

Мониторинг качества воздуха в промышленных центрах: мировой и казахстанский опыт на основе исследования взвешенных частиц (PM_{2.5}, PM₁₀)

Жанат Байгазинов¹, Арай Темиржанова^{1,2*}, Нурлан Мухамедияров^{1,3,4}, Касым Жумадилов^{1,5}, Ажар Ташекова¹, Ербол Шакенов¹, Медет Актаев^{1,6}

¹Парк ядерных технологий, Курчатов, Казахстан;
zh.baigazinov@gmail.com, arayt1010@gmail.com,
nurlan.eventumlab@gmail.com, zhumadilovk@gmail.com,
zhymanova.13@mail.ru, erbolshakenov82@gmail.com,
medet_aktaev@mail.ru

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; arayt1010@gmail.com,

³Shakarim University, Семей, Казахстан;
nurlan.eventumlab@gmail.com,

⁴Научно-исследовательский центр «Eventumlab», Семей, Казахстан;
nurlan.eventumlab@gmail.com

⁵Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан; zhumadilovk@gmail.com

⁶«Baiterek Engineering», Астана, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru

*Корреспонденция: arayt1010@gmail.com

Цитирование: Байгазинов, Ж., Темиржанова, А., Мухамедияров, Н., Жумадилов, К., Ташекова, А., Шакенов, Е., Актаев, М. (2026). Мониторинг качества воздуха в промышленных центрах: мировой и казахстанский опыт на основе исследования взвешенных частиц (PM_{2.5}, PM₁₀). *Journal of Ecology and Sustainability*, 155(2), 22-47. <https://doi.org/10.32523/7yekb.v21>

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 16.02.2026
Исправлена: 02.05.2026
Принята: 06.06.2026
Опубликована: 30.06.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация. В статье представлен обзор исследований качества атмосферного воздуха в промышленных городах Казахстана Усть-Каменогорске и Павлодаре с акцентом на изучение твердых аэрозольных частиц PM_{2.5} и PM₁₀, а также газообразных загрязнителей, включая SO₂, NO_x и CO. Цель работы заключается в анализе современного состояния мониторинга атмосферного воздуха в промышленных регионах Казахстана и мира, а также в выявлении существующих научных пробелов в исследованиях аэрозольного загрязнения. Несмотря на ограниченное количество комплексных исследований, в стране накоплен определенный эмпирический опыт по мониторингу концентраций PM_{2.5} и PM₁₀ и приоритетных токсичных газов, что позволяет оценивать уровень техногенной нагрузки и формировать первичные представления о структуре загрязнения воздуха в урбанизированных и промышленных зонах. Научная новизна работы заключается в проведении сравнительного анализа отечественного и зарубежного опыта изучения физико-химических характеристик твердых аэрозольных частиц, включая особенности мониторинга PM_{2.5} и PM₁₀. Показано, что в Казахстане исследования элементного состава, морфологии и источников происхождения твердых аэрозольных частиц остаются недостаточно развитыми по сравнению с практиками стран Европы, США, Китая и Индии, где функционируют разветвленные системы мониторинга, сочетающие регулярные измерения PM_{2.5} и PM₁₀ с применением спектроскопических и масс-спектрометрических методов анализа. Такой подход обеспечивает более точную идентификацию

источников загрязнения и разработку эффективных стратегий снижения вредных выбросов. Сделан вывод о необходимости дальнейших комплексных исследований, направленных на изучение химического состава аэрозольных частиц, их сезонной изменчивости и пространственно-временных закономерностей распространения.

Ключевые слова: качество воздуха; PM_{2.5}; PM₁₀; атмосферные аэрозоли; элементный состав; промышленные регионы Казахстана.

1. Введение

Аэрозольные частицы оказывают существенное влияние на качество атмосферного воздуха, климатические процессы и состояние окружающей среды. Установлено, что их воздействие определяется химическим составом, морфологией, размерным распределением и концентрацией частиц. Несмотря на незначительную массовую долю в атмосфере, аэрозоли играют важную роль в атмосферной оптике, теплообмене, процессах облако- и осадкообразования, а также в трансграничном переносе загрязняющих веществ (Seinfeld & Pandis, 2016; Ma et al., 2024; Chen et al., 2022; Ravshanov et al., 2020; Hu et al., 2024; Ryu & Min, 2024; Xu et al., 2021).

По данным IQAir за 2024 год, Казахстан занял 71-е место в мировом рейтинге стран и регионов по среднегодовой концентрации PM_{2.5} (IQAir.com, 2025). Показано, что загрязнение атмосферного воздуха остается одной из наиболее значимых экологических проблем крупных городов страны. Наиболее неблагоприятная ситуация наблюдается в промышленных и урбанизированных центрах. Так, в Караганде среднегодовая концентрация PM_{2.5} достигла 104,8 мкг/м³, что превышает рекомендуемый уровень Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) (15 мкг/м³) в 10- и раз (WHO, 2021). Повышенные значения также зафиксированы в Бурабае (67,7 мкг/м³), Темиртау (43,5 мкг/м³), Усть-Каменогорске (20,9 мкг/м³), Алматы (20,3 мкг/м³), Шымкенте (19,9 мкг/м³), Актау (18 мкг/м³), Астане и Павлодаре (по 15,4 мкг/м³). Полученные данные свидетельствуют о систематическом превышении рекомендуемых нормативов ВОЗ в ряде городов Казахстана. Это указывает на необходимость совершенствования мониторинга, регулирования выбросов и управления качеством атмосферного воздуха.

Высокая сложность химического состава атмосферных аэрозолей обусловила рост научного интереса к исследованию их элементных характеристик. Особое внимание уделяется мелкодисперсным фракциям PM_{2.5} и PM₁₀, способным проникать в глубокие отделы дыхательной системы. Международные исследования показывают, что оценка только массовых концентраций недостаточна для полноценного анализа аэрозольного загрязнения (Allen et al., 2001; Pakkanen et al., 2001; Hu et al., 2003; Motallebi et al., 2003; Pekney & Davidson, 2005; Park & Dam, 2010; Offor et al., 2016; Taye et al., 2024; Sah, 2024). Установлено, что токсичность частиц во многом определяется содержанием тяжелых металлов и других опасных элементов, включая Pb, Cd, Hg и As.

Результаты современных эпидемиологических исследований подтверждают связь между воздействием мелкодисперсных частиц и ростом заболеваемости хроническими респираторными и сердечно-сосудистыми заболеваниями, а также отдельными формами онкологических патологий. Повышенный риск отмечается в условиях загрязнения воздуха внутри помещений, особенно при недостаточной вентиляции. Накопление токсичных элементов характерно как для жилых, так и для производственных объектов, где присутствуют дополнительные источники вторичного загрязнения. Наибольшему воздействию подвержено население промышленных городов, поскольку высокая концентрация источников эмиссии и ограниченные условия для рассеивания загрязнителей усиливают антропогенную нагрузку на здоровье человека.

Цель настоящего обзора заключается в обобщении мирового и казахстанского опыта оценки качества атмосферного воздуха на основе исследований взвешенных частиц PM_{2.5} и PM₁₀, их элементного состава и взаимосвязи с метеорологическими параметрами. Особое внимание уделено промышленным городам Казахстана Усть-Каменогорску и Павлодару.

В ходе исследования проведен анализ около 100 научных публикаций за период 2000-2025 гг., а также ключевых работ 1970-1999 гг. Это позволило проследить эволюцию научных подходов и выявить современные тенденции в изучаемой проблематике. Основу обзора составили источники, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science, а также публикации из перечня научных изданий, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Республики Казахстан.

Дополнительно использованы данные информационных бюллетеней Казгидромета по Восточно-Казахстанской и Павлодарской областям, а также материалы платформы IQAir.com, что обеспечило сопоставление национальных и международных данных о качестве атмосферного воздуха. Отбор источников осуществлялся с использованием научных баз данных ResearchGate, Google Scholar, eLibrary и других академических платформ.

Приоритет отдавался рецензируемым научным статьям, монографиям и материалам конференций, обладающим высокой научной и прикладной значимостью.

2. Международный и казахстанский опыт изучения твердых частиц аэрозолей воздуха (PM_x)

2.1. Массовые концентрации PM_x

Атмосферный воздух является ключевым компонентом природной среды и характеризуется высокой динамичностью по сравнению с водной и почвенной средами. В его составе присутствуют примеси природного и антропогенного происхождения, включая твердые частицы, газы и аэрозоли. Наибольший научный интерес представляют атмосферные аэрозоли, представляющие собой сложные дисперсные системы, включающие твердые частицы и жидкие капли различного происхождения и физико-химических свойств.

Твердые частицы PM_{2.5} и PM₁₀ формируются как в результате природных процессов (почвенная и вулканическая пыль, эрозия, биогенные источники), так и вследствие антропогенной деятельности, включая промышленное производство, транспорт, горные работы и сжигание топлива (Buseck & Adachi, 2008; Viana et al., 2006; Pöschl et al., 2005; IPCC, 2021; Putaud et al., 2025). Соотношение этих источников определяет химический состав и токсикологические свойства аэрозольных частиц.

Особое значение имеет фракция PM_{2.5}, обладающая высокой проникающей способностью. Установлено, что частицы данного размера достигают альвеол легких и могут поступать в кровоток, вызывая системные эффекты и повышая риск сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний (Ayers et al., 1996; Bergin et al., 2001; Bi et al., 2002). Таким образом, именно мелкодисперсная фракция рассматривается как основной фактор экологического риска.

Анализ научной литературы показывает, что систематические исследования загрязнения атмосферного воздуха начали активно развиваться с 1990-х годов и получили значительное ускорение после 2000 года. Этот рост обусловлен усилением урбанизации, увеличением антропогенной нагрузки и ростом внимания к последствиям загрязнения воздуха для здоровья населения и климата (Kim et al., 2017; Wilson et al., 2002; Khobragade & Ahirwar, 2019; Joksić et al., 2009). В результате сформировался широкий спектр исследований, охватывающих пространственно-временную динамику загрязнения, химический состав аэрозолей, их источники и воздействие на здоровье населения.

Ключевым направлением современных исследований является идентификация источников формирования и механизмов переноса PM_{2.5} и PM₁₀. Установлено, что аэрозольные частицы подразделяются на первичные, непосредственно поступающие в атмосферу (выбросы транспорта, промышленности, сжигание топлива, пылевые процессы), и

вторичные, образующиеся в результате химических и фотохимических реакций газов-предшественников (Houthuijs et al., 2001; Ehrlich et al., 2007; Zhou et al., 2023; Rodríguez & Lopez, 2024; Kim et al., 2024; Han et al., 2022; Cho et al., 2013; Bartaria et al., 2024; Van Dingenen et al., 2004). Пространственная неоднородность концентраций РМх определяется сочетанием локальных выбросов и атмосферного переноса, который усиливается метеорологическими условиями, включая скорость и направление ветра, влажность и температурную стратификацию.

Отдельное направление исследований связано с трансграничным переносом аэрозолей, что подтверждает необходимость международной координации в области мониторинга и регулирования выбросов (UNECE, 2022). Показано, что аэрозольные частицы могут переноситься на большие расстояния, включая арктические регионы, при этом интенсивность переноса определяется синоптическими и климатическими условиями (Liu et al., 2024). Это указывает на глобальный характер проблемы загрязнения атмосферного воздуха.

