



УДК 614.76
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-3-420-433
EDN DZTRZZ

Полиэлементное загрязнение почв в зоне аэротехногенного воздействия Новочеркасской ГРЭС

Константинова Е.Ю., Чаплыгин В.А., Манджиева С.С.,
Черникова Н.П., Минкина Т.М.

Южный федеральный университет

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

kons@sfedu.ru, chaplygin@sfedu.ru, msaglara@sfedu.ru, nchernikova@sfedu.ru, minkina@sfedu.ru

Аннотация. Тепловые электростанции являются значимым источником выбросов загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и металлоидов (ТММ). В данной работе представлена оценка индивидуального и суммарного загрязнения ТММ антропогенно-измененных почв импактной зоны Новочеркасской ГРЭС (НГРЭС) (Ростовская обл., Россия). Проведен сравнительный анализ результатов классификации загрязнения почв по показателям, широко используемым в отечественной и зарубежной практике экологического контроля: индексу геоаккумуляции (*Igeo*) и коэффициенту концентрации (*Kc*), суммарному показателю загрязнения (*Zc*), модифицированному комплексному суммарному показателю загрязнения (*Zct(z)*) и индексу загрязнения Немерова (*NPI*). Показано, что, согласно *Kc*, приоритетными поллютантами почв импактной зоны НГРЭС являются Ni, Cu, Zn, Pb, Cd и As, тогда как по *Igeo* только последние три элемента представляют значимую опасность. Максимальные значения *Zc* и *Zct(z)* достигают 21 и 27 соответственно, что характеризует умеренно опасное суммарное загрязнение почв, тогда как, согласно *NPI*, в импактной зоне НГРЭС выявлена область опасного загрязнения. Полученные результаты подтверждают наличие аэротехногенного воздействия тепловой электростанции на прилегающие территории, вместе с тем негативные эффекты в виде выраженного полиэлементного загрязнения почв проявляются в радиусе 3 км от источника.

Ключевые слова: потенциально токсичные элементы, тяжелые металлы и металлоиды, оценка загрязнения, индекс геоаккумуляции, индекс загрязнения Немерова, теплоэлектростанция, Ростовская область

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10097, <https://rscf.ru/project/22-77-10097/>

Для цитирования: Константинова Е.Ю., Чаплыгин В.А., Манджиева С.С., Черникова Н.П., Минкина Т.М. 2025. Полиэлементное загрязнение почв в зоне аэротехногенного воздействия Новочеркасской ГРЭС. Региональные геосистемы, 49(3): 420–433. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-420-433 EDN: DZTRZZ

Polyelemental Pollution of Soils under the Aerotechnogenic Impact of Novocherkassk State District Power Plant

Elizaveta Yu. Konstantinova, Viktor A. Chaplygin, Saglara S. Mandzhieva,
Natalia P. Chernikova, Tatiana M. Minkina

Southern Federal University

105/42 Bolshaya Sadovaya St, Rostov-on-Don 344006, Russia

kons@sfedu.ru, chaplygin@sfedu.ru, msaglara@sfedu.ru, nchernikova@sfedu.ru, minkina@sfedu.ru

Abstract. Thermal power plants are a significant source of pollutant emissions, including heavy metals and metalloids (HMs). This paper presents an assessment of individual and total HM pollution of

© Константинова Е.Ю., Чаплыгин В.А., Манджиева С.С., Черникова Н.П., Минкина Т.М., 2025

anthropogenically modified soils in the Novocherkassk State District Power Plant (NGRES) impact zone (Rostov Region, Russia). A comparative analysis of the results of soil pollution classification was performed applying the parameters widely used in domestic and foreign environmental monitoring practices: geoaccumulation index (Igeo) and concentration coefficient (Kc), total pollution index (Zc), modified complex total pollution index (Zct(g)), and Nemerov pollution index (NPI). The findings show that according to Kc, the priority pollutants of soils in the NGRES impact zone are Ni, Cu, Zn, Pb, Cd and As, while according to Igeo, only the last three elements pose a significant hazard. The maximum values of Zc and Zct(g) reach 21 and 27, respectively, which characterizes moderately dangerous total soil pollution, whereas according to NPI, an area of dangerous pollution has been identified in the impact zone of NGRES. The results obtained confirm the presence of aerotechnogenic impact of the thermal power plant on adjacent territories, at the same time, negative effects in the form of pronounced soil pollution with heavy metals appear within a radius of three km from the source.

Keywords: potentially toxic elements, trace elements, pollution assessment, geoaccumulation index, Nemerov pollution index, thermal power plant, Rostov Region

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-77-10097, <https://rscf.ru/project/22-77-10097/>

For citation: Konstantinova E.Yu., Chaplygin V.A., Mandzhieva S.S., Chernikova N.P., Minkina T.M. 2025. Polyelemental Pollution of Soils under the Aerotechnogenic Impact of Novocherkassk State District Power Plant. *Regional Geosystems*, 49(3): 420–433 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-420-433 EDN: DZTRZZ

Введение

Электростанции являются одним из ключевых источников загрязнения окружающей среды, особенно при использовании угля в качестве топлива. Его сжигание приводит к выбросам оксидов азота (NO_x), оксида углерода (CO), диоксида серы (SO₂), парниковых газов и пыли, содержащей тяжелые металлы и металлоиды (ТММ) – V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Pb [Коротченко и др., 2020; Linnik et al., 2020; Guercio et al., 2022; Mor et al., 2022]. Помимо выбросов, в процессе работы теплоэлектростанций образуются золошлаковые отходы, содержащие органические и неорганические загрязнители, образующиеся в процессе горения [Ковалева и др., 2020; Сычева, Кошелева, 2023; Насонкина и др., 2024; Konstantinov et al., 2024]. В результате пыления и атмосферных выпадений эти поллютанты накапливаются в почвах вокруг предприятий энергетики [Гаретова и др., 2023; Журавлева и др., 2023; Чаплыгин и др. 2024]. Поскольку электростанции часто располагаются в густонаселенных районах, их выбросы представляют серьезную угрозу для здоровья населения [Lobzenko et al., 2020; Minkina et al., 2021].

Новочеркасская ГРЭС (НГРЭС) с установленной мощностью 2258 МВт является крупнейшей тепловой электростанцией юга России. В 7,5 км к западу от нее расположен город Новочеркасск – пятый по численности населения в Ростовской области (160,5 тыс. чел.). Город характеризуется самым высоким уровнем загрязнения атмосферы в регионе (ИЗА 17). Очень высокий уровень загрязнения обусловлен повышенными концентрациями формальдегида, взвешенных частиц, NO, NO₂ и CO [Экологический вестник Дона, 2024].

