

Научная статья
УДК 626:543.31+631.4(477.75)
EDN MHWSYU

Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий

В. Ю. Проскурнин, Н. Ю. Мирзоева, О. Д. Чужикова *,
М. О. Вахрушев

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: olga88.chp@ya.ru*

Аннотация

В 2022–2023 гг. в водной экосистеме Северо-Крымского канала, орошаемых почвах вдоль него и выращиваемых поливных сельскохозяйственных культурах были определены концентрации микроэлементов Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag. Содержание всех изучаемых элементов определяли в их кислотных концентратах и минерализатах в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite (AnalytikJena, Германия)* на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Концентрации тяжелых металлов и микроэлементов в водной экосистеме Северо-Крымского канала были безопасны для использования днепровской воды в качестве питьевой, а также для других хозяйственных нужд Крыма. Максимальное относительное увеличение пула микроэлементов вследствие орошения полей днепровской водой было определено для Mo (до 0.1 %), а также для Zn, Sb и Pb (не более 0.04 %), что не может существенно влиять на экологическое состояние орошаемых земель. В почвах как рисовых и пшеничных полей, так и целинных земель наблюдалось систематическое превышение предельно допустимой концентрации Cd для почв сельхозугодий (до 230 %). В культурах риса и пшеницы обнаружено превышение максимально допустимых уровней содержания Fe, Ni, Cd, As для зерна и зернофуража. В колосе пшеницы максимально допустимые уровни Fe были превышены на 24 %, Ni – на 110 %, As – на 70 %. В зерне риса были превышены предельно допустимые концентрации для продуктов питания Cu (на 29 %), Cd (на 150 %) и Pb (на 438 %), а в зерне пшеницы – Cd (на 360 %) и Pb (на 300 %). Выявлено, что незначительные количества микроэлементов, приносимые с днепровской водой по Северо-Крымскому каналу, не могут оказать ощутимого эффекта на орошаемые сельхозугодья Крыма. Обнаруженные превышения предельно допустимых концентраций и максимально допустимых уровней микроэлементов в почвах и сельскохозяйственных культурах обусловлены, вероятно, деятельностью промышленных предприятий на севере полуострова.

© Проскурнин В. Ю., Мирзоева Н. Ю., Чужикова О. Д., Вахрушев М. О., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: Северо-Крымский канал, тяжелые металлы в почве, тяжелые металлы в растениях, тяжелые металлы в воде, орошаемые почвы, сельскохозяйственные растения, загрязнение тяжелыми металлами

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РФФИ, проект № 23-26-00128: «Роль оросительной системы Северо-Крымского канала в процессах переноса долгоживущих радионуклидов черноморского происхождения, тяжелых металлов, а также углеводов с днепровской водой на поливные сельхозугодья Крыма».

Для цитирования: Микроэлементы в компонентах водной экосистемы Северо-Крымского канала и орошаемых сельхозугодий / В. Ю. Проскурнин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 123–138. EDN MHWSYU.

Trace Elements in the Components of the Aquatic Ecosystem of the North Crimean Canal and Irrigated Farmland

**V. Yu. Proskurnin, N. Yu. Mirzoeva, O. D. Chuzhikova *,
M. O. Vakhrushev**

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

** e-mail: olga88.chp@ya.ru*

Abstract

For 2022–2023, the concentrations of trace elements (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag) were determined in the aquatic ecosystem of the North Crimean Canal, adjacent irrigated soils and cultivated irrigated agricultural crops. The content of all studied elements was determined in their acidic concentrates and mineralizates in accordance with State Standard of Russia 56219-2014 by mass spectrometry with inductively coupled plasma on a PlasmaQuant MS Elite mass spectrometer (AnalytikJena, Germany) on the basis of the collective use center “Spectrometry and Chromatography” A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS. The concentrations of heavy metals and trace elements in the aquatic ecosystem of the North Crimean Canal allowed safe use of the Dnieper water both for drinking and for other economic needs of Crimea. The maximum relative increase in the heavy metals pool due to irrigation of fields with the Dnieper water was for Mo (up to 0.1 %), Zn, Sb and Pb (no more than 0.04 %), which cannot affect the ecological state of the irrigated lands. In soils, a systematic excess of the maximum permissible concentrations was observed for Cd (up to 230 %) both in rice and wheat fields as well as in virgin lands. In rice and wheat crops, the maximum permissible levels for grain and grain fodder for Fe, Ni, Cd, As were exceeded. In the wheat ear, maximum permissible levels were exceeded for Fe (by 24 %), Ni (by 110 %) and As (by 70 %). Maximum permissible concentrations in rice grain were exceeded for Cu (by 29 %), Cd (by 150 %) and Pb (by 438 %), and in wheat grain – for Cd (by 360 %) and Pb (by 300 %). It was revealed that insignificant amounts of trace elements brought with the Dnieper water through the North Crimean Canal cannot have a noticeable effect on the irrigated farmland of Crimea. The detected excesses of maximum permissible concentrations and maximum permissible levels of trace elements in soils and agricultural crops are probably due to the activities of industrial enterprises in the north of the peninsula.