В международной практике мониторинг РМ_{2.5} осуществляется преимущественно в режиме непрерывных или суточных измерений, что позволяет анализировать динамику загрязнения и формировать базы данных для сравнительных исследований. Согласно данным IQAir (2025), в 2024 году ряд стран Азии и Африки демонстрировал наиболее высокие уровни среднегодовой концентрации РМ_{2.5}. Сводные показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рейтинг наиболее загрязненных стран по среднегодовой концентраций РМ_{2.5} за последние 5 лет по данным IQAir.com, мкг/м³

Страна	Занимаемое место за 2024 год	Годы				
		2024	2023	2022	2021	2020
Чад	1	91,8	-	89,7	75,9	-
Бангладеш	2	78,0	79,9	65,8	76,9	77,1
Пакистан	3	73,7	73,7	70,9	66,8	59,0
Демократическая Республика Конго	4	58,2	40,8	15,5	-	-
Индия	5	50,6	54,4	53,3	58,1	51,9
Таджикистан	6	46,3	49,0	46,0	59,4	30,9
Непал	7	42,8	42,4	40,1	46,0	39,2
Уганда	8	41,0	27,3	39,6	27,6	26,1
Казахстан	71	15,1	16,4	17,0	21,0	20,4
Нормативы WHO (2021) (среднегодовые/среднесуточные)	15,3/5,0					
Нормативы NAAQS US (2025) ¹ (среднегодовые)	9,0					
Нормативы Европейского Союза - Директива 2008/50/ЕС (2008) ² (среднегодовые)	20					
Нормативы Канады - Canadian Ambient Air Quality Standards (2025) ³ (среднегодовые/среднесуточные)	27/8,8					
Нормативы Индии – National Ambient Air Quality Monitoring (2019) ⁴ /45/2019-2020 (среднегодовые/среднесуточные)	40/60					
Нормативы РК (2022) (среднесуточные)	35					

Примечание: ¹National Ambient Air Quality Standards United States Environmental Protection Agency (<https://www.epa.gov/pm-pollution/timeline-particulate-matter-pm-national-ambient-air-quality-standards-naaqs>);

²Стандарты качества воздуха Европейского Союза (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050>)

³Канадские стандарты качества окружающего воздуха (CAAQS) (<https://ccme.ca/en/res/caaqshandbook.pdf>)

⁴Национальные стандарты качества атмосферного воздуха Индии (NAAQS) (https://cpcb.nic.in/upload/NAAQS_2019.pdf)

В последние годы появляются все более комплексные работы, в которых используются современные методы моделирования, дистанционного зондирования и химического анализа (Putaud et al., 2004; Genga et al., 2018; Li et al., 2024; Zhang et al., 2022a; Nautiyal et al., 2025).

Установлено, что сочетание данных методов повышает достоверность разделения антропогенных источников, включая транспорт, промышленность и бытовое сжигание топлива, а также улучшает оценку трансграничного переноса загрязняющих веществ. Это приводит к более детальному пониманию пространственно-временной структуры загрязнения воздуха в урбанизированных территориях.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследования атмосферных аэрозолей в мегаполисах приобретают все более междисциплинарный характер и остаются высоко актуальными. Развитие методологической базы обеспечивает повышение точности оценок и создает научную основу для разработки природоохранных и санитарно-гигиенических мероприятий.

Проведенный анализ подтверждает, что формирование PM_{2.5} и PM₁₀ определяется комплексным взаимодействием источников эмиссии, размерной структуры частиц, атмосферного переноса и метеорологических условий. Однако ключевым ограничением современной научной литературы остается доминирование подхода, основанного на массовых концентрациях РМ, при недостаточном учете их химико-элементного состава и источниковой специфики. Это приводит к неполной интерпретации пространственно-временных закономерностей загрязнения и ограничивает точность оценки токсикологических рисков (Pore & Dockery, 2006; Schraufnagel, 2020).

Сравнительный анализ международных исследований показывает, что даже при развитых системах мониторинга сохраняется разрыв между измерением концентраций и пониманием механизмов формирования аэрозолей. В частности, недостаточно интегрированы данные о сочетании размерного распределения РМ с их химическим составом и источниковой идентификацией, что снижает сопоставимость результатов между регионами и ограничивает эффективность трансграничных оценок загрязнения.

В этом контексте выявляется ключевой научный пробел: при значительном объеме исследований PM_{2.5} и PM₁₀ недостаточно разработаны подходы, одновременно учитывающие элементный состав аэрозолей, их размерную фракционность и метеорологически обусловленные механизмы переноса. Хотя отдельные исследования демонстрируют значимость каждого из этих факторов, их комплексная интеграция остается ограниченной, что снижает аналитическую глубину современных оценок РМ-загрязнения. Так, результаты Houthuijs et al. (2001) подтверждают выраженную сезонную вариативность PM_{2.5} и PM₁₀ в урбанизированных регионах Европы, однако не позволяют дифференцировать вклад химического состава частиц. Аналогично Ehrlich et al. (2007) показали зависимость размерного распределения от типа технологического процесса, но без привязки к токсикологически значимым элементам. В исследованиях Zhou et al. (2023); Kim et al. (2024) акцент сделан на метеорологических и трансграничных механизмах, однако химическая специфика аэрозолей остается второстепенной.

Таким образом, несмотря на накопление значительного массива данных, сохраняется методологическая фрагментарность, т.е. различные аспекты РМ-загрязнения (источники, химический состав, перенос, сезонность) рассматриваются изолированно, а не как единая

система. В этом контексте обоснован переход к многоуровневым источником-ориентированным моделям оценки РМ-загрязнения, объединяющим химический состав, размерную структуру и атмосферную динамику (Bartaria et al., 2024; Rodríguez & Lopez, 2024; Han et al., 2022; Cho et al., 2013). Такой подход позволяет повысить точность идентификации источников эмиссии и улучшить интерпретацию наблюдаемых концентрационных и пространственных аномалий.

Дополнительным подтверждением необходимости комплексного подхода служат данные глобальных обзоров, демонстрирующих значительную региональную неоднородность состава РМ и соотношения органического углерода (ОС) и элементного углерода (ЕС) ОС/ЕС (Putaud et al., 2025; IQAir, 2025), что невозможно объяснить только различиями в уровнях концентраций без учета химической структуры аэрозолей.

Таким образом, новизна данного анализа заключается не только в систематизации существующих результатов, но и в выявлении структурного ограничения современной парадигмы исследований РМ-загрязнения, выраженного в разрыве между концентрационными, химическими и источниковыми подходами. Обосновано, что именно их интеграция является необходимым условием повышения аналитической и прогностической точности исследований качества атмосферного воздуха.

2.2. Элементный состав РМх в мировом контексте

Вопросы регулирования качества атмосферного воздуха в настоящее время рассматриваются не только через оценку массовых концентраций взвешенных частиц (PM_{2.5}, PM₁₀), но и через анализ их физико-химических характеристик. Такой подход обусловлен тем, что токсичность аэрозолей, их способность к атмосферному переносу, химической трансформации и накоплению в организме в значительной степени определяются именно элементным составом частиц. В связи с этим исследование химического состава атмосферных аэрозолей различных фракций стало одним из ключевых направлений современных экологических и медико-биологических исследований. Международные мониторинговые программы и аналитические исследования ориентированы не только на количественную оценку РМх, но и на определение содержащихся в них химических элементов, поскольку именно состав частиц определяет уровень экологического и санитарного риска для населения.

Установлено, что элементный состав PM_{2.5}, PM₁₀ существенно варьирует в зависимости от природно-климатических условий и характера антропогенной нагрузки. На глобальном уровне в составе атмосферных аэрозолей наиболее часто выявляются Al, Si, Fe, Ca и Ti, характерные для минеральной пыли, а также токсикологически значимые элементы Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb и Cd, связанные преимущественно с промышленными выбросами, процессами сжигания топлива и дорожным трафиком (Allen et al., 2001; Pakkanen et al., 2001; Hu et al., 2003). При этом сравнительный анализ исследований показывает выраженные региональные различия. В странах Азии, Африки, Латинской Америки и Восточной Европы высокие концентрации тяжелых металлов, как правило, связаны с интенсивной промышленной деятельностью и недостаточной эффективностью экологического регулирования. Напротив, в государствах с более жесткими стандартами контроля выбросов (страны Европейского Союза, Канада, Япония) наблюдается снижение содержания высокотоксичных компонентов в составе PM_{2.5}, PM₁₀, хотя локальные превышения продолжают фиксироваться вблизи транспортных узлов и промышленных площадок. Это указывает на то, что даже при развитой системе экологического контроля сохраняется высокая роль локальных источников загрязнения.

Показано, что анализ элементного состава PM_{2.5}, PM₁₀ позволяет не только оценивать уровень загрязнения, но и идентифицировать источники формирования аэрозолей. Сопоставление данных, полученных в различных климатических и географических регионах, позволяет различать вклад почвенной пыли, морского аэрозоля, продуктов сжигания топлива и вторично образованных соединений, включая сульфаты и нитраты (Motallebi et al., 2003;

Pekney & Davidson, 2005; Park & Dam, 2010). Вследствие этого исследования химического состава аэрозолей становятся важным инструментом для анализа трансграничного переноса загрязняющих веществ, оценки долгосрочных тенденций изменения качества воздуха и разработки природоохранной политики. Таким образом, интерпретация элементного состава РМх имеет не только диагностическое, но и прогностическое значение, позволяя оценивать устойчивость аэрозольного загрязнения и его потенциальное распространение за пределы зон непосредственной эмиссии.

Существенное внимание в современных исследованиях уделяется способности атмосферных аэрозолей выступать переносчиками токсичных соединений на большие расстояния. В работах Offor et al. (2016); Taye et al. (2024); Sah (2024) показано, что твердые частицы могут аккумулировать тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды и радионуклиды, обеспечивая их перенос в зависимости от метеорологических условий. Это приводит к расширению ареала загрязнения и формированию экологических рисков даже за пределами промышленных территорий. Следовательно, воздействие аэрозольных загрязнителей не ограничивается локальными промышленными зонами, а приобретает региональный и трансграничный характер. Данный вывод имеет принципиальное значение для оценки риска, поскольку свидетельствует о невозможности эффективного управления качеством воздуха исключительно на локальном уровне без учета атмосферной циркуляции и межрегионального переноса загрязняющих веществ.

Антропогенные выбросы химических элементов в атмосферу остаются одной из наиболее острых экологических проблем урбанизированных территорий. Основной вклад в загрязнение воздуха вносят промышленные предприятия, энергетический сектор, строительство и автотранспорт, тогда как среди природных источников наибольшее значение имеют эрозия пыли, вулканическая активность, морские аэрозоли и биогенные выбросы. Аэрозольные частицы играют ключевую роль в аккумуляции и переносе тяжелых металлов и других токсичных соединений, что делает их важнейшим объектом экологического мониторинга. В этой связи исследования происхождения РМ_{2.5} и механизмов их поведения в атмосфере приобретают особую значимость для оценки воздействия загрязнения на здоровье населения и окружающую среду (Zhang et al., 2013; Huang et al., 2024; Bhanot et al., 2025; Lee et al., 2024; Nayebar et al., 2022).

Современные исследования демонстрируют устойчивый сдвиг от оценки массовых концентраций взвешенных частиц к анализу их химического и элементного состава. Такой подход позволяет более точно идентифицировать источники аэрозолей и оценивать связанные с ними экологические и санитарные риски. Установлено, что именно мелкодисперсные фракции РМ_{2.5} и РМ₁₀ характеризуются наибольшим накоплением токсичных элементов и вторичных соединений, формируя наиболее опасную для здоровья компоненту атмосферного загрязнения.

