



Научная статья

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Талшын Р. Оразбаева¹, Азамат С. Мадиеков¹ ассоциированный профессор, PhD, Лаура Т. Исмуханова² PhD, Айша А. Мадиекова¹, Ботакоз М. Султанбекова¹

¹ Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; orazbayeva.talshyn@gmail.com (ТРО), madibekov@mail.ru (АСМ), aisha.madibekova@mail.ru (ААМ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС)

² АО «Институт географии и водной безопасности», г. Алматы, Казахстан; l--aura@bk.ru (ЛТИ)

*Автор корреспонденции: Талшын Р. Оразбаева, orazbayeva.talshyn@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

атмосферные осадки, химический состав, сезонность, антропогенное воздействие, мониторинг, пространственная изменчивость

АБСТРАКТ

Проведен многолетний анализ химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за 2005...2024 гг. по данным метеостанций Алматы, Аул-4, Есик, Капшагай, Мынжылкы и Текели. Исследование охватывает урбанизированные, долинные-индустриальные и высокогорные пункты наблюдений, что позволило оценить пространственные различия минерализации и ионного состава осадков. Рассчитаны среднегодовые концентрации основных катионов и анионов, суммарная минерализация, вклад отдельных ионов в общую ионную массу, коэффициенты вариации и корреляционные связи между компонентами.

Суммарная минерализация осадков в большинстве лет составляет 1,06...7,13 мг/дм³ на высокогорной станции Мынжылкы и 8,37...25,9 мг/дм³ в урбанизированных и долинные-индустриальных районах. В структуре главных ионов преобладают Na⁺ (44,0...53,0 %), HCO₃⁻ (18,0...28,0 %) и Ca²⁺ (10,0...18,0 %). Более высокая межгодовая изменчивость минерализации на Аул-4 и в Текели отражает влияние карбонатно-пылевого переноса, локальной антропогенной нагрузки и условий накопления аэрозольных примесей в долинных районах. Корреляционная структура указывает на участие трех факторов формирования состава осадков: карбонатно-пылевого (Ca²⁺-HCO₃⁻; r ≈ 0,87), солевого аэрозольного и техногенно-вторичного (SO₄²⁻-Cl⁻; r = 0,94). Связь минерализации с HCO₃⁻ (r = 0,95) подтверждает значительный вклад карбонатного материала в суммарную ионную нагрузку осадков.

По статье:

Получено: 28.02.2026

Пересмотрено: 04.03.2026

Принято: 06.05.2026

Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:

Оразбаева Т., Мадиеков А., Исмуханова Л., Мадиекова А., Султанбекова Б., Сезонная динамика химического состава осадков юго-восточного Казахстана//

Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 55-66

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные осадки являются не только ключевым компонентом гидрологического цикла, но и интегральным индикатором химического состояния приземной атмосферы. В процессе формирования облачных систем и выпадения осадки аккумулируют газообразные и аэрозольные примеси, включая соединения серы и азота, минеральную пыль, морские соли, продукты биогенных процессов и техногенных выбросов. Их химический состав отражает совокупное воздействие локальных источников загрязнения, регионального и трансграничного переноса аэрозолей, а также природных геохимических факторов. В этом контексте атмосферные осадки рассматриваются как чувствительный инструмент мониторинга изменений качества атмосферы и региональной экологической динамики.

В международной практике химический состав атмосферных осадков широко используется для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ и анализа процессов кислотных выпадений. Долгосрочные программы наблюдений в Европе и Северной Америке (ЕМЕР и NADP) продемонстрировали устойчивую зависимость между концентрациями SO₄²⁻ и NO₃⁻ в осадках и динамикой выбросов энергетического

сектора, а также постепенное снижение кислотной нагрузки вследствие природоохранной политики [1, 2]. В последние десятилетия отмечается трансформация химического профиля осадков: уменьшение доли сульфатов и относительное увеличение вклада нитратов и аммония, что связано с изменением структуры источников выбросов.

Исследования в Восточной Азии подтверждают высокую чувствительность состава осадков к изменению промышленной и транспортной нагрузки. В Китае снижение выбросов SO_2 сопровождалось перестройкой сульфатно-нитратного баланса и изменением ионных соотношений в осадках [3, 4]. В регионах с интенсивным пылевым переносом (Южная Европа, Ближний Восток), установлено значительное влияние карбонатной минеральной пыли на нейтрализацию кислотных соединений и формирование щелочной реакции осадков [5...7]. В горных и предгорных районах дополнительно проявляется роль орографических процессов, определяющих вертикальное распределение аэрозолей и интенсивность их вымывания из атмосферы [8]. Следовательно, химический состав осадков формируется в результате сложного взаимодействия эмиссионных и циркуляционных факторов.

Для Центральной Азии характерно сочетание аридного климата, высокой пылевой активности, выраженной сезонной контрастности атмосферных процессов и растущей антропогенной нагрузки. Регион относится к числу территорий, чувствительных к климатической изменчивости и усилению экстремальных атмосферных явлений, включая пылевые бури и температурные инверсии. Исследования последних лет указывают на значительный вклад минеральной пыли и карбонатных частиц в формирование ионного состава атмосферных осадков, а также на возрастающую роль урбанизированных и промышленных источников [9...11]. Однако большинство работ в регионе сосредоточено либо на анализе снежного покрова, либо на краткосрочных сериях наблюдений, тогда как комплексный многолетний анализ дождевых и снеговых осадков в сопоставлении различных ландшафтных условий остается ограниченным.

Юго-восточная часть Казахстана представляет собой уникальную модельную территорию, где в пределах одного региона сочетаются крупная урбанизированная агломерация (Алматы), индустриально-долинные зоны (Текели, Капшагай), предгорные территории и высокогорные участки Тянь-Шаня (Мынжылкы). Такое разнообразие природных и техногенных условий формирует выраженный пространственный градиент химического состава атмосферных выпадений. Регион характеризуется значительной сезонной контрастностью: в холодный период доминируют антициклональные условия и температурные инверсии, способствующие накоплению загрязняющих веществ, тогда как в теплый сезон активизируются процессы турбулентного перемешивания и пылевого переноса, что делает территорию показательной для изучения сезонной трансформации ионного состава атмосферных осадков.

Несмотря на наличие отдельных исследований атмосферных выпадений в Казахстане, комплексные оценки пространственно-временной динамики химического состава дождевых и снеговых осадков в сопоставлении урбанизированных, промышленных и высокогорных территорий за длительный период (2005...2024 гг.) представлены ограниченно. В ряде работ анализ сосредоточен преимущественно на снежном покрове либо на краткосрочных сериях наблюдений, что усложняет выявление устойчивых сезонных закономерностей, межгодовой динамики и структуры ионных взаимосвязей в многолетнем аспекте.