Keywords: North Crimean Canal, heavy metals in soil, heavy metals in plants, heavy metals in water, irrigated soils, agricultural plants, heavy metal pollution

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation Grant, Project No. 23-26-00128: “The role of the North Crimean Canal irrigation system in the processes of transfer of long-lived radionuclides of Chernobyl origin, heavy metals, as well as hydrocarbons with Dnieper water to irrigated farmland of the Crimea”.

For citation: Proskurnin, V.Yu., Mirzoeva, N.Yu., Chuzhikova, O.D. and Vakhrushev, M.O., 2024. Trace Elements in the Components of the Aquatic Ecosystem of the North Crimean Canal and Irrigated Farmland. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 123–138.

Введение

Северо-Крымский канал (СКК) был построен и введен в эксплуатацию в 1971 г. для устойчивого обеспечения водой Юга Украины и Крыма. Земледелие на Крымском полуострове осложнено из-за засушливого климата, поэтому функционирование системы СКК стратегически важно для водообеспечения обширных сельхозугодий северной и северо-западной частей полуострова¹⁾ [1]. Среди выращиваемых на полуострове сельскохозяйственных (с/х) культур особое значение имеют рис и пшеница [2, 3]. В 2022 г. после восьмилетнего перерыва в штатной работе канала подача днепровской воды в Крым по СКК была возобновлена [4]. Одним из важнейших показателей качества используемой воды является содержание в ней тяжелых металлов (ТМ) и других микроэлементов. Целесообразно проводить мониторинг этого показателя как в орошаемых этой водой почвах, так и в выращиваемых на них с/х культурах [5, 6]. Для оценки возможного негативного воздействия днепровской воды, поступающей по СКК, на качество выращиваемых на полуострове поливных с/х культур важно понимание закономерностей перераспределения ТМ в системе вода – орошаемые почвы – поливные с/х культуры [7–9].

Цели исследований:

а) определение современного качества днепровской воды, поступающей по СКК, в отношении микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), включая тяжелые металлы;

б) количественное определение уровней перехода этих элементов из воды в орошаемые почвы, расположенные вдоль СКК, и выращиваемые на них сельскохозяйственные культуры;

в) сравнение полученных результатов с установленными в РФ санитарными нормами в отношении содержания ТМ и других микроэлементов в изучаемых объектах.

