in 2nd International Conference 18 December 2020, Environmental Science, Computer Science 2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN).
30. Huixiang Liu, Qing Li, Dongbing Yu, Yu Gu Air Quality Index and Air Pollutant Concentration Prediction Based on Machine Learning Algorithms. *Appl. Sci.* 2019, 9(19), 4069. – URL: <https://doi.org/10.3390/app9194069>
31. Katharine M. Banner, Kathryn M. Irvine, Thomas J. Rodhouse The use of Bayesian priors in Ecology: The good, the bad and the not great. *Ecology and Evolution*, 2020. Volume 11, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13407>
32. Обухов А.Д., Краснянский М.Н. Нейросетевая архитектура информационных систем // Компьютерные науки. - 2019. - Т. 29. - Вып. 3. - С. 438–455.
33. Svozilik V., Svoziliková Krakovská A., Bitta J., Jančík P. Comparison of the Air Pollution Mathematical Model of PM10 and Moss Biomonitoring Results in the Tria Region // *Atmosphere* 2021, 12(6), 656. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12060656>
34. EPA, U.S. EPA OAQPS Guideline Series - GUIDELINE ON AIR QUALITY MODELS. Available online: <https://nepis.epa.gov/Exec/zyPDF.cgi/91005584.PDF?Dockey=91005584.PDF>
35. Leelossy A., Molnar Jr. F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review // *Central European Journal of Geosciences*. 2014. - V. 6. - P. 257-278. DOI:10.2478/s13533-012-0188-6
36. Старченко А.В., Шельмина Е.А., Кижнер Л.И., Одинцов С.Л. Численное моделирование качества воздуха над городом Томском при слабом ветре // *Вестник Томского государственного университета*. - 2022. - №79. - С. 25-43. – doi: 10.17223/19988621/79/3.
37. AERMOD implementation guide EPA-454/B-23-009 / United States Environmental Protection Agency. - 2023. URL: https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_implementation_guide.pdf.
38. Melo A., Santos J.M., Mavroidis I., Reis Jr N.C. Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF. Comparison with wind tunnel results // *Building and environment*. – 2012. – V. 56. – P. 8-20.
39. Рашевский Н.М. Поддержка принятия решений в процессе мониторинга загрязнения атмосферного воздуха городских территорий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Волгоград, 2019. - 144 с.
40. Recommendations when using the GRAL/GRAMM modelling system. 2020. – URL: <https://github.com/GralDispersionModel/GRALRecommendations>
41. Hurley P. TAPM V4. Part 1: Technical Description // CSIRO Marine and Atmospheric Research. – 2008. – №25. – 59 p. – URL: https://www.cmar.csiro.au/research/tapm/docs/tapm_v4_technical_paper_part1.pdf
42. CALPUFF Modeling System. - Exponent Inc. - 2019. - 226 p. – URL: https://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf
43. Kim G., Lee M.I., Lee S., Choi S.D., Kim S.J., Song C.K. Numerical modeling for the accidental dispersion of hazardous air pollutants in the urban metropolitan area // *Atmosphere*. - 2020. - V. 11(5), 477. doi:10.3390/atmos11050477.
44. Marchuk G.I. Mathematical Models in Environmental Problems. Elsevier Science. - 1986. - 220 p.
45. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1985. – 256 с.
46. Дробышевский Н.И., Зайчик Л.И., Мукин Р.В., Стрижов В.Ф., Филиппов А.С. Развитие и применение диффузионноинерционной модели для расчета газодисперсных турбулентных течений // *Теплофизика и аэромеханика*. - 2009. - Т. 16. - № 4. - С. 553-572.
47. Baklanov A., Korsholm U., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K.P., Sass B.H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. P. 2971–2999. – doi: 10.5194/gmd10-2971-2017
48. Srivastava I, Yarragunta S., Kumar R., Mitra D. Distribution of surface carbon monoxide over the Indian subcontinent: Investigation of source contributions using WRF-Chem // *Atmospheric Environment*. - 2020. - V. 243(15). - P. 117838. – doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117838
49. Grell, G., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model // *Atmospheric Environment*. - 2005. - V. 39(37), - P. 6957–6975. – doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027
50. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gill D.O. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions // *Bulletin of the American Meteorological Society*/ - 2017. - V. 98(8). - P. 1717–1737. – doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1
51. Hu J., Chen J., Ying Q., Zhang H. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system // *Atmospheric Chemistry and Physics*. - 2016. - V. 16(16). - P. 10333–10350. – doi:10.5194/acp-16-10333-2016
52. Shahrokhishahraki N., Rayner P.J., Silver J.D., Thomas S., Schofield R. High-resolution modeling of gaseous air pollutants over Tehran and validation with surface and satellite data // *Atmospheric Environment*. - 2022. - V. 270. - P. 118881. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118881>.