Многолетние мониторинговые ландшафтно-геохимические исследования импактной зоны НГРЭС выявили значительное повышение содержания ТММ в почвах по сравнению с глобальным и региональным геохимическим фоном [Linnik et al., 2020; Lobzenko et al., 2020; Minkina et al., 2021; Чаплыгин и др. 2024]. В качестве глобальных эталонов для оценки интенсивности техногенеза и выявления геохимической специализации почв [Касимов, Власов, 2015] используются кларки элементов в верхней части континентальной коры (ВЧКК) и среднемировое содержание элементов в почвах [Kabata-Pendias, 2011; Rudnick, Gao, 2014]. Региональный фон дает представление о среднем содержании химических элементов в поч-



вах на участках однородных по ландшафтно-геохимической структуре со сходными литолого-геоморфологическими условиями, вне прямого антропогенного воздействия [Minkina et al., 2021]. Эколого-геохимическая оценка состояния почв проводится с применением различных индивидуальных и суммарных показателей загрязнения. В отечественной практике используются коэффициенты концентрации отдельных веществ (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c) [МУ 2.1.7.730-99, 1999; СанПиН 1.2.3685-21, 2021]. Для учета различной токсичности химических элементов и широкого разброса значений K_c Ю.Н. Водяницким [2010] предложен модифицированный комплексный показатель суммарного загрязнения почв $Z_{ct}(z)$ [Лисецкий, Зеленская, 2023]. В международных исследованиях наиболее универсальными считаются индекс геоаккумуляции (I_{geo}) и индекс загрязнения Немерова (NPI) [Kowalska et al., 2018].

Цель данной работы состоит в эколого-геохимической оценке опасности моно- и полиэлементного загрязнения почв импактной зоны НГРЭС с использованием наиболее эффективных показателей.

Объекты и методы исследования

Исследование проводили в августе 2023 года в зоне влияния НГРЭС (47°24'00" N, 40°13'55" E) в долине рек Тузлов и Аксай и Аксайской возвышенности (Ростовская область, Россия), в 35 км северо-восточнее Ростова-на-Дону. Климат территории умеренно континентальный с преобладанием восточных, северо-восточных, западных и юго-западных ветров. Локальная циркуляция атмосферы трансформируется под влиянием рельефа: воздушные массы, проникающие с востока в долину рек Тузлов и Аксай, встречаются с естественным орографическим барьером – Аксайской возвышенностью, достигающей высоты 106 м [Minkina et al., 2021].

В качестве топлива на НГРЭС используется каменный уголь (в том числе антрацитовый штыб) и природный газ [Бушумов и др., 2016]. Предусмотрено смешанное удаление золы уноса: как мокрое, так и сухое [Насонкина и др., 2024], с последующим складированием на золоотвалах к юго-западу от станции. Объем накопленных золошлаковых отходов составляет не менее 50 млн т [Будина и др., 2021]. Зола уноса НГРЭС состоит из алюмосиликатной массы, магнетитовых, угольных и карбонатных микрочастиц, ферросилиция, элементов-примесей, в частности Cr (64,1 мг/кг), Ni (< 150 мг/кг), Zn (50 мг/кг), As (64,1 мг/кг), Cd (< 5 мг/кг) [Федорова, Шафорост, 2015].

Характер аэротехногенного воздействия НГРЭС на геохимические свойства почв оценивался на основе данных 25 мониторинговых площадок, расположенных вдоль радиусов, исходящих от дымовых труб станции в различных направлениях. Исследования охватывали ближнюю зону влияния (до 3 км), а также участки на расстоянии от 3 до 20 км по линии господствующих ветров. Данный метод выбора площадок мониторинга широко используется для анализа пространственного распределения загрязняющих веществ в зонах воздействия электростанций [Linnik et al., 2020; Mor et al., 2022; Parlak et al., 2023]. В качестве эталонного природного ландшафта, типичного для района исследований, выступал участок ООПТ «Персиановская заповедная степь», где были изучены черноземы обыкновенные тяжелосуглинистые под целинной разнотравно-типчаково-ковыльной степью. На каждой мониторинговой площадке методом конверта из глубины 0–10 см отбирали смешанные пробы поверхностного горизонта почв, которые затем подготавливали к дальнейшему анализу, согласно стандартным методикам [МУ 2.1.7.730-99, 1999]. Почвы территории исследования представлены черноземами обыкновенными ($n = 19$), лугово-черноземными ($n = 4$) и аллювиальными дерновыми насыщенными почвами ($n = 2$). Их свойства достаточно вариативны: встречаются виды от мало- до сильно гумусированных (Сорг 0,9–3,5 %), от слабо- до умеренно карбонатных (CaCO_3 , 1–8,3 %). Реакция варьирует от слабокислых до щелочных

(рН 6,2–8,0), емкость катионного обмена от средней до очень высокой (15–46 ммоль(+)/100 г) [Чаплыгин и др. 2024]. Аллювиальные дерновые насыщенные почвы имеют песчаный и супесчаный состав (доля частиц < 0,01 мм 7,5–11 %), тогда как черноземы обыкновенные и лугово-черноземные почвы представлены разновидностями от легкосуглинистых до легкоглинистых (доля частиц < 0,01 мм 27–68).

Валовое содержание V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Pb определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа в воздушно-сухих таблетированных пробах с использованием спектрометра «Спектроскан МАКС-GV» (Спектрон, Россия) [М-049-ПДО/18, 2018]. Определение Cd проводилось по неаттестованной методике, представляющей собой пользовательскую градуировку, разработанную в соответствии с рекомендацией производителя оборудования.

Для оценки степени техногенной трансформации почв рассчитаны кларки концентрации (KK) относительно глобального фона [Касимов, Власов, 2012]:

$$KK = C_i/K,$$

где C_i – содержание элемента в почве, K – кларк элемента в ВЧКК [Rudnick, Gao, 2014] или среднемировое содержание элементов в почвах (СМСП) [Kabata-Pendias, 2011]. Значения KK от 0,95 до 1,5 соответствуют околосредним содержаниям элементов, а в пределах 1,5–3 и 3–10 указывают на слабое и умеренное концентрирование ТММ. Значения $KK > 10$ отмечают сильное концентрирование элементов. По средним значениям KK построены геохимические спектры фоновых и антропогенно-измененных почв.

Оценка опасности загрязнения почв проведена на основе индивидуальных и комплексных геохимических показателей (табл. 1). Относительно фоновых содержаний химических элементов рассчитаны Kc и I_{geo} :

$$Kc = C_i/C_b,$$

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1,5 + C_b} \right),$$

где C_i – содержание элемента в почве, C_b – содержание элемента в целинном черноземе обыкновенном Персиановской заповедной степи. Преимущество I_{geo} состоит в сокращении литогенной вариативности почв и детальной шкале оценки [Müller, 1986], тогда как Kc широко распространен и имеет аналог – индекс загрязнения почв (PI), кроме того, используется для расчета комплексных показателей [Kowalska et al., 2018].

