



Научная статья

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЗАХСТАНА

Талшын Р. Оразбаева<sup>1</sup> , Азамат С. Мадибеков<sup>1</sup>  PhD, ассоциированный профессор, Кузу Л. Садулла<sup>2</sup>   
PhD, ассоциированный профессор

<sup>1</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com) (ТРО), [madibekov@mail.ru](mailto:madibekov@mail.ru) (АСМ);

<sup>2</sup>Стамбульский Технический Университет, г. Стамбул, Турция, [kuzul@itu.edu.tr](mailto:kuzul@itu.edu.tr) (КСЛ)

\*Автор корреспонденции: Талшын Р. Оразбаева, [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Снежный покров, экологический риск, тяжелые металлы, Igeo, PERI, техногенная нагрузка, юго-восток Казахстана

### АБСТРАКТ

В статье представлена оценка экологического риска, связанного с загрязнением снежного покрова тяжелыми металлами (Cd, Pb, Cu, As) на трех контрастных станциях юго-востока Казахстана (Алматы-Агро, Текели, Мынжилки) за период 2005...2024 гг. Снежный покров рассматривается как эффективный индикатор сезонной техногенной нагрузки. Для оценки степени загрязнения и угрозы для окружающей среды применены индексы геоаккумуляции (Igeo), потенциального экологического риска (PERI) и суммарного коэффициента загрязнения (Zc). Установлено, что максимальные уровни загрязнения и риска зафиксированы в зоне городской агломерации (Алматы-Агро), где значения RI достигали 600, а Igeo по кадмию и свинцу превышали 4,0, что соответствует «очень сильному» загрязнению. В Текели значения характеризуются умеренно-высоким уровнем риска, обусловленным локальными источниками эмиссии. Высокогорная станция Мынжилки в основном сохраняет фоновые характеристики, за исключением отдельных сезонов с эпизодическими подъемами риска. Полученные результаты подчеркивают пространственную мозаичность загрязнения и подтверждают значимость снегового покрова в качестве индикатора антропогенного воздействия.

### По статье:

Получено: 27.01.2026

Пересмотрено: 30.03.2026

Принято: 23.06.2026

Опубликовано: 01.07.2026

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сезонный снежный покров в умеренно-континентальном климате юго-восточного Казахстана важный природный компонент, выполняющий как климаторегулирующую, так и индикаторную функцию. В течение холодного сезона снежный покров аккумулирует широкий спектр загрязняющих веществ (твердые аэрозоли, ионные примеси, стойкие органические соединения и тяжелые металлы), поступающих в атмосферу от локальных и трансграничных источников и осаждающихся в результате сухих и влажных процессов. Благодаря высокой сорбционной способности и длительному периоду накопления, снежный покров является эффективным средством для оценки текущего уровня загрязнения атмосферы и тенденций его изменения. Особенно актуален такой подход для регионов, сочетающих высокую плотность населения, активную промышленную деятельность и сложные метеорологические и орографические условия, к которым относится юго-восток Казахстана, охватывающий Алматинскую и область Жетісу.

В последние десятилетия использование снежного покрова в качестве объекта экологического мониторинга стало предметом многочисленных исследований. В Канаде [1] и Норвегии [2] выявлена высокая пространственная чувствительность снегового покрова к выбросам ТЭЦ и нефтехимических производств. В Китае снег активно используется для оценки степени загрязнения урбанизированных территорий и прилегающих водно-болотных экосистем [3...4]. В странах Восточной Европы и Центральной Азии, включая Казахстан, проблема загрязнения снега тяжелыми металлами приобретает все большую актуальность в контексте климатических изменений, урбанизации и роста антропогенного давления на природные среды [5...6]. Однако большая часть работ посвящена анализу концентраций отдельных элементов, в то время как комплексная оценка риска и пространственная дифференциация загрязнений по экологическим категориям выполняется крайне ограниченно.

#### Для цитирования:

Оразбаева Т.,  
Мадибеков А., Садулла К.,  
Оценка экологического  
риска загрязнения  
снежного покрова  
тяжелыми металлами в  
Юго-Восточной части  
Казахстана//  
Гидрометеорология и  
экология, 122 (2), 2026,  
199-213.

Методика оценки потенциального экологического риска (PERI) по Хакансону [7], а также индекс геоаккумуляции (Igeo) по Мюллеру [8] позволяют выйти за рамки простой фиксации концентраций загрязнителей и перейти к обоснованной оценке степени угрозы для окружающей среды. Данные методы учитывают не только содержание металлов, но и их токсикологическую значимость, подвижность, биодоступность и способность к долговременному накоплению в экосистемах. Применение PERI и Igeo в сочетании с коэффициентами суммарного загрязнения (Zc) обеспечивает комплексный анализ техногенной нагрузки, позволяющий выделить экологически уязвимые участки, определить источники загрязнения и проследить межгодовые тенденции.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на результатах наблюдений за химическим составом снежного покрова, проводимых РГП «Казгидромет» в течение 2005...2024 гг. Объектами мониторинга выступили три репрезентативные станции юго-востока Казахстана, различающиеся по природно-географическим и техногенным условиям:

- станция Алматы-Агро расположена в зоне плотной урбанизации и характеризуется интенсивной транспортной и хозяйственной деятельностью;
- Мынжилки представляет высокогорный ландшафт с минимальным уровнем антропогенного вмешательства;
- Текели, является типичной долинной промышленной территорией с развитой горнорудной и металлургической инфраструктурой.

Для комплексной оценки загрязнения были использованы интегральные показатели. Интегральная оценка загрязнения природных сред требует применения показателей, отражающих совокупное воздействие нескольких элементов на окружающую среду. Одним из таких инструментов служит коэффициент суммарного загрязнения (Kc, Zc), рассчитываемый как сумма коэффициентов концентрации для совокупности элементов [9...10]. Показатель отражает общий уровень химической нагрузки, не учитывая различий в токсичности между металлами.

Расчет суммарного показателя загрязнения снега проведен по следующим формулам (1), (2):

$$Kc = \frac{ci}{cф} \quad (1)$$

$$Zc = \sum Kc - (n - 1) \quad (2)$$

где, Kc – коэффициент концентрации загрязняющего вещества;  
Ci – концентрация загрязняющего вещества;  
Cф – концентрация загрязняющего вещества в фоновой точке;  
n – число определяемых элементов.