Научная новизна исследования определяется проведением системной многолетней оценки химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана с комплексным рассмотрением пространственного градиента «урбанизированная зона – индустриально-долинная территория – высокогорная зона», сезонной асимметрии и межгодовой вариабельности в пределах двадцатилетнего ряда наблюдений. В работе выполнена количественная оценка вклада отдельных ионов в формирование суммарной минерализации, рассчитаны коэффициенты вариации для различных ландшафтных

условий и предложена обобщенная корреляционная модель формирования ионного состава осадков, отражающая совокупное влияние природных и антропогенных факторов.

Полученные результаты дополняют представления о механизмах формирования атмосферных выпадений в условиях сочетания аридного климата, активного пылевого переноса и урбанизированной нагрузки. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования химического состава атмосферных осадков в качестве индикатора трансформации аэрозольного состава приземной атмосферы и инструмента долгосрочного экологического мониторинга в условиях климатической изменчивости и усиления техногенного воздействия.

Целью настоящей работы является выявление пространственно-временных закономерностей формирования ионного состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за период 2005...2024 гг. Особое внимание уделено количественной оценке сезонной динамики основных катионов и анионов, анализу межгодовой изменчивости, определению вклада отдельных ионов в суммарную минерализацию и выявлению устойчивых корреляционных связей, характеризующих роль природных и антропогенных факторов в формировании атмосферных выпадений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве источника данных использованы результаты химического анализа атмосферных осадков (снега и дождя), выполненного по многолетним данным наблюдений РГП «Казгидромет» за период 2005...2024 гг.

В анализ включались только фактически представленные значения; периоды отсутствия наблюдений не учитывались и в расчетах пропускались.

В работе использованы показатели кислотности (pH) и концентрации основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), анионов (SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-), биогенных ионов (NO_3^- , NH_4^+), а также суммарная минерализация, рассчитанная как сумма растворенных ионов.

Для выявления пространственно-временных закономерностей выполнены следующие этапы обработки данных:

- расчет среднегодовых значений. Для каждой станции вычислены средние годовые концентрации ионов за период 2005...2024 гг. на основе имеющихся месячных наблюдений. Если данные по отдельным месяцам отсутствовали, расчет производился по фактически представленным значениям без искусственного заполнения.

- анализ межгодовой динамики. Построены многолетние линейные графики изменения концентраций каждого иона и показателя минерализации за 2005...2024 гг. Для оценки общей направленности изменений применена линейная аппроксимация методом наименьших квадратов с построением трендовых линий по фактически имеющимся данным.

- сравнительный пространственный анализ. Проведено сопоставление среднегодовых значений между урбанизированными (Алматы, Аул-4), долинно-индустриальными (Текели, Капшагай, Есик) и высокогорной (Мынжылкы) станциями с целью выявления устойчивых пространственных градиентов.

- корреляционный анализ. Для оценки взаимосвязей между ионными компонентами рассчитана корреляционная матрица по средним годовым значениям за весь период наблюдений (2005...2024 гг.). Коэффициенты корреляции Пирсона использовались для выявления групп ионов, формирующихся под влиянием общих природных или антропогенных факторов.

- графическая визуализация. Построены линейные графики динамики концентраций и корреляционная матрица, обеспечивающие наглядную интерпретацию пространственно-временных закономерностей формирования химического состава атмосферных осадков.

Таким образом, методический подход ориентирован на выявление устойчивых трендов, межгодовой изменчивости и структурных взаимосвязей ионного состава без

применения интегральных индексов загрязнения, что позволяет объективно оценить многолетнюю динамику химического состава атмосферных осадков региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ среднегодовых концентраций основных ионов атмосферных осадков за 2005...2024 гг. по метеостанциям Алматы, Аул-4, Есик, Капчагай, Мынжылкы Текели выявил устойчивую пространственную дифференциацию и межгодовую изменчивость химического состава. Суммарная минерализация на протяжении исследуемого периода в большинстве лет варьировала в пределах 3,74...12,1 мг/дм³ для Алматы, 8,42...26,0 мг/дм³ для Аул-4, 2,31...8,53 мг/дм³ для Есика и Капчагай, 2,50...10,21 мг/дм³ для Текели и 1,06...7,13 мг/дм³ для высокогорной станции Мынжылкы. Исключением является 2005 г., характеризующийся аномально повышенными значениями (до 120...125 мг/дм³ на Аул-4), после чего показатели стабилизируются на существенно более низком уровне. В целом превышение урбанизированных пунктов над высокогорным фоном составляет в среднем 2...4 раза, достигая 5-кратных различий в отдельные годы.

Межгодовая вариабельность минерализации наиболее выражена на Аул-4 и в Текели (коэффициент вариации порядка 40,0...50,0 %), несколько ниже в Алматы (30,0...40,0 %) и минимальна на Мынжылкы (до 25 %), указывает на относительно стабильные фоновые условия и меньшую роль локальных источников загрязнения. Линейные тренды не демонстрируют статистически значимого устойчивого роста или снижения, однако фиксируются синхронные эпизоды повышения на нескольких станциях (2012, 2018, 2022 гг.), могут свидетельствовать о сочетанном влиянии регионального переноса аэрозолей и общего антропогенного воздействия, поскольку в эти годы осадки на разных станциях имели сходный уровень минерализации. Структура ионного состава определяется доминированием натрия, доля которого согласно таблице 1, составляет 44,0...53,0 % суммарной массы главных ионов.