Таблица 1
Table 1

Классификация загрязнения почв по геохимическим показателям
Classification of soil pollution by geochemical indices

Класс загрязнения	Разброс значений [Müller, 1986; Kowalska et al., 2018]		
	I_{geo}	Kc	NPI
Нет загрязнения	≤ 0	≤ 1	$\leq 0,7$
С угрозой загрязнения	–	–	0,7–1,0
Слабое	0–1	1–2	1–2
Умеренное	1–2	–	2–3
Среднее	2–3	2–3	–
Сильное	3–4	3–5	> 3
Очень сильное	4–5	> 5	–
Экстремальное	> 5	–	–



Полиэлементное загрязнение почв оценивалось на основе Z_c , $Z_{ct}(z)$ и NPI [Водяницкий, 2010; СанПиН 1.2.3685-21, 2021; Kowalska et al., 2018]:

$$Z_c = \sum Kc_i - (n - 1), Kc_i > 1$$

$$Z_{ct}(r) = n \times \left(\prod [Kc_i \times Kt_i] \right)^{1/n} - (n - 1), Kc_i > 2$$

$$NPI = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Kc_i \right)^2 + Kc_{max}^2}{2}}$$

где n – число рассматриваемых веществ, Kc_i – коэффициент концентрации отдельного элемента, Kc_{max} – максимальное значение коэффициента концентрации среди всех исследуемых элементов, Kt – коэффициент токсичности, равный 1,5 для Cr, Ni, Zn, As, Cd, Pb, 1,0 для Cu, 0,5 для V и Mn [Водяницкий, 2010]. К недостаткам Z_c относится зависимость оценки опасности от числа исследуемых поллютантов. Вместе с тем данный показатель позволяет как классифицировать степень загрязнения почв, так и оценить уровень экологической опасности (табл. 2). Аналогичная система значений используется при анализе $Z_{ct}(z)$. Следует отметить, что благодаря NPI можно выделить зоны загрязнения, обусловленные высоким содержанием одного или нескольких элементов при низком содержании остальных [Konstantinov et al., 2024].

Таблица 2
Table 2

Классификация загрязнения почв по суммарному показателю загрязнения
[Федорец и др., 2015; СанПиН 1.2.3685-21, 2021]
Classification of soil pollution by total pollution index

Значения	Категория загрязнения	Уровень экологической опасности
< 4	неопасная	минимальный
4–8	допустимая	очень низкий
8–16	малоопасная	низкий
16–32	умеренно опасная	средний
32–64	опасная	высокий
64–128	очень опасная	очень высокий
≥ 128	чрезвычайно опасная	максимальный

Паттерны пространственного распределения моно- и полиэлементного загрязнения почв охарактеризованы с помощью точечных карт, построенных в программе *Surfer 12* (*Golden Software*, США). Описательные статистики вычислены с использованием программного комплекса *Statistica 12* (*StatSoft*, США).

Результаты и их обсуждение

Распределение Cr, Mn, Ni, Zn и As в антропогенно-измененных почвах импактной зоны НГРЭС гомогенно (коэффициенты вариации < 33 %) и близко к нормальному, а средние значения близки к медианным (табл. 3). Напротив, V, Cu, Cd и Pb демонстрируют существенную пространственную неоднородность. Таким образом, первая группа элементов предположительно имеет природное происхождение, а вторая преимущественно поступает от антропогенных источников [Minkina et al., 2021]. По убыванию средних содержаний в почвах элементы образуют ряд: Mn > Cr ≈ Zn > V > Cu ≈ Ni > Pb > As > Cd.

Таблица 3
Table 3

Валовое содержание тяжелых металлов и металлоидов в почвах импактной зоны НГРЭС (n = 25)
Total content of heavy metals and metalloids in soils
in the impact zone of Novocherkassk State District Power Plant (n = 25)

Элемент	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ст. откл.	Коэф. вариации, %	C _b
V	77,3	73,5	30,0	143,9	32,4	41,9	117,6
Cr	108,2	111,7	71,1	154	20,9	19,3	96,5
Mn	805	791	597	1044	139	17,3	815,0
Ni	52,6	52,8	29,9	91,0	16,3	31,1	39,0
Cu	55,7	47,2	26,1	147,4	26	46,8	49,1
Zn	102,9	94	70,1	193,0	25,6	24,9	68,5
As	8,1	8,3	4,1	10,3	1,5	18,5	2,0
Cd	0,65	0,45	0,3	2,8	0,55	83,8	0,35
Pb	36,6	31,2	11	97,3	17,5	47,8	25,3

Во всех почвах умеренно концентрируется Cd (КК 3,9–9,7) относительно ВЧКК (рис. 1), что свидетельствует о техногенном поступлении данного элемента [Сычева, Кочелева, 2024]. В фоновых черноземах обыкновенных и аллювиальных дерновых насыщенных почвах содержания ТММ близки к фону или рассеиваются, тогда как в измененных черноземах обыкновенных и лугово-черноземных почвах слабо концентрируются Cu, Zn, As и Pb, околофоновые концентрации имеют Cr, Mn и Ni, а рассеивается V. Относительно СМСП в целинных черноземах рассеиваются V, As, Cd и Pb, в пределах природной вариации находятся Ni, Cu и Zn, а Cr и Mn слабо накапливаются. Несколько ниже уровни ТММ в аллювиальных дерновых насыщенных почвах. В черноземах обыкновенных и лугово-черноземных почвах содержания большинства ТММ превышают СМСП в 1,2–2,2 раза, тогда как содержания V, напротив, ниже глобального фона.

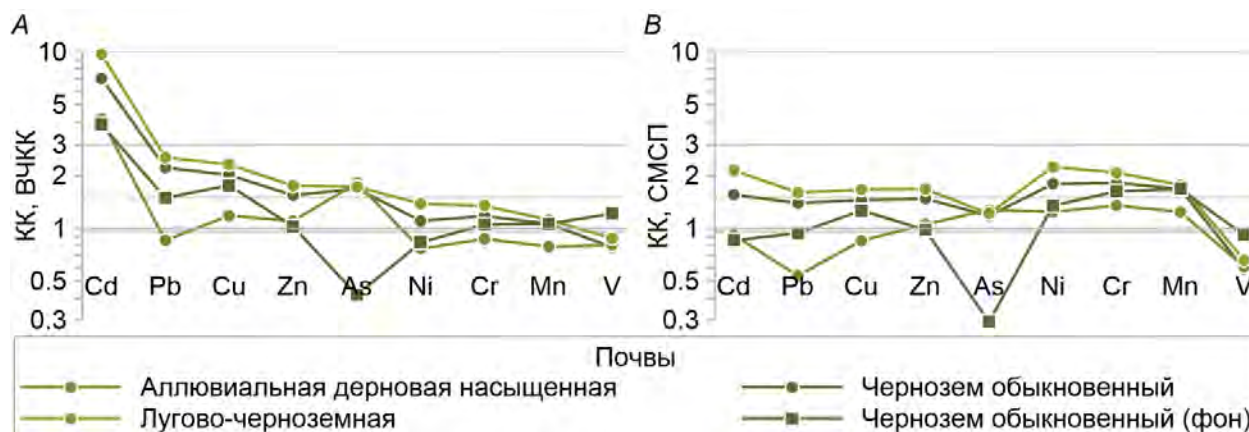


Рис. 1. Геохимические спектры почв импактной зоны НГРЭС относительно кларка верхней части континентальной коры (ВЧКК) (А) и среднемирового содержания металлов в почвах (СМСП) (В)