53. Giovannini L., Ferrero E., Karl T., Rotach M.W., Staquet C., Castelli S.T., Zardi D. Atmospheric Pollutant Dispersion over Complex Terrain: Challenges and Needs for Improving Air Quality Measurements and Modeling // *Atmosphere*. - 2020. - V. 11(6), 646. - <https://doi.org/10.3390/atmos11060646>

54. Sofiev M., Vira J., Prank M., Soares J., Kouznetsov R. An outlook of System for Integrated modeLLing of Atmospheric coMposition SILAM v.5. In: Steyn, D., Builtjes, P., Timmermans, R. (eds) *Air Pollution Modeling and its Application XXII. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. - 2014. - P. 397-400. - URL: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5577-2_67

REFERENCES

1. Natsional'nyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei srede i ob ispol'zovanii prirodnykh resursov Respubliki Kazakhstan za 2021 god. - Elektronnyi resurs: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/documents/details/383692?lang=ru> (data obrashcheniya 15.01.2024 g.).

2. Informatsionnye byulleteni o sostoyanii okruzhayushchei srede Respubliki Kazakhstan. - Elektronnyi resurs: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informatsionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushchey-srede> (data obrashcheniya 24.01.2024 g.).

3. Byuro natsional'noi statistiki Respubliki Kazakhstan. - Elektronnyi resurs: <https://stat.gov.kz/ru/> (data obrashcheniya 10.01.2024 g.).

4. Sal'nikov V.G. *Ekologo-klimaticheskii potentsial Kazakhstana*. - Almaty: Qazaq universiteti, 2006. - 230 s.

5. Adilet, 2021. Environmental code of the Republic of Kazakhstan. - URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100023517> (data obrashcheniya 15.01.2024 g.).

6. IQAir, 2022a. World's Most Polluted Countries & Regions (Historical Data 2018-2021). - URL: <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>.

7. United States Air Quality Index (AQI) Live. - URL: <https://www.aqi.in/us/dashboard/united-states>

8. Lawrence M.G., Rasch P.J., von Kuhlmann R., Williams J., Fischer H., de Reus M., Lelieveld J., Crutzen P.J., Schultz M., Stier P., Huntrieser H., Heland J., Stohl A., Forster C., Elbern H., Jakobs H., Dickerson R.R. Global chemical weather forecasts for field campaign planning: predictions and observations of large-scale features during MINOS, CONTRACE and INDOEX // *Atmospheric Chemistry & Physics*. - 2003. - V. 3. - №1. - P. 267-289. <https://doi.org/10.5194/acp-3-267-2003>.

9. Li Q., Jiang J.H., Wu D.L., Read W.G., Livesey N.J., Waters J.W., Zhang Y., Wang B., Filipiak M.J., Davis C.P., Turquety S., Wu S., Park R.J., Yantosca R.M., Jacob D.J. Convective outflow of South Asian pollution: A global CTM simulation compared with EOS MLS observations // *Geophysical Research Letters*. - 2005. - V. 32. - №14. -DOI: 10.1029/2005GL022762

10. Sokhi R.S., Baklanov A.A., Shlunzen K.H. *Mesoscale modelling for meteorological and air pollution application*. Anthem Press, 2018. 376 p.