На основе полученных суммарных показателей загрязнения снега были оценены согласно оценочным шкалам [11...12] (таблица 1).

**Таблица 1**Уровни загрязнения СП ( $Z_c$ ) металлами

Уровень	Суммарный показатель загрязнения СП
Допустимый (фоновый)	< 32
Низкий	32...64
Средний	64...128
Высокий	128...256
очень высокий	> 256

Оценка опасности загрязнения снега металлами по соответствующим показателям, отражающим дифференциацию загрязнения области, проводилась по ориентировочным оценочной шкале [11] (таблица 2).

**Таблица 2**Ориентировочная оценочная шкала опасности загрязнения СП по суммарному показателю загрязнения ( $Z_c$ )

Уровень	Суммарный показатель загрязнения СП ( $Z_c$ )	Категории загрязнения СП
Допустимый (фоновый)	< 32	Неопасный
Низкий	32...64	Умеренно опасный
Средний	64...128	Опасный
Высокий	128...256	Очень опасный
очень высокий	> 256	Чрезвычайно опасный

Метод Хакансона (Potential Ecological Risk Index) широко применяется в мировой практике для оценки потенциального экологического риска [7]. Его применение позволяет не только выявить локальные очаги загрязнения, но и определить суммарную нагрузку на экосистемы, интегрируя вклад каждого элемента с учетом его токсичности.

Для дополнительной характеристики уровня загрязнения используется индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ), основанный на сравнении фактических концентраций металлов с геохимическим фоном [8,13...15]. Он дает возможность классифицировать снежный покров по уровням загрязнения – от фоновых значений до экстремально высоких нагрузок.

Совместное применение метода Хакансона и индекса  $I_{geo}$  обеспечивает комплексный подход к оценке экологического состояния региона, что позволяет определить критические зоны экологического риска, выделить территории с различной степенью техногенной нагрузки и более обоснованно судить о степени устойчивости экосистем юго-восточной части Казахстана. В рамках данного подхода на первом этапе были рассчитаны коэффициент загрязнения ( $C_f$ ) по формуле (3):

$$C_f i = \frac{C_i}{C_{фон}} \quad (3)$$

где  $C_i$  – фактическая концентрация элемента в исследуемой пробе, а  $C_{фон}$  – фоновая концентрация данного элемента (для снежного покрова были использованы минимальные региональные значения).

На втором этапе по формуле (4) был определен индивидуальный индекс экологического риска ( $E_r$ )

$$E_r i = C_f i \cdot T_i \quad (4)$$

где  $T_i$  – токсикологический коэффициент (коэффициент токсичности) элемента, отражающий его потенциальную опасность для экосистем. В расчетах были использованы и адаптированы значения, предложенные Хакансоном: Cd = 30, Pb = 5, Cu = 5, Ni = 5, Co = 5, Cr = 2, Zn = 1, Mn = 1.

Суммарный показатель экологического риска (RI) был определен по формуле (5) как сумма всех индивидуальных рисков:

$$RI = \sum Eri \quad (5)$$

Классификация по Хакансону была оценена по градации суммарного риска (таблица 3).

**Таблица 3**

Градация суммарного риска (RI)

RI (значение)	Категория риска
<150	Низкий
150...300	Умеренный
300...600	Высокий
≥600	чрезвычайно высокий

Для сопоставления полученных данных по снегу, также был рассчитан индекс геоаккумуляции ( $I_{geo}$ ), предложенный Мюллером (таблица 4). Индекс вычисляется по формуле (6):

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_i}{1,5 \cdot C_{фон}}\right) \quad (6)$$

где  $C_i$  – фактическая концентрация элемента,  $C_{фон}$  – его фоновая концентрация, коэффициент 1,5 учитывает возможные колебания фонового уровня, связанные с естественной вариабельностью.

**Таблица 4**

Классификация по индексу геоаккумуляции ( $I_{geo}$ , по Мюллеру)

$I_{geo}$ (значение)	Степень загрязнения
≤0	отсутствие загрязнения
0...1	Слабое
1...2	Умеренное
2...3	Среднее
3...4	Сильное
4...5	очень сильное
>5	чрезвычайно сильное

Таким образом, сочетание метода Хакансона и индекса  $I_{geo}$  обеспечивает комплексный подход: первый позволяет оценить потенциальный экологический риск с учетом токсичности металлов, второй – степень пространственной вариабельности накопления поллютантов.

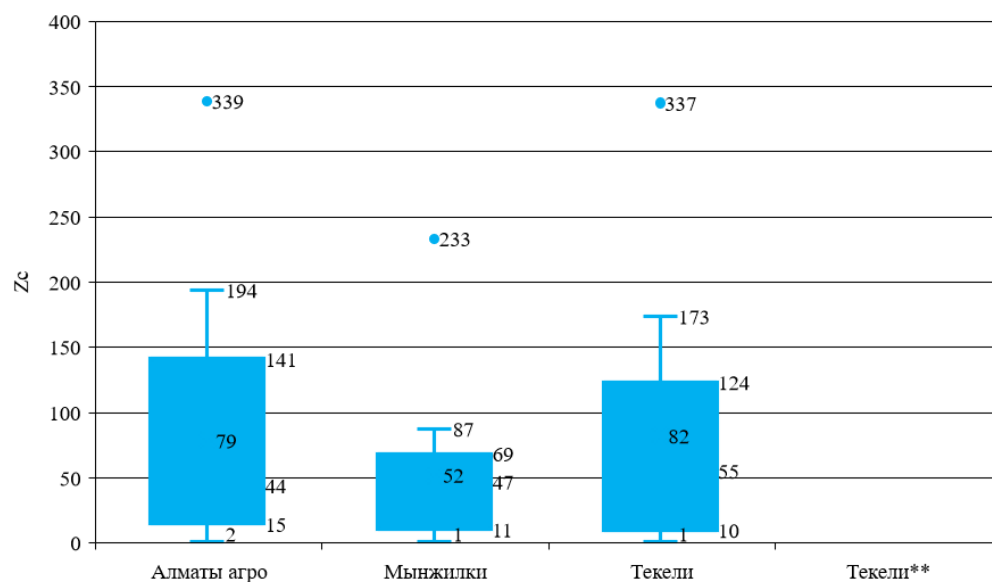
Анализ рассчитанных коэффициентов загрязнения ( $C_f$ ), индивидуальных индексов риска ( $E_i$ ) и интегрального индекса экологического риска (RI) для снега показал сложную