Таблица 1

Средний процентный вклад основных ионов в суммарную массу главных ионов

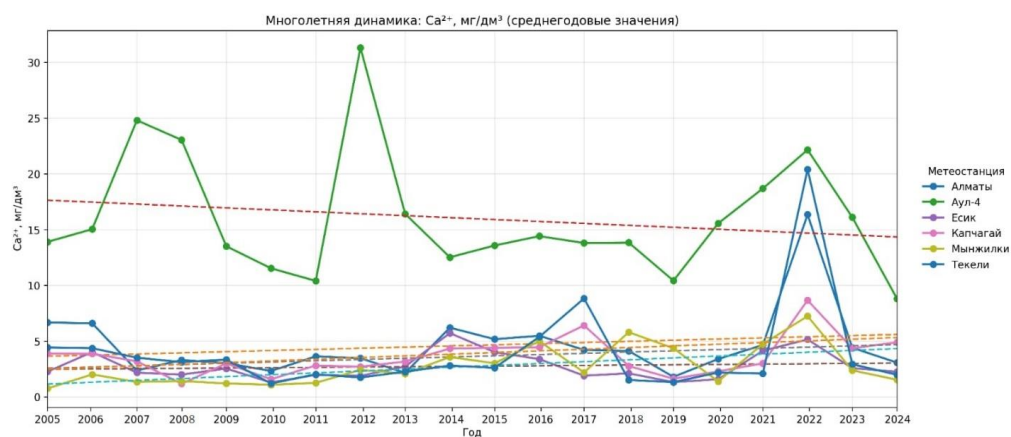
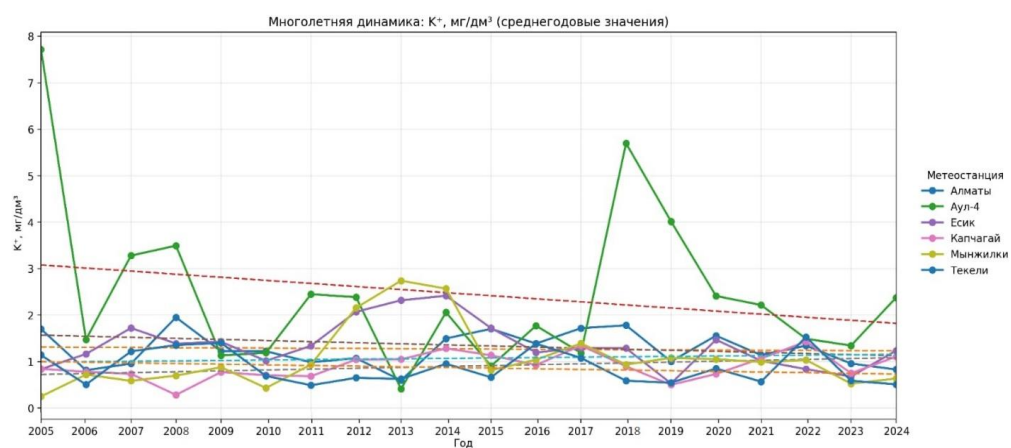
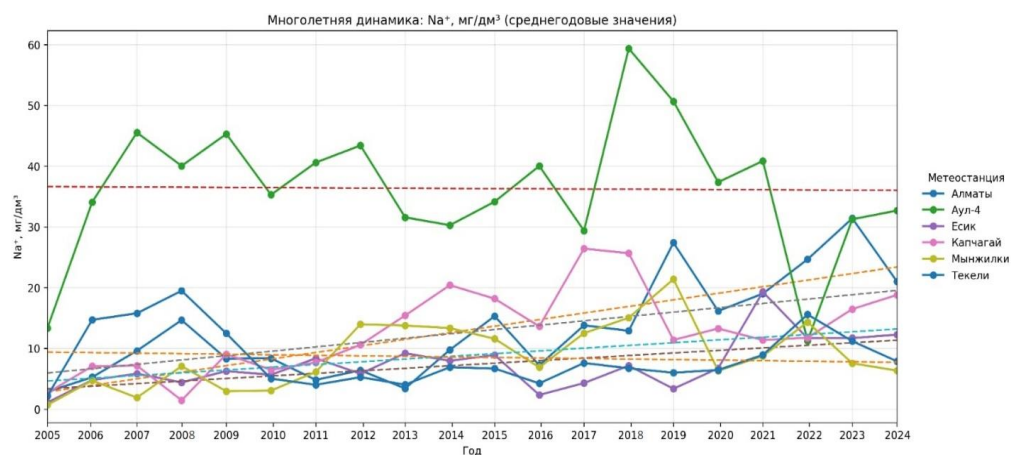
Метеостанция	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
	%						
Алматы	13...18	2...4	44...50	<1	7...11	3...6	18...25
Аул-4	10...15	2...4	48...53	<1	6...10	4...7	18...24
Есик	12...17	2...4	46...51	<1	6...10	3...6	20...26
Капчагай	11...16	2...4	47...52	<1	6...10	3...6	19...26
Мынжылкы	12...18	2...4	45...50	<1	6...10	2...5	22...28
Текели	12...18	2...4	44...50	<1	7...11	3...6	20...27

Среднегодовые концентрации Na⁺ на Аул-4 варьируют преимущественно в диапазоне 37,8...45,3 мг/дм³ с пиковыми значениями до 55,6...59,9 мг/дм³ (2018 г.), тогда как в Алматы и Текели чаще фиксируются значения 4,95...32,2 мг/дм³, в Есике и Капчагае – 4,96...28,2 мг/дм³, а на Мынжылкы – 0,65...21,2 мг/дм³ (рис. 1). Коэффициент вариации Na⁺ достигает 45...55 % в урбанизированных районах и не превышает 25...30 % в высокогорной зоне, что отражает зависимость от локальных и региональных источников солевых аэрозолей.

Кальций занимает второе место по вкладу (10,0...18,0 %). На Аул-4 концентрации Ca²⁺ достигают 25,2...32,1 мг/дм³ (2012 г.), в Алматы и Текели пиковые значения составляют 16,2...20,3 мг/дм³ (2022 г.), тогда как на Мынжылкы в большинстве лет находятся в пределах 1,01...6,54 мг/дм³. Межгодовая изменчивость Ca²⁺ выражена сильнее в долинных районах (CV 35,0...45,0 %), что может быть связано с изменчивостью

карбонатно-пылевого переноса, ресуспензией почвенного материала и особенностями долинной циркуляции, что существенно ниже в высокогорной зоне (около 20,0...25,0 %). Устойчивая положительная корреляция $\text{Ca}^{2+}\text{--HCO}_3^-$ ($r = 0,87$ в зависимости от парного анализа; для совокупности годовых данных $r \approx 0,44$) подтверждает участие карбонатно-пылевого механизма.

Магний и калий играют вспомогательную роль. Концентрации Mg^{2+} на Аул-4 достигают 3,52...4,51 мг/дм³, что может быть связано с локальными особенностями поступления минеральных аэрозолей, карбонатно-магниевых частиц и условиями накопления примесей в долинной зоне, на остальных станциях преимущественно 0,72...2,53 мг/дм³. Калий стабильно остается на уровне <1,09...2,61 мг/дм³, формируя менее 1 % суммарной минерализации.