Fig. 1. Geochemical spectra of soils in the impact area of NGRES relative to the upper continental crust (A) and the world soil average content (B)

Анализ *Igeo* показал, что содержания V и Mn в почвах района исследования не представляют опасности загрязнения. Значения *Igeo* большинства элементов не превышают 1,0, а доля почв, слабо загрязненных Cr, Ni, Cu и Zn, составляет 4–36 %. Максимальных значений *Igeo* достигают As (1,8), Pb (1,4) и Cd (2,4), а доля загрязненных почв составляет суммарно 100 %, 28 % и 40 % соответственно (рис. 2). Умеренное загрязнение Cd отмечено в единичной почве в непосредственной близости к НГРЭС, источником которого, вероятно, является пыление золоотвала [Ковалева и др., 2020; Konstantinov et al., 2024].

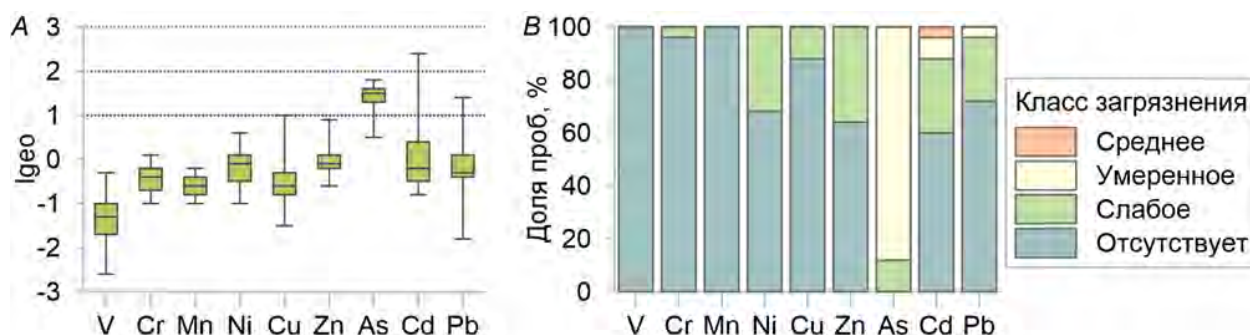


Рис. 2. Вариабельность индекса геоаккумуляции (I_{geo}) тяжелых металлов (медиана $\pm$ квартиль, усы – минимум и максимум) в почвах импактной зоны НГРЭС и распределение почв по классам загрязнения

Fig. 2. Variability of the geoaccumulation index (I_{geo}) of heavy metals (median $\pm$ quartile, whiskers – minimum and maximum) in the soils of the impact area of the NGRES and distribution of soils by pollution classes

Более консервативную оценку индивидуального загрязнения почв демонстрируют результаты анализа K_c (рис. 3). Минимальную опасность представляют V, Cr и Mn, значения K_c которых варьируют в пределах 0,3–1,6, а доля слабо загрязненных проб составляет 16–56 %. Превышение содержаний Ni, Cu, Zn над фоном достигает 2,3–3 раза. В большей части проб отмечается слабое загрязнение (36–92 %) данными элементами, в единичных – среднее (4–8 %). Наибольшую опасность представляют Pb и Cd, максимальные K_c которых составляют 3,8 и 8,1, а загрязнение варьирует от слабого (52–64 %) до сильного (3,9–8,0 %) и очень сильного (0–3,9 %). Значения K_c составили 2,1–5,2 для As, уровни которого соответствуют среднему загрязнению в 4 % проб, сильному в 48 % и очень сильному в 12 % проб. Таким образом, по результатам анализа I_{geo} и K_c к приоритетным загрязнителям почв импактной зоны НГРЭС относятся As, Cd и Pb. Более ранние исследования данной территории показали аналогичные результаты [Minkina et al., 2021].

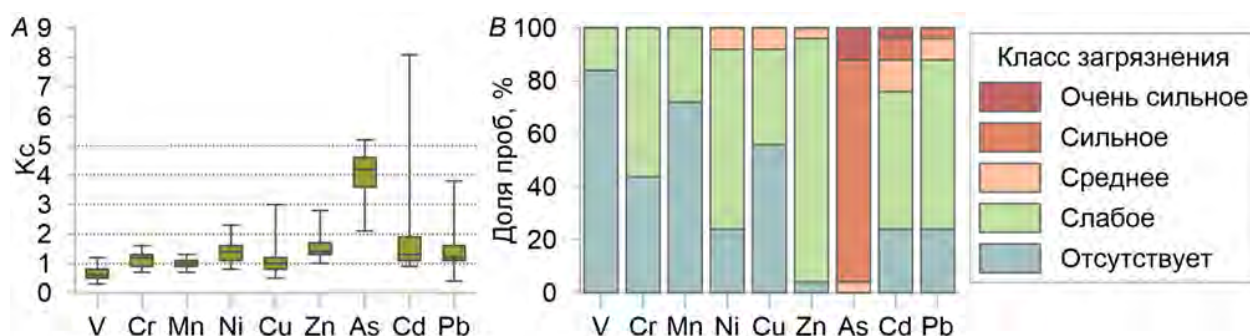


Рис. 3. Вариабельность коэффициента концентрации (K_c) тяжелых металлов (медиана $\pm$ квартиль, усы – минимум и максимум) в почвах импактной зоны НГРЭС и распределение почв по классам загрязнения
Fig. 3. Variability of the heavy metal concentration coefficient (K_c) (median $\pm$ quartile, whiskers – minimum and maximum) in soils of the impact zone of NGRES and distribution of soils by pollution classes

Распределение K_c обнаруживает следующие пространственные особенности (рис. 4). Слабоконтрастная аномалия V отмечается к северу от НГРЭС, вероятно, обусловленная составом почвообразующих пород. Содержания Cr и Mn незначительно превышают природный фон в почвах по направлению господствующих ветров, вместе с тем в непосредственной близости от НГРЭС содержания данных элементов несколько ниже. Данный факт свидетельствует в пользу предположения об их естественном происхождении.