и разнонаправленную картину пространственного распределения тяжелых металлов, отражающую различия в механизмах их поступления и накопления в снеге.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 1. Интегральная оценка загрязнения по коэффициентам концентрации ( $K_c$ ) и суммарному показателю загрязнения ( $Z_c$ )

Интегральная оценка загрязнения снежного покрова по коэффициентам концентрации ( $K_c$ ) и суммарному показателю загрязнения ( $Z_c$ ) позволила выявить уровень техногенного воздействия на атмосферные осадки в районе трех исследуемых станций: Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2005...2024 гг. Показатели были рассчитаны на основе соотношения между фактическими концентрациями тяжелых металлов (Pb, Cu, As, Cd) в снегу и их фоновыми значениями. Индивидуальный коэффициент концентрации ( $K_c$ ) отражает степень превышения содержания конкретного элемента относительно естественного уровня, в то время как  $Z_c$ , это агрегированный показатель, суммирующий все  $K_c$  с поправкой на количество элементов (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Пространственно-временное распределение суммарного показателя загрязнения снежного покрова ( $Z_c$ ) на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2004...2024 гг.

*Примечание:* Текели\*\* - не было устойчивого снежного покрова

Сравнительный анализ суммарного загрязнения снежного покрова по показателю  $Z_c$  выявил ярко выраженные пространственные различия между исследуемыми участками. Данные из рисунка 1 показывают, что уровень техногенной нагрузки варьировал от фона до чрезвычайно высокого, отражая как локальные источники эмиссии, так и сезонные особенности атмосферы.

На станции Алматы-Агро зафиксированы наивысшие значения  $Z_c$ , что свидетельствует о мощном техногенном прессинге. В отдельные периоды (2010...2011, 2014...2015, 2020...2021 гг.) индекс превышал отметку 220...270, а максимальные значения достигали 339, что соответствует категории «очень высокого загрязнения».

Среднее значение  $Z_c$  составило 141, с межсезонной вариабельностью от 15 до 194. Индивидуальные коэффициенты концентрации ( $K_c$ ) для кадмия в отдельные периоды доходили до 12...15, по свинцу до 18...22, по меди до 5...9, по мышьяку до 4...6. Причиной столь высокого загрязнения является совокупное влияние автомобильных выбросов, коммунального отопления, строительства и неблагоприятных метеоусловий (инверсии, штиль), характерных для зимнего периода.

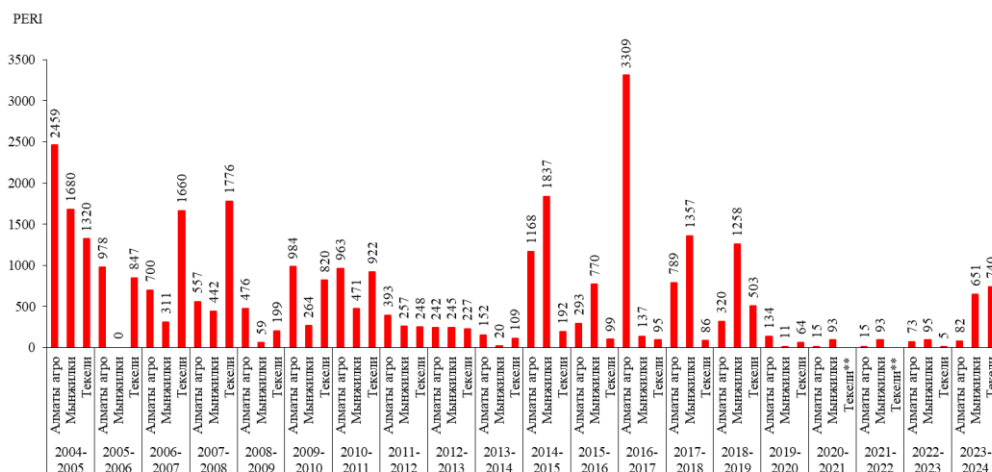
На станции Текели значения  $Z_c$  в среднем варьировали от 110 до 180, относясь к диапазону среднего и высокого загрязнения. В 2008...2009 и 2016...2017 гг. индекс превышал 256, что квалифицируется как чрезвычайно высокий уровень загрязнения. Среднее значение составило 124, а диапазон колебаний варьировал от 55 до 173. Максимальные  $K_c$  были зарегистрированы по меди (до 20), свинцу (до 14) и кадмию (до 10). Такие показатели, очевидно, обусловлены активностью ТЭЦ, строительных объектов и выбросами пылевых фракций. Отдельной особенностью станции является регулярное повторение сезонов с комплексным превышением по нескольким металлам, что свидетельствует о стабильно высоком уровне техногенного фона.

На высокогорной станции Мынжилки, значения  $Z_c$  в большинстве периодов были ниже 64, указывая на низкий уровень загрязнения. Однако в 2020...2021 и 2022...2023 гг. индекс поднимался до 95 и 120, приближаясь к категории среднего загрязнения. Среднее значение составило 69, с разбросом от 11 до 87. Основной вклад давали кадмий и свинец, и  $K_c$  в отдельные сезоны достигали 4...6, в то время как медь и мышьяк в основном оставались на фоновом уровне ( $K_c \leq 2$ ). Подобные колебания могут быть связаны с переносом загрязняющих аэрозолей с подстилающих территорий при южной циркуляции, а также с редкими эпизодами локального воздействия.

Таким образом, наиболее загрязненная оказалась зона Алматы-Агро, где сочетаются все категории риска: транспорт, бытовое отопление, урбанизация. Текели демонстрирует периодическую техногенную нагрузку, связанную с промышленными источниками, а Мынжилки сохраняет статус фоновой станции, но подвержена эпизодическому загрязнению при специфических погодных условиях. Анализ  $Z_c$  подтверждает, что техногенное давление на снежный покров в пределах юго-востока Казахстана носит ярко выраженный пространственно-временной характер, что делает данный индикатор эффективным инструментом экологического мониторинга и оценки степени химической нагрузки.