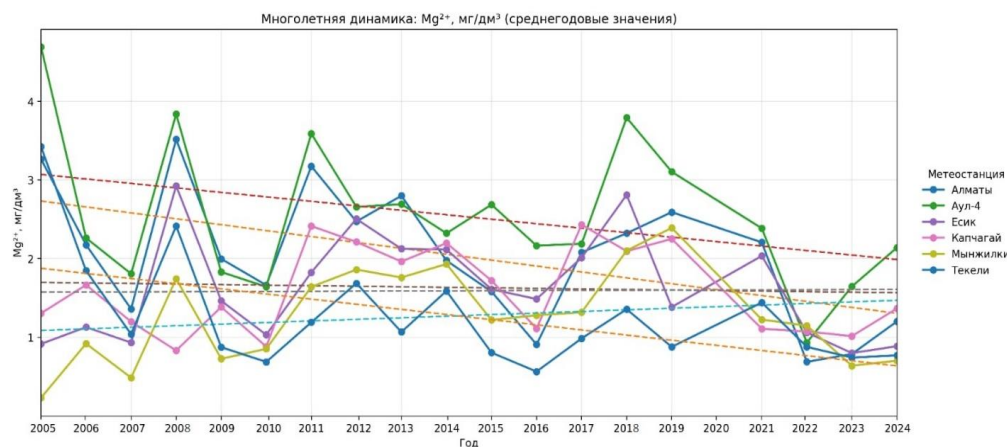
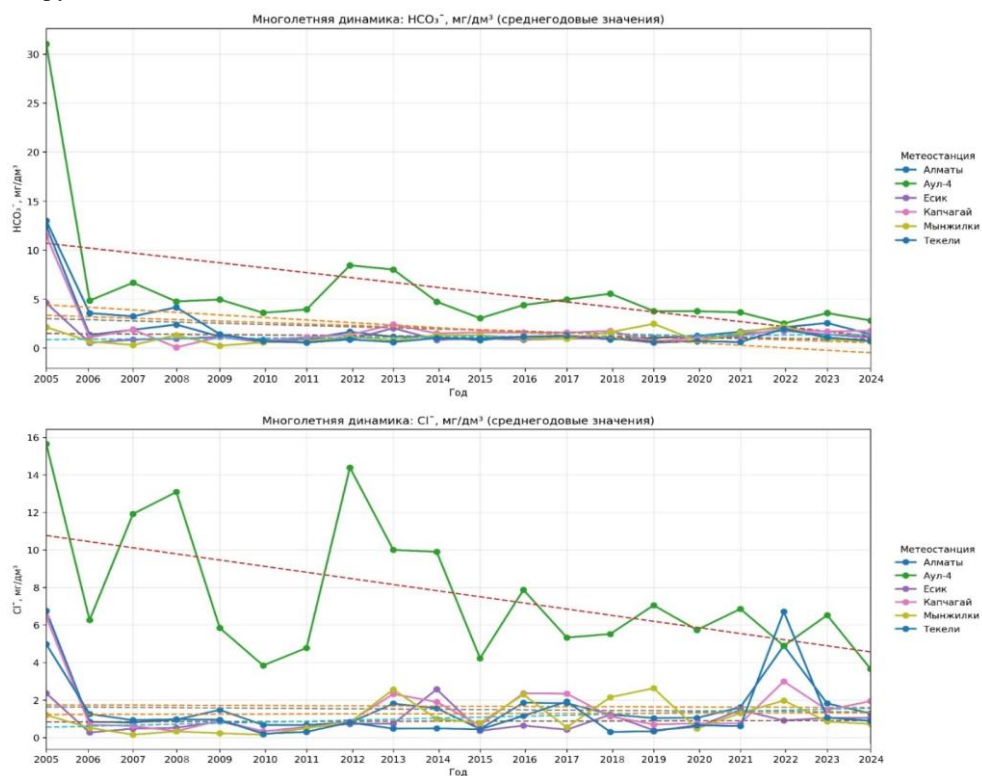


Рисунок 1. Многолетняя среднегодовая динамика катионов по метеостанциям

Анионный состав характеризуется более выраженной межгодовой асимметрией (рис. 2). Сульфаты на Аул-4 достигают 21,5...36,3 мг/дм³ (2005, 2012 гг.), тогда как на остальных станциях их концентрации чаще находятся в пределах 0,51...5,45 мг/дм³. Хлориды демонстрируют схожую динамику: до 14,2...15,9 мг/дм³ на Аул-4 и преимущественно 0,3...3,23 мг/дм³ на Мынжилки. В холодный период содержание SO_4^{2-} и Cl^- возрастает на 40...70 % по сравнению с теплым сезоном, что связано с отопительной нагрузкой и инверсионными условиями.

Гидрокарбонаты составляют 18,0...28,0 % суммарной массы и играют ключевую роль в формировании минерализации. На Аул-4 их концентрации достигают до 32,0 мг/дм³ (2005 г.), в остальные годы – 3,32...9,10 мг/дм³; на Мынжилки – 0,52...2,98 мг/дм³. Наиболее тесная связь установлена между минерализацией и HCO_3^- ($r = 0,95$), что указывает на доминирующую роль карбонатного блока в формировании общей ионной нагрузки.



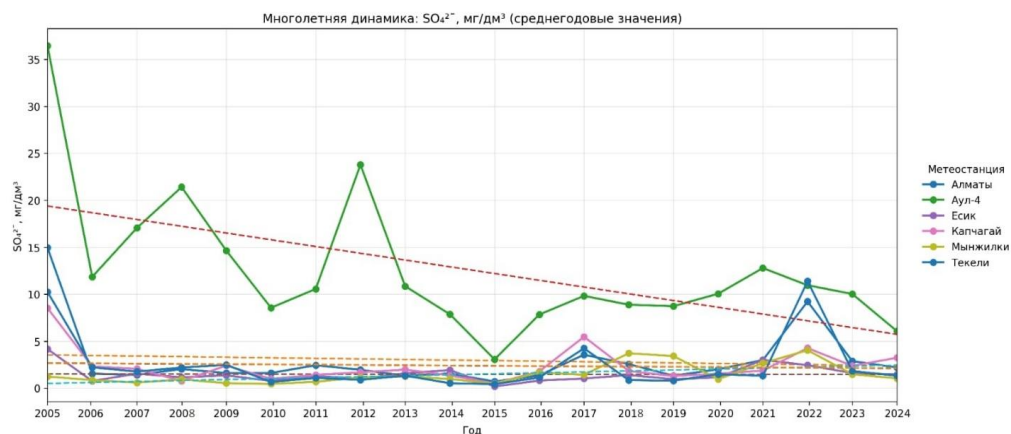


Рисунок 2. Многолетняя среднегодовая динамика анионов по метеостанциям

Анионы типа NH_4 демонстрируют максимальную межгодовую изменчивость (рис. 3). Нитраты на Аул-4 достигают экстремальных значений $180,0 \dots 220,0$ мг/дм^3 (2008, 2012 гг.), тогда как на остальных станциях варьируют преимущественно в пределах $15,1 \dots 80,3$ мг/дм^3 . Экстремальные значения нитратов в отдельные годы требуют дополнительной проверки и, вероятно, отражают эпизоды интенсивного аэрозольного переноса либо особенности отбора проб. Аммоний на большинстве станций в диапазоне $5,64 \dots 7,30$ мг/дм^3 с умеренным ростом к 2020-м годам. Корреляция $\text{NO}_3^- - \text{Na}^+$ ($r = 0,91$) и $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ ($r = 0,94$) свидетельствует о синхронности аэрозольных процессов, тогда как отрицательная связь $\text{NH}_4^+ - \text{HCO}_3^-$ ($r = -0,55$) отражает разнонаправленность карбонатных и кислотно-вторичных процессов.

