Прикладная экология

Applied ecology

УДК 504.054:666.94

АККУМУЛЯЦИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АРАРАТСКОЙ ДОЛИНЕ

Т. М. АСТАБАЦЯН[1)], ***М. М. ЗАФРАНСКАЯ***[2)], ***Н. С. ТАДЕВОСЯН***[3)], ***Е. О. ЧИЧОЯН***[4)]

[1)]*Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь*
[2)]*НИИ экспериментальной и клинической медицины Белорусского государственного медицинского университета, агрогородок Лесной, 106-2, 223040, Минский район, Минская область, Беларусь*
[3)]*Ереванский государственный медицинский университет им. Мхитара Гераци, ул. Корюна, 2, 0025, Ереван, Армения*
[4)]*Центр репродукции человека, ул. Молдовакана 41/7, 0062, г. Ереван, Армения*

Пылевое загрязнение атмосферного воздуха является ведущим проявлением техногенной нагрузки предприятий цементной промышленности на прилегающие экосистемы. Несмотря на значительное количество исследований отдельных природных сред в районах цементного производства, комплексные работы, одновременно охватывающие абиотические и биотические компоненты экосистем в зоне влияния конкретных предприятий Закавказья, остаются

Образец цитирования:
Астабацян ТМ, Зафранская ММ, Тадевосян НС, Чичоян ЕО. Аккумуляция поллютантов в компонентах экосистем зоны влияния цементного производства в Араратской долине. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2026;3:14–21.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-14-21

For citation:
Astabatsyan TM, Zafranskaya MM, Tadevosyan NS, Chichoyan EO. Pollutant accumulation in ecosystem components within the zone of influence of cement production in the Ararat valley. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2026;3:14–21. Russian.
https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-3-14-21

Авторы:
Тигран Мушегович Астабацян – аспирант факультета экологической медицины.
Марина Михайловна Зафранская – доктор медицинских наук профессор; главный научный сотрудник.
Наталья Степановна Тадевосян – доктор медицинских наук; научный сотрудник лаборатории гигиены окружающей среды и токсикологии.
Ева Оганесовна Чичоян – научный сотрудник центра репродукции человека.

Authors:
Tigran M. Astabatsyan, postgraduate student, faculty of environmental medicine.
tigran.astabacyan.88@bk.ru
Marina M. Zafranskaya, doctor of science (medicine), full professor; chief researcher.
zafranskaya@gmail.com
Natalia S. Tadevosyan, doctor of science (medicine); researcher at the laboratory of environmental hygiene and toxicology.
tadevosnat@yahoo.com
Yeva O. Chichoyan, researcher at the center of human reproduction .
yevachichoyan@gmail.com

немногочисленными. Дается оценка пространственных закономерностей распределения и аккумуляции техногенных поллютантов в абиотических и биотических компонентах экосистем в зоне влияния ЗАО «Араратцемент» (Араратская долина, Армения). Проведен комплексный анализ содержания загрязняющих веществ в атмосферных выпадениях, почвах верхнего горизонта (0–10 см), листьях древесных растений (*Prunus armeniaca* L., *Morus alba* L.), а также поверхностных и подземных водах. Отбор проб осуществлялся вдоль радиальных трансект от промышленной площадки с учетом преобладающего направления ветров. Установлено формирование выраженного градиента аэрозольной нагрузки: медианная интенсивность пылеосаждения на расстоянии 0,3 км от источника составила 168 мг/м^2/сут, на расстоянии 3 км – 84 мг/м^2/сут (p = 0,008). Содержание Pb и Cr в пыли ближней зоны превышало значения контрольной точки в 2,1 раза (p = 0,008). Концентрации PM_{10} (52 мкг/м^3) и $PM_{2,5}$ (21 мкг/м^3) в импактной точке (0,7 км) превышали рекомендуемые среднесуточные уровни ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения) в 1,16 и 1,4 раза соответственно; концентрации SO_2 и NO_2 оставались ниже нормативов ВОЗ, что указывает на преимущественно пылевой характер загрязнения. В почвах импактной зоны (0,5 км) содержание Pb (18,2 мг/кг) и Cd (0,42 мг/кг) превышало значения локальной контрольной площадки (2 км) в 1,86 и 2,0 раза соответственно (p = 0,008), при этом не превышая ориентировочно допустимых концентраций. Зафиксирован сдвиг pH почв в щелочную сторону на 0,40 единицы (p = 0,008), обусловленный поступлением карбоната и гидроксида кальция с цементной пылью. Коэффициенты локального контраста составили 1,86 для Pb и 2,00 для Cd, интегральный индекс $PLI_{control}$ – 1,93, что характеризует умеренно выраженный полиэлементный контраст. Содержание Pb в листьях *P. armeniaca* (4,2 мг/кг) и *M. alba* (3,4 мг/кг) находилось в верхней части использованного сопоставительного диапазона; содержание Ca превышало 11 г/кг, что рассматривается как характерный маркер цементного загрязнения. Листо-почвенное отношение BCF_{leaf} составило 0,231 для *P. armeniaca* и 0,187 для *M. alba*, количественно характеризуя интегральную листовую нагрузку Pb. Поверхностные воды характеризовались более высоким содержанием Pb (6,2 мкг/л) по сравнению с подземными (4,1 мкг/л, p = 0,016), повышенными значениями TDS (512 мг/л) и pH (7,50), однако все показатели оставались ниже рекомендуемых уровней ВОЗ. Согласованность пространственных градиентов загрязнения во всех исследованных средах доказывает целесообразность применения комплексного подхода к биоиндикационной оценке экологического состояния территорий, прилегающих к предприятиям цементной отрасли.