## **2. Потенциальный экологический риск по методу Хакансона (PERI)**

Потенциальный экологический риск, рассчитанный по методике Хакансона (PERI), позволил более глубоко и количественно охарактеризовать степень угрозы от загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами с учетом их токсикологических характеристик. Индекс экологического риска (RI) варьировал по станциям и годам, отражая как локальные особенности эмиссионных нагрузок, так и сезонную изменчивость атмосферной обстановки (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Динамика интегрального индекса потенциального экологического риска (PERI) по методу Хакансона для снежного покрова на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели в 2004...2024 гг.

Наибольшие значения PERI зафиксированы на станции Алматы-Агро, где интегральный индекс RI в ряде сезонов превышал порог 300, относясь к категории «высокий риск», а в отдельные годы (2014...2015 и 2020...2021 гг.) приближался к границе «чрезвычайно высокого риска» ( $RI \geq 600$ ). Ведущий вклад в суммарный риск на данной станции вносил кадмий (Ег до 210), за которым следовали свинец (Ег до 120) и никель (Ег до 70). Высокие показатели этих элементов обусловлены их значительным антропогенным происхождением: кадмий и свинец поступают в атмосферу с выхлопами транспорта, сжиганием топлива, выбросами от отопительных систем и строительной деятельности. Никель, в свою очередь, ассоциируется с промышленными выбросами и присутствием аэрозолей от металлических конструкций и оборудования. Таким образом, индекс PERI в районе Алматы-Агро отражает высокую степень техногенного загрязнения, вызванного сочетанием высокой урбанизацией, транспортными и бытовыми факторами.

Станция Текели, расположенная в долинной индустриальной зоне, продемонстрировала значения RI в пределах 150...260, что соответствует диапазону «умеренного» и «высокого» экологического риска. Наибольший вклад вносят медь (Ег до 90), никель (Ег до 60) и кадмий (Ег до 100). Характер загрязнения Текели во многом определяется специфическим профилем местной промышленности – ТЭЦ, строительные и горнодобывающие объекты, дорожная деятельность, с характерным выбросом меди, свинца и продуктов горения. В условиях малой снежозапасности даже умеренные выбросы могут привести к концентрационному эффекту и формированию значительного экологического риска, особенно в инверсионные зимние периоды.

На высокогорной станции Мынжилки, несмотря на относительную удаленность от крупных промышленных источников, в ряде лет наблюдался переход значений RI в категорию «умеренного риска» ( $RI 160...180$ ). Основным элементом риска здесь выступал кадмий (Ег до 110), с меньшими значениями по свинцу и никелю. Вероятной причиной появления значений выше фоновых на этой станции является перенос загрязняющих веществ с нижележащих территорий в условиях южных и юго-западных ветров, а также инверсионных явлений в атмосфере, способствующих аккумуляции аэрозолей в

замкнутых котловинах. Кроме того, в отдельные годы в районе Мынжилки наблюдались неблагоприятные метеоусловия (низкая температура, слабая циркуляция), способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое воздуха и, соответственно, в снежном покрове.

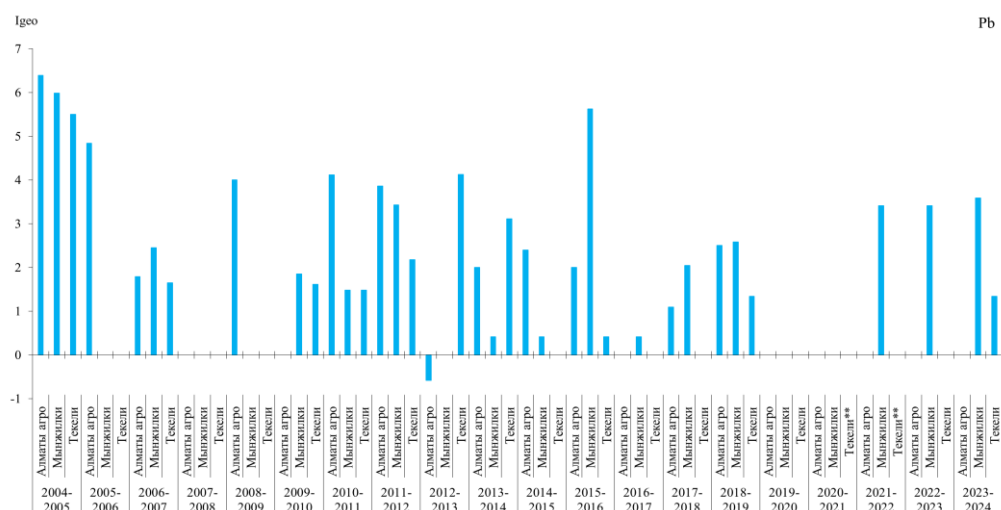
В целом, структура вклада элементов в PERI по станциям демонстрирует следующие особенности:

- на Алматы-Агро: кадмий (до 40 % в RI), свинец (до 35 %), никель (до 20 %), прочие элементы – незначительно;
- на Текели: кадмий (до 35 %), медь (до 30 %), никель и свинец – примерно по 15 %;
- на Мынжилки: кадмий (доминирует до 50 %), свинец (до 30 %), никель (до 15 %).