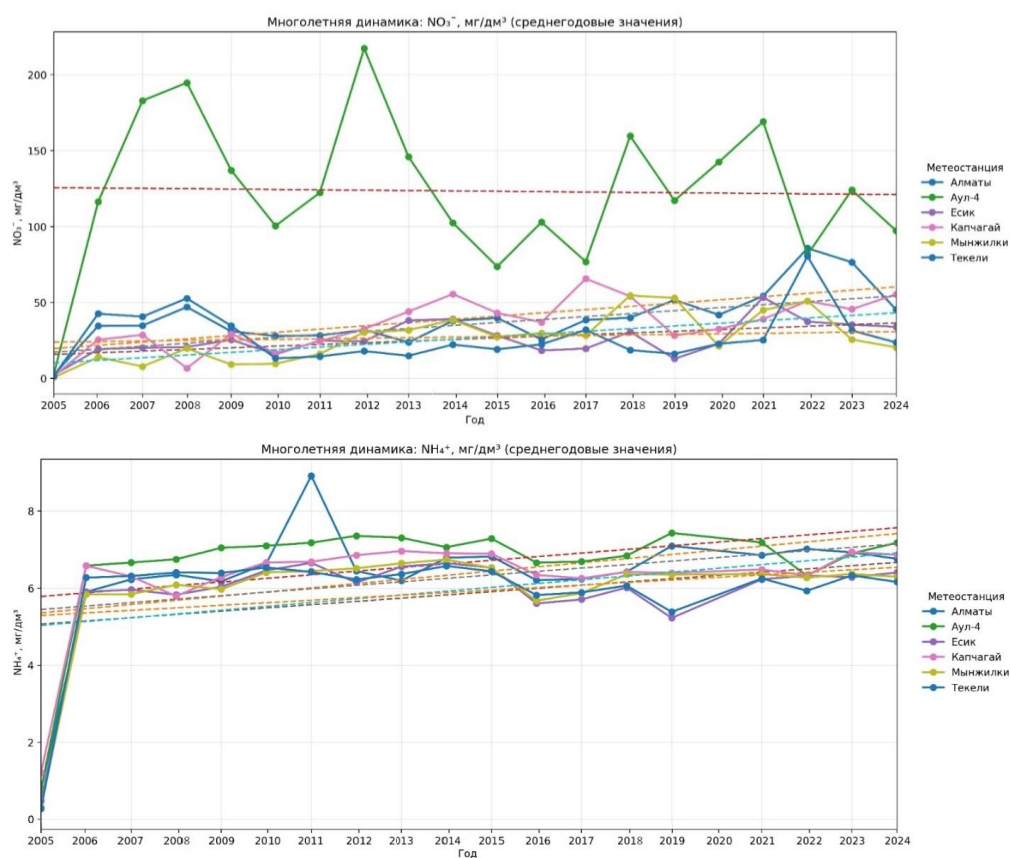


Рисунок 3. Многолетняя среднегодовая динамика анионов по метеостанциям

Анализ реакции среды показал, что pH варьирует преимущественно от 5,3 до 7,6 (рис. 4). Средние значения составляют $6,2 \dots 6,8$ в урбанизированных районах и $5,6 \dots 6,3$ в

высокогорной зоне. В холодный период наблюдается снижение на 0,2...0,4 единицы, что соответствует росту SO_4^{2-} и NO_3^- . Положительная корреляция $\text{pH}-\text{NO}_3^-$ ($r = 0,96$ по совокупным данным) указывает на сложный характер взаимосвязей, обусловленный совместной динамикой ионных блоков.

Корреляционная матрица демонстрирует трехблочную структуру: солевой натриевый (Na^+ , NO_3^-), карбонатный (HCO_3^- , Ca^{2+} , минерализация) и техногенно-вторичный (SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+). Связь минерализации с HCO_3^- ($r = 0,95$) существенно выше, чем с Na^+ ($r = 0,25$), что подтверждает ключевую роль карбонатного компонента в формировании суммарной ионной нагрузки.

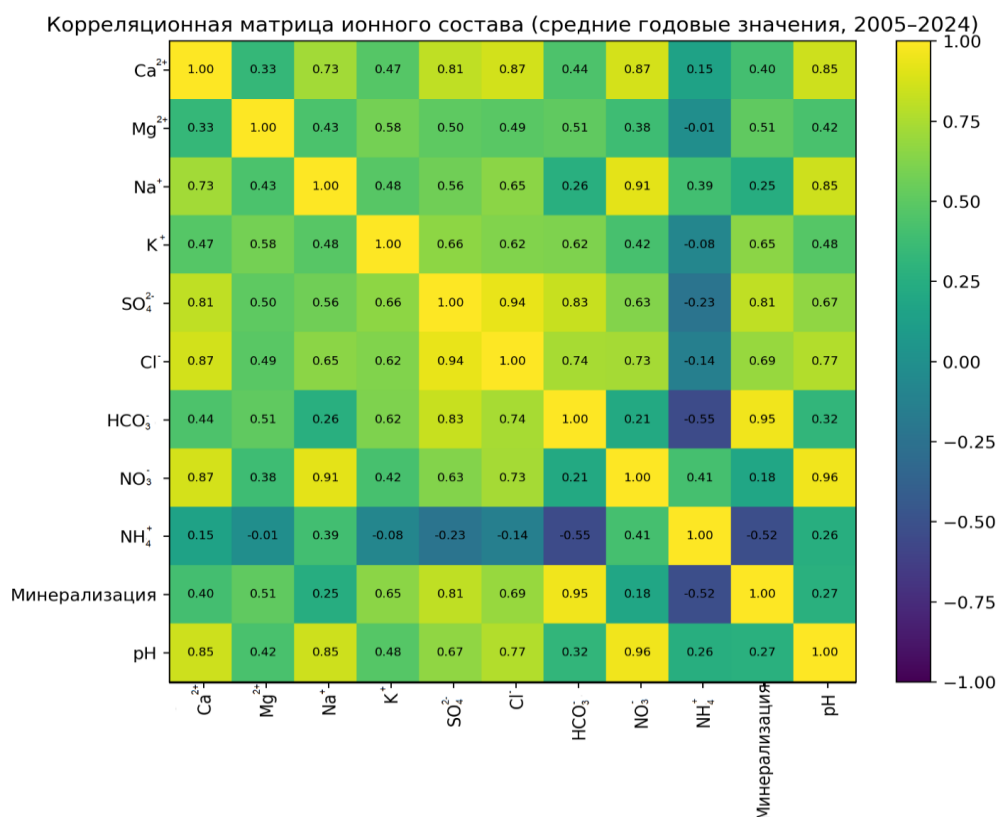


Рисунок 4. Корреляционная матрица химического состава (среднегодовые значения за 2005...2024 гг.)