11. Voloshin V.G. *Dinamicheskaya model' zagryazneniya atmosfery s meteorologicheskim preprotessorom*. - Odessa: Ekologiya, 2013. - 296 p.

12. Zhang, Y.; Bocquet, M.; Mallet, V.; Seigneur, C.; Baklanov, A. Real-time air quality forecasting, part I: History,

techniques, and current status. *Atmos. Environ.* 2012, 60, p. 632–655.

13. Taheri Shahraiyini, H.; Sodoudi, S. Statistical Modeling Approaches for PM10 Prediction in Urban Areas; A Review of 21st-Century Studies. *Atmosphere* 2016, 7, 15.

14. Sykes, A.O. *An Introduction to Regression Analysis*. Am. Stat. 1993, 61, 101.

15. Mendenhall, W. *Second Course in Statistics, A: Regression Analysis*. Int. J. Gynaecol. Obstet. Off. Organ. Int. Fed. Gynaecol. Obstet. 2011, 78 (Suppl. 1), 1–5.

16. Mohammad Ahmad, Weihu Cheng, Zhao Xu, Abdul Kalam. Outlier Detection of Air Quality for Two Indian Urban Cities Using Functional Data Analysis, *Open Journal of Air Pollution*, 2023, 12, 79-91.

17. Vikas Singh a, Shweta Singh, Akash Biswal, Amit P. Kesarkar, Suman Mor, Khaiwal Ravindra Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. *Environmental Pollution* 266 (2020).

18. Chen Z., Zhuang Y., Xie X., Chen D., Cheng N., Yang L., Li R. Understanding long-term variations of meteorological influences on ground ozone concentrations in Beijing During 2006–2016 // *Environmental Pollution*. - 2019. - V. 245. - P. 29–37. - DOI: 10.1016/j.envpol.2018.10.117

19. Meng C., Cheng T., Gu X., Shi S., Wang W., Wu Y., Bao F. Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing // *Science of the Total Environment*. - 2019. - V. 656. - P. 977–985. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.365

20. Kai Wang, · Chengxiu Ling · Ying Chen · Zhengjun Zhang Spatio-temporal joint modelling on moderate and extreme air pollution in Spain, *Environmental and Ecological Statistics* (2023) 30:601–624.

21. Elena Cerezuela-Escudero, Juan Manuel Montes-Sanchez, Juan Pedro Dominguez-Morales-Lourdes Duran-Lopez1 · Gabriel Jimenez-Moreno A systematic comparison of different machine learning models for the spatial estimation of air pollution, *Applied Intelligence*, 2023.

22. Shelby Zangari, Dustin T. Hill, Amanda T. Charette, Jaime E. Mirowsky Air quality changes in New York City during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, Volume 742, 10 November 2020, 140496. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140496>

23. Deng, J.L. Control problems of grey system. *Syst. Control Lett.* 1982, 1, 288–294.

24. Mishra, D.; Goyal, P. NO2 forecasting models Agra. *Atmos. Pollut. Res.* 2015, 6, 99–106.

25. Lu W.Z., Wang W.J., Wang X.K., Xu Z.B., Leung A.Y.T. Using improved neural network model to analyze RSP, NOx and NO2 levels in urban air in Mong Kok, Hong Kong *Environmental Monitoring and Assessment*, 87 (2003), p. 235-254.

26. Kramareva L.S., Andreev A.I., Bloschinskii V.D., Kuchma M.O., Davidenko A.N., Pustatintsev I.N., Shamilova Yu. A., Kholodov E.I., Korolev S.P. Ispol'zovanie neironnykh setei v zadachakh gidrometeorologii // *Vychislitel'nye tekhnologii*. - 2019. - T. 24. - № 6. - S. 50-59.