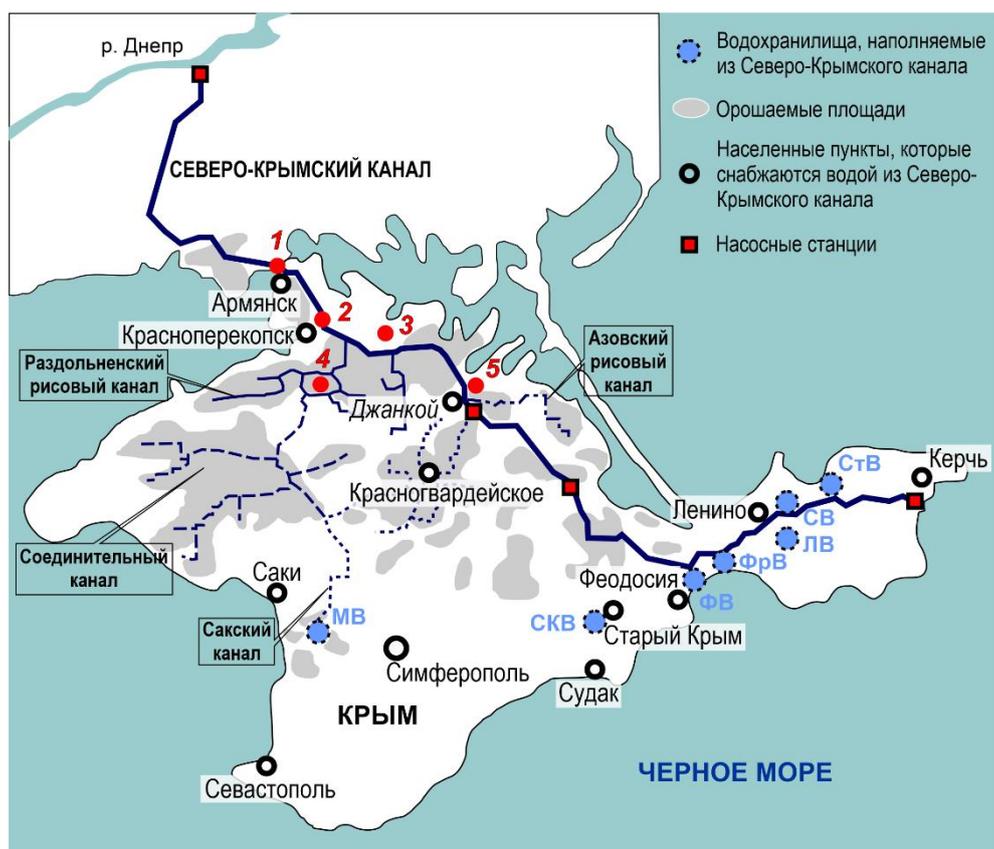
Исследования, подобные данному как по поставленным задачам, так и по количеству изучаемых элементов в отобранных объектах в районе СКК и в прилегающих к нему орошаемых сельхозугодьях, ранее не проводились, что определяет их новизну.

Материал и методы

Для определения микроэлементов, включая ТМ, пробы воды и взвешенного в ней вещества отбирали непосредственно из русла СКК и отводных каналов. Пробы почв полей, орошаемых водой из СКК, а также выращиваемых

¹⁾ Соколов А. А. Гидрография СССР (Воды суши). Ленинград : Гидрометеиздат, 1964. 535 с.

на них риса и пшеницы отбирали в районах сел Крепкого и Ильинки, а также г. Джанкоя (с. Победное), (рис. 1, табл. 1). Пробы отбирали с апреля 2022 г. по май 2023 г., в них определяли 15 микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Tl, Pb). Из воды растворенные формы определяемых элементов извлекали путем их экстракционного концентрирования



Р и с . 1. Карта-схема отбора проб в районе Северо-Крымского канала (2022–2023 гг.). Станции отбора проб: 1 – магистральное русло СКК, район г. Армянска; 2 – магистральное русло СКК, район г. Красноперекопска; 3 – с. Крепкое, район г. Красноперекопска; 4 – ответвление СКК, с. Ильинка, район г. Красноперекопска; 5 – с. Победное, район г. Джанкоя. Водохранилища: МВ – Межгорное, СКВ – Старокрымское, ФВ – Феодосийское, ФрВ – Фронтовое, ЛВ – Ленинское, СВ – Самарлинское, СтВ – Станционное (Керченское)

Fig. 1. Scheme map of sampling in the area of the North Crimean Canal (2022–2023). Arrows indicate sampling stations: 1 – main bed of the NCC, Armyansk area; 2 – main bed of the NCC, Krasnoperekopsk area; 3 – the village of Krepkoe, Krasnoperekopsk area; 4 – branch of the NCC, the village of Ilyinka, Krasnoperekopsk area; 5 – the village of Pobednoye, Dzhankoy area). Water reservoirs: MB – Mezhhornoe, SKB – Starokrymskoe, FB – Feodosiyskoe, FRB – Frontovoe, LB – Leninskoe, SB – Samarlinskoe, StB – Stantsionnoe (Kerchenskoe)