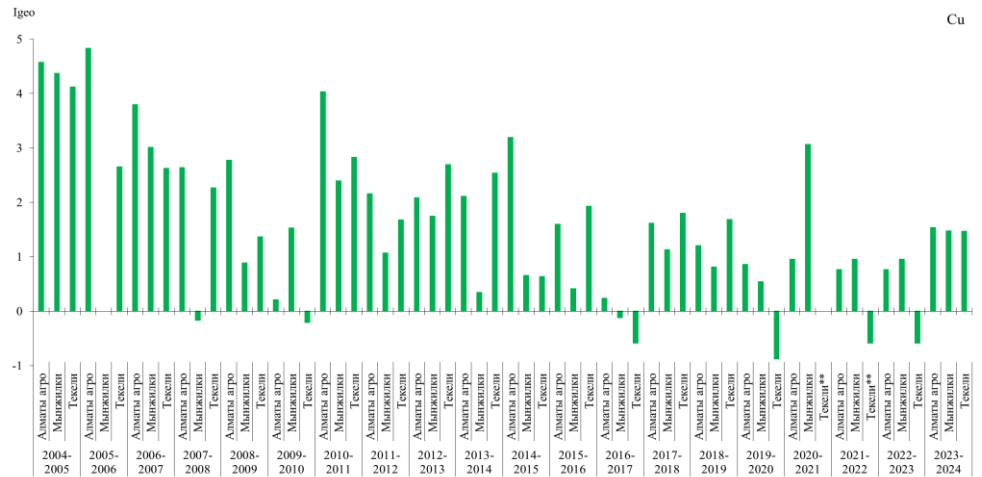
Таким образом, кадмий представляет собой основной фактор экологического риска на всех трех станциях, что подтверждает его высокую токсичность и подвижность в природной среде. Высокие значения PERI свидетельствуют об экологической уязвимости снежного покрова региона, особенно в условиях повышенной антропогенной активности, индустриальной нагрузки и неблагоприятных метеоусловий. Применение PERI позволяет не только идентифицировать проблемные зоны, но и выделить приоритетные элементы, представляющие наибольшую угрозу для экосистем юго-востока Казахстана.

### 3. Индекс геоаккумуляции (Igeo) и уровни загрязнения снежного покрова

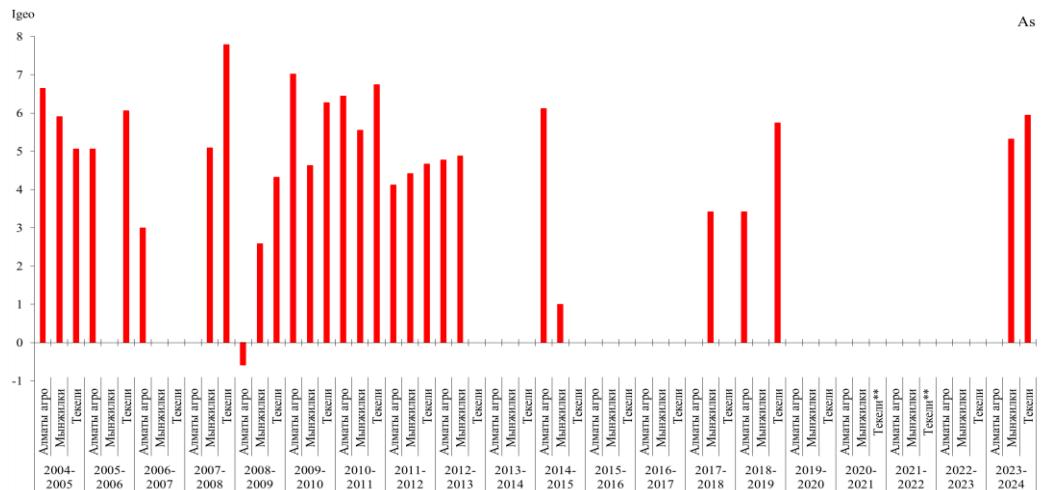
Индекс геоаккумуляции (Igeo), рассчитанный для оценки степени геохимического обогащения снежного покрова тяжелыми металлами, позволил выявить значимые пространственно-временные вариации и охарактеризовать уровень техногенного воздействия на разные участки юго-востока Казахстана. Применение метода Igeo дало возможность выделить зоны приоритетного загрязнения и определить наиболее обогащенные элементы на каждой из трех метеостанций: Алматы-Агро, Мынжилки и Текели (рисунки 3...6).



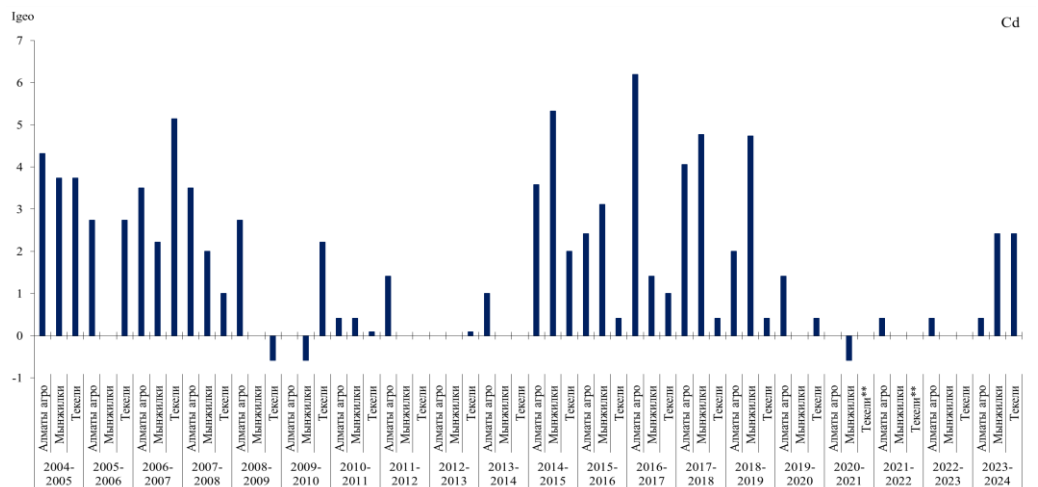
**Рисунок 3.** Динамика индекса геоаккумуляции (Igeo) по свинцу (Pb) в снежном покрове на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2004...2024 гг.



**Рисунок 4.** Динамика индекса геоаккумуляции (Igeo) по меди (Cu) в снежном покрове на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2004...2024 гг.



**Рисунок 5.** Динамика индекса геоаккумуляции (Igeo) по мышьяку (As) в снежном покрове на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2004...2024 гг.



**Рисунок 6.** Динамика индекса геоаккумуляции (Igeo) по кадмию (Cd) в снежном покрове на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели за 2004...2024 гг.