Многоэлементные исследования атмосферной пыли в промышленных зонах показывают выраженную суточную и пространственную изменчивость состава. При анализе фильтрационных проб фиксируются колебания более чем 30 химических элементов, а также неоднородное распределение токсикантов в пределах урбанизированных территорий, что отражает влияние локальных источников и метеорологических условий (Zhao et al., 2022; Zhang et al., 2022b). Эти результаты согласуются с данными о глобальном характере загрязнения атмосферы частицами, обогащенными тяжелыми металлами и другими приоритетными компонентами (Zhang et al., 2013; Remoundaki et al., 2011; Zeb et al., 2018).

Сравнительные исследования подтверждают, что даже при соблюдении массовых нормативов РМ сохраняется значимая химическая неоднородность аэрозолей. Так, в Бухаресте зафиксировано увеличение содержания 17 элементов, что потребовало пересмотра представлений об источниках загрязнения и потенциальных рисках для населения (Yabutani et al., 2010). Это подчеркивает принципиальное ограничение концентрационного подхода и

необходимость расширения перечня контролируемых химических компонентов при мониторинге качества воздуха.

Региональные сравнения «город-село» также демонстрируют устойчивый контраст элементного состава РМх. В Кантабрии (Северная Испания) при отсутствии превышений нормативов по массе РМ выявлены повышенные концентрации Mn, Cu, Ni и Pb в городской среде по сравнению с сельской, что указывает на доминирующий вклад транспорта, отопления и промышленности при фоновом природном происхождении элементов (Arruti et al., 2010). Таким образом, соответствие массовым нормативам не исключает наличия химически обусловленных рисков.

В индустриально развитых и густонаселенных регионах химический состав PM_{2.5} отражает наложение промышленных и бытовых источников. В прибрежных районах Северной Джакарты стабильно фиксируются высокие уровни серы и черного углерода, при этом основными компонентами являются сульфат аммония и углеродсодержащие соединения, что свидетельствует о совместном влиянии промышленных выбросов и сжигания топлива (Anggraini et al., 2024).

Аналогичные закономерности наблюдаются в ряде азиатских мегаполисов, где в зимний период при застойных метеоусловиях усиливается накопление элементов, связанных с угольной энергетикой, транспортом и сжиганием отходов (Makkonen et al., 2023; Li et al., 2024; Zhang et al., 2022b). В Ханое преобладают органическое вещество, вторичные ионы и элементы Zn, Pb, Cd и Cl. В Гуйяне доминируют сульфаты, нитраты, аммоний, органический углерод и металлы Fe, Zn и Ca. В Ухане при среднегодовой концентрации PM_{2.5}, достигающей 80,5 мкг/м³, выявлено преобладание вторичных неорганических ионов (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺), органического и элементарного углерода, а также S, K, Cl, Ba, Fe, Ca и I. Соотношения NO₃⁻/SO₄²⁻ и факторный анализ подтверждают вклад как стационарных источников, так и углеродо- и металлоемких эмиссий. В совокупности эти данные демонстрируют необходимость интеграции химического состава и размерной структуры РМ при интерпретации источников загрязнения.

Особую обеспокоенность вызывают исследования, фиксирующие высокие концентрации токсичных элементов в составе PM_{2.5} и PM₁₀. В различных микросредах Аддис-Абебы выявлены Cr, Zn, Pb, Ni и другие элементы, при этом индекс опасности в ряде случаев превышает допустимые значения (Taye et al., 2024). В Шеохаре (Индия) в составе PM_{2.5} обнаружены As, Cd, Cr, Ni и Pb с превышением санитарных норм, а коэффициенты обогащения подтвердили выраженное антропогенное происхождение загрязнения. При этом расчет канцерогенного риска показал особенно высокую уязвимость детской популяции (Sah, 2024).

В целом, сопоставление результатов различных исследований демонстрирует устойчиво повторяющуюся глобальную закономерность: высокая нагрузка PM_{2.5}, значительное содержание токсичных элементов и доминирование антропогенных источников (промышленность, транспорт, сжигание топлива) независимо от географического региона. Это указывает на системный характер проблемы, который не может быть корректно оценен исключительно через массовые концентрации PM_{2.5} и PM₁₀.

За последние два десятилетия международная научная парадигма существенно продвинулась в понимании химической природы PM_{2.5} и PM₁₀. Современные подходы ориентированы на интеграцию количественного анализа концентраций с элементным и химическим составом частиц для идентификации источников, оценки трансформационных процессов в атмосфере и прогнозирования их долговременного воздействия. Однако проведенный анализ показывает, что сохраняется методологический разрыв между концентрационными, химическими и источниковыми исследованиями.

К преимуществам рассмотренных исследований следует отнести использование комплексных аналитических подходов, позволяющих оценивать не только массовые концентрации PM_{2.5}, PM₁₀, но и их химический состав, источниковую принадлежность и

пространственно-временную изменчивость. Значительная часть работ демонстрирует высокий потенциал элементного анализа для идентификации антропогенных источников загрязнения и оценки трансграничного переноса аэрозолей. Вместе с тем анализ литературы выявил и ряд ограничений. Во многих исследованиях отсутствует единый подход к интерпретации данных, недостаточно учитываются сезонные и метеорологические факторы, а также ограничено количество долгосрочных наблюдений. Кроме того, в ряде регионов сохраняется дефицит данных по ультрадисперсным фракциям PM_{1.0} и их химическому составу, что затрудняет сопоставление результатов между странами и проведение комплексной оценки токсикологических рисков.

Таким образом, ключевая научная новизна обобщенного анализа заключается в выявлении системного ограничения существующих подходов к оценке PM-загрязнения, выраженного в недостаточной интеграции элементного состава, размерной фракционности и источниковой идентификации. Обосновано, что переход к комплексным мультипараметрическим моделям анализа является необходимым условием повышения точности диагностики источников загрязнения и экологических рисков, а также формирования научно обоснованных стратегий управления качеством атмосферного воздуха.

2.3. Исследования твердых частиц (PM_x) в атмосферном воздухе Казахстана

На фоне глобальных исследований, демонстрирующих высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха и значимый вклад токсичных компонентов в состав PM_{2.5} в городах Азии, Европы и Африки, возрастает необходимость регионального анализа механизмов формирования аэрозольной нагрузки. Для Казахстана это особенно важно ввиду выраженной пространственно-временной неоднородности загрязнения и сочетанного влияния антропогенных (транспорт, отопление, промышленность) и природных факторов (пыль, пожары).

В работах казахстанских исследователей, включая исследования, выполненные в сотрудничестве с зарубежными научными центрами, представлены значимые результаты по изучению состояния атмосферного воздуха в различных регионах страны. Основное внимание уделяется анализу сезонной и суточной изменчивости концентраций твердых частиц различной дисперсности (PM_{2.5} и PM₁₀), а также нормируемых газообразных загрязнителей (NO₂, SO₂, CO, O₃). Подобные исследования проводятся преимущественно в крупнейших урбанизированных и промышленных центрах Казахстана - Алматы, Астане, Караганде, Усть-Каменогорске и Павлодаре, где антропогенная нагрузка наиболее выражена. Полученные данные формируют научно-методическую основу для экологического мониторинга, оценки санитарно-гигиенических рисков и разработки природоохранных мероприятий. Вместе с тем анализ литературы показывает, что большинство исследований ориентировано преимущественно на оценку массовых концентраций загрязняющих веществ, тогда как вопросы химического и элементного состава аэрозольных частиц, механизмов их трансформации и токсикологической специфики изучены значительно слабее.

Как и в международной практике, в казахстанской научной литературе наибольшее внимание сосредоточено на проблеме загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами PM_{2.5} (Kerimray et al., 2020a; Kerimray et al., 2020b; Assanov et al., 2021a; Mukhtarov et al., 2023; Li et al., 2020; Bekbossinova & Niyazbekov, 2024; Baimatova et al., 2022; Yedilkhan et al., 2025; Agibayeva et al., 2023; Biloshchytskyi et al., 2024; Kenessariyev et al., 2013; Kenessary et al., 2019; Pak et al., 2025). Установлено, что устойчивое превышение концентраций PM_{2.5} сопровождается ростом заболеваемости респираторными, сердечно-сосудистыми и онкологическими патологиями, особенно среди уязвимых групп населения - детей, пожилых людей и лиц с хроническими заболеваниями. При этом исследования показывают, что влияние PM_{2.5} не ограничивается только уличным воздухом. В условиях недостаточной вентиляции и наличия локальных источников эмиссии (печное отопление, табачный дым, строительные материалы, производственные процессы) внутри помещений могут формироваться еще более

высокие концентрации токсичных аэрозолей и связанных с ними тяжелых металлов. Тем самым подтверждается, что проблема PM_{2.5} носит комплексный характер и определяется не только уровнем выбросов, но и особенностями городской среды, метеоусловиями и типом источников загрязнения.

Следует отметить, что современные казахстанские исследования характеризуются расширением используемых методических подходов. Наряду с инструментальными измерениями активно применяются геостатистические методы, спутниковые данные, модели атмосферной дисперсии, ГИС-технологии и методы математического прогнозирования. Это позволило перейти от простой фиксации превышений ПДК к анализу пространственно-временных закономерностей загрязнения, идентификации основных источников эмиссии и оценке влияния метеорологических факторов, включая температуру воздуха, влажность, скорость и направление ветра. Однако критический анализ показывает, что даже при наличии современных методов исследования, результаты остаются фрагментарными и часто ограничены краткосрочными наблюдениями без комплексного изучения элементного состава PM-фракций и их источниковой аппроксимации.

Так, в Алматы (Kerimray et al., 2020a) установлены устойчивые превышения PM_{2.5}, PM₁₀ и NO₂ относительно рекомендаций ВОЗ с выраженной зимней сезонностью. Показано, что сочетание угольного отопления и неблагоприятных метеоусловий (слабый ветер, инверсии) формирует пики загрязнения. Отрицательная корреляция концентраций SO₂, PM_{2.5} и PM₁₀ с высотой над уровнем моря указывает на локализацию источников в низинных урбанизированных зонах с концентрацией ТЭЦ и промышленности. Ограничением является недостаточный учет вторичных загрязнителей (О₃, ПАУ), что снижает полноту источниковой интерпретации.

Эти данные согласуются с общенациональными оценками (Kerimray et al., 2020b), где зафиксированы превышения TSP, NO₂, SO₂ и O₃ и оценено около 8100 преждевременных смертей ежегодно, связанных с PM_{2.5}. Наибольшая нагрузка характерна для Жезказгана, Темиртау, Балхаша и особенно Усть-Каменогорска (SO₂ до 85 мкг/м³). Ранее (Kenessariyev et al., 2013) оценка смертности составила около 16 000 случаев в год (95 % CI до 25 500), что указывает на методологическую вариативность оценок риска.

Анализ Kenessary et al. (2019) показывает превышение HQ и HI > 1 в большинстве городов Казахстана и наличие хронических и канцерогенных рисков, связанных с PM_{2.5}, NO₂, SO₂ и тяжелыми металлами (Cd, Mn, Pb, Cr). Канцерогенные риски для Cd, As, Pb и Cr превышают допустимые уровни для всего населения, что указывает на недостаточность существующего нормирования. При этом сохраняется ключевой научный разрыв, большинство исследований ограничивается массовыми концентрациями PM_{2.5} и PM₁₀ при недостаточной детализации их химического состава, что снижает точность идентификации источников и причинно-следственных механизмов риска.