Области геохимических аномалий Ni, Cu и Zn прилегают к золоотвалам НГРЭС, с удалением от источника значения K_c снижаются. Золоотвалы угольных ТЭЦ обогащены Ni, Cu, Zn, Cd, As, Pb и служат вторичным источником загрязнения сопредельных ланд-

шафтов [Гаретова и др., 2023; Насонкина и др., 2024]. Геохимические аномалии Cd и Pb в целом более обширны и контрастны, а градиент снижения Kc при удалении от НГРЭС менее выражен. Отмечена обширная область высоких значений Kc для As.

В почвах зон аэротехногенного воздействия ТЭЦ определяются полиэлементные аномалии, фиксируемые в радиусе от 3–5 до 10 км [Коротченко и др., 2020; Журавлева и др., 2023; Сычева, Кошелева, 2023, 2024]. Значения Zc в почвах импактной зоны НГРЭС варьируют в пределах 2,8–21,2 при среднем 6,8. Почвы распределены по категориям загрязнения следующим образом: 12% – неопасное, 56% – допустимое, 28% – малоопасное и 4% – умеренно опасное. Область мало и умеренно опасного загрязнения почв по Zc локализована в пределах 3,0 км зоны от НГРЭС (рис. 5). При большем удалении от источника уровень экологической опасности суммарного загрязнения почв ТММ снижается и оценивается как минимальный. Необходимо отметить, что за последние пять лет уровень суммарного загрязнения снизился: Zc в эпицентре достигал 20, на удалении до 20 км по господствующим направлениям ветра составлял 6 [Linnik et al., 2020].

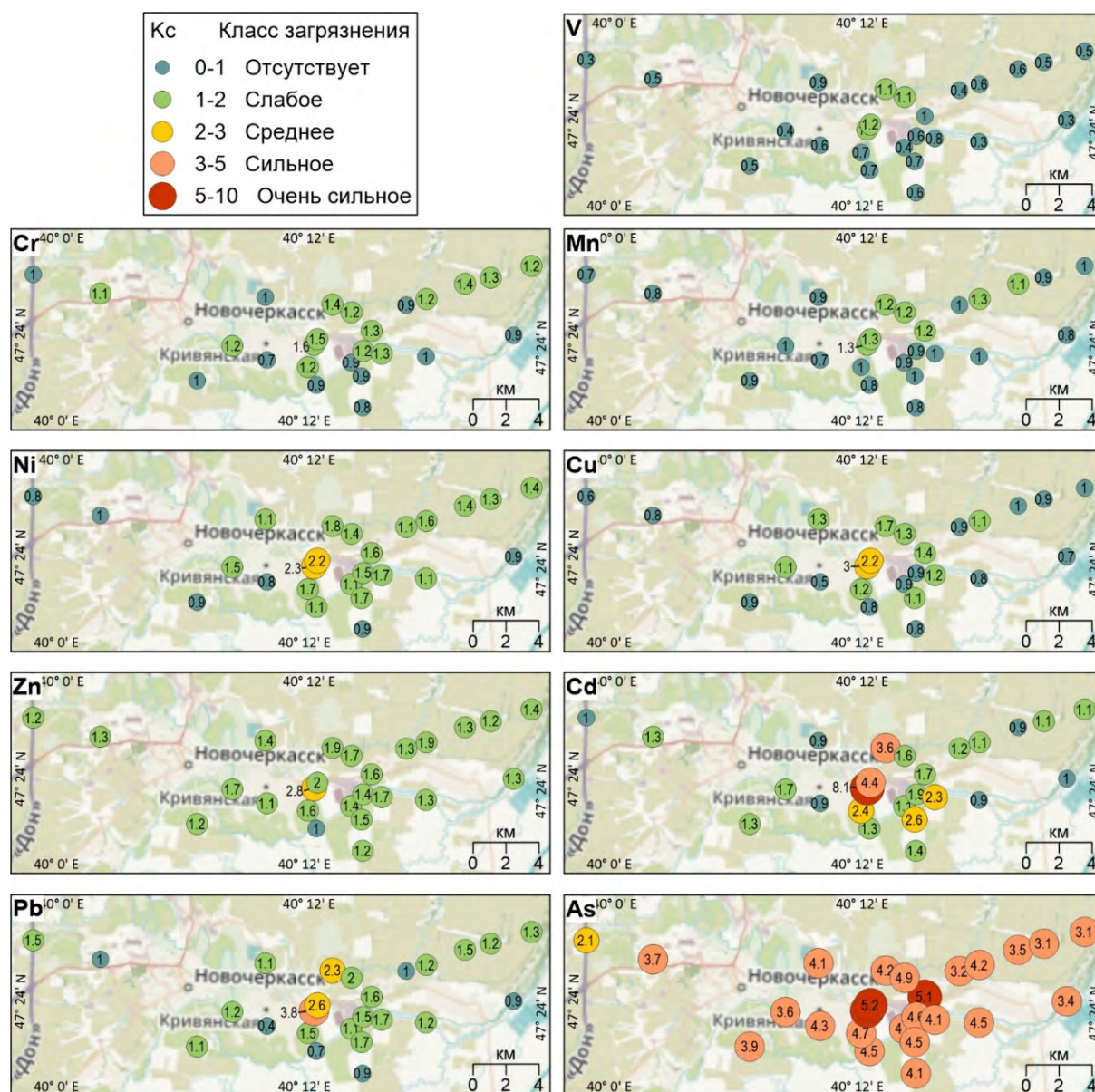


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициентов концентрации (Kc) тяжелых металлов в почвах импактной зоны НГРЭС

Fig. 4. Spatial distribution of heavy metal concentration coefficients (Kc) in soils of the impact zone of NGRES

Вероятно, данные изменения обусловлены постепенным увеличением доли природного газа в топливном балансе НГРЭС. Значения $Z_{ct}(z)$ в почвах территории исследования составили 3,2–27 при среднем 7,8. В среднем оценки распределения почв по категориям смещены в сторону более опасного загрязнения по сравнению с традиционным показателем Z_c : 4% проб относятся к незагрязненным, 72% характеризуются допустимым загрязнением, 16% – малоопасным и 8% – умеренно опасным. В ближней зоне воздействия НГРЭС $Z_{ct}(z)$ варьирует в пределах 6,9–27, причем максимум приурочен к участкам вблизи золоотвалов.