27. Shankar Subramaniam, Naveenkumar Raju, Abbas Ganesan, Nithyaprakash Rajavel, Maheswari Chenniappan, Chander Prakash Alokesh Pramanik, Animesh Kumar Basak and Saurav Dixit Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review, *Sustainability*, 2022. - URL: <https://doi.org/10.3390/su14169951>

28. A. Alimissis, Kostas Philippopoulos, Chris Tzani, Despina Deligiorgi Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models, *Atmospheric Environment*, Volume 191, October 2018, Pages 205-213.
29. Tanisha Madan, Shreddha Sagar, Deepali Virmani Air Quality Prediction using Machine Learning Algorithms –A Review. Published in 2nd International Conference... 18 December 2020, *Environmental Science, Computer Science 2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*.
30. Huixiang Liu, Qing Li, Dongbing Yu, Yu Gu Air Quality Index and Air Pollutant Concentration Prediction Based on Machine Learning Algorithms. *Appl. Sci.* 2019, 9(19), 4069. – URL: <https://doi.org/10.3390/app9194069>
31. Katharine M. Banner, Kathryn M. Irvine, Thomas J. Rodhouse The use of Bayesian priors in Ecology: The good, the bad and the not great. *Ecology and Evolution*, 2020. Volume 11, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13407>
32. Obukhov A.D., Krasnyanskiy M.N. Neurosetevaya arkhitektura informatsionnykh sistem // *Komp'yuternye nauki*. - 2019. - T. 29. - Vyp. 3. - S. 438–455.
33. Svozilik V., Svoziliková Krakovská A., Bitta J., Jančík P. Comparison of the Air Pollution Mathematical Model of PM10 and Moss Biomonitoring Results in the Tria Region // *Atmosphere* 2021, 12(6), 656. – URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12060656>
34. EPA, U.S. EPA OAQPS Guideline Series - GUIDELINE ON AIR QUALITY MODELS. Available online: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/91005584.PDF?Dockey=91005584.PDF>
35. Leelossy A., Molnar Jr. F., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review // *Central European Journal of Geosciences*. 2014. - V. 6. - P. 257-278. – DOI:10.2478/s13533-012-0188-6
36. Starchenko A.V., Shel'mina E.A., Kizhner L.I., Odintsov S.L. Chislennoe modelirovanie kachestva vozdukha nad gorodom Tomskom pri slabom vetre // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. - 2022. - №79. - S. 25-43. – doi: 10.17223/19988621/79/3
37. Aermod implementation guide EPA-454/B-23-009 / United States Environmental Protection Agency. - 2023. https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_implementation_guide.pdf.
38. Melo A., Santos J.M., Mavroidis I., Reis Jr N.C. Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF. Comparison with wind tunnel results // *Building and environment*. – 2012. – V. 56. – P. 8-20.
39. Rashevskii N.M. Podderzhka prinyatiya reshenii v protsesse monitoringa zagryazneniya atmosfernogo vozdukha gorodskikh territorii. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. - Volgograd, 2019. - 144 p.
40. Recommendations when using the GRAL/GRAMM modelling system. 2020. <https://github.com/GralDispersionModel/GRALRecommendations>
41. Hurley P. TAPM V4. Part 1: Technical Description // CSIRO Marine and Atmospheric Research. – 2008. – №25. – 59 p. – URL: https://www.cmar.csiro.au/research/tapm/docs/tapm_v4_technical_paper_part1.pdf.
42. CALPUFF Modeling System. - Exponent Inc. - 2019. - 226 r. – URL: https://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf.
43. Kim G., Lee M.I., Lee S., Choi S.D., Kim S.J., Song C.K. Numerical modeling for the accidental dispersion of hazardous air pollutants in the urban metropolitan area // *Atmosphere*. - 2020. - V. 11(5), 477. – doi:10.3390/atmos11050477
44. Marchuk G.I. *Mathematical Models in Environmental Problems*. Elsevier Science. - 1986. - 220 p.
45. Penenko V.V., Aloyan A.E. *Modeli i metody dlya zadach okhrany okruzhayushchei sredy*. – Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1985. – 256 s.
46. Drobyshevskii N.I., Zaichik L.I., Mukin R.V., Strizhov V.F., Filippov A.S. Razvitiye i primeneniye diffuzionnoinertsionnoi modeli dlya rascheta gazodispersnykh turbulentnykh techenii // *Teplofizika i aeromekhanika*. - 2009. - T. 16. - № 4. - С. 553-572
47. Baklanov A., Korsholm U., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K.P., Sass B.H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // *Geosci. Model Dev*. 2017. V. 10. P. 2971–2999. – doi: 10.5194/gmd10-2971-2017
48. Srivastava I., Yarragunta S., Kumar R., Mitra D. Distribution of surface carbon monoxide over the Indian subcontinent: Investigation of source contributions using WRF-Chem // *Atmospheric Environment*. - 2020. - V. 243(15). - R. 117838. – doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117838
49. Grell, G., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model // *Atmospheric Environment*. - 2005. - V. 39(37), - P. 6957–6975. – doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027
50. Powers J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C., Davis C.A., Dudhia J., Gill D.O. et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions // *Bulletin of the American Meteorological Society* / - 2017. - V. 98(8). - P. 1717–1737. – doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1
51. Hu J., Chen J., Ying Q., Zhang H. One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system // *Atmospheric Chemistry and Physics*. - 2016. - V. 16(16). - P. 10333–10350. – doi:10.5194/acp-16-10333-2016
52. Shahrokhishahraki N., Rayner P.J., Silver J.D., Thomas S., Schofield R. High-resolution modeling of gaseous air pollutants over Tehran and validation with surface and satellite data // *Atmospheric Environment*. - 2022. - V. 270. - P. 118881. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118881>
53. Giovannini L., Ferrero E., Karl T., Rotach M.W., Staquet C., Castelli S.T., Zardi D. Atmospheric Pollutant Dispersion over Complex Terrain: Challenges and Needs for Improving Air Quality Measurements and Modeling // *Atmosphere*. - 2020. - V. 11(6), 646. – URL: <https://doi.org/10.3390/atmos11060646>
54. Sofiev M., Vira J., Prank M., Soares J., Kouznetsov R. An outlook of System for Integrated modelling of Atmospheric composition SILAM v.5. In: Steyn, D., Builtjes, P., Timmermans, R. (eds) *Air Pollution Modeling and its Application XXII*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. - 2014. - R. 397-400. – URL: <https://doi.org/10.1007/978->