Т а б л и ц а 1. Координаты станций отбора проб

T a b l e 1. Coordinates of sampling stations

Район исследования / Study area	Координаты отбора проб (в. д., с. ш.) / Sampling coordinates (N, E)
1. Магистральное русло СКК (район г. Армянска) / 1. NCC main bed (Armyansk area)	46°07.208', 33°41.426'
2. Магистральное русло СКК (район г. Красноперекопска) / 2. NCC main bed (Krasnoperekopsk area)	45°57.261', 33°49.184'
3. Село Крепкое (район г. Красноперекопска): пшеничное поле, рисовые чеки / 3. The village of Крепкое (Krasnoperekopsk area): wheat field paddy fields	45°55.419', 33°54.223' 45°56.097', 33°55.029'
4. Ответвление СКК (район г. Красноперекопска), село Ильинка / 4. NCC branch (Krasnoperekopsk area), the village of Illyinka	45°50.067', 33°45.600'
5. Магистральное русло СКК, село Победное (район г. Джанкоя), орошаемое поле / 5. NCC main bed, the village of Pobednoe (Dzhankoy area), irrigated field	45°45.500', 34°26.230'

в виде диэтилдитиокарбаматов с помощью четыреххлористого углерода в соответствии с РД 52.10.243-92. Из твердых образцов (почв, взвешенного вещества, стеблей и зерна риса и пшеницы) определяемые элементы извлекали путем их кислотной минерализации с последующим фильтрованием в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Содержание всех изучаемых элементов в кислотных концентратах и минерализатах измеряли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре *PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena, Германия)* в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 на базе НО ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ. Масс-спектрометр калибровали с помощью стандартного раствора «Стандарт калибровочный многоэлементный IV-28, HNO₃/HF, 125 мл» (*Inorganic Ventures*) путем построения калибровочной прямой по растворам со степенями разбавления стандарта, охватывающими весь диапазон определяемых концентраций элементов. Процедура измерения включала не менее семи повторностей для каждого измеряемого элемента в каждой пробе. Время измерения каждого отношения *m/z* определялось интенсивностью отклика детектора на присутствие того или иного элемента в растворе и варьировалось от 0.01 до 0.1 с. Для всех измеряемых элементов определяли относительную погрешность измерения, которая не превышала 10 %.

Для оценки качества вод полученные значения концентраций элементов сравнивали с ПДК, установленными СанПиН 1.2.3.3685-21²⁾ для вод хозяйственно-питьевого использования (ПДК_{хоз-пит}). Эти ПДК применяются и к водам, используемым для орошения. Поскольку местное население вылавливает и употребляет в пищу рыбу, обитающую в канале, то полученные значения сравнивали также с ПДК, рекомендуемыми для вод водных объектов рыбохозяйственного назначения³⁾ (ПДК_{р-хоз}). Значения концентраций элементов, определенные в почвах, сравнивали со значениями ПДК (или ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК_п)), установленными для почв сельскохозяйственных (ПДК_п)²⁾. Кроме того, поскольку для земледелия в Крыму используются прежде всего каштановые почвы с pH > 5.5, в случаях, когда это применимо, использовали значения ПДК_п (ОДК_п) для глинистых и суглинистых почв с pH > 5.5. Перенос элементов с водами СКК на орошаемые поля оценивали исходя из средней нормы удельной массы пахотного слоя 3000 т·га⁻¹ (по СанПиН 2.1.7.573-96) и максимальной нормы расхода воды для орошения полей с зерновыми яровыми культурами Ростовской области как сходной по типу почв и климатическим особенностям с Крымским полуостровом, до 4140 м³·га⁻¹·год⁻¹ (по ГОСТ Р58331.3-2019). Качество с/х культур оценивали по временным максимально допустимым уровням (МДУ) в зерне и зернофураже для сельскохозяйственных животных⁴⁾ и ПДК для круп как продукта питания человека (ПДК_{прод}) (СанПиН 2.3.2.560-96). Закономерности накопления микроэлементов с/х культурами из почв характеризовали коэффициентами перехода (K_п), рассчитываемыми как отношение концентрации элемента в культуре (части культуры) C_к к концентрации элемента в почве под этой культурой C_п.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений концентраций микроэлементов в днепровской воде СКК, используемой для орошения, в орошаемых почвах и с/х культурах приведены в табл. 2.

Оценка качества вод СКК в отношении содержания в них микроэлементов в 2022–2023 гг. приведена на рис. 2.

²⁾ СанПиН 1.2.3.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года)

³⁾ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552.

⁴⁾ Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г.)

Т а б л и ц а 2. Концентрация микроэлементов в воде ($\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), в почве и в с/х культурах ($\text{мг}\cdot\text{кг}^{-1}$ сух. массы)

T a b l e 2. Concentrations of trace elements in the water ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), in the soil and in the agricultural crops ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ D.W.)