Системные ограничения мониторинга подтверждены в работе Assanov et al. (2021), где анализ 21 электростанции и 9 металлургических предприятий показал «высокий» уровень загрязнения в 8 из 14 городов по ИЗА при фрагментированности наблюдательной сети. Корреляция ИЗА и выбросов (R² = 0,4791) нестабильна при неполных данных. Дополнительно выявлена регуляторная асимметрия допустимый SO₂ до 500 мкг/м³ в СЗЗ в 25 раз превышает ориентир ВОЗ (20 мкг/м³).

Динамические исследования подтверждают устойчивую сезонность. В Mukhtarov et al. (2023) среднегодовые PM_{2.5} составили 22,5 мкг/м³ в Астане и 35,3 мкг/м³ в Алматы (4,5 и 7,1 превышения ВОЗ), с 151 и 217 днями превышений. Моделирование HYSPLIT показало преобладание локальных источников в Алматы и трансграничного переноса в Астане, что требует дифференцированного управления качеством воздуха.

Отдельное направление исследований связано с изучением трансграничного переноса аэрозольных частиц. В работе Li et al. (2020) с использованием кластерного анализа, метода потенциального вклада источников (PSCF) и траекторного анализа (CWT) определены

основные пути переноса PM_{2.5} и PM₁₀ для станции Акедала (северо-запад Китая) в 2017-2019 гг. Установлено, что среднегодовые концентрации составляли $11,63 \pm 9,31$ мкг/м³ для PM_{2.5} и $19,99 \pm 14,39$ мкг/м³ для PM₁₀, а максимальные значения фиксировались зимой. Показано, что загрязняющие воздушные массы преимущественно поступали с территории восточного Казахстана, северного Синьцзяна и западной Монголии. Доминируют высотные переносы (выше 840 гПа), что подчеркивает региональный вклад Казахстана в аэрозольное загрязнение сопредельных территорий. Эти результаты имеют принципиальное значение, поскольку подтверждают участие Казахстана в региональных процессах трансграничного переноса аэрозолей и демонстрируют, что загрязнение воздуха в промышленных регионах нельзя рассматривать исключительно как локальную экологическую проблему.

Эконометрические оценки Bekbossinova & Niyazbekov (2024) фиксируют зависимость качества воздуха от экономического роста: увеличение ВРП на 10 % сопровождается ростом загрязнения на 5 % в Алматы при среднем PM_{2.5} до 42 мкг/м³, что указывает на структурную природу экологической нагрузки.

Краткосрочные ограничения подтверждают инерционность системы, во время COVID-19 (Baimatova et al., 2022) наблюдалось снижение NO₂ и CO, но не PM_{2.5}, PM₁₀ и SO₂ в промышленных центрах, включая Усть-Каменогорск и Караганду, что указывает на доминирование стационарных источников.

В условиях высокой вариабельности концентраций загрязняющих веществ возрастает интерес к методам прогнозирования качества воздуха. В частности, авторы Yedilkhan et al. (2025) разработали модель прогнозирования PM_{2.5} и PM₁₀ в Алматы на основе алгоритмов машинного обучения LightGBM и LSTM с механизмом внимания. Модель LSTM показала наилучшие результаты для выявления временных зависимостей и обработки нестабильных данных (RMSE 5,54 и 5,69 для PM_{2.5} и PM₁₀ соответственно), что подчеркивает потенциал нейросетевых подходов в условиях сложной городской метеодинамики. Авторы также выявили значимые связи между концентрациями частиц и метеорологическими факторами, такими как время суток, температура и направление ветра. Источниковый анализ Agibayeva et al. (2023) подтверждает доминирование угольной энергетики, отопления и транспорта, а Biloshchytskyi et al. (2024) - пространственную зависимость РМ от близости ТЭЦ.

Экологические риски угольной энергетики усиливаются данными Pak et al. (2025), где выявлено от 4-х до 8-и кратного увеличение радионуклидов (⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U) в золошлаках и присутствие токсичных металлов (Mn, Cd, Ni, Co, Zn).

Обобщение показывает, что ключевым ограничением современных исследований является доминирование массовых показателей РМх при недостаточной интеграции химико-элементного и источникового анализа. Это приводит к неполной идентификации эмиссионных источников и снижает точность оценки причинно-следственных механизмов формирования риска.

Показано, что расхождения в оценках риска (смертность, НQ/НI, канцерогенные риски) обусловлены не только реальными различиями в загрязнении, но и методологической неоднородностью мониторинга и моделирования. Следовательно, переход к интеграции РМ-мониторинга с элементным анализом и источниковыми моделями является ключевым направлением повышения достоверности экологических оценок.

Преимуществом казахстанских исследований является накопление значительного массива данных по сезонной динамике PM_{2.5} и PM₁₀, внедрение современных методов моделирования и использование междисциплинарных подходов для оценки рисков здоровью населения. Кроме того, установлена связь между уровнями загрязнения и промышленной, транспортной и энергетической нагрузкой в крупнейших городах страны. В то же время основными ограничениями остаются недостаточная изученность элементного состава аэрозольных частиц, ограниченность долговременных наблюдений, слабое развитие систем источниковой идентификации и недостаточная интеграция токсикологических показателей в программы мониторинга. Это существенно ограничивает возможности объективной оценки

экологических рисков и сближает казахстанские исследования с преимущественно описательным уровнем анализа по сравнению с современными международными практиками.

В данном разделе приведено комплексное сопоставление современных данных о загрязнении атмосферного воздуха промышленных городов Казахстана с учетом массовых концентраций $PM_{2.5}$ и PM_{10} , их химического состава, сезонной изменчивости и отраслевой специфики источников эмиссии. Систематизированы результаты исследований, отражающие взаимосвязь между структурой промышленности, элементарным составом аэрозольных частиц и потенциальными рисками для здоровья населения. Дополнительно выявлены ключевые ограничения существующих систем мониторинга, связанные с недостаточной детализацией химического состава PM -фракций и ограниченной сопоставимостью данных между регионами.

Установлено, что казахстанские исследования вносят значимый вклад в изучение закономерностей атмосферного загрязнения, влияния $PM_{2.5}$ на здоровье населения и процессов трансграничного переноса аэрозолей. Вместе с тем выявлено, что ключевым научным пробелом остается недостаточная изученность химического и элементарного состава PM -фракций, особенно в промышленных регионах с высокой техногенной нагрузкой. Это определяет необходимость перехода от оценки исключительно массовых концентраций к комплексному физико-химическому анализу аэрозольных частиц, что позволит повысить достоверность экологического мониторинга, расширить возможности идентификации источников загрязнения и обеспечить научно обоснованную разработку природоохранных и санитарно-гигиенических мер.

2.4. PM_x в Усть-Каменогорске и Павлодаре

Особое внимание в современной научной литературе уделяется Усть-Каменогорску как одному из наиболее загрязненных промышленных центров Казахстана и одной из региональных «горячих точек» по уровню аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха. Повышенный исследовательский интерес к данному городу обусловлен сочетанием крупных металлургических предприятий, угольной энергетики, высокой плотности промышленных объектов и неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Выявлено, что для Усть-Каменогорска характерно устойчивое присутствие как газообразных примесей, так и мелкодисперсных аэрозольных частиц, содержащих токсичные элементы и тяжелые металлы.

Усть-Каменогорск на протяжении длительного времени рассматривается как один из наиболее экологически нагруженных промышленных центров Казахстана и Центральной Азии. Формирование его промышленной структуры исторически связано с цветной металлургией, что обусловило устойчивую концентрацию предприятий тяжелой промышленности, включая ТОО «Казцинк», Ульбинский металлургический завод и Усть-Каменогорский титано-магниевый комбинат (KazDATA, 2025), а также объекты энергетики и химической промышленности.

Такая структура формирует комплексную эмиссию загрязняющих веществ (SO_2 , NO_x , CO , пыль и аэрозольные частицы $PM_{2.5}$ и PM_{10}). Пространственная неоднородность загрязнения выражена отчетливо, максимальные нагрузки фиксируются в восточной промышленной зоне, тогда как северо-западные и юго-восточные районы дополнительно испытывают влияние энергетических объектов и транспортных потоков. В условиях температурных инверсий и слабой вентиляции происходит накопление загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, что усиливает экспозицию населения.

Согласно данным Казгидромета (Информационный бюллетень, 2024а), в 2024 году качество атмосферного воздуха в Усть-Каменогорске характеризовалось высоким уровнем загрязнения ($ИЗА5 = 7,3$; $СИ = 6,6$). Основной вклад в загрязнение вносили SO_2 (до 6,6 ПДКм.р., 1418 случаев превышения), H_2S (до 5,4 ПДКм.р., 3831 случай, включая 114 превышений >10 ПДК), NO_x (до 2,9 ПДКм.р.), CO (до 2,5 ПДКм.р.), а также Cl (6,0 ПДКм.р.).

По другим загрязнителям превышения носили ограниченный характер. При этом средние концентрации PM_{2.5} и PM₁₀ не превышали среднесуточных нормативов, а превышения максимально-разовой ПДК составили 1,5 для PM_{2.5} и 1,15 для PM₁₀. Таким образом, при доминировании газовой компоненты загрязнения аэрозольная фракция характеризуется преимущественно эпизодическим характером повышений, что указывает на ограниченность усредненных оценок для отражения реальной кратковременной нагрузки.

Современные исследования (Assanov et al., 2021b; Assanov et al., 2022; Temirbekov et al., 2025; Мухамедияров и др., 2023) подтверждают высокий уровень техногенной нагрузки и необходимость углубленного анализа РМ-фракций. Однако ключевым методологическим ограничением остается недостаточная проработка элементного состава аэрозольных частиц и его источниковой интерпретации, что снижает точность оценки токсикологического риска и разделения вкладов отдельных эмитентов. Дополнительные данные Baisanov et al. (2025) показывают, что среднегодовые концентрации PM_{2.5} достигали 35 мкг/м³ при ПДК 25 мкг/м³, а PM₁₀ - 56 мкг/м³ при ПДК 40 мкг/м³ с выраженной сезонностью и максимумами в зимний период.

В исследовании Assanov et al. (2021) проанализировано влияние ограничительных мер периода COVID-19 на качество атмосферного воздуха Усть-Каменогорска. Научная значимость работы определяется возможностью оценки вклада различных источников эмиссии в условиях резкого сокращения транспортной активности. Установлено, что, несмотря на снижение интенсивности автомобильного движения, концентрации большинства загрязняющих веществ не продемонстрировали существенного уменьшения. Средние концентрации SO₂ в апреле-мае 2020 г. сохранялись на высоком уровне и составляли около 88 мкг/м³, при этом ориентировочные суточные нормативы ВОЗ не были достигнуты ни в один из дней наблюдений. Проведенный авторами регрессионный анализ выявил снижение концентраций CO, отсутствие статистически значимых изменений по NO₂ и SO₂, а также увеличение содержания TSP. Полученные результаты позволили установить доминирующий вклад стационарных источников загрязнения, прежде всего металлургических предприятий и угольных ТЭЦ, в формирование качества атмосферного воздуха города. Авторами дополнительно определены ключевые ограничения существующей системы экологического контроля, включая недостаточную плотность сети мониторинга, отсутствие полной и достоверной инвентаризации выбросов, а также ограниченный учет метеорологических параметров, таких как температурные инверсии, высота пограничного слоя атмосферы и интенсивность атмосферного перемешивания. Особая значимость данного исследования заключается в том, что впервые для условий индустриального города Казахстана было показано: сокращение транспортных выбросов само по себе не обеспечивает существенного улучшения качества атмосферного воздуха. Выявлено, что без модернизации промышленного сектора, повышения эффективности газоочистного оборудования и совершенствования экологического регулирования устойчивое снижение загрязнения остается маловероятным. Вместе с тем исследование имеет и ряд ограничений. В частности, анализ преимущественно сосредоточен на массовых концентрациях загрязняющих веществ, тогда как химический и элементный состав аэрозольных частиц изучен ограниченно. Кроме того, недостаточно подробно рассмотрены сезонные различия формирования РМ-фракций.