Ключевые слова: цементное производство; тяжелые металлы; атмосферные выпадения; загрязнение почвы; биоаккумуляция; Араратская долина; пылевая нагрузка.

POLLUTANT ACCUMULATION IN ECOSYSTEM COMPONENTS WITHIN THE ZONE OF INFLUENCE OF CEMENT PRODUCTION IN THE ARARAT VALLEY

T. M. ASTABATSYAN[a], ***M. M. ZAFRANSKAYA***[b], ***N. S. TADEVOSYAN***[c], ***E. O. CHICHOYAN***[d]

[a]*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,*
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
[b]*Research Institute of Experimental and Clinical Medicine, Belarusian State Medical University,*
106-2, agro-town Liasny 223040, Minsk District, Minsk Region, Belarus
[c]*Yerevan State Medical University after Mkhitar Heratsi,*
2 Koryun Street, Yerevan 0025, Armenia
[d]*Human Reproduction Center,*
47/1 Moldovakan Street, Yerevan 0062, Armenia
Corresponding author: T. M. Astabatsyan (tigran.astabacyan.88@bk.ru)

Atmospheric dust pollution is a primary manifestation of technogenic pressure of cement plants on adjacent ecosystems. Despite a substantial body of research on individual environmental components in areas affected by cement production, comprehensive studies simultaneously covering abiotic and biotic ecosystem components in the zone of influence of specific plants in the South Caucasus remain scarce. The aim of this study was to assess the spatial patterns of distribution and accumulation of technogenic pollutants in abiotic and biotic ecosystem components within the zone of influence of the Araratcement cement plant (Ararat Valley, Armenia). A comprehensive analysis of pollutant concentrations was carried out in atmospheric deposition, topsoil (0–10 cm), leaves of woody plants (*Prunus armeniaca* L., *Morus alba* L.), and surface water and groundwater. Sampling was conducted along radial transects from the industrial site, taking into account the prevailing wind directions. A pronounced aerosol load gradient was identified: the median dust deposition rate at 0.3 km from the source was 168 mg/(m^2*day), decreasing to 84 mg/(m^2*day) at 3 km (p = 0.008). Pb and Cr concentrations in dust from the near zone exceeded control-site values by a factor of 2.1 (p = 0.008). PM_{10} (52 μg/m^3) and $PM_{2.5}$ (21 μg/m^3) concentrations at the impact site (0.7 km) exceeded WHO recommended daily levels by factors of 1.16 and 1.4, respectively, whereas SO_2 and NO_2 concentrations remained below WHO guidelines, indicating a predominantly particulate nature of contamination. In the impact zone soils (0.5 km), Pb (18.2 mg/kg) and Cd (0.42 mg/kg) concentrations exceeded local

control-site values (2 km) by factors of 1.86 and 2.0, respectively (p = 0.008), while remaining below the approximate permissible concentrations. A statistically significant alkaline shift of soil pH by 0.40 units (p = 0.008) was recorded, attributed to the deposition of calcium carbonate and hydroxide with cement dust. Local contrast coefficients were 1.86 for Pb and 2.00 for Cd; the integral $PLI_{control}$ index was 1.93, characterizing a moderately expressed multielement contrast. Pb content in leaves of *P. armeniaca* (4.2 mg/kg) and *M. alba* (3.4 mg/kg) was in the upper part of the comparison range used; Ca content exceeded 11 g/kg, which is considered a characteristic marker of cement pollution. The leaf-to-soil ratio BCF_{leaf} was 0.231 for *P. armeniaca* and 0.187 for *M. alba*, quantitatively characterizing the integrated leaf Pb load. Surface water exhibited higher Pb concentrations (6.2 μg/L) compared to groundwater (4.1 μg/L, p = 0.016), elevated TDS (512 mg/L) and pH (7.50), though all parameters remained below WHO guideline values. The consistency of spatial pollution gradients in all studied media proves the expediency of applying a comprehensive approach to the bioindicative assessment of territories adjacent to cement industry enterprises.