БАТЫС ҚАЗАҚСТАН ӨңІРІНІҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУА САПАСЫНЫҢ МОНИТОРИНГІ: ПРИНЦИПТЕРІ, ӘДІСТЕРІ, ТӘСІЛДЕРІ

В.Г. Сальников¹ *г.ғ.д., профессор*, **С.Е. Полякова¹** *г.ғ.к.доцент*, **А.А. Ульман¹** *г.ғ.к., доцент*,
А.М. Кауазов¹ *г.ғ.к.*, **М.О. Турсумбаева¹** *Phd*, **Д.К. Кисебаев²**, **Д.И. Миськив¹**, **Е.Е. Белдеубаев^{1*}**,
Г.Т. Мусралинова¹, **С.О. Кожажулов¹**

¹*әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

²*"Қазгидромет" РМК, Алматы, Қазақстан*

E-mail: yerkebulan.beldeubayev@kaznu.edu.kz

Мақалада Батыс Қазақстанды мысалға ала отырып атмосфераның ластану ерекшеліктері мен жағдайларын зерттеудің негізгі тәсілдері мен әдістері қарастырылды. Қолданылатын тәсілдерді тақырыптар, әдістер, уақыт аралықтары және басқа да тиісті критерийлер бойынша жіктеу мен топтастыру жүргізілді. Атмосфераға түсетін тасталымдардың көздері мен көлеміне, сондай-ақ ауа бассейнінің ластануын бақылау жүйелері туралы қолда бар ақпаратқа талдау жүргізілді. Атмосфералық ауаның сапасын басқару жүйесінің тиімділігін арттыру үшін ластанудың әртүрлі деңгейлерін анықтайтын метеорологиялық факторлар мен синоптикалық жағдайлардың әсерін ескере отырып, кешенді тәсілді қолданған жөн. Атмосфералық ауадағы лаптаушы заттардың таралуын модельдеудің заманауи әдістеріне аналитикалық шолу терең машиналық оқытумен біріктірілген статистикалық әдістерді және турбулентті диффузияның Эйлер континуальды моделін қолданудың қажеттілігін көрсетті. Алынған тұжырымдар болашақта зерттелетін аймақтың атмосфералық ауа сапасын басқару жүйесін жетілдіру үшін кешенді тәсілді қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: экология, мониторинг, атмосфералық ауа, лаптаушы көздер, лаптаушы заттардың лақтырылымы, метеорологиялық жағдай, модельдеу, Батыс Қазақстан.