На станции Алматы-Агро, расположенной в урбанизированной зоне предгорий, наблюдаются устойчиво высокие значения Igeo по кадмию, свинцу и мышьяку. В отдельные сезоны (2004...2005, 2014...2015, 2020...2021 гг.) значения Igeo по кадмию и свинцу превышали 4,0, что соответствует категории «очень сильного загрязнения». Особенно примечательны значения мышьяка: в 2004...2005 и 2008...2009 гг. они достигали уровня 6,5...6,7, что указывает на «чрезвычайно сильное загрязнение» по шкале Мюллера. Полученные данные свидетельствуют о регулярном поступлении в атмосферу значительных объемов токсичных аэрозолей, вероятно, связанных с городским транспортом, сжиганием углеводородного топлива, выбросами от отопительных систем, а также пылевыми потоками с территорий строительства и интенсивной хозяйственной деятельности. В то же время, по меди и никелю значения Igeo в большинстве сезонов не превышали 1...2 («слабое-умеренное загрязнение»), что может свидетельствовать о менее активном участии этих элементов в сезонной аэрозольной нагрузке на атмосферу.

На Текели, промышленной станции, локализованной в долине с выраженной металлургической и энергетической активностью, также фиксируются высокие значения Igeo, особенно по меди, кадмию и мышьяку. Так, в сезонах 2009...2010 гг. и 2016...2017 гг. значения Igeo по меди составили до 3,3...3,5, что соответствует «сильному загрязнению». Для кадмия максимальные значения достигали 3,7 в 2012...2013 гг., а для мышьяка 7,7 в 2008...2009 гг., что указывает на экстремальное загрязнение в ряде сезонов. Вероятными источниками загрязнения являются локальные выбросы от объектов энергетики (в том числе ТЭЦ), предприятий цветной металлургии и перерабатывающих производств. Кроме того, долинное расположение станции способствует аккумуляции загрязняющих веществ при слабой вентиляции и инверсионных условиях. Свинец и никель варьировали в пределах Igeo 1,5...2,8, что соответствует «умеренному» и «среднему» загрязнению. Такие значения отражают смешанный вклад как локальных источников, так и возможного регионального переноса загрязнителей.

На высокогорной станции Мынжилки, расположенной на высоте более 3000 м над уровнем моря, значения Igeo по всем исследуемым металлам в основном не превышали 1,0, что соответствует «слабому загрязнению» или его отсутствию. Исключения фиксировались в отдельные сезоны (2018...2019 и 2022...2023 гг.), когда значения по кадмию и свинцу достигали 1,5...2,0, указывая на «умеренное загрязнение». Такие эпизоды вероятно связаны с переносом загрязняющих веществ из нижележащих урбанизированных районов при устойчивом южном или юго-западном направлении ветра. Медь и цинк на данной станции, как правило, сохраняли значения Igeo ниже 1, оставаясь в пределах фоновых уровней, что подтверждает малую техногенную нагрузку в условиях высокогорья и значительную роль атмосферы как среды распространения загрязнения.

Таким образом, использование индекса геоаккумуляции позволило объективно оценить пространственную мозаичность техногенного воздействия и выделить наиболее уязвимые зоны юго-востока Казахстана. Результаты подтверждают значимость снежного покрова как индикатора сезонных изменений загрязнения и подчеркивают важность продолжения комплексного мониторинга химического состава снега для своевременного выявления экологических угроз.

Результаты многолетнего анализа снежного покрова на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели выявили выраженную пространственно-временную

дифференциацию уровня загрязнения тяжелыми металлами и связанного с этим экологического риска. Совокупное использование показателей коэффициента концентрации (Кс), суммарного загрязнения (Zс), индекса геоаккумуляции (Igeo) и потенциального экологического риска (PERI) позволило получить целостную картину масштабов техногенного давления на сезонные осадки юго-востока Казахстана.

Наибольшую нагрузку по всем показателям демонстрирует станция Алматы-Агро, что обусловлено плотной застройкой, активным транспортом, высокой долей индивидуального отопления и неблагоприятными метеоусловиями (инверсии, слабая циркуляция воздуха). Здесь в отдельные сезоны значения Zс достигали 339, PERI – 2459, Igeo по кадмию и свинцу превышал 4,0, что соответствует уровням «очень высокого» загрязнения и «чрезвычайного» риска. Особенно значимыми элементами, формирующими нагрузку, выступают кадмий, свинец и медь, чья токсичность и подвижность в условиях урбанизированной среды повышают вероятность их аккумуляции в снеге. Данные элементы также продемонстрировали наивысшие значения Eg и Cf, подтверждая важность учета их индивидуального вклада при экологическом анализе.

Текели, как индустриальный узел, характеризуется устойчивым загрязнением с регулярными эпизодами повышенного содержания меди и кадмия. Средние значения Zс (82) и PERI (740) указывают на стабильный уровень загрязнения, классифицируемый как «средний» и «высокий» в отдельные годы. Как показано на рисунке 4, Igeo по меди, а также PERI отчетливо прослеживаются пики в сезонах, сопряженных с активной эксплуатацией промышленных объектов. Частота превышений по всем показателям в Текели выше, чем на Мынжилки, но ниже, чем в Алматы, что подтверждает его промежуточное положение между фоновыми и урбанизированными условиями.

Станция Мынжилки демонстрирует преимущественно фоновый уровень загрязнения. Однако эпизодические всплески по PERI (до 337), Zс (до 120) и Igeo по кадмию и свинцу (до 2) свидетельствуют о воздействии трансграничного переноса загрязняющих веществ или кратковременных инверсионных явлений, что особенно выражено в 2020...2023 гг., что может быть связано с метеоаномалиями и увеличением городской эмиссии. Таким образом, Мынжилки, несмотря на свою высокогорную локализацию, не является полностью изолированной от техногенных влияний, особенно при южной и юго-западной циркуляции воздушных масс.

Пространственная структура загрязнения снежного покрова, отраженная в графиках и расчетах, демонстрирует, что максимальная степень техногенного воздействия зафиксирована вблизи урбанизированных и индустриальных центров. Заметная межгодовая изменчивость показателей (особенно PERI и Igeo) подчеркивает важность многолетнего мониторинга, позволяющего отследить тенденции, эпизоды аномалий и оценить устойчивость экосистем к техногенному воздействию.