В последующем исследовании Assanov et al. (2022) впервые выполнен комплексный пространственно-временной анализ загрязнения атмосферного воздуха Усть-Каменогорска на основе многолетних рядов наблюдений и применения многомерных статистических методов. Установлено устойчивое превышение национальных и международных нормативов по SO₂ и NO₂, особенно в холодный период года. Выявлено, что максимальные уровни загрязнения локализуются в северной промышленной зоне города, характеризующейся высокой концентрацией металлургических предприятий и энергетических объектов. Авторами показано, что, несмотря на декларируемое снижение объемов выбросов, улучшения качества атмосферного воздуха в городе не наблюдается. Определено, что существующая система

экологического регулирования демонстрирует ограниченную эффективность в условиях высокой промышленной нагрузки. Дополнительно выявлена необходимость пересмотра подходов к мониторингу качества воздуха, включая расширение сети автоматизированных станций, учет пространственной неоднородности загрязнения и интеграцию метеорологических параметров в модели оценки атмосферных процессов. Преимуществом данного исследования является использование многолетних рядов наблюдений и статистических методов пространственного анализа, что позволило выявить устойчивые закономерности распределения загрязняющих веществ. Вместе с тем работа преимущественно ориентирована на анализ газообразных примесей, тогда как данные о химическом составе PM_{2.5} и PM₁₀ представлены ограниченно. Это снижает возможность комплексной оценки токсикологической опасности атмосферных аэрозолей. Исследование Temirbekov et al. (2025), охватывающее девять промышленных городов Казахстана, включая Усть-Каменогорск и Павлодар, демонстрирует переход к более современным подходам анализа загрязнения атмосферного воздуха. Авторами использованы методы численного моделирования и ассимиляции данных автоматизированных станций мониторинга для уточнения параметров источников загрязнения. Установлено, что интеграция мониторинговых данных и математических моделей позволяет значительно повысить точность оценки пространственно-временного распределения CO, SO₂ и NO₂. Выявлено, что применение методов моделирования обеспечивает более точное прогнозирование эпизодов загрязнения и позволяет учитывать влияние метеорологических факторов на перенос загрязняющих веществ. Работа имеет высокую прикладную значимость, поскольку демонстрирует перспективность использования современных цифровых технологий для экологического мониторинга промышленных агломераций. Одновременно определено, что существующие модели требуют дальнейшей адаптации к региональным климатическим условиям Казахстана, включая более детальный учет сезонных инверсий, ветрового режима и процессов вторичного аэрозолеобразования. Кроме того, исследование ограниченно рассматривает элементный состав PM-фракций, что снижает возможности идентификации конкретных источников загрязнения.

Одним из немногих исследований, посвященных детальному анализу элементного состава атмосферных аэрозолей в Казахстане, является работа Мухамедиярова и др. (2023), выполненная в Усть-Каменогорске. Научная значимость исследования определяется комплексным изучением PM_{2.5} и TSP с определением содержания тяжелых металлов и расчетом геохимических коэффициентов обогащения. Установлено превышение концентраций PM_{2.5} относительно нормативов в 1,3-1,7 раза. В составе TSP выявлены экстремально высокие концентрации Ba, достигающие 10 ПДК, тогда как в PM_{2.5} зафиксировано превышение по Pb до 1,3 ПДК. Дополнительно установлено, что в почвенном покрове города концентрации Pb достигали 7 ПДК, а содержания Cu и Zn превышали кларковые значения в 2 и 5 раз соответственно. Расчет коэффициентов обогащения (КО > 10) для Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, Th и U подтвердил выраженную антропогенную природу загрязнения. Выявлено, что металлургические процессы являются ключевым источником поступления токсичных элементов в атмосферные аэрозоли города. Особая значимость данной работы заключается в том, что авторами показана ограниченность оценки только массовых концентраций PM_{2.5} и PM₁₀ без учета химического состава частиц. Установлено, что токсикологическая опасность аэрозолей во многом определяется содержанием тяжелых металлов и геохимическими особенностями загрязнения. Вместе с тем выявлено, что подобные исследования для Казахстана остаются единичными, а данные по сезонной изменчивости элементного состава PM-фракций и их связи с источниками эмиссии представлены недостаточно полно.

Таким образом, Усть-Каменогорск следует рассматривать не только как территорию с устойчиво высоким уровнем промышленного загрязнения, но и как систему с недостаточно изученной химико-элементной структурой аэрозолей, что формирует значимый научный

пробел и обосновывает переход от концентрационного к ориентированному на элементный анализ самих РМ-фракций.

Павлодарская область также относится к числу наиболее индустриализированных регионов Казахстана. Несмотря на высокие объемы выбросов загрязняющих веществ, установлено, что количество исследований, посвященных комплексному анализу РМ_{2.5} и РМ₁₀, существенно уступает числу аналогичных работ по Усть-Каменогорску. Это указывает на неравномерность научной изученности индустриальных регионов Казахстана.

Павлодар является крупным индустриальным центром нефтехимического и энергетического профиля, где высокая концентрация предприятий (Павлодарский нефтехимический завод, АО «Алюминий Казахстана», ТЭЦ и др.) формирует устойчивую антропогенную нагрузку на атмосферный воздух (Pavlodar Oil Chemistry Refinery, 2025; Aluminium of Kazakhstan JSC, 2025). Пространственная структура города характеризуется близким соседством промышленных зон и жилой застройки, что усиливает воздействие загрязняющих веществ на население, особенно в условиях неблагоприятной метеорологической обстановки.

По данным Казгидромета (Информационный бюллетень, 2024b), качество атмосферного воздуха в Павлодаре оценивалось неоднозначно, по индексу загрязнения атмосферы - «низкое» (ИЗА = 3), при этом по наибольшей повторяемости и стандартному индексу - «высокое» (НП = 26 %, СИ = 9,3). Основной вклад в загрязнение вносили NO₂ (821 случай превышения ПДК), СО (719 случаев) и NO (191 случай). Максимально-разовые концентрации отдельных примесей (СО, NO_x, О₃, H₂S, фенол и др.) достигали 2-9 ПДК, при этом превышений свыше 10 ПДК не зафиксировано. По РМ_{2.5} превышения отмечались лишь в двух точках и составили 1,0 и 1,1 ПДК_{м.р.}, при отсутствии случаев высокого и экстремально высокого загрязнения (ВЗ и ЭВЗ). При этом локальная пространственная структура загрязнения усиливается близостью промышленных зон к жилой застройке, особенно в восточной части города, где в условиях слабой вентиляции и температурных инверсий формируются устойчивые зоны накопления загрязнений.

Сопоставление с результатами Vaisanov et al. (2025) подтверждает наличие устойчивых превышений загрязняющих веществ в промышленных городах, включая Павлодар, что указывает на необходимость более детального пространственно-временного анализа и учета микролокальных пиков их концентраций.

В исследовании Safarov et al. (2024), выполненном в Павлодаре, РМ_{2.5} и NO₂ определены как ключевые загрязнители атмосферного воздуха. Установлено, что на 87,4 % исследованных участков концентрации NO₂ превышали суточный ПДК, а РМ_{2.5} формировал максимальные значения AQI в 75,7 % случаев. Пространственный анализ выявил увеличение концентраций РМ_{2.5}, РМ₁₀ и AQI в восточно-северо-восточном направлении, что связано с размещением промышленных объектов и особенностями ветрового режима. Структурное моделирование показало, что именно РМ_{2.5} оказывает определяющее влияние на индекс качества воздуха, тогда как статистическая значимость вклада NO₂ оказалась ниже. Полученные результаты подтверждают наличие локальных зон устойчивого аэрозольного загрязнения даже при формально умеренных средних значениях AQI. Научным преимуществом исследования является применение пространственного анализа и статистического моделирования, позволяющих выявлять локальные особенности распределения загрязняющих веществ. Однако работа преимущественно ориентирована на массовые концентрации РМ и не включает детальный анализ элементного состава аэрозольных частиц.

При сравнении Усть-Каменогорска и Павлодара установлено, что структура загрязнения атмосферного воздуха определяется не только объемом выбросов, но и отраслевой спецификой промышленности. Для Усть-Каменогорска характерно преобладание металлосодержащих аэрозолей и сернистых соединений, тогда как для Павлодара более значимыми являются продукты нефтехимии, энергетики и транспортных выбросов. Эти

различия обуславливают неодинаковые токсикологические эффекты и требуют применения различных подходов к мониторингу и оценке риска для здоровья населения.

Следует отметить, что существующие исследования атмосферных аэрозолей в промышленных городах Казахстана имеют как существенные преимущества, так и ряд ограничений. К сильным сторонам относится расширение сети инструментальных наблюдений, внедрение методов анализа PM_{2.5} и PM₁₀, а также использование международных подходов к оценке химического состава аэрозолей. Современные исследования позволяют выявлять сезонные закономерности загрязнения, определять вклад различных источников эмиссии и анализировать пространственное распределение загрязняющих веществ.

Одновременно выявлен ряд ограничений. Во многих исследованиях наблюдается фрагментарность данных и различия в методах отбора проб, периодичности наблюдений и аналитических процедурах. Это затрудняет сопоставление результатов между регионами и снижает возможность долгосрочного анализа трендов. Кроме того, в большинстве работ недостаточно подробно рассматривается элементный состав РМ-фракций и его связь с конкретными источниками выбросов. Ограниченным остается и анализ рисков для здоровья населения, особенно в части хронического воздействия многокомпонентных аэрозольных смесей.

Таким образом, по анализированным результатам научных работ Усть-Каменогорск и Павлодар представляют собой показательные модели индустриального загрязнения атмосферы в Казахстане. В работах установлено, что ключевую роль в формировании экологических рисков играют не только объемы выбросов, но и примеси (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO_x, CO, O₃, H₂S), метеорологические условия и пространственная структура городской застройки. Проведенные в Усть-Каменогорске и Павлодаре исследования выявили основные источники загрязнения атмосферного воздуха, определили пространственно-временные закономерности распределения РМ-фракций и газообразных примесей, а также оценили потенциальные экологические риски для населения. Вместе с тем критический анализ литературы показывает, что большинство исследований по Казахстану по-прежнему сосредоточено преимущественно на изучении массовых концентраций PM_{2.5} и PM₁₀, а также нормировании с установленными уровнями газовых примесей, тогда как элементный состав аэрозольных частиц изучен ограниченно. Полученные обобщения подтверждают необходимость развития комплексного мониторинга РМ-фракций, ориентированного на анализ элементного состава, источников загрязнения и долгосрочных рисков для здоровья населения.

Установлено, что отечественные исследования существенно уступают современной международной практике в части комплексного анализа тяжелых металлов, токсичных элементов и геохимических индикаторов загрязнения. Выявлено, что недостаточная детализация химического состава РМ-фракций ограничивает возможности идентификации источников загрязнения, токсикологической оценки и анализа долгосрочных рисков для здоровья населения.