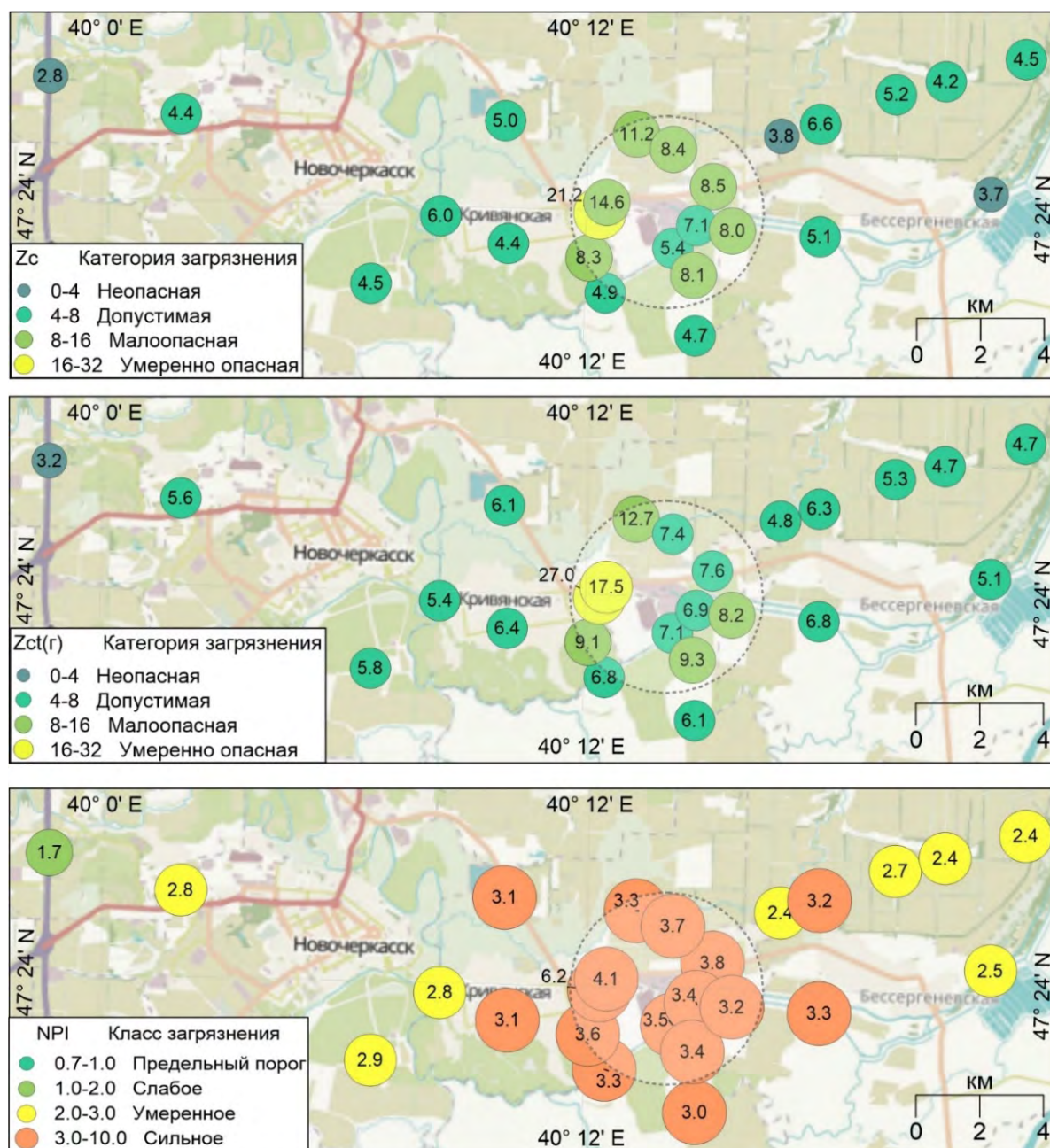


Рис. 5. Пространственное распределение суммарного показателя загрязнения почв (Z_c), модифицированного комплексного суммарного показателя загрязнения почв ($Z_{ct}(r)$) и индекса загрязнения Немеорова (NPI) в импактной зоне НГРЭС. Пунктиром отмечена ближняя трехкилометровая зона воздействия

Fig. 5. Spatial distribution of the total soil pollution index (Z_c) and Nemerov pollution index (NPI) in the impact zone of NGRES. The dotted line marks the nearest five-kilometer zone of influence of the state district power plant

Загрязнение почв, согласно значениям *NPI*, в среднем характеризуется как более высокое по сравнению с оценкой *Zc*. Значения *NPI* составили 1,7–6,2 (в среднем 3,2). Слабым загрязнением характеризуются 4 % изученных проб почв, тогда как в 36 % и 60 % проб отмечено загрязнение умеренное и сильное соответственно. Сильное загрязнение прослеживается до 6 км НГРЭС (см. рис. 5). С удалением от источника по направлению господствующих ветров опасность загрязнения снижается.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить уровни и закономерности пространственные распределения металлов в почвах импактной зоны НГРЭС. Сравнительный анализ индивидуальных геохимических показателей показал большую эффективность *Ks*, тогда как применение *Igeo*, вероятно, приводит к недооценке загрязнения. Содержания Ni, Cu, Zn, As, Cd и Pb в ближней трехкилометровой зоне НГРЭС до 2–8 раз превышают фоновые содержания в целинных черноземах обыкновенных, а загрязнение достигает среднего и сильного уровня. Значения *Zc* варьируют в пределах 1,1–16,9, при этом 68 % почв классифицируются как неопасные. Модифицированный комплексный показатель суммарного загрязнения почв *Zct(z)* позволяет учесть различную токсичность ТММ, как следствие, его значения в среднем выше по сравнению с *Zc*. В пределах 3 км от НГРЭС наблюдаются зоны умеренно опасного загрязнения. Анализ *NPI* выявил более высокую степень загрязнения по сравнению с *Zc*, особенно в ближней зоне. За последние пять лет уровень загрязнения снизился, вероятно, из-за увеличения доли природного газа в топливном балансе НГРЭС. Таким образом, As, Cd и Pb являются приоритетными загрязнителями почв, а источником их поступления остаются выбросы электростанции и пыление золошлаковых отходов.

Список источников

- М-049-ПДО/18. Методика измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв и донных отложений рентгенофлуоресцентным методом. 2018. СПб, ООО «НПО «Спектрон», 18 с.
- МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 7 февраля 1999 г.). 1999. М., Информационно-издательский центр Минздрава России, 18 с.
- СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (ред. от 30.12.2022). Электронный ресурс. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=603138049&backlink=1&&nd=602092088> (дата обращения 27.02.2025).
- Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2023 году». 2024. Ростов-на-Дону, Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области, 369 с.

Список литературы

- Будина Т.С., Курбанов Н.Х., Прокофьева Л.М., Шийко В.Г. 2021. Учет промышленных отходов на примере золошлаковых отвалов. Экономика и управление: проблемы, решения, 4(4(112)): 182–188. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.04.04.033>.
- Бушумов С.А., Короткова Т.Г., Сай Ю.В. 2016. Технологические стадии производства и техногенные отходы Новочеркасской ГРЭС. Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КУБГУ», 13: 25–34.
- Водяницкий Ю.Н. 2010. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами. Почвоведение, 10: 1276–1280.