В совокупности данные свидетельствуют, что химический состав атмосферных осадков юго-востока Казахстана определяется взаимодействием трех устойчивых факторов: солевого натриевого (около 45,0...50,0 % структуры), карбонатно-кальциевого (до 25,0...28,0 %) и вторично-аэрозольного сульфатно-нитратного блока (до 15,0...20,0 %). Пространственный контраст между урбанизированными и высокогорными зонами достигает 3...5-кратных различий, а сезонная амплитуда техногенных анионов составляет 40,0...80,0 %, что подтверждает высокую чувствительность атмосферных осадков к изменению антропогенной нагрузки и региональной циркуляции воздушных масс.

После представления основных результатов необходимо рассмотреть факторы, определяющие выявленные пространственные и межгодовые различия химического состава атмосферных осадков. Межгодовая изменчивость химического состава атмосферных осадков обусловлена сочетанием природных и антропогенных факторов [12, 13]. Для Ca^{2+} и HCO_3^- основное значение имеет переменная интенсивность поступления карбонатно-пылевого материала, связанная с пылевым переносом, ресуспензией почвенных частиц и сезонным состоянием подстилающей поверхности [7, 14]. В долинных районах эти процессы проявляются сильнее вследствие ограниченного

воздухообмена, накопления аэрозольных примесей и влияния локальных источников пыли, тогда как в высокогорной зоне условия формирования осадков ближе к фоновым. Изменчивость Mg^{2+} также может быть связана с поступлением минеральных аэрозолей, включая карбонатно-магниевого частицы [7].

Антропогенное влияние проявляется прежде всего через увеличение содержания SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ и Cl^- , связанных с выбросами отопительного сектора, транспорта, промышленных объектов и процессами вторичного аэрозолеобразования [13, 15]. В предгорных и долинных условиях эти компоненты могут накапливаться в приземном слое атмосферы, особенно в холодный период при температурных инверсиях и слабом вертикальном перемешивании воздуха [16]. Поэтому межгодовые изменения минерализации и отдельных ионов отражают не один фактор, а совместное влияние пылевого переноса, локальной антропогенной нагрузки и региональных метеорологических условий [11, 13, 15].

Вместе с тем выявленная структура факторов не может быть интерпретирована исключительно через призму локальных эмиссий. Межгодовая вариабельность и синхронные изменения концентраций на нескольких станциях (например, одновременные пики 2012, 2018 и 2022 гг.) свидетельствуют о существенном влиянии региональных процессов атмосферной циркуляции. В холодный период доминирование антициклональных условий и температурных инверсий в предгорных и долинных районах способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, что приводит к увеличению содержания SO_4^{2-} , NO_3^- и NH_4^+ в осадках на 40,0...80,0 % по сравнению с теплым сезоном.

В теплый сезон возрастает вклад карбонатно-пылевого компонента вследствие усиления турбулентного перемешивания и подъема минеральной пыли с подстилающей поверхности, что сопровождается ростом концентраций Ca^{2+} и HCO_3^- и увеличением их доли в структуре минерализации. Орографические особенности Иле Алатау формируют устойчивый градиент «долина – предгорье – высокогорье»: станция Мынжылкы фиксирует фоновые параметры (1,06...7,13 мг/дм³ суммарной минерализации), тогда как Алматы и Аул-4 аккумулируют локальные и региональные аэрозольные примеси (до 20,4...26,0 мг/дм³ в отдельные годы).

Периодические синхронные повышения минерализации и концентраций отдельных ионов на нескольких станциях указывают на эпизоды дальнего переноса воздушных масс, вероятно, с индустриально развитых территорий и аридных зон, являющихся источниками минеральной пыли. Таким образом, формирование химического состава атмосферных осадков юго-востока Казахстана определяется сочетанием локальной антропогенной нагрузки и макромасштабных циркуляционных процессов, что подтверждает высокую чувствительность осадков к региональным климатическим и экологическим изменениям.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний анализ химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за 2005...2024 гг. выявил устойчивую пространственную дифференциацию и межгодовую изменчивость ионного состава. После аномального 2005 г. суммарная минерализация в большинстве лет варьировала в пределах 3,74...12,1 мг/дм³ в Алматы, 8,42...26,0 мг/дм³ на Аул-4 и 1,06...7,13 мг/дм³ на высокогорной станции Мынжылкы, что отражает 2...4-кратный пространственный контраст между урбанизированными и фоновыми условиями.

В структуре ионного состава доминирует натрий (44,0...53,0 % суммарной массы главных ионов), за которым следуют гидрокарбонаты (18,0...28,0 %) и кальций (10,0...18,0 %). Максимальные концентрации Ca^{2+} в отдельные годы достигали 23,9...32,9 мг/дм³ на Аул-4, SO_4^{2-} до 21,5...33,8 мг/дм³, тогда как на высокогорной станции их значения, как правило, не превышали 5,38 мг/дм³ (Ca^{2+}) 5,00 мг/дм³ (SO_4^{2-}).

Коэффициенты вариации для техногенных анионов составляли 40,0...60,0 %, что указывает на высокую чувствительность системы к изменению эмиссионной нагрузки и метеорологических условий.

Корреляционная структура подтверждает существование трех устойчивых факторов формирования состава осадков: карбонатно-пылевого ($\text{Ca}^{2+}\text{--HCO}_3^-$; $r = 0,87$), натрий-доминирующего солевого ($\text{Na}^+\text{--NO}_3^-$; $r = 0,91$) и техногенно-вторичного ($\text{SO}_4^{2-}\text{--Cl}^-$; $r = 0,94$). Связь минерализации с гидрокарбонатами ($r = 0,95$) указывает на доминирующую роль карбонатного блока в формировании суммарной ионной нагрузки. Это свидетельствует о значительном вкладе карбонатно-пылевого материала, поступающего в осадки при переносе и вымывании минеральных частиц с карбонатных почв и открытых аридных поверхностей.