AIR QUALITY MONITORING IN THE WEST KAZAKHSTAN REGION: PRINCIPLES, METHODS, APPROACHES

V. Salnikov¹ *Dr.Geo.Sci., Professor*, **S. Polyakova¹** *Canidate Geo.Sci., Associate Professor*,
A. Ullman¹ *Canidate Geo.Sci., Associate Professor*, **A. Kauazov¹** *Canidate Geo.Sci.*, **M. Tursumbayeva¹** *Phd*,
D. Kisebayev², **D. Miskiv¹**, **E. Beldeubayev^{1*}**, **G. Musralinova¹**, **S. Kozhagulov¹**

¹*al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

²*RSE "Kazhydromet", Almaty, Kazakhstan*

E-mail: yerkebulan.beldeubayev@kaznu.edu.kz

The main approaches and methods of studying the characteristics and conditions of atmospheric pollution on the example of Western Kazakhstan are considered. The classification and grouping of applied approaches by topics, methods, time intervals and other relevant criteria was conducted. An analysis of the available information on the sources and volumes of emissions into the atmosphere, as well as on the systems for monitoring the pollution of the air basin, was carried out. It is shown that to increase the effectiveness of the atmospheric air quality management system, it is expedient to use a complex approach taking into account the influence of meteorological factors and synoptic conditions that determine different levels of pollution. An analytical review of modern methods of modeling the spread of pollutants in atmospheric air showed the feasibility of using statistical methods integrated with deep machine learning and the Eulerian continuum model of turbulent diffusion. The obtained conclusions will allow further use of an integrated approach to improve the atmospheric air quality management system of the studied region.

Keywords: ecology, monitoring, atmospheric air, pollution sources, pollutants, meteorological conditions, modeling, Western Kazakhstan.

Сведения об авторах/Авторлар туралы мәліметтер/Information about authors:

В.Г. Сальников — д.г.н., профессор кафедры метеорологии и гидрологии, КазНУ им. аль-Фараби, *Vitali.Salnikov@kaznu.kz*
С.Е. Полякова — к.г.н., доцент кафедры метеорологии и гидрологии, КазНУ им. аль-Фараби, *svetlana.polyakova@kaznu.kz*
А.А. Ульман — к.г.н., доцент кафедры картографии и геоинформатики, КазНУ им. аль-Фараби, *ullman33@gmail.com*
А.М. Кауазов — к.г.н., ст. преподаватель кафедры метеорологии и гидрологии, КазНУ им. аль-Фараби, *a_kauazov@mail.ru*
М.О. Турсумбаева — phd, ст. преподаватель кафедры метеорологии и гидрологии, КазНУ им. аль-Фараби, *tursumbaeva.madina@gmail.com*
Д.К. Кисебаев — начальник отдела метеорологических прогнозов, Филиал РГП «Казгидромет» по г. Алматы и Алматинской обл., *daulet-ktl@mail.ru*
Д.И. Миськив — инженер программист, АО НИТ, *danil.miskiv@mail.ru*
Е.Е. Белдеубаев — докторант, КазНУ им. аль-Фараби, *yerke_beldeubayev@mail.ru*
Г.Т. Мусралинова — докторант, КазНУ им. аль-Фараби, *fog555meteo@gmail.com*
С.О. Кожугулов — докторант, КазНУ им. аль-Фараби, *s_kozhagulov@mail.ru*