Keywords: cement production; heavy metal; atmospheric deposition; soil contamination; bioaccumulation; Ararat Valley; dust load.

Введение

Цементная промышленность традиционно относится к числу наиболее ресурсоемких и экологически уязвимых секторов экономики. Процессы добычи сырья, обжига клинкера и помола цемента сопровождаются масштабными эмиссиями в окружающую среду поллютантов различной химической природы. Ведущим фактором техногенного воздействия цементных заводов выступает аэрогенное загрязнение, обусловленное выбросами минеральной пыли, взвешенных частиц фракций PM_{10} и $PM_{2.5}$, а также газообразных примесей (оксидов серы, азота, углерода) и тяжелых металлов [1; 2].

Оседая на подстилающую поверхность, цементная пыль инициирует каскад негативных экологических эффектов. В почвенном покрове, выступающем главным депонирующим компонентом экосистем, происходит не только прогрессирующее накопление приоритетных загрязняющих веществ (в частности, Pb, Cd, Cr, Zn), но и трансформация физико-химических свойств. Поступление больших объемов кальцит- и силикатсодержащей пыли вызывает характерный сдвиг реакции почвенной среды (pH) в щелочную сторону, что, в свою очередь, модифицирует биодоступность тяжелых металлов [3; 4]. В биотическом блоке экосистем растения подвергаются как прямому воздействию аэрозолей (закупорка устьиц, снижение интенсивности фотосинтеза), так и опосредованному – через корневое поглощение поллютантов из загрязненных почв [5]. При этом древесные виды, обладая развитой листовой поверхностью и длительным периодом вегетации, выступают высокоинформативными биоиндикаторами пространственного распределения промышленных выбросов [6]. В исследованиях территорий возле цементных предприятий поверхностные и подземные воды рассматриваются как самостоятельные компоненты комплексного экологического мониторинга [7].

Несмотря на обширную мировую литературу, посвященную экологическим проблемам цементного производства [8; 9], большинство исследований фокусируется на анализе отдельных компонентов окружающей среды (только воздуха, только почв или только растений). Однако для объективной оценки экологических рисков требуется комплексный, мультисредовый подход, позволяющий проследить пути миграции загрязняющих веществ.

Особую актуальность подобные комплексные исследования приобретают для Араратской долины (Республика Армения) – важнейшего сельскохозяйственного региона с интенсивным растениеводством, специфическим засушливым климатом и характерной розой ветров. Функционирование на данной территории крупного промышленного узла – закрытого акционерного общества «Араратцемент» (ЗАО «Араратцемент») – диктует необходимость регулярного и детального экологического мониторинга.

На основании вышеизложенного, целью настоящего исследования является комплексная оценка пространственных закономерностей распределения и аккумуляции техногенных поллютантов в основных абиотических и биотических компонентах экосистем в зоне влияния цементного производства ЗАО «Араратцемент».

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) количественно оценить пылевую нагрузку, концентрации PM_{10}, $PM_{2.5}$, газообразных примесей и химический состав атмосферных выпадений по градиенту удаленности от источника эмиссии;

2) определить уровень накопления тяжелых металлов (Pb, Cd) и изменение физико-химических параметров (pH, содержание нитратов и сульфатов) в почвах верхнего горизонта;

3) исследовать аккумуляцию приоритетных элементов (Pb, Cr, Zn, Ca) в листьях типичных для региона древесных сельскохозяйственных культур (*Prunus armeniaca* L., *Morus alba* L.) и оценить листо-почвенное отношение Pb как показатель интегральной листовой нагрузки;

4) дать сравнительную гидрохимическую характеристику поверхностных и подземных вод в зоне влияния предприятия.

Материалы и методы исследования

Район и объекты исследования. Для оценки пространственных закономерностей распределения техногенных поллютантов при воздействии цементного производства проведен комплексный анализ содержания загрязняющих веществ в основных абиотических и биотических компонентах экосистем. Исследования проводились в Араратской долине в зоне влияния промышленной площадки ЗАО «Араратцемент». Отбор проб осуществлялся вдоль радиальных трансект от предприятия с учетом преобладающего направления ветров. Объектами исследования послужили атмосферные выпадения (оседающая пыль и мелкодисперсные взвешенные частицы), почвы верхнего горизонта (0–10 см), листья древесных растений, а также поверхностные и подземные воды.