Следовательно, основной научный пробел заключается в недостатке комплексных данных по элементному составу PM_{2.5} и PM₁₀ в промышленных городах Казахстана, включая Усть-Каменогорск и Павлодар. Определено, что отсутствие подобных данных ограничивает возможность установления взаимосвязей между аэрозольной нагрузкой и ростом сердечно-сосудистых, респираторных и канцерогенных заболеваний населения. В этой связи исследования, ориентированные на комплексный анализ элементного состава твердых частиц атмосферных аэрозолей с использованием современных аналитических и геохимических методов, обладают высокой научной значимостью и являются необходимым этапом совершенствования экологического мониторинга и природоохранной политики Казахстана.

3. Заключение

Таким образом, в результате анализа около 100 научных источников установлено, что в Казахстане активно развиваются исследования, посвященные оценке качества атмосферного воздуха, прежде всего в крупных урбанизированных и промышленных центрах. Показано, что в последние годы значительно возросло внимание к мониторингу мелкодисперсных аэрозольных частиц PM_{2.5} и PM₁₀, однако основные исследования по-прежнему сосредоточены преимущественно на оценке их массовых концентраций и сезонной динамики. Вместе с тем выявлено, что данные о химическом и элементном составе атмосферных аэрозолей для промышленных городов Казахстана остаются крайне ограниченными и фрагментарными. Установлено, что вопросы накопления токсичных элементов, идентификации источников загрязнения и оценки их потенциального воздействия на здоровье населения изучены недостаточно, что существенно ограничивает возможности объективной экологической и санитарно-гигиенической оценки качества атмосферного воздуха.

В ходе критического сопоставления международных и казахстанских исследований выявлен разрыв между современными мировыми подходами и существующей практикой исследований в Казахстане. Показано, что международные исследования ориентированы на комплексный анализ элементного состава PM_{2.5} и PM₁₀, применение геохимических индикаторов, методов источниковой аппроксимации и оценки токсикологических рисков, тогда как для Усть-Каменогорска, Павлодара и других промышленных регионов подобные исследования носят единичный характер. Установлено, что химико-элементный анализ PM_{2.5} является ключевым инструментом для выявления локальных и трансграничных источников загрязнения, оценки вклада промышленности, энергетики и транспорта, а также прогнозирования экологических и медико-биологических последствий аэрозольного загрязнения.

Следовательно, определено, что одним из ключевых научных пробелов является отсутствие системных исследований элементного состава PM_{2.5} и PM₁₀ в условиях высокой промышленной нагрузки. Обоснована необходимость проведения комплексных исследований атмосферных аэрозолей с использованием современных аналитических и геохимических методов, а также интеграции данных о составе РМ в систему экологического мониторинга Казахстана. Полученные результаты могут служить научной основой для совершенствования оценки риска, разработки эффективных природоохранных мер и повышения результативности государственной политики в области управления качеством атмосферного воздуха.

4. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

5. Вклады авторов

Концептуализация - К.Ж., Ж.Б., А.Т.; методология - А.Т., Н.М., Аж.Т., Е.Ш.; программное обеспечение - А.Т., М.А.; валидация - К.Ж., Ж.Б.; формальный анализ - Аж.Т., Н.М.; исследование - А.Т., Аж.Т. Н.М., М.А.; ресурсы - А.Т.; курирование данных - Ж.Б., Н.М.; написание - подготовка оригинального черновика - А.Т.; написание - рецензирование и редактирование - А.Т., Аж.Т., Н.М., Ж.Б.; визуализация - А.Т.; руководство - К.Ж., Ж.Б.; администрирование проекта - К.Ж., Ж.Б., Н.М.; получение финансирования - Н.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

6. Информация об авторах

Байгазинов, Жанат - председатель правления АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1, Курчатова, Абайская область, Казахстан, 071410; zh.baigazinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0348-8473>

Темиржанова, Арай - докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан, 050040; arayt1010@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2820-2731>

Мухамедияров, Нурлан - докторант, НАО «Университет имени Шакарима города Семей», ул. Глинки, 20 А, Семей, Абайская область, Казахстан, 071410; nurlan.eventumlab@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5073-5978>

Жумадилов, Касым - заведующий Международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологий», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан, 010008; zhumadilovk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0205-4585>

Ташекова, Ажар - PhD, АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1 Курчатова, Абайская область, Казахстан, 071410; zhymanova.13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2367-6498>

Шакенов, Ербол - научный сотрудник АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1, Курчатова, Абайская область, Казахстан, 071410; erbolshakenov82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5707-8955>

Актаев, Медет - PhD, главный инженер, ТОО «Baiterek Engineering», проспект Тұран, 55/11, Астана, Казахстан, 010000; medet_aktaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0651-630X>

7. Финансирование: Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27101493 «Разработка стратегии снижения загрязнения воздуха в промышленных городах Казахстана, основанная на идентифицировании распределения источников загрязнения»).

8. Благодарности: Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению качества и научного содержания статьи. Особая признательность выражается редакторам журнала за техническую поддержку, внимательное сопровождение рукописи и помощь в подготовке статьи к публикации.

9. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

10. Список литературы

1. Agibayeva, A., Karaca, F., Guney, M., Bex, T., & Avcu, E. (2023). Annual and periodic variations of particulates and selected gaseous pollutants in Astana, Kazakhstan: source identification via conditional bivariate probability function. *Aerosol Science and Engineering*, 7, 502-516. <https://doi.org/10.1007/s41810-023-00194-5>
2. Allen, A. G., Nemitz, E., Shi, J. P., Harrison, R. M., & Greenwood, J. C. (2001). Size distributions of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom. *Atmospheric Environment*, 35(27), 4581 - 4591. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00190-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00190-X)
3. Aluminium of Kazakhstan JSC. (2025). Official website of Aluminium of Kazakhstan - bauxite mining and alumina production, part of Eurasian Resources Group [Web page]. <https://aluminium.erg.kz/>
4. Arruti, A., Fernández-Olmo, I., & Irabien, A. (2010). Evaluation of the contribution of local sources to trace metals levels in urban PM_{2.5} and PM₁₀ in the Cantabria region (Northern Spain). *Journal of Environmental Monitoring*, 12(7), 1451-1458. <https://doi.org/10.1039/b926740a>
5. Anggraini, Z., Santoso, M., & Sofyan, A. (2024). Characteristics of fine particulate matter (PM_{2.5}) chemical composition in the North Jakarta industrial area. *Environment and Natural Resources Journal*, 22(3), 222-231. <https://doi.org/10.32526/ennrj/22/20230300>
6. Assanov, D., Zapasnyi, V., & Kerimray, A. (2021a). Air quality and industrial emissions in the cities of Kazakhstan. *Atmosphere*, 12(3), 314. <https://doi.org/10.3390/atmos12030314>
7. Assanov, D., Kerimray, A., Batkeyev, B., & Kapsalyamova, Z. (2021b). The effects of COVID-19-related driving restrictions on air quality in an industrial city. *Aerosol and Air Quality Research*, 21, 200663. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200663>

8. Assanov, D., Radelyuk, I., Perederiy, O., Galkin, S., Maratova, G., Zapasnyi, V., & Klemeš, J. J. (2022). Spatiotemporal patterns of air pollution in an industrialised city - a case study of Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. *Atmosphere*, 13(12), 1956. <https://doi.org/10.3390/atmos13121956>
9. Ayers, G. P., Yeung, K. K. (1996). Acid deposition in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 30(9), 1581-1587.
10. Baimatova, N., Omarova, A., Muratuly, A., Tursumbayeva, M., Ibragimova, O., Bukenov, B., & Kerimray, A. (2022). Seasonal variations and effect of COVID-19 lockdown restrictions on the air quality in the cities of Kazakhstan. *Environmental Processes*, 9(48). <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00603-w>
11. Baisanov, A., Spivak-Lavrov, I., & Bebenin, A. (2025). Analysis of changes in atmospheric air pollution in industrial cities of Kazakhstan based on environmental monitoring data (Analiz izmeneniy ekologicheskogo zagryazneniya atmosfernogo vozdukha v promyshlennykh gorodakh Kazakhstana na osnove dannyykh monitoringa okruzhayushchey sredy in Russian). *Hydrometeorology and ecology (Gidrometeorologiya i ekologiya)*, 120(5), 57-65. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2025-120-5-57-65>
12. Bartaria, V., Jangid, A., & Kumar, R. (2024). Characterization of aerosol (PM10, PM2.5, PM1.0, AOD) and black carbon at ARFI network Agra. In *National Conference on Emerging Trends in Science, Engineering and Management*. BSACET, Mathura, India.
13. Bekbossinova, A., & Niyazbekov, A. (2024). Impact of urbanization on air quality in largest cities of Kazakhstan. *Eurasian Journal of Economic and Business Studies*, 68(3), 66-81. <https://doi.org/10.47703/ejeb.v68i3.419>
14. Bergin, M. H., Cass, G. R., Xu, J., Fang, C., Zeng, L. M., Yu, T., Salmon, L. G., Kiang, C. S., Tang, X. Y., Zhang, Y. H., & Chameides, W. L. (2001). Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 17969-17980. <https://doi.org/10.1029/2001JD900073>
15. Bhanot, D., Jadhav, Y., Tiwari, G., Walia, A. (2025). Environmental implications of heavy metal deposition and particulate matter in coal mining ecosystems. *NE Sciences*, 10(1), 325-339. <https://doi.org/10.28978/nesciences.1648723>
16. Bi, X. H., Sheng, G. Y., Peng, P. A., Zhang, Z. Q., Fu, J. M. (2002). Extractable organic matter in PM10 from LiWan District of Guangzhou City, PR China. *Science of the Total Environment*, 300(1-3), 213-228. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00272-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00272-3)
17. Biloshchytskyi, A., Neftissov, A., Kuchanskyi, O., Andrashko, Y., Biloshchytska, S., Mukhatayev, A., & Kazambayev, I. (2024). Fractal analysis of air pollution time series in urban areas in Astana, Republic of Kazakhstan. *Urban Science*, 8(3), 131. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030131>
18. Buseck, P. R., & Adachi, K. (2008). Nanoparticles in the atmosphere. *Elements*, 4(6), 389-394. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.6.389>
19. Canadian Council of Ministers of the Environment. (2025). *Canadian ambient air quality standards (CAAQS) handbook* (PN 1645). <https://ccme.ca/en/res/caaqshandbook.pdf>
20. Central Pollution Control Board. (2019). *National ambient air quality standards (NAAQS) 2019*. Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India. https://aqmx.org/sites/default/files/resources/NAAQS_2019.pdf
21. Chen, Y., Chen, S., Zhao, D., Li, J., Bi, H., Lou, G., & Guan, Y. (2022). The role of boundary layer height in India on transboundary pollutions to the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 837, 155816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155816>
22. Cho, C., Park, G., & Kim, B. (2013). An effectiveness of simultaneous measurement of PM10, PM2.5, and PM1.0 concentrations in Asian dust and haze monitoring. *Journal of Environmental Science International*, 22(6), 651-659. <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.6.651>
23. Ehrlich, C., Noll, G., Kalkoff, W., Baumbach, G., & Dreiseidler, A. (2007). PM10, PM2.5 and PM1.0 - Emissions from industrial plants - Results from measurement programmes in