В.Г. Сальников — г.ф.д, метеорология және гидрология кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *Vitali.Salnikov@kaznu.kz*
С.Е. Полякова — г.ф.к., метеорология және гидрология кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *svetlana.polyakova@kaznu.kz*
А.А. Ульман — г.ф.к., картография және геодезия кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *ullman33@gmail.com*
А.М. Кауазов — г.ф.к., метеорология және гидрология кафедрасының аға оқытушысы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *a_kauazov@mail.ru*
М.О. Турсумбаева — Phd, метеорология және гидрология кафедрасының аға оқытушысы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *tursumbaeva.madina@gmail.com*
Д.К. Кисебаев — метеорологиялық болжамдар бөлімінің басшысы, РМК «Казгидромет» Алматы қ. және Алматы обл. филиалы, *daulet-ktl@mail.ru*
Д.И. Миськив — инженер программист, АҚ Ұлттық ғылыми технология, *danil.miskiv@mail.ru*
Е.Е. Белдеубаев — докторант, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *yerke_beldeubayev@mail.ru*
Г.Т. Мусралинова — докторант, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *fog555meteo@gmail.com*
С.О. Кожугулов — докторант, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, *s_kozhagulov@mail.ru*

Salnikov V. — Dr. Geo. Sci., Professor of the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University, *Vitali.Salnikov@kaznu.kz*
Polyakova S. — Candidate Geo. Sci, Associate Professor of the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University, *svetlana.polyakova@kaznu.kz*
Ullman A. — Candidate Geo. Sci, Associate Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Al-Farabi Kazakh National University, *ullman33@gmail.com*
Kauazov A. — Candidate Geo. Sci, Senior Lecturer of the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University, *a_kauazov@mail.ru*
Tursumbayeva M. — Phd, Senior Lecturer of the Department of Meteorology and Hydrology, Al-Farabi Kazakh National University, *tursumbaeva.madina@gmail.com*
Kisebyaev D. — Head of Meteorological Forecasts Department, Branch of RSE Kazgidromet in Almaty and Almaty region, *daulet-ktl@mail.ru*
Miskiv D. — Engineer programmer, Joint -Stock Company National infrastructure technologies, *danil.miskiv@mail.ru*
Beldeubayev E. — Phd student, Al-Farabi Kazakh National University, *yerke_beldeubayev@mail.ru*
Musralonova G. — Phd student, Al-Farabi Kazakh National University, *fog555meteo@gmail.com*
Kozhagulov S. — Phd student, Al-Farabi Kazakh National University, *s_kozhagulov@mail.ru*

Вклад авторов/ Авторлардың қосқан үлесі/ Authors' contribution:

В.Г. Сальников — разработка концепции, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация
С.Е. Полякова, А.А. Ульман, А.М. Кауазов — разработка методологии, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация
М.О. Турсумбаева, Д.К. Кисебаев, Г.Т. Мусралинова — разработка методологии, проведение исследования, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация
Д.И. Миськив, Е.Е. Белдеубаев, С.О. Кожугулов — проведение исследования, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация

В.Г.Сальников – тўжырымдаманы эзирлеу, ресурстар, мэтінді дайындау және өндеу, көрнекілік

С.Е. Полякова, А.А.Ульман, А.М. Кауазов – әдістемені эзирлеу, ресурстар, мэтінді дайындау және өндеу, көрнекілік

М.О. Турсумбаева, Д.К. Кисебаев, Г.Т. Мусралинова – әдістемені эзирлеу, зерттеу жүргізу, ресурстар, мэтінді дайындау және өндеу, көрнекілік

Д.И. Миськив, Е.Е. Белдеубаев, С.О. Кожугулов – зерттеу жүргізу, ресурстар, мэтінді дайындау және өндеу, көрнекілік

V.G. Salnikov – concept development, methodology development, conducting a research, resources, preparing and editing the text, visualization

S.E. Polyakova, A.A. Ullman, A.M. Kauazov – methodology development, conducting a research, resources, preparing and editing the text, visualization

M.O. Tursumbayeva, D.K. Kisebayev, G.T. Musralinova – methodology development, conducting a research, resources, preparing and editing the text, visualization

D.I. Miskiv, E.E. Beldeubayev, S.O. Kozhagulov – conducting a research, resources, preparing and editing the text, visualization