Методы отбора проб. Для количественной оценки интенсивности аэрозольных выпадений использован метод пассивного пылесбора с помощью стандартных чашек Петри (диаметр 90 мм), экспонированных на высоте 1,5 м от поверхности в течение 30 сут. Точки отбора располагались на расстоянии 0,3 км (ближняя импактная зона, юго-восток) и 3 км (удаленная зона, северо-запад). Параллельно выполнены серии измерений (n = 6, с интервалом 2 ч в дневное время) концентраций взвешенных частиц фракций PM_{10} и $PM_{2.5}$, а также газообразных примесей (SO_2, NO_2) в приземном слое атмосферы в импактной (0,7 км, юг) и операционной контрольной (5 км) точках. Расстояние 5 км не является произвольным. В полевых исследованиях цементных предприятий применялись схемы с площадками на расстояниях 0,2–4 км и контролем около 5 км, а также парное сопоставление почв и растительности на расстоянии 0,5 и 5 км [10; 11]. Опубликованные сравнения площадок ближе и дальше 3,5 км показывают зависимость дальности влияния от технологии и условий переноса [12].

Отбор проб почв (горизонт 0–10 см) выполнен на двух площадках: 0,5 км к северо-востоку (ближняя импактная зона) и 2 км к югу (локальная контрольная площадка). На каждой площадке заложено 5 элементарных проб (смешанные образцы из 3–5 уколов), каждая из которых анализировалась индивидуально (n = 5). Полученные отношения описывают локальный пространственный контраст между обследованными площадками.

Для оценки аккумуляции поллютантов в фитомассе проанализированы пробы листьев двух видов: абрикоса обыкновенного (*Prunus armeniaca* L., 1 км к северу) и тутового дерева (*Morus alba* L., 1,5 км к западу). Отобрано по 8 индивидуальных листовых проб для каждого вида (n = 8).

Отбор проб воды осуществлялся из двух источников: подземных вод (артезианская скважина глубиной 25 м, ~1 км к западу, n = 5) и поверхностных вод (ирригационный канал, 1,2 км к югу, n = 5).

Аналитические исследования выполнены с использованием высокоточного оборудования. Элементный анализ (определение содержания тяжелых металлов и кальция) проводился методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометрах *Agilent 7800/7900* и *Thermo iCAP*. Определение содержания анионов (нитратов, сульфатов, хлоридов) в почвенных вытяжках и водных пробах выполнялось методом ионной хроматографии (*Dionex ICS-1100*). Концентрация мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе оценивалась методом лазерной нефелометрии (*TSI 5030*). Набор определяемых элементов сформирован как целевая индикаторная панель «источник–маркер–эффект»: Pb, Cd и Cr характеризуют токсичную фракцию выбросов цементных печей, Zn дополняет оценку нагрузки тяжелыми металлами как часто встречающийся элемент, а Ca выступает маркером минеральной составляющей цементной пыли [13].

Расчетные экотоксикологические показатели. Для количественной оценки различий между почвенными площадками рассчитывался коэффициент локального контраста (K_c):

$$K_c = C_{imp} / C_{control},$$

где C_{imp} – содержание элемента в ближней импактной зоне, $C_{control}$ – содержание элемента на локальной контрольной площадке (2 км). Интегральный индекс контраста двух металлов рассчитывался как геометрическое среднее:

$$PLI_{control} = (K_{c,Pb} \times K_{c,Cd})^{1/2}.$$

Интегральную листовую нагрузку Pb оценивали с помощью листо-почвенного отношения (BCF_{leaf}) [14]:

$$BCF_{leaf} = C_{leaf} / C_{soil},$$

где C_{leaf}– содержание Pb в листовых пробах, C_{soil} – медианное содержание Pb в почве ближней площадки. Показатель отражает совокупную листовую нагрузку Pb, формируемую тканевым пулом и аэрогенным осаждением, и используется для биоиндикационной характеристики растительного компонента экосистемы.

Статистическая обработка данных. Ввиду малых объемов выборок (n = 5–8) и невозможности корректной верификации нормальности распределения при таких объемах, при статистическом анализе принято допущение о ненормальности распределений [15]. Результаты представлены методами описательной

непараметрической статистики в виде медианы и интерквартильного размаха – Me (Q1÷Q3). Сравнение двух независимых групп выполнено с использованием U-критерия Манна – Уитни (Mann – Whitney U test, двусторонний, точный). Уровень статистической значимости принят равным α = 0,05. Статистическая обработка массивов данных реализована в программной среде *Python 3.11* с использованием библиотеки *scipy.stats*.

Результаты исследования и их обсуждение

Пылевая нагрузка и состав атмосферных выпадений. Пылевое загрязнение атмосферного воздуха выступает ведущим фактором техногенного воздействия предприятий цементной промышленности на прилегающие экосистемы [1; 2]. Установлено, что медианная интенсивность осаждения пыли на ближней импактной площадке (0,3 км) составила 168 (159 ÷ 176) мг/м^2/сут, тогда как на удаленной площадке (3 км) – 84 (78 ÷ 90) мг/м^2/сут. Различия статистически значимы (U = 0, p = 0,008) (табл. 1). Кратность различий медиан составила 2,0 раза, что свидетельствует о выраженном градиенте пылеосаждения, формируемом промышленным источником.