Комплексное применение методик Zс, PERI и Igeo доказало свою эффективность при оценке состояния снежного покрова как индикатора загрязнения атмосферы. Их сочетание позволяет одновременно учитывать как содержание, так и токсикологическую значимость элементов, а также геохимическую специфику исследуемой территории.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многолетнего мониторинга снежного покрова юго-востока Казахстана на станциях Алматы-Агро, Мынжилки и Текели выявили выраженные пространственные и сезонные различия в уровне техногенного загрязнения. Наиболее высокие значения интегральных индексов были зафиксированы на станции Алматы-Агро: суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  достигал 339, а PERI превышал 2400 в 2004...2005 гг., что соответствует «чрезвычайно высокому» риску. Для Текели максимальные значения составили  $Z_c = 337$  и  $PERI = 770$ , что также указывает на высокую степень загрязнения в отдельные годы. На Мынжилки, несмотря на общее фоновое состояние, в ряде сезонов (2020...2021 гг.) зафиксированы  $Z_c = 120$  и  $PERI = 293$ , что классифицируется как «умеренный» экологический риск.

Индекс геоаккумуляции (Igeo) подтвердил лидирующую роль кадмия как основного загрязнителя: значения по нему достигали 6,5...7,2 в Алматы-Агро и Текели, что соответствует «очень сильному» загрязнению. Значения Igeo по свинцу колебались в пределах 4,5...6,0 в наиболее загрязненные годы, а по меди до 3,3 в Текели, что также указывает на высокую степень геохимического обогащения.

По структуре вклада элементов в индекс экологического риска PERI на всех станциях доминирует кадмий (до 40...50 %), за которым следуют свинец (до 35 %) и никель (до 20 %). Вклад меди составляет 10...20 % в зависимости от станции.

Таким образом, наиболее загрязненным и экологически уязвимым участком является зона Алматы-Агро, где фиксируются многолетние превышения порогов по всем оценочным шкалам. Текели занимает промежуточную позицию с устойчивым присутствием промышленных загрязнителей, а Мынжилки функционирует как высокогорный индикатор сезонных трансферов загрязнений. Полученные результаты подчеркивают важность регулярного мониторинга снежного покрова как чувствительного индикатора атмосферного состояния и необходимой составляющей оценки экологической безопасности региона.

#### ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АСМ; управление данными – АСМ, ТРО; формальный анализ – ТРО; методология – АСМ, ТРО, СЛК; руководство – АСМ; визуализация – ТРО; написание исходного текста – АСМ, ТРО, СЛК; написание и редактирование окончательного текста – АСМ, ТРО, СЛК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guéguen C., Cuss C.W., Cho S. Snowpack deposition of trace elements in the Athabasca oil sands region, Canada // Chemosphere. – 2016. – Vol. 153. – P. 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.020>
2. Steinnes E. Heavy metal contamination of the terrestrial environment from long-range atmospheric transport: Evidence from 35 years of research in Norway // E3S Web of Conferences, Proceedings of the 16th International Conference on Heavy Metals in the Environment. – 2013. – Vol. 1. – Article 35001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130135001>
3. Huang L., Rad S., Xu L., Gui L., Song X., Li Y., Wu Z., & Chen Z. Heavy Metals Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment in Huixian Wetland, South China // Water. 2020. 12(2), 431. <https://doi.org/10.3390/w12020431>
4. Li W., Shen Z., Tian T. et al. Temporal variation of heavy metal pollution in urban stormwater runoff. Front // Environ. – 2012. – Vol. 6. – P. 692–700. <https://doi.org/10.1007/s11783-012-0444-5>

5. Faurat A., Yessimova D., Satybaldiyeva G., Kuatbayev A., Utarbayeva A., Kaliyeva A., 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. – Vol. 20(5). – e0322300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300>
6. Szwed M., Kozłowski R. Snow Cover as an Indicator of Dust Pollution in the Area of Exploitation of Rock Materials in the Świętokrzyskie Mountains // *Atmosphere* – 2022. – Vol. 13(3). – 409. <https://doi.org/10.3390/atmos13030409>
7. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach // *Water Research*. – 1980. – Vol. 14. – P. 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
8. Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // *GeoJournal*. – 1969. – Vol. 2. – P. 108–118.
9. Валетдинов А.Р. Технология комплексной оценки влияния промышленных объектов на загрязненность тяжелыми металлами природных сред по результатам мониторинга СП: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. – Казань, 2006. – 19 с.
10. Сагет Ю. У. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
11. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве // Рекомендации подготовлены в лаборатории геохимии окружающей среды Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов Мингео СССР и АН СССР (ИМГРЭ) к.м.н. Б.А. Ревичем, д.г.-м.н. Ю.Е. Сагетом, к.м.н. Р.С. Смирновой. Утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 15 мая 1990 г., № 5174-90. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200087676> (дата обращения 17.05.2025).
12. Ревич Б.А., Сагет Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 110 с.
13. Omwene P.I., Oncel M.S., Celen M., Kobya M., Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey) // *Chemosphere*, – 2018. – Vol. 208. – P. 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.031>
14. Duodu G.O., Goonetilleke A., Ayoko G.A. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment // *Environmental Pollution*. – 2016. Vol. 219. P. 1077–1091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>
15. Sarkar S., Ghosh P.B., Sil A.K., Saha T. Heavy metal pollution assessment through comparison of different indices in sewage fed fishery pond sediments at East Kolkata Wetland India // *Environ. Earth Sci.* – 2010. – Vol. 63. – P. 915–924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0760-7>