- Germany. *Atmospheric Environment*, 41(29), 6236-6254. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.059>
24. *Environmental bulletin on the state of the environment in East Kazakhstan and Abai regions* (2024a) (Informatsionnyy byulleten' o sostoyanii okruzhayushchey sredy po Vostochno-Kazakhstanskoy i Abayskoy oblastyam in Russian). Ust-Kamenogorsk (Ust'-Kamenogorsk).
 25. *Environmental bulletin on the state of the environment in Pavlodar region* (2024b) (Informatsionnyy byulleten' o sostoyanii okruzhayushchey sredy po Pavlodarskoy oblasti in Russian). Pavlodar (Pavlodar).
 26. European Parliament & Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe* (CELEX No. 32008L0050). *Official Journal of the European Union*, L 152, 1–44. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050>
 27. Genga, A., Siciliano, T., Siciliano, M., Aiello, D., & Tortorella, C. (2018). Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(8), 456. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6826-9>
 28. Han, J., Lim, S., Lee, M., Lee, Y., Lee, G., Shim, C., & Chang, L.-S. (2022). Characterization of PM_{2.5} mass in relation to PM_{1.0} and PM₁₀ in megacity Seoul. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16, 20211204. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.124>
 29. Houthuijs, D., Breugelmans, O., Hoek, G., Vaskövi, É., Miháliková, E., Pastuszka, J., Jirik, V., Sachelarescu, S., Lolova, D., Meliefste, K., Uzunova, E., Marinescu, C., Volf, J., de Leeuw, F., Wiel, H., Fletcher, T., Lebret, E., & Brunekreef, B. (2001). PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Central and Eastern Europe. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2757-2771. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00123-6)
 30. Huang, J., Cai, A., Wang, W., He, K., Zou, S., & Ma, Q. (2024). The variation in chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} before, during, and after COVID-19 restrictions in Zhengzhou, China. *Toxics*, 12(1), 81. <https://doi.org/10.3390/toxics12010081>
 31. Hu, C., Chao, M., Wu, K., Chang-Chein, G., Lee, W., Chang, L. W., & Lee, W. (2003). Characterization of multiple airborne particulate metals in the surroundings of a municipal waste incinerator in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 37(20), 2845-2852. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00208-5)
 32. Hu, Y., Yu, H., Kang, S., Yang, J., Rai, M., Yin, X., Chen, X., & Chen, P. (2024). Aerosol-meteorology feedback diminishes the transboundary transport of black carbon into the Tibetan Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(1), 85-107. <https://doi.org/10.5194/acp-24-85-2024>
 33. IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
 34. IQAir.com. (2025). *World's most polluted countries 2025 (PM_{2.5})*. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>
 35. Joksić, J., Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Radenković, M., Yttri, K.-E., Matić-Besarabić, S., & Ignjatović, L. (2009). Physical and chemical characterization of the particulate matter suspended in aerosols from the urban area of Belgrade. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 74(11), 1319-1333. <https://doi.org/10.2298/JSC09111319J>
 36. KazDATA. (n.d.). Kazakh business directory: catalog of Kazakhstan [Web page]. KazDATA. <https://kazdata.kz/04/katalog-kazakhstan.html>
 37. Kenessariyev, U., Golub, A., Brody, M., Dosmukhametov, A., Amrin, M., Erzhanova, A., & Kenessary, D. (2013). Human health cost of air pollution in Kazakhstan. *Journal of Environmental Protection*, 4(8), 869-876. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.48101>
 38. Kenessary, D., Kenessary, A., Adilgireiuly, Z., Akzholova, N., Erzhanova, A., Dosmukhametov, A., Syzdykov, D., Masoud, A. R., & Saliev, T. (2019). Air pollution in Kazakhstan and its

- health risk assessment. *Annals of Global Health*, 85(1), 133. <https://doi.org/10.5334/aogh.2535>
39. Kerimray, A., Azbanbayev, E., Kenessov, B., Plotitsyn, P., Alimbayeva, D., & Karaca, F. (2020a). Spatiotemporal variations and contributing factors of air pollutants in Almaty, Kazakhstan. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(6), 1340-1352. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0464>
40. Kerimray, A., Assanov, D., Kenessov, B., & Karaca, F. (2020b). Trends and health impacts of major urban air pollutants in Kazakhstan. *Journal of the Air Waste Management Association*, 70(11), 1148-1164. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1813837>
41. Khobragade, P. P., & Ahirwar, A. V. (2019). Heavy metals in PM10 aerosols over an urban industrial city. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1), 1402 - 1408. <https://doi.org/10.35940/ijeat.A1225.109119>
42. Kim, S. Y., Olives, C., Sheppard, L., Sampson, P. D., Larson, T. V., Keller, J. P., & Kaufman, J. D. (2017). Historical prediction modeling approach for estimating long-term concentrations of PM2.5 in cohort studies before the 1999 implementation of widespread monitoring. *Environmental Health Perspectives*, 125(1), 38-46. <https://doi.org/10.1289/EHP131>
43. Kim, P., Shin, S., Kim, C., Park, J.-S., Hwang, K., Kim, J. B., Park, J., & Kim, J. (2024). Annual variations of PM10, PM2.5 and PM1.0 fraction at an urban site in Ansan, Korea. *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 27(3), 175-184. <https://doi.org/10.36278/jeaht.27.3.175>
44. Lee, L. Y., Kerry, R., Ingram, B., Golden, C. S., & LeMonte, J. J. (2024). Investigating the spatial patterns of heavy metals in topsoil and asthma in the western Salt Lake Valley, Utah. *Environments*, 11(10), Article 223. <https://doi.org/10.3390/environments11100223>
45. Li, H., He, Q., & Liu, X. (2020). Identification of long-range transport pathways and potential source regions of PM2.5 and PM10 at Akedala Station, Central Asia. *Atmosphere*, 11(11), 1183. <https://doi.org/10.3390/atmos11111183>
46. Li, Y., Wang, X., Xu, P., Gui, J., Guo, X., Yan, G., Fei, X.-H., & Yang, A. (2024). Chemical characterization and source identification of PM2.5 in the Huaxi urban area of Guiyang. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81048-z>
47. Liu, H., Wang, Q., Wei, P., Zhang, Q., Qu, Y., Zhang, Y., Tian, J., Xu, H., Zhang, N., Shen, Z., Su, H., Han, Y., & Cao, J. (2024). The impacts of regional transport on anthropogenic source contributions of PM2.5 in a basin city, China. *Science of the Total Environment*, 917, 170038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170038>
48. Ma, J., Bi, J., Li, B., Zhu, D., Wang, X., Meng, Z., & Shi, J. (2024). Aerosol vertical structure and optical properties during two dust and haze episodes in a typical valley basin city, Lanzhou of Northwest China. *Remote Sensing*, 16(5), 929. <https://doi.org/10.3390/rs16050929>
49. Makkonen, U., Vestenius, M., Huy, L. N., Anh, N. T. N., Linh, P. T. V., Thuy, P. T., Phuong, H. T. M., Nguyen, H., Thuy, L. T., Aurela, M., Hellén, H., Loven, K., Kouznetsov, R., Kyllönen, K., Teinilä, K., & Kim Oanh, N. T. (2023). Chemical composition and potential sources of PM2.5 in Hanoi. *Atmospheric Environment*, 299, 119650. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119650>
50. Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. (2022). *Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan No. QR DSM-70 of 2 August 2022 «On approval of hygienic standards for ambient air quality in populated areas»* (Prikaz Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan No. QR DSM-70 ot 2 avgusta 2022 g. «Ob utverzhdenii gigienicheskikh normativov kachestva atmosfernogo vozdukha naselyonnykh mest»), Astana (Astana). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029011>
51. Motallebi, N., Taylor, C. A., Jr., Turkiewicz, K., & Croes, B. E. (2003). Particulate matter in California: Part 1-Intercomparison of several PM2.5, PM10-2.5, and PM10 monitoring

- networks. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(12), 1509-1516. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466322>
52. Mukhamediyarov, N. Zh., Kolbin, V. V., Temirzhanova, A. E., Dyusembaeva, M. T., Dashuk, A. L., Kruglykhin, A. A., Shakenov, E. Z., Suyundukov, Zh. Zh., Nurgaysinova, N. K., & Tashekova, A. Zh. (2023, September 12-14). Chemical element content in suspended particles of the air in Ust-Kamenogorsk (Soderzhaniye khimicheskikh elementov vo vzveshennykh chastitsakh vozdukha goroda Ust'-Kamenogorsk). *Semipalatinsk test site: Legacy and prospects for the development of scientific and technical potential. Proceedings of the 10th International Conference (Semipalatinskiy ispytatel'nyy poligon: naslediye i perspektivy razvitiya nauchno-tehnicheskogo potentsiala. Materialy X mezhdunarodnoy konferentsii)*. Kurchatov (Kurchatov). <https://www.nnc.kz/ru/conferences/x-mejdunarodnaya-konferenciya-semipalatinskiy-ispytatelnyy-poligon-nasledie-i-perspektivy-razvitiya-nauchno-tehnicheskogo-potenciala>
53. Mukhtarov, R., Ibragimova, O., Omarova, A., Tursumbayeva, M., Tursun, K., Muratuly, A., Karaca, F., & Baimatova, N. (2023). An episode-based assessment for the adverse effects of air mass trajectories on PM_{2.5} levels in Astana and Almaty, Kazakhstan. *Urban Climate*, 49, 101541. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101541>
54. Nautiyal, S., Joshi, V., Gautam, A., Kumar, R., Kumar, S., Singh, K., & Gautam, S. (2025). Characterization and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in a Mountain Valley: seasonal variations, morphology, and elemental composition. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 82(1), 9469. <https://doi.org/10.1007/s10874-025-09469-2>
55. Nayebar, S. R., Aburizaiza, O. S., Siddique, A., Hussain, M. M., Zeb, J., Khatib, F., Carpenter, D. O., Blake, D. R., & Khwaja, H. A. (2022). Understanding the sources of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) in Jeddah, Saudi Arabia. *Atmosphere*, 13(5), 711. <https://doi.org/10.3390/atmos13050711>
56. Offor, I. F., Adie, G. U., & Ana, G. R. (2016). Review of particulate matter and elemental composition of aerosols at selected locations in Nigeria from 1985-2015. *Journal of Health and Pollution*, 6(10), 1-18. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-6-10.1>
57. Pak, Y., Pak, D., Ibragimova, D., Matonin, V., & Tebayeva, A. (2025). Assessment of natural radioactivity and trace element composition of coals and ash and slag waste in Kazakhstan. *Atmosphere*, 16(2), 125. <https://doi.org/10.3390/atmos16020125>
58. Pakkanen, T. A., Loukkola, K., Ojanen, C., Korhonen, C., Aurela, M., Mäkelä, T., Hillamo, R. E., Aarnio, P., Koskentalo, T., Kousa, A., Maenhaut, W. (2001). Sources and chemical composition of fine and coarse particles in the Helsinki area. *Atmospheric Environment*, 35(32), 5381-5391. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00307-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00307-7)
59. Park, K., & Dam, H. D. (2010). Characterization of metal aerosols in PM₁₀ from urban, industrial, and Asian dust sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160, 289-300. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0695-6>
60. Pavlodar Oil Chemistry Refinery. (2025). *Official website of Pavlodar Petrochemical Plant (TOO "PNHZ") - company information, news, products, and policies*. <https://www.pnhz.kz/>
61. Pekney, N. J., & Davidson, C. I. (2005). Determination of trace elements in ambient aerosol samples. *Analytica Chimica Acta*, 540(2), 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.03.065>
62. Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
63. Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520-7540. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>
64. Putaud, J.-P., Raes, F., Van Dingenen, R., Brüggemann, E., Facchini, M.-C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hüglin, C., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Mihalopoulos, N., Müller, K., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tørseth, K., &