Таблица 1

Пылевая нагрузка и химический состав атмосферных выпадений в зоне влияния ЗАО «Араратцемент»; Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Table 1

Dust load and chemical composition of atmospheric deposition in the impact zone of CJSC «Araratcement»; Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Параметр	0,3 км (Ю-В)	3 км (С-З)	p	Кратность различий
Осаждение пыли, мг/м^2/сут.	168 (159 ÷ 176)	84 (78 ÷ 90)	0,008*	2,0
Pb в пыли, мг/кг	14,1 (13,4 ÷ 15,2)	6,8 (6,1 ÷ 7,4)	0,008*	2,1
Cr в пыли, мг/кг	3,2 (2,9 ÷ 3,4)	1,5 (1,3 ÷ 1,7)	0,008*	2,1
SiO_2, %	63	58	–	1,1

Примечание. * – p < 0,05.

В ходе анализа химического состава осевшей пыли зафиксировано повышенное содержание тяжелых металлов в образцах ближней зоны. Содержание Pb на расстоянии 0,3 км от источника в 2,1 раза превышало значение, отмеченное на удалении 3 км (U = 0, p = 0,008). Аналогичная закономерность установлена для Cr (кратность различий – 2,1 раза). Доля SiO_2 в пылевых пробах ближней точки (63 %) несколько превышала таковую на удаленной площадке (58 %), что согласуется с литературными данными о минералогическом составе цементной пыли, в которой преобладают силикаты и свободный кварц [2].

Результаты измерений содержания взвешенных частиц и газообразных примесей представлены в табл. 2. Медианная концентрация PM_{10} в импактной точке составила 52 (48÷56) мкг/м^3, что значимо превышает значения контрольной точки (U = 0, p = 0,002). Для фракции $PM_{2.5}$ различия также статистически значимы: 21 (18÷24) мкг/м^3 в импактной зоне против 11 (9÷13) мкг/м^3 в контрольной точке.

Таблица 2

Содержание взвешенных частиц и газообразных примесей в атмосферном воздухе; Me (Q_1÷Q_3), n = 6

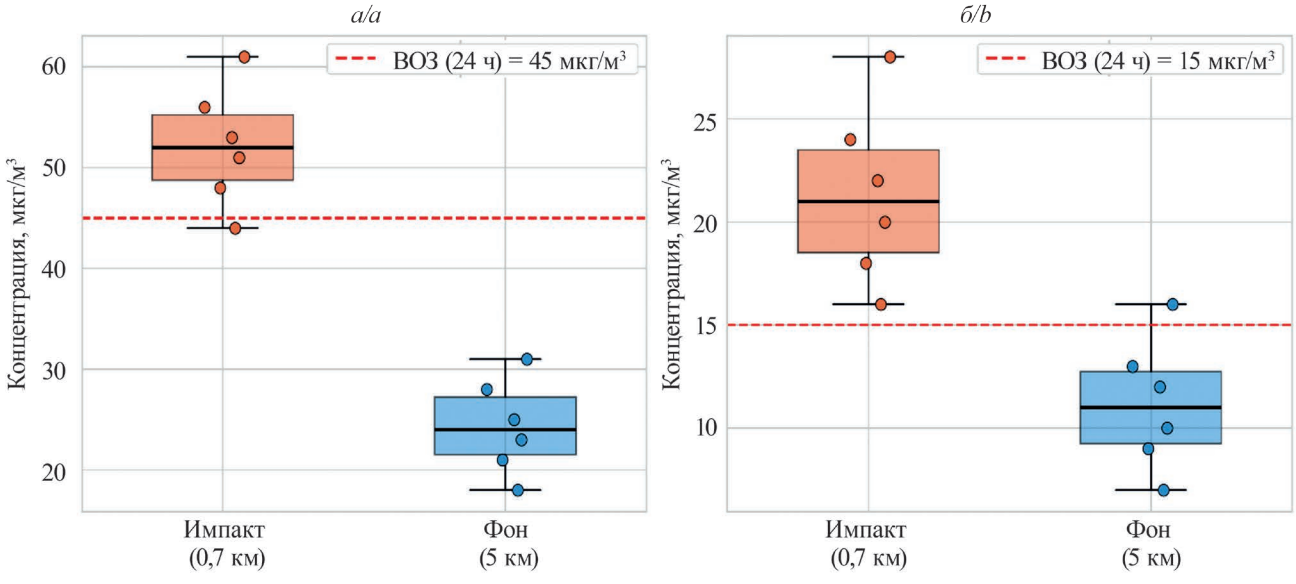
Table 2

Content of suspended particles and gaseous impurities in the ambient air; Me (Q_1÷Q_3), n = 6