## REFERENCES

1. Guéguen, C., Cuss, C. W., & Cho, S. (2016). Snowpack deposition of trace elements in the Athabasca oil sands region, Canada. *Chemosphere*, 153, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.020>
2. Steinnes, E. (2013). Heavy metal contamination of the terrestrial environment from long-range atmospheric transport. *E3S Web of Conferences*, 1, 35001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20130135001>
3. Huang, L., Rad, S., Xu, L., et al. (2020). Heavy metals distribution, sources, and ecological risk assessment in Huixian Wetland, South China. *Water*, 12(2), 431. <https://doi.org/10.3390/w12020431>
4. Li, W., Shen, Z., Tian, T., et al. (2012). Temporal variation of heavy metal pollution in urban stormwater runoff. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6, 692–700. <https://doi.org/10.1007/s11783-012-0444-5>
5. Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., et al. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in snow cover. *PLoS One*, 20(5), e0322300. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300>
6. Szwed, M., & Kozłowski, R. (2022). Snow cover as an indicator of dust pollution. *Atmosphere*, 13(3), 409. <https://doi.org/10.3390/atmos13030409>
7. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. *Water Research*, 14, 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
8. Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.
9. Valetdinov, A. R. (2006). Tekhnologiya kompleksnoy otsenki... [Technology of integrated assessment...] (PhD thesis abstract). Kazan. [in Russian]
10. Saet, Yu. U., et al. (1990). Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Environmental geochemistry]. Moscow: Nedra. [in Russian]
11. Methodological guidelines (1990). Otsenka zagryazneniya atmosfernogo vozdukha... [Assessment of atmospheric air pollution...]. [in Russian]
12. Revich, B. A., Saet, Yu. E., Smirnova, R. S., & Sorokina, E. P. (1982). Geochemical assessment of urban contamination. Moscow: IMGRE. [in Russian]
13. Omwene, P. I., Oncel, M. S., Celen, M., & Kobya, M. (2018). Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpaşa stream located in the world's largest borate basin (Turkey). *Chemosphere*, 208, 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.031>
14. Duodu, G. O., Goonetilleke, A., & Ayoko, G. A. (2016). Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment. *Environmental Pollution*, 219, 1077–1091. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>

15. Sarkar, S., Ghosh, P. B., Sil, A. K., & Saha, T. (2010). Heavy metal pollution assessment through comparison of different indices in sewage fed fishery pond sediments at East Kolkata Wetland India. *Environmental Earth Sciences*, 63, 915–924. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0760-7>

## ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ ҚАР ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ АУЫР МЕТАЛДАРМЕН ЛАСТАНУЫНЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ТӘУЕКЕЛІН БАҒАЛАУ

Талшын Р. Оразбаева<sup>1</sup>, Азамат С. Мадібеков<sup>1</sup> PhD, қауымдастырылған профессор, Садулла Л. Кузу<sup>2</sup>, PhD, қауымдастырылған профессор

<sup>1</sup>әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com) (ТРО), [madibekov@mail.ru](mailto:madibekov@mail.ru) (АСМ),

<sup>2</sup>Стамбул техникалық университеті, Стамбул қ., Түркия, [kuzul@itu.edu.tr](mailto:kuzul@itu.edu.tr) (К.С.Л.)

\*Автор корреспондент: Талшын Р. Оразбаева, [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com)

### ТҮЙІН СӨЗДЕР

қар жамылғысы, экологиялық тәуекел, ауыр металдар, Igeo, PERI, техногендік жүктеме, Қазақстанның оңтүстік-шығысы

#### Мақала жайында:

Алынды: 27.01.2026

Қайта қаралды: 30.03.2026

Қабылданды: 23.06.2026

Жарияланды: 01.07.2026

### АБСТРАКТ

Мақалада Қазақстанның оңтүстік-шығыс аймағындағы үш контрастты станцияда (Алматы-Агро, Текелі, Мыңжылқы) 2005...2024 жылдар аралығында ауыр металдармен (Cd, Pb, Cu, As) қар жамылғысының ластануының экологиялық тәуекелі бағаланған. Қар жамылғысы маусымдық техногендік жүктемені көрсететін тиімді индикатор ретінде қарастырылған. Ластанудың дәрежесі мен қоршаған ортаға қауіптің деңгейін бағалау үшін геокорлану индексі (Igeo), потенциалды экологиялық тәуекел индекстері (PERI) және суммарлық ластану коэффициенті (Zc) қолданылды. Зерттеу нәтижелері бойынша максималды ластану мен тәуекел деңгейлері қалалық агломерация аймағында (Алматы-Агро) тіркелген, онда RI мәндері 600-ге жетіп, кадмий мен қорғасын бойынша Igeo көрсеткіштері 4,0-ден асып, «өте күшті» ластануға сәйкес келеді. Текелі станциясында мәндер локалды эмиссия көздерінен туындайтын орташа-жоғары тәуекел деңгейін көрсетеді. Жоғары таулы Мыңжылқы станциясы негізінен фондық сипатқа ие болып, кейбір маусымдарда тәуекелдің эпизодтық өсуі ғана байқалады. Алынған нәтижелер ластанудың кеңістіктегі әртүрлілігін көрсетеді және қар жамылғысының антропогендік әсер индикаторы ретіндегі маңыздылығын растайды.

## ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISK OF SNOW COVER CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN SOUTH-EASTERN KAZAKHSTAN

Talshyn Orazbayeva, Azamat Madibekov PhD, Associate Professor, Kuzu Sadullah Levent PhD, Associate Professor

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com) (T.R.O.), [madibekov@mail.ru](mailto:madibekov@mail.ru) (A.S.M.),

<sup>2</sup>Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey; [kuzul@itu.edu.tr](mailto:kuzul@itu.edu.tr) (K.S.L.)

\*Author correspondent: Talshyn R. Orazbayeva, [orazbayeva.talshyn@gmail.com](mailto:orazbayeva.talshyn@gmail.com)

### KEY WORDS

snow cover; ecological risk; heavy metals; Igeo; PERI; technogenic load; south-eastern Kazakhstan

#### About article:

Received:27.01.2026

### ABSTRACT

This study presents an assessment of ecological risk associated with heavy metal contamination (Cd, Pb, Cu, As) of snow cover at three contrasting monitoring stations in southeastern Kazakhstan (Almaty-Agro, Tekeli, Mynzhilki) over the period 2005...2024. Snow cover is considered an effective indicator of seasonal technogenic load. To assess the degree of contamination and potential environmental threat, the geoaccumulation index (Igeo), potential ecological risk index (PERI), and total contamination factor (Zc) were applied. The results indicate that the highest levels of contamination and ecological risk were recorded within the urban agglomeration zone

Revised: 30.03.2026  
Accepted: 23.06.2026  
Published: 01.07.2026

(Almaty-Agro), where RI values reached up to 600, and Igeo values for cadmium and lead exceeded 4.0, corresponding to very strong contamination. In Tekeli, contamination levels were characterized as moderate to high, primarily associated with local emission sources. The high-altitude Mynzhilki station generally retained background conditions, except for certain seasons marked by episodic increases in risk. The findings highlight the spatial heterogeneity of contamination and confirm the significance of snow cover as an indicator of anthropogenic environmental impact.

---

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