- Wiedensohler, A. (2004). A European aerosol phenomenology - 2: Chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 38(16), 2579-2595. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.041>
65. Putaud, J.-P., Cavalli, F., Yttri, K. E., Chow, J. C., Watson, J. G., Sinha, B., Venkataraman, C., Ikemori, F., Jaffrezo, J.-L., Uzu, G., Moreno, I., Krejci, R., Laj, P., Gupta, T., Hu, M., Kim, S.-W., Mayol-Bracero, O., Quinn, P., Aas, W., Alastuey, A., & Yadav, K. (2025). A worldwide aerosol phenomenology: Elemental and organic carbon in PM_{2.5} and PM₁₀. *Atmospheric Environment*, 358, 121338. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121338>
66. Ravshanov, Z., Abdullaev, Z., & Khafizov, O. (2020). Atmospheric dispersion modelling of dust emissions from the dried bottom of the Aral Sea. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 896(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012045>
67. Remoundaki, E., Bourliva, A., Kokkalis, P., Mamouri, R.-E., Papayannis, A., Grigoratos, T., Samara, C., & Tsezos, M. (2011). PM₁₀ composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). *Science of the Total Environment*, 409, 4361-4372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.026>
68. Rodríguez, S., & Lopez, J. (2024). Extreme Saharan dust events expand northward over the Atlantic and Europe, prompting record-breaking PM₁₀ and PM_{2.5} episodes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 12031-12053. <https://doi.org/10.5194/acp-24-12031-2024>
69. Ryu, Y.H., & Min, S.K. (2024). Anthropogenic warming degrades spring air quality in Northeast Asia by enhancing atmospheric stability and transboundary transport. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(50). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00603-7>
70. Safarov, R., Shomanova, Z., Nossenko, Y., Kopishev, E., Bexeitova, Z., & Kamatov, R. (2024). Spatial analysis of air pollutants in an industrial city using GIS-based techniques: A case study of Pavlodar, Kazakhstan. *Sustainability*, 16(17), 7834. <https://doi.org/10.3390/su16177834>
71. Sah, D. (2024). Chemical characteristics and public health risk assessment of PM_{2.5}-bound elements in Sheohar, India. *Aerosol Science and Engineering*, 8. <https://doi.org/10.1007/s41810-024-00215-x>
72. Schraufnagel, D. E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Experimental Molecular Medicine*, 52, 311-317. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>
73. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.
74. Taye, A., Chandravanshi, B., Beshah, F., & Sahle-Demessie, E. (2024). Elemental composition and health risk assessment of PM₁₀, PM_{2.5} at different microenvironments: Addis Ababa, Ethiopia. *PLOS ONE*, 19, e0309995. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309995>
75. Temirbekov, N., Tamabay, D., & Tanashova, M. (2025). Spread of harmful substances in the atmosphere of industrial cities of Kazakhstan: Modeling and data refinement. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 37(1), 636-647. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v37.i1.pp636-647>
76. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2022). *Air pollution: Convention on long-range transboundary air pollution (CLRTAP)*. <https://unece.org/environmental-policy-1/air>
77. U.S. Environmental Protection Agency. (2025, November 10). *Timeline of particulate matter (PM) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. U.S. EPA. <https://www.epa.gov/pm-pollution/timeline-particulate-matter-pm-national-ambient-air-quality-standards-naaqs>
78. Van Dingenen, R., Raes, F., Putaud, J.-P., Baltensperger, U., Charron, A., Facchini, M.-C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.-C., Harrison, R. M., Hüglin, C., Jones, A. M., Laj, P., Lorbeer, G., Maenhaut, W., Palmgren, F., Querol, X., Rodriguez, S., Schneider, J., ten Brink, H., Tunved, P., Tørseth, K., Wehner, B., Weingartner, E., Wiedensohler, A., & Wåhlin, P. (2004). A European aerosol phenomenology-1: Physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 38(16), 2561-2577. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.040>

79. Viana, M., Querol, X., & Alastuey, A. (2006). Chemical characterisation of PM episodes in NE Spain. *Chemosphere*, 62(6), 947-956. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.048>
80. Wilson, W. E., Chow, J. C., Claiborn, C., Fusheng, W., Engelbrecht, J., & Watson, J. G. (2002). Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere*, 49(9), 1009-1043. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00270-9)
81. World Health Organization (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>
82. Xu, L., Liu, X., Gao, H., Yao, X., Zhang, D., Bi, L., Liu, L., Zhang, J., Zhang, Y., Wang, Y., Yuan, Q., & Li, W. (2021). Long-range transport of anthropogenic air pollutants into the marine air: Insight into fine particle transport and chloride depletion on sea salts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 17715-17726. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17715-2021>
83. Yabutani, T., Nakamoto, Y., Yamanouchi, R., Thuy le, T. X., Murai, K., Motonaka, J., Ogaki, M., Dancila, M. A., Stanescu, R., & Plesca, M. (2010). Multielemental characterization of airborne particulate matter collected in Bucharest and Tokushima by inductively coupled plasma mass spectrometry and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analytical Sciences*, 26(3), 395-400. <https://doi.org/10.2116/analsci.26.395>
84. Yedilkhan, M., Berdyshev, A., Galiyev, M., & Merembayev, T. (2025). Air quality prediction based on the LSTM with attention using meteorological data in urban area in Kazakhstan. *Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies*, 3(1), 3-12. <https://doi.org/10.26577/jpcsit20253101>
85. Zeb, B., Alam, K., Sorooshian, A., Blaschke, T., Ahmad, I., & Shahid, I. (2018). On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(6), 1431-1447. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.09.0340>
86. Zhang, D., Li, Z., Wu, H., Wu, T., Ren, R., Cai, Z., Liang, C., & Chen, L. (2022a). Analysis of aerosol particle number size distribution and source attribution at three megacities in China. *Atmospheric Environment*, 279, 119114. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119114>
87. Zhang, R., Jing, J., Tao, J., Hsu, S.-C., Wang, G., Cao, J., Lee, S., Zhu, L., Chen, Z., & Zhao, Y. (2013). Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 13, 9953-10007. <https://doi.org/10.5194/acpd-13-9953-2013>
88. Zhang, X., Ji, G., Peng, X., Kong, L., Zhao, X., Ying, R., Yin, W., Xu, T., Cheng, J., & Wang, L. (2022b). Characteristics of the chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} for a one-year period in Wuhan, China. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 79, Article 9431. <https://doi.org/10.1007/s10874-022-09431-6>
89. Zhao, X., Xu, Z., Li, P., Dong, Z., Fu, P., Liu, C.-Q., & Pavuluri, C. M. (2022). Characteristics and seasonality of trace elements in fine aerosols from Tianjin, North China during 2018-2019. *Environmental Advances*, 9, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100263>
90. Zhou, J. Q., Yu, L., Chen, S. X., Lu, J. F., Xu, Y. L., Ji, H. B., Zhang, L. F., Liu, J. S., & Wang, J. (2023). Pollution characteristics of PM_{2.5} chemical composition in Zhejiang Province. *Huan Jing Ke Xue*, 44(3), 1297-1309. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202203118>

Өнеркәсіптік орталықтарда ауа сапасын бақылау: қатты бөлшектерді (PM_{2.5}, PM₁₀) зерттеуге негізделген дүниежүзілік және қазақстандық тәжірибе

Жанат Байғазинов, Арай Теміржанова, Нұрлан Мухамедияров, Қасым Жұмаділов, Ажар Ташекова, Ербол Шакенов, Медет Ақтаев

Аңдатпа. Мақалада Қазақстанның өнеркәсіптік қалалары - Өскемен мен Павлодар атмосфералық ауасының сапасын зерттеуге арналған ғылыми жұмыстарға шолу жасалған. Зерттеу барысында PM_{2.5} және PM₁₀ қатты аэрозольдік бөлшектеріне, сондай-ақ SO₂, NO_x және CO сияқты газ тәрізді ластанушы заттарға ерекше назар аударылды. Жұмыстың мақсаты - Қазақстан мен әлемнің өнеркәсіптік аймақтарындағы атмосфералық ауа мониторингінің қазіргі жағдайын талдау және аэрозольдік ластануды зерттеудегі ғылыми олқылықтарды анықтау. Кешенді зерттеулер санының шектеулі болуына қарамастан, елімізде PM_{2.5} және PM₁₀ концентрацияларын, сондай-ақ басым улы газдарды бақылау бойынша белгілі бір эмпирикалық тәжірибе жинақталған. Бұл урбандалған және индустриялық аймақтардағы техногендік жүктеме деңгейін бағалауға және ауа ластануы құрылымы туралы бастапқы түсінік қалыптастыруға мүмкіндік береді. Жұмыстың ғылыми жаңалығы қатты аэрозольдік бөлшектердің физика-химиялық сипаттамаларын зерттеудегі отандық және шетелдік тәжірибеге салыстырмалы талдау жүргізумен байланысты. Шолу жұмысы барысында Қазақстанда қатты аэрозоль бөлшектерінің элементтік құрамы, морфологиясы және шығу көздерін зерттеу Еуропа, АҚШ, Қытай және Үндістан елдерімен салыстырғанда жеткіліксіз дамығаны көрсетілді. Аталған елдерде PM_{2.5} және PM₁₀ аэрозольдік қатты бөлшектерін тұрақты массалық өлшеу жұмыстары спектроскопиялық және масс-спектрометриялық талдау әдістерімен үйлестірілген кешенді мониторинг жүйелері қолданылады. Мұндай тәсіл ластану көздерін дәлірек анықтауға және атмосфераға зиянды шығарындыларды азайтудың тиімді стратегияларын әзірлеуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижесінде аэрозоль бөлшектерінің химиялық құрамын, маусымдық өзгергіштігін және кеңістіктік-уақыттық таралу заңдылықтарын анықтауға бағытталған кешенді зерттеулерді жалғастыру қажеттілігі туралы қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: ауа сапасы; PM_{2.5}; PM₁₀; атмосфералық аэрозольдер; элементтік құрам; Қазақстанның өнеркәсіптік өңірлері.

Air quality monitoring in industrial centers: global and Kazakh experience based on the study of particulate matters (PM_{2.5}, PM₁₀)

Zhanat Baigazinov, Aray Temirzhanova, Nurlan Mukhamediyarov, Kassym Zhumadilov, Azhar Tashekova, Yerbol Shakenov, Medet Aktayev

Abstract. This article reviews studies on atmospheric air quality in the industrial cities of Kazakhstan - Ust-Kamenogorsk and Pavlodar, focusing on particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and gaseous pollutants, including SO₂, NO_x, and CO. The aim of the study is to analyze the current state of air quality monitoring in the industrial regions of Kazakhstan and worldwide, as well as to identify existing scientific gaps in aerosol pollution research. Although comprehensive studies remain limited, Kazakhstan has accumulated empirical experience in monitoring PM_{2.5}, PM₁₀, and toxic gases, enabling the assessment of anthropogenic impacts and the identification of major air pollution patterns in urban and industrial areas. The scientific novelty of the work lies in the comparative analysis of domestic and international approaches to studying the physicochemical characteristics of particulate matter, including PM_{2.5} and PM₁₀ monitoring practices. The review shows that studies on the elemental composition, morphology, and sources of aerosol particles in Kazakhstan remain insufficiently developed compared to those conducted in Europe, the United States, China, and India, where advanced monitoring systems combine regular PM measurements with spectroscopic and mass spectrometric analyses. Such approaches allow more accurate identification of pollution sources and support the development of effective emission reduction strategies. The study emphasizes the need

for further comprehensive research on the chemical composition, seasonal variability, and spatio-temporal distribution of aerosol particles.

Keywords: Air quality; PM2.5; PM10; atmospheric aerosols; elemental composition; industrial regions of Kazakhstan.