Параметр	Импакт (0,7 км)	Контрольная точка (5 км)	p	Кратность
PM_{10}, мкг/м^3	52 (48 ÷ 56)	24 (21 ÷ 28)	0,002*	2,2
$PM_{2.5}$, мкг/м^3	21 (18 ÷ 24)	11 (9 ÷ 13)	0,002*	1,9
SO_2, мкг/м^3	7,2 (6,2 ÷ 8,3)	3,1 (2,5 ÷ 3,8)	0,002*	2,3
NO_2, мкг/м^3	16,5 (14,5 ÷ 19,0)	8,8 (7,5 ÷ 10,5)	0,002*	1,9

Примечание. * – p < 0,05.

Значение медианной концентрации PM_{10} в импактной точке в 1,16 раза выше рекомендуемого среднесуточного уровня ВОЗ (45 мкг/м^3 [3]); для $PM_{2.5}$ превышение составляет 1,4 раза (рекомендация 15 мкг/м^3). В контрольной точке значения обеих фракций находились в пределах рекомендаций (рис.).



Концентрации *а*) PM_{10} и *б*) $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе импактной (0,7 км) и операционной контрольной (5 км) точек в сопоставлении с рекомендуемыми среднесуточными уровнями ВОЗ (пунктирные горизонтальные линии)

Concentrations of *a*) PM_{10} and *b*) $PM_{2.5}$ in the ambient air of the impact (0.7 km) and operational control (5 km) sites in comparison with the WHO recommended daily mean levels (dashed horizontal lines)

Концентрации SO_2 и NO_2 не превышали рекомендуемых уровней ВОЗ (40 мкг/м³ для SO_2 и 25 мкг/м³ для NO_2), что служит подтверждением преимущественно пылевого, а не газообразного характера аэрогенного загрязнения.

Двукратное снижение интенсивности пылеосаждения на расстоянии 3 км согласуется с результатами аналогичных исследований в зонах влияния цементных заводов [1; 2] и служит указанием на преобладающий вклад локального источника в формирование нагрузки на прилегающие территории.

Аккумуляция тяжелых металлов и физико-химические свойства почв. Содержание Pb в почве ближней зоны (0,5 км) составило 18,2 (17,0÷19,8) мг/кг, что в 1,86 раза превышает значение локальной контрольной площадки (табл. 3). Для Cd выявлено аналогичное двукратное превышение (U = 0, p = 0,008).

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов и физико-химические свойства почв (горизонт 0–10 см); Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Table 3

Content of heavy metals and physicochemical properties of soils (0–10 cm horizon; Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Параметр	0,5 км (С-В)	2 км (Ю), локальная контрольная площадка	p	Кратность / K_c	ОДК[1]
pH (водн.)	7,40 (7,30 ÷ 7,50)	7,00 (6,90 ÷ 7,10)	0,008*	+0,40 ед.	—
Pb, мг/кг	18,2 (17,0 ÷ 19,8)	9,8 (8,9 ÷ 10,7)	0,008*	1,86	32
Cd, мг/кг	0,42 (0,38 ÷ 0,47)	0,21 (0,18 ÷ 0,25)	0,008*	2,00	2,0
NO_3^-, мг/кг	22,5 (20,5 ÷ 24,0)	18,1 (16,0 ÷ 20,5)	0,151	1,24	—
SO_4^{2-}, мг/кг	115 (105 ÷ 124)	98 (89 ÷ 108)	0,222	1,17	—

Примечание. 1 – ОДК [16]; * – p < 0,05.

Абсолютные значения содержания Pb и Cd не превышают ориентировочно допустимых концентраций (ОДК)[1], составляя для Pb 0,57 ОДК в ближней зоне, для Cd – 0,21 ОДК. Коэффициенты локального контраста K_c составили 1,86 для Pb и 2,00 для Cd, а интегральный индекс $PLI_{control}$ – 1,93. Согласованная кратность различий Pb и Cd характеризует умеренно выраженный полиэлементный контраст между обследованными площадками.

Медианное значение pH в ближней зоне (7,40) статистически значимо выше показателя контрольной площадки (7,00). Сдвиг реакции среды в щелочную сторону на 0,4 единицы обусловлен поступлением карбоната кальция с цементной пылью [2; 4] и может рассматриваться как специфический индикатор

[1]ТКП 17.03-06-2019. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли. Порядок выполнения работ по дифференцированному нормированию содержания химических веществ в землях (включая почвы). Минск: Минприроды, 2019. 22 с.