Таким образом, атмосферные осадки юго-востока Казахстана отражают взаимодействие природного карбонатного фона, солевого аэрозольного переноса и техногенной нагрузки. Пространственные различия проявляются в повышенной минерализации осадков в урбанизированных и долинно-индустриальных районах относительно высокогорной зоны, тогда как межгодовая изменчивость ионного состава указывает на влияние карбонатно-пылевого переноса, региональных аэрозольных процессов и антропогенных источников. Это подтверждает информативность химического состава атмосферных осадков как индикатора региональных климатических и антропогенных изменений.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из открытых и платных источников.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АСМ, ЛТИ; Управление данными – АСМ, ЛТИ, ТРО; Формальный анализ – ТРО, ААМ, БМС; Методология – АСМ, ТРО, ЛТИ; Руководство – АСМ; Визуализация – ТРО, БМС, ААМ; Написание исходного текста – АСМ, ТРО, ЛТИ; Написание и редактирование окончательного текста – АСМ, ЛТИ, ТРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vet R., Artz R.S., Carou S., et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus // *Atmospheric Environment*. – 2014. 93. 3-100. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
2. Torseth K., Aas W., Breivik K., et al. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2012. – Vol. 12, issue 12, 5447-5481. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5447-2012>
3. Qi L., Zheng H., Ding D., Wang S. Responses of sulfate and nitrate to anthropogenic emission changes in eastern China - in perspective of long-term variations // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 855, 158875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158875>
4. Liu Y., Wang W., Zhang J., Li Z. Characteristics and sources of chemical composition in precipitation on the Loess Plateau of China // *Sci Total Environ*. – 2024. 935. 173401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173401>
5. Usher C.R., Michel A.E., Grassian V.H. Reactions on mineral dust // *Chemical Reviews*. – 2003. – Vol. 103 (12). – P. 4883–4940. – DOI: 10.1021/cr020657y.
6. Heydarizad M., Gimeno L., Amiri S., Minaei M., Mohammadabadi H.G. A Comprehensive Overview of the Hydrochemical Characteristics of Precipitation across the Middle East // *Water*. – 2022. – Vol. 14, 2657. – DOI: 10.3390/w14172657.
7. Al-Khashman O.A. Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39, Issue 33, 6175-6183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.056>
8. Rogora M., Colombo L., Lepori F., et al. Thirty Years of Chemical Changes in Alpine Acid-Sensitive Lakes in the Alps // *Water Air Soil Pollut* – 2013. – 224, 1746. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1746-3>
9. Madibekov A.S., Amirgaliyev N.A., Ismukhanova L.T., et al. Spatial distribution of heavy metals in the snow cover for Almaty agglomeration. // *SGEM Conference Proceedings*. – 2019. – 19(5.1). – P. 679-685. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.084>
10. Faurat A., Yessimova D., Satybaldiyeva G., et al. Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan // *PLoS One*. – 2025. – 20(5), e0322300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300>
11. Султанбекова Б.М., Жади А.О., Мадибекова А.А., Жуматаев С.М. Сравнительный анализ снежного покрова в Жетысуской области по основным гидрохимическим показателям // *Материалы VII Байкальской международной научной конференции – Стратегическая сессия (16-20 июня 2025 г.)*. – Нижний Новгород: Радонежская типография, 2025. – С. 93–103.
12. Keresztesi, Á., Birsan, M.V., Nita, I.A., et al. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000-2017. // *Environmental Sciences Europe*. – 2019. – 31, 50. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9>

13. Gülsoy G., Tayanç M., Ertürk F. Chemical analyses of the major ions in the precipitation of · Istanbul, Turkey // *Environmental Pollution*. – 1999. – 105(2). – P. 273-280. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00186-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00186-9)
14. Özsoy T., Saydam A.C. Acidic and alkaline precipitation in the Cilician Basin, north-eastern Mediterranean Sea // *Science of the Total Environment*. – 2000. – 253(1-3). – P. 93-109. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00380-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00380-6)
15. Liu Y., Feng Z., Zheng F., et al. Ammonium nitrate promotes sulfate formation through uptake kinetic regime // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – 21. 13269-13286. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13269-2021>
16. Cerling T.E., Alexander A.J. Chemical composition of hoarfrost, rime and snow during a winter inversion in Utah, U.S.A. // *Water Air Soil Pollut.* – 1987. – 35. – P. 373-379. <https://doi.org/10.1007/BF00290943>

REFERENCES

1. Vet, R., Artz, R. S., Carou, S., et al. (2014). A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 93, 3-100. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
2. Tørseth, K., Aas, W., Breivik, K., et al. (2012). Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 12, issue 12, 5447–5481. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5447-2012>
3. Qi, L., Zheng, H., Ding, D., & Wang, S. (2023). Responses of sulfate and nitrate to anthropogenic emission changes in eastern China - in perspective of long-term variations. *Science of The Total Environment*, vol. 855, 158875, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158875>
4. Liu, Y., Wang, W., Zhang, J., & Li, Z. (2024). Characteristics and sources of chemical composition in precipitation on the Loess Plateau of China. *Science of The Total Environment*, 935. 173401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173401>
5. Usher, C. R., Michel, A. E., & Grassian, V. H. (2003). Reactions on mineral dust. *Chemical Reviews*, 103(12), 4883-940. doi: 10.1021/cr020657y
6. Heydarizad, M., Gimeno, L., Amiri, S., Minaei, M., & Mohammadabadi, H. G. (2022). A Comprehensive Overview of the Hydrochemical Characteristics of Precipitation across the Middle East. *Water*, 14, 2657. <https://doi.org/10.3390/w14172657>
7. Al-Khashman, O. A. (2005). Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan. *Atmospheric Environment*, vol. 39, issue 33, 6175-6183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.056>
8. Rogora, M., Colombo, L., Lepori, F. et al. (2013). Thirty Years of Chemical Changes in Alpine Acid-Sensitive Lakes in the Alps. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224, 1746. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1746-3>
9. Madibekov, A.S., Amirgaliyev, N.A., Ismukhanova, L.T., et al. (2019). Spatial distribution of heavy metals in the snow cover for Almaty agglomeration. *SGEM Conference Proceedings*, 19(5.1), 679-685. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.084>
10. Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., et al. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan. *PLoS One*, 20(5), e0322300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300>
11. Sultanbekova, B. M., Zhadi, A. O., Madibekova, A. A., & Zhumataev, S. M. (2025). Srovnitelnyy analiz snezhnogo pokrova v Zhetysuskoj oblasti po osnovnym gidrokhimicheskim pokazatelyam [Comparative analysis of snow cover in the Zhetysu region by main hydrochemical parameters]. *Materialy VII Baikalskoj mezhdunarodnoi nauchnoj konferentsii – Strategicheskaya sessiya (16–20 iyunya 2025 g.)*, pp. 93–103. Nizhnii Novgorod: Radonezhskaya tipografiya [in Russian].
12. Keresztesi, A., Birsan, M. V., Nita, I. A., et al. (2019). Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000-2017. *Environmental Sciences Europe*, 31, 50. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9>
13. Gülsoy, G., Tayanç, M., & Ertürk, F. (1999). Chemical analyses of the major ions in the precipitation of · Istanbul, Turkey. *Environmental Pollution*, 105(2), 273-280. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00186-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00186-9)
14. Özsoy, T., & Saydam, A. C. (2000). Acidic and alkaline precipitation in the Cilician Basin, north-eastern Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 253(1-3), 93-109. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00380-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00380-6)
15. Liu, Y., Feng, Z., Zheng, F., et al. (2021). Ammonium nitrate promotes sulfate formation through uptake kinetic regime. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 13269-13286. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13269-2021>
16. Cerling, T.E., Alexander, A.J. (1987). Chemical composition of hoarfrost, rime and snow during a winter inversion in Utah, U.S.A.. *Water, Air, & Soil Pollution*, 35, 373-379. <https://doi.org/10.1007/BF00290943>

ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНЫҢ МАУСЫМДЫҚ ДИНАМИКАСЫ

Талшын Р. Оразбаева¹, Азамат С. Мадібеков¹ қауымдастырылған профессор, PhD, Лаура Т. Исмуханова²
PhD, Айша А. Мадібекова¹, Ботакоз М. Султанбекова¹

¹ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; orazbayeva.talshyn@gmail.com (ТПО), madibekov@mail.ru (АСМ), aisha.madibekova@mail.ru (ААМ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС)

² «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; l-aura@bk.ru (ЛТИ)

*Автор корреспонденции: Талшын Р. Оразбаева, orazbayeva.talshyn@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

атмосфералық жауын-шашын,
химиялық құрам,
маусымдылық, антропогендік
әсер, мониторинг, кеңістіктік
өзгергіштік

Мақала жайында:

Алынды: 28.02.2026

Қайта қаралды: 04.03.2026

Қабылданды: 06.05.2026

Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Мақалада 2005...2024 жылдар аралығында Алматы, Ауыл-4, Есік, Қапшағай, Мыңжылқы және Текелі метеостанцияларының деректері негізінде Қазақстанның оңтүстік-шығыс бөлігіндегі атмосфералық жауын-шашынның химиялық құрамына жүргізілген көпжылдық талдау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – урбандалған, индустриялық және биіктаулы ландшафттардың үйлесуі жағдайында жауын-шашынның иондық құрамының қалыптасуындағы кеңістіктік-уақыттық заңдылықтарды айқындау. Негізгі катиондар мен аниондардың орташа жылдық және маусымдық концентрациялары есептеліп, жылдар аралық динамикасы мен жиынтық минералдану көрсеткіштері талданды, сондай-ақ иондық байланыстар құрылымына корреляциялық талдау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері бойынша, көпшілік жылдары жауын-шашынның жиынтық минералдануы биіктаулы Мыңжылқы станциясында 1,06...7,13 мг/дм³ аралығында, ал урбандалған және индустриялық аймақтарда 8,37...25,9 мг/дм³ шегінде өзгеріп, 2...4 еселік кеңістіктік контраст қалыптастыратыны анықталды. Иондық құрам құрылымында Na⁺ (негізгі иондардың жиынтық массасының 44,0...53,0 %), HCO₃⁻ (18,0...28,0 %) және Ca²⁺ (10,0...18,0 %) басым үлеске ие. Суық кезеңде SO₄²⁻, NO₃⁻ және NH₄⁺ концентрациялары жылы маусыммен салыстырғанда 40,0...80,0 %-ға жоғары болып, бұл жылыту маусымының және екінші реттік аэрозоль түзілу үдерістерінің ықпалын көрсетеді. Корреляциялық талдау SO₄²⁻-Cl⁻ (r = 0,94), Ca²⁺-HCO₃⁻ (r ≈ 0,87) және SO₄²⁻-NH₄⁺ (r ≈ 0,75) арасындағы тұрақты байланыстарды анықтап, жауын-шашын құрамының қалыптасуы көпфакторлы сипатқа ие екенін және табиғи мен антропогендік факторлардың өзара ықпалын растайды.

SEASONAL DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN SOUTH-EASTERN KAZAKHSTAN

Talshyn R. Orazbayeva¹, Azamat S. Madibekov¹ Associate Professor, PhD, Laura T. Ismukhanova² PhD, Aisha A. Madibekova¹, Botakoz M. Sultanbekova¹

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; orazbayeva.talshyn@gmail.com (T.R.O.), madibekov@mail.ru (A.S.M.), aisha.madibekova@mail.ru (A.A.M.), sultanbekova_botakoz@mail.ru (B.M.S.).

² JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; l-aura@bkk.ru (L.T.I.)

*Author correspondent: Talshyn R. Orazbayeva, orazbayeva.talshyn@gmail.com

KEY WORDS

atmospheric precipitation, chemical composition, seasonality, anthropogenic impact, monitoring, spatial variability

About article:

Received: 28.02.2026

Revised: 04.03.2026

Accepted: 06.05.2026

Published: 30.09.2026

ABSTRACT

The article presents the results of a long-term analysis of the chemical composition of atmospheric precipitation in the southeastern region of Kazakhstan for the period 2005...2024, based on data from the meteorological stations of Almaty, Aul-4, Yesik, Kapchagai, Mynzhilki, and Tekeli. The study aims to identify the spatiotemporal patterns of the ion composition of precipitation under a combination of urbanized, industrial, and high-mountain landscapes. Annual and seasonal mean concentrations of major cations and anions were calculated, interannual dynamics and total mineralization were analyzed, and a correlation analysis of the ionic structure was performed.

It was found that, in most years, the total mineralization of precipitation ranges from 1.06 to 7.13 mg/dm³ at the high-mountain station of Mynzhilki and from 8.37 to 25.9 mg/dm³ in urbanized and industrial areas, forming a 2...4-fold spatial contrast. The ion composition is dominated by Na⁺ (44.0...53.0 % of the total major ion mass), HCO₃⁻ (18.0...28.0 %), and Ca²⁺ (10.0...18.0 %). During the cold season, the concentrations of SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ exceed those in the warm season by 40.0...80.0 %, reflecting the influence of the heating period and secondary aerosol formation. Correlation analysis revealed stable relationships of SO₄²⁻-Cl⁻ (r = 0.94), Ca²⁺-HCO₃⁻ (r ≈ 0.87), and SO₄²⁻-NH₄⁺ (r ≈ 0.75), confirming the multifactorial nature of precipitation composition formation and the interaction of natural and anthropogenic factors.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).