- Гаретова Л.А., Имранова Е.Л., Кириенко О.А., Фишер Н.К., Кошельков А.М. 2023. Оценка состояния воды, почв и донных отложений территории, сопряженной с бывшим золоотвалом. *Экология и промышленность России*, 27(2): 60–66. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-60-66>
- Журавлева М.А., Зубрев Н.И., Кокин С.М. 2023. Сравнение вкладов тепловой станции и железной дороги в загрязнение почвы тяжелыми металлами. *Наука и техника транспорта*, 3: 106–110.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. 2012. Технофильность химических элементов в начале XXI века. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, 1: 15–22.
- Касимов Н.С., Власов Д.В. 2015. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 2: 7–17.
- Ковалева Е.В., Матвеев Т.И., Вагурин И.Ю., Кузьмина О.С. 2020. Воздействия золоотвалов теплоэлектростанций на окружающую среду в черте пригородных зон. *Polish Journal of Science*, 28–1(28): 11–21.
- Коротченко И.С., Первышина Г.Г., Мучкина Е.Я. 2020. Воздействие процесса сжигания углей Ирша-Бородинского разреза на депонирование тяжелых металлов в почве (на примере Минусинской ТЭЦ). *Уголь*, 6(1131): 67–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-67-69>
- Лисецкий Ф.Н., Зеленская Е.Я. 2023. Различия в содержании тяжелых металлов в почвах Южного берега Крыма (пространственно-временной анализ). *Экосистемы*, 34: 81–91.
- Насонкина Н.Г., Антоненко С.Е., Забурдаев В.С., Соколов Д.Г. 2024. Системный подход к оценке экологического воздействия отходов ТЭС ДНР на окружающую среду. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*, 2024-5(169): 96–104. <https://doi.org/10.71536/vd.2024.5c169.12>
- Сычева Д.Г., Кошелева Н.Е. 2023. Эколого-геохимическое состояние почвенного покрова г. Гусиноозерска в зоне влияния угольной ГРЭС. *Почвоведение*, 8: 953–969. <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600270>
- Сычева Д.Г., Кошелева Н.Е. 2024. Источники, уровни накопления и экологическая опасность тяжелых металлов и металлоидов в почвах и фракции РМ10 г. Северобайкальска. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 335(3): 137–153. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/3/4259>
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Ахметова Г.В., Новиков С.Г., Ткаченко Ю.Н., Солодовников А.Н. 2015. Тяжелые металлы в почвах Карелии. *Петрозаводск, Карельский научный центр РАН*, 222 с.
- Федорова Н.В., Шафорост Д.А. 2015. Перспективы использования золы-уноса тепловых электростанций Ростовской области. *Теплоэнергетика*, 1: 53–58. <https://doi.org/10.1134/S0040363615010038>
- Чаплыгин В.А., Бурачевская М.В., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Сиромля Т.И., Черникова Н.П., Дудникова Т.С. 2024. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах и лекарственных растениях импактной зоны Новочеркасской ГРЭС. *Почвоведение*, 10: 1424–1438. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24100116>
- Guercio V., Doutsis A., Exley K.S. 2022. A Systematic Review on Solid Fuel Combustion Exposure and Respiratory Health in Adults in Europe, USA, Canada, Australia and New Zealand. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 241: 113926. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.113926>
- Kabata-Pendias A. 2011. *Trace Elements in soils and Plant*. Boca Raton, CRC Press, 505 p.
- Konstantinov A., Konstantinova E., Novoselov A., Kurasova A., Shuvaev E., Sherstnev A., Zaitseva V., Minkina T. 2024. Geochemical Status of Non-Reclaimed Ash Dumps Subjected to Long-Term Self-Overgrowing: Evidence from the Tyumen, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*, 258: 107387. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107387>
- Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. 2018. Pollution Indices as Useful Tools for the Comprehensive Evaluation of the Degree of Soil Contamination—A Review. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
- Linnik V.G., Minkina T.M., Bauer T.V., Saveliev A.A., Mandzhieva S.S. 2020. Geochemical Assessment and Spatial Analysis of Heavy Metals Pollution Around Coal-Fired Power Station. *Environmental Geochemistry and Health*, 42: 4087–4100. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00361-z>

- Lobzenko I., Konstantinova E., Bauer T., Mandzhieva S., Sushkova S., Chaplygin V., Burachevskaya M., Minkina T., Kravcova N., Kalinichenko V. 2020. Assessment of Health Risks Associated with Soil Contamination by Heavy Metal in an Impact Area of Novochoerkassk Power Plant. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 578: 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012020>
- Minkina T., Konstantinova E., Bauer T., Mandzhieva S., Sushkova S., Chaplygin V., Burachevskaya M., Nazarenko O., Kizilkaya R., Gülser C., Maksimov A. 2021. Environmental and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Soils Around the Largest Coal-Fired Power Station in Southern Russia. Environmental Geochemistry and Health, 43: 2285–2300. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00666-4>
- Mor S., Vig N., Ravindra K. 2022. Distribution of Heavy Metals in Surface Soil Near a Coal Power Production Unit: Potential Risk to Ecology and Human Health. Environmental Monitoring and Assessment, 194: 263. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09692-w>
- Müller G. 1986. Schadstoffe in Sedimenten – Sedimente Als Schadstoffe. Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 79: 107–126.
- Parlak M., Taş İ., Görgişen C., Gökalp Z. 2023. Spatial Distribution and Health Risk Assessment for Heavy Metals of the Soils Around Coal-Fired Power Plants of Northwest Turkey. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 104(20): 9708–9722. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2243231>
- Rudnick R.L., Gao S. 2014. Composition of the Continental Crust. Treatise on geochemistry. Second Edition. Vol. 4: The Crust. Elsevier Science: 1–51.