данного типа загрязнения. Процесс подщелачивания способствует снижению биодоступности тяжелых металлов за счет образования труднорастворимых гидроксидов [4]. Отсутствие статистически значимых различий в содержании нитратов и сульфатов может свидетельствовать об их диффузном происхождении.

Фитоаккумуляция поллютантов листьями древесных растений. По результатам элементного анализа листьев *P. armeniaca* и *M. alba* (табл. 4) установлено, что медианное содержание Pb составило 4,2 и 3,4 мг/кг соответственно. Различия между видами находятся на уровне тенденции (U = 16, p = 0,105). Зафиксированные показатели располагаются в верхней части сопоставительного диапазона содержания Pb в листьях (0,1–5,0 мг/кг), что согласуется с аэрогенной нагрузкой в зоне воздействия предприятия.

Таблица 4

Содержание элементов в листьях древесных растений в зоне влияния ЗАО «Араратцемент»; Me (Q_1÷Q_3), n = 8

Table 4

Element content in the leaves of woody plants in the impact zone of CJSC «Araratcement»; Me (Q_1÷Q_3), n = 8

Параметр	*P. armeniaca* (1 км)	*M. alba* (1,5 км)	U	p	Сопоставительный диапазон[1]
Pb, мг/кг	4,2 (3,5 ÷ 4,8)	3,4 (2,9 ÷ 3,9)	16	0,105	0,1–5,0
Cr, мг/кг	0,51 (0,44 ÷ 0,57)	0,47 (0,41 ÷ 0,53)	22	0,328	0,2–1,0
Zn, мг/кг	30 (27 ÷ 34)	26 (23 ÷ 30)	19	0,161	20–100
Ca, мг/кг	12100 (11350÷12750)	11050 (10400÷11700)	14	0,065	10000–25000

Примечание. [1]Диапазоны значений, использованные для описательного сопоставления.

Содержание Cr и Zn в листьях обоих видов находилось в пределах использованных сопоставительных диапазонов; статистически значимые межвидовые различия отсутствовали. Особый интерес представляет высокая концентрация Ca (более 11 г/кг сухой массы в обоих образцах). Повышенное содержание кальция согласуется с поступлением минеральной составляющей цементной пыли на территориях, подверженных воздействию цементного производства [2].

Листо-почвенное отношение BCF_{leaf} составило 0,231 для *P. armeniaca* и 0,187 для *M. alba*. Полученные значения количественно характеризуют интегральную листовую нагрузку Pb у исследованных видов и дополняют их биоиндикационную оценку.

Гидрохимическая характеристика поверхностных и подземных вод. При анализе поверхностных и подземных вод (табл. 5) установлено, что медианное содержание Pb в поверхностных водах (6,2 мкг/л) статистически значимо превышает показатель, зафиксированный в подземных водах (4,1 мкг/л; U = 1, p = 0,016). При этом оба значения остаются ниже безопасного уровня, рекомендованного ВОЗ (10 мкг/л [16]).

Таблица 5

Гидрохимические показатели поверхностных и подземных вод; Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Table 5

Hydrochemical parameters of surface water and groundwater; Me (Q_1÷Q_3), n = 5

Параметр	Артезианская скважина	Ирригационный канал	p	ВОЗ[1]
pH	7,10 (7,00 ÷ 7,20)	7,50 (7,40 ÷ 7,60)	0,008*	6,5–8,5
TDS, мг/л	420 (400 ÷ 445)	512 (488 ÷ 540)	0,008*	< 600
Pb, мкг/л	4,1 (3,6 ÷ 4,6)	6,2 (5,5 ÷ 6,9)	0,016*	10
Cr, мкг/л	н/о	1,8 (1,5 ÷ 2,1)[2]	–	50
Ca, мг/л	68 (59 ÷ 76)[2]	н/о	–	–
Cl^-, мг/л	42 (36 ÷ 46)[2]	н/о	–	250
SO_4^{2-}, мг/л	н/о	132 (121 ÷ 145)[2]	–	250

Примечание. [1]ВОЗ [16]; [2]межгрупповое сравнение невозможно; н/о – не определялось; * – p < 0,05.

Поверхностные воды характеризуются более высокой общей минерализацией (TDS = 512 мг/л) и повышенным значением pH (7,50). Сопоставление поверхностных и подземных источников воды применялось при комплексной оценке территорий цементных предприятий [7]. Более высокие значения Pb, TDS и pH в поверхностной воде характеризуют ее повышенную восприимчивость к поступлению минерализованного вещества с прилегающей территории.

В целом совокупность выявленных закономерностей свидетельствует о формировании единой техногенной геохимической аномалии в импактной зоне, которая проявляется в согласованном отклике всех исследованных компонентов экосистемы.

Заключение

На основании проведенного комплексного исследования установлены пространственные закономерности распределения техногенных поллютантов в зоне влияния ЗАО «Араратцемент». Подтверждено, что ведущим фактором трансформации экосистем выступает аэрогенное поступление загрязняющих веществ. В импактной зоне (до 1 км) зафиксирован выраженный градиент пылевой нагрузки с двукратным увеличением интенсивности осаждения пыли и концентраций тяжелых металлов (Pb, Cr), а также превышением рекомендуемых ВОЗ среднесуточных уровней для мелкодисперсных фракций PM_{10} и $PM_{2.5}$.

В почвенном покрове прилегающих территорий выявлен локальный контраст содержания Pb и Cd: на ближней площадке значения были выше контрольных в 1,86 и 2,00 раза соответственно. При отсутствии превышений нормативов интегральный индекс $PLI_{control}$ составил 1,93, характеризуя умеренно выраженный полиэлементный контраст. Специфическим индикатором эмиссий цементного производства выступает зафиксированный сдвиг реакции почвенной среды в слабощелочную сторону, способствующий связыванию металлов и снижению их биодоступности.

При анализе фитомассы древесных растений (*Prunus armeniaca* L., *Morus alba* L.) подтверждена их высокая биоиндикационная значимость. Отмечено интенсивное накопление кальция в листовом аппарате, выступающего надежным маркером осаждения минеральной пыли. Листо-почвенное отношение BCF_{leaf} составило 0,231 для *P. armeniaca* и 0,187 для *M. alba*. Полученные значения количественно характеризуют интегральную листовую нагрузку Pb у исследованных видов.

Сравнительная характеристика поверхностных и подземных вод выявила более высокие уровни минерализации и содержания Pb в поверхностной воде по сравнению с подземной. В целом, согласованность выявленных градиентов загрязнения во всех исследованных средах обосновывает эффективность применения мультисредового подхода при оценке экологических рисков и указывает на необходимость актуализации программ производственного экологического контроля на урбоагроландшафтах Араратской долины.

Библиографические ссылки / References

1. Zerrouqi Z, Sbaa M, Oujidi M, et al. Assessment of cement's dust impact on the soil using principal component analysis and GIS. *International Journal of Environmental Science and Technology.* 2008;5(1):125–134. DOI: 10.1007/BF03326005.

2. Al-Khashman OA, Shawabkeh RA. Metals distribution in soils around the cement factory in southern Jordan. *Environmental Pollution.* 2006;140(3):387–394. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.08.023.

3. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. 273 p.

4. Asubiojo OI, Aina PO, Oluwole AF, et al. Effects of cement production on the elemental composition of soils in the neighbourhood of two cement factories. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1991;57–58:819–828.

5. Sutherland RA. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*. 2000;39(6):611–627. DOI: 10.1007/s002540050473.

6. Tomlinson DL, Wilson JG, Harris CR, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*. 1980;33:566–575. DOI: 10.1007/BF02414780.

7. Egbe ER, Nsonwu-Anyanwu AC, Offor SJ, et al. Element content of surface and underground water sources around a cement factory site in Calabar, Nigeria. *Iranian Journal of Toxicology*. 2017;11(1):19–25. DOI: 10.29252/arakmu.11.1.19.

8. Nanos GD, Ilias IF. Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf physiological parameters. *Environmental Science and Pollution Research*. 2007;14(3):212–214. DOI: 10.1065/espr2006.08.327.

9. Baker AJM. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition.* 1981;3(1–4):643–654. DOI: 10.1080/01904168109362867.

10. Olatunde KA, Sosanya PA, Bada BS, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soils around a major cement factory, Ibese, Nigeria. *Scientific African*. 2020;9:e00496. DOI: 10.1016/j.sciaf.2020.e00496.

11. Kabiru S, Rufai Y, Lukman A, et al. Effects of cement kiln dust on some selected plants around Obajana Cement Factory. *Journal of Chemical Society of Nigeria*. 2015;40(2).

12. Schuhmacher M, Bocio A, Agramunt MC, et al. PCDD/F and metal concentrations in soil and herbage samples collected in the vicinity of a cement plant. *Chemosphere*. 2002;48(2):209–217. DOI: 10.1016/S0045-6535(02)00042-5.

13. Gupta RK, Majumdar D, Trivedi JV, et al. Particulate matter and elemental emissions from a cement kiln. *Fuel Processing Technology*. 2012;104:343–351. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.06.007.

14. Cakaj A, Lisiak-Zielińska M, Hanć A, et al. Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific Reports*. 2023;13:6926. DOI: 10.1038/s41598-023-34019-9.

15. Fay MP, Proschan MA. Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. *Statistics Surveys*. 2010;4:1–39. DOI: 10.1214/09-SS051.

16. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. 614 p.

Статья поступила в редколлегию 05.07.2026.
Received by editorial board 05.07.2026.