References

- Budina T.S., Kurbanov N.Kh., Prokofieva L.M., Shiyko V.G. Industrial Waste Accounting on Example Ash Dumps. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya, 4(4(112)): 182–188 (in Russian). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.04.04.033>.
- Bushumov S.A., Korotkova T.G., Say Yu.V. 2016. Technological stage of production and technogenic waste Novochoerkassk SDPP. Scientific Works of KUBSTU, 13: 25–34 (in Russian).
- Vodyanitskii Y.N. 2010. Equations for Assessing the Total Contamination of Soils with Heavy Metals and Metalloids. Eurasian Soil Science, 43(10): 1184–1188 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S106422931010011X>
- Garetova L.A., Imranova E.L., Kirienko O.A., Fisher N.K., Koshelkov A.M. 2023. Assessment of the State of Water, Soil and Bottom Sediments of the Territory Adjacent to the Former Ash-disposal Area. Ecology and Industry of Russia, 27(2): 60–66 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-2-60-66>
- Zhuravleva M.A., Zubrev N.I., Kokin S.M. 2023. Comparison of Thermal Plant and Railway Influence to Heavy Metal Soil Pollution. Science and Technology in Transport, 3: 106–110 (in Russian).
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. 2012. Technophilia of chemical elements in the beginning of the 21st century. Moscow University Bulletin. Series 5, Geography, 1: 15–22 (in Russian).
- Kasimov N.S., Vlasov D.V. 2015. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. Moscow University Bulletin. Series 5, Geography, 2: 7–17 (in Russian).
- Kovalyova E., Matveenkov T., Vagurin I., Kuzmina O. 2020. Impact of Ash and Slag Landfills of Thermal Power Plants on Atmospheric Air, Soils and Plants. Polish Journal of Science, 28–1(28): 11–21 (in Russian).
- Korotchenko I.S., Pervyshina G.G., Muchkina E.Ya. 2020. Impact of the Coal Burning Process of the Irsha-Borodinsky Open-Pit Mine on the Deposition of Heavy Metals in Soil (for Example, Minusinskaya CHP). Ugol', 6(1131): 67–69 (in Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-6-67-69>
- Lisetskii F.N., Zelenskaya E.Ya. 2023. Differences in the Content of Heavy Metals in the Soils of the Southern Coast of Crimea (Spatio-Temporal Analysis). Ekosistemy, 34: 81–91 (in Russian).
- Nasonkina N.G., Antonenko S.Ye., Zaburdaiev V.S., Sokolov D.G. 2024. System Approach to Assessing the Environmental Impact of Heat and Power Stations Waste on the Environment in the DPR. Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Engineering systems and technological safety, 2024-5(169): 96–104 (in Russian). <https://doi.org/10.71536/vd.2024.5c169.12>



- Sycheva D.G., Kosheleva N.E. 2023. Ecological and Geochemical State of the Soil Cover of Gusinoozersk in the Impact Zone of Coal Thermal Power Plant. *Eurasian Soil Science*, 56(8): 1114–1129 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/s1064229323600896>
- Sycheva D.G., Kosheleva N.E. 2024. Sources, Accumulation Levels and Environmental Hazard of Heavy Metals and Metalloids in Soils and PM10 Fractions of Severobaykalsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335(3): 137–153 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/3/4259>
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V., Novikov S.G., Tkachenko Yu.N., Solodovnikov A.N. 2015. Heavy Metals in Soils of Karelia. Petrozavodsk, Publ. Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 222 p. (in Russian).
- Fedorova N.V., Shaforost D.A. 2015. Prospects for Using the Fly Ash Produced at Thermal Power Plants in the Rostov Region. *Thermal Engineering*, 62(1): 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0040601515010036>
- Chaplygin V.A., Burachevskaya M.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Siromlya T.I., Chernikova N.P., Dudnikova T.S. 2024. Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soils and Medicinal Plants in the Impact Zone of Novocherkassk Power Station. *Eurasian Soil Science*, 57: 1746–1758. <https://doi.org/10.1134/S1064229324601501>
- Guercio V., Doutsis A., Exley K.S. 2022. A Systematic Review on Solid Fuel Combustion Exposure and Respiratory Health in Adults in Europe, USA, Canada, Australia and New Zealand. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 241: 113926. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.113926>
- Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in soils and Plant. Boca Raton, CRC Press, 505 p.
- Konstantinov A., Konstantinova E., Novoselov A., Kurasova A., Shuvaev E., Sherstnev A., Zaitseva V., Minkina T. 2024. Geochemical Status of Non-Reclaimed Ash Dumps Subjected to Long-Term Self-Overgrowing: Evidence from the Tyumen, Russia. *Journal of Geochemical Exploration*, 258: 107387. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107387>
- Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. 2018. Pollution Indices as Useful Tools for the Comprehensive Evaluation of the Degree of Soil Contamination—A Review. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
- Linnik V.G., Minkina T.M., Bauer T.V., Saveliev A.A., Mandzhieva S.S. 2020. Geochemical Assessment and Spatial Analysis of Heavy Metals Pollution Around Coal-Fired Power Station. *Environmental Geochemistry and Health*, 42: 4087–4100. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00361-z>
- Lobzenko I., Konstantinova E., Bauer T., Mandzhieva S., Sushkova S., Chaplygin V., Burachevskaya M., Minkina T., Kravcova N., Kalinichenko V. 2020. Assessment of Health Risks Associated with Soil Contamination by Heavy Metal in an Impact Area of Novocherkassk Power Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 578: 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012020>
- Minkina T., Konstantinova E., Bauer T., Mandzhieva S., Sushkova S., Chaplygin V., Burachevskaya M., Nazarenko O., Kizilkaya R., Gülser C., Maksimov A. 2021. Environmental and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Soils Around the Largest Coal-Fired Power Station in Southern Russia. *Environmental Geochemistry and Health*, 43: 2285–2300. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00666-4>
- Mor S., Vig N., Ravindra K. 2022. Distribution of Heavy Metals in Surface Soil Near a Coal Power Production Unit: Potential Risk to Ecology and Human Health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194: 263. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09692-w>
- Müller G. 1986. Schadstoffe in Sedimenten – Sedimente Als Schadstoffe. *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 79: 107–126.
- Parlak M., Taş İ., Görgişen C., Gökalp Z. 2023. Spatial Distribution and Health Risk Assessment for Heavy Metals of the Soils Around Coal-Fired Power Plants of Northwest Turkey. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(20): 9708–9722. <https://doi.org/10.1080/03067319.2023.2243231>
- Rudnick R.L., Gao S. 2014. Composition of the Continental Crust. *Treatise on geochemistry*. Second Edition. Vol. 4: The Crust. Elsevier Science: 1–51.

*Поступила в редакцию 01.04.2025;
поступила после рецензирования 07.05.2025;
принята к публикации 10.06.2025*

*Received April 01, 2025;
Revised May 07, 2025;
Accepted June 10, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Константинова Елизавета Юрьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник фронтальной лаборатории «Биоинженерия ризосферы» Академии биологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Чаплыгин Виктор Анатольевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Манджиева Сагара Сергеевна, кандидат биологических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории мониторинга биосферы Академии биологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Черникова Наталья Петровна, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Агробιοтехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции» Академии биологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Минкина Татьяна Михайловна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elizaveta Yu. Konstantinova, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of the Frontier Laboratory "Rhizosphere Bioengineering", D.I. Ivanovsky Academy of Biology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Viktor A. Chaplygin, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Research Laboratory for Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Saglara S. Mandzhieva, Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher of the Research Laboratory of Biosphere Monitoring, D.I. Ivanovsky Academy of Biology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Natalia P. Chernikova, postgraduate student, junior researcher at the laboratory "Agrobiotechnology for Improving Soil Fertility and Quality of Agricultural Products", D.I. Ivanovsky Academy of Biology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

Tatiana M. Minkina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, D.I. Ivanovsky Academy of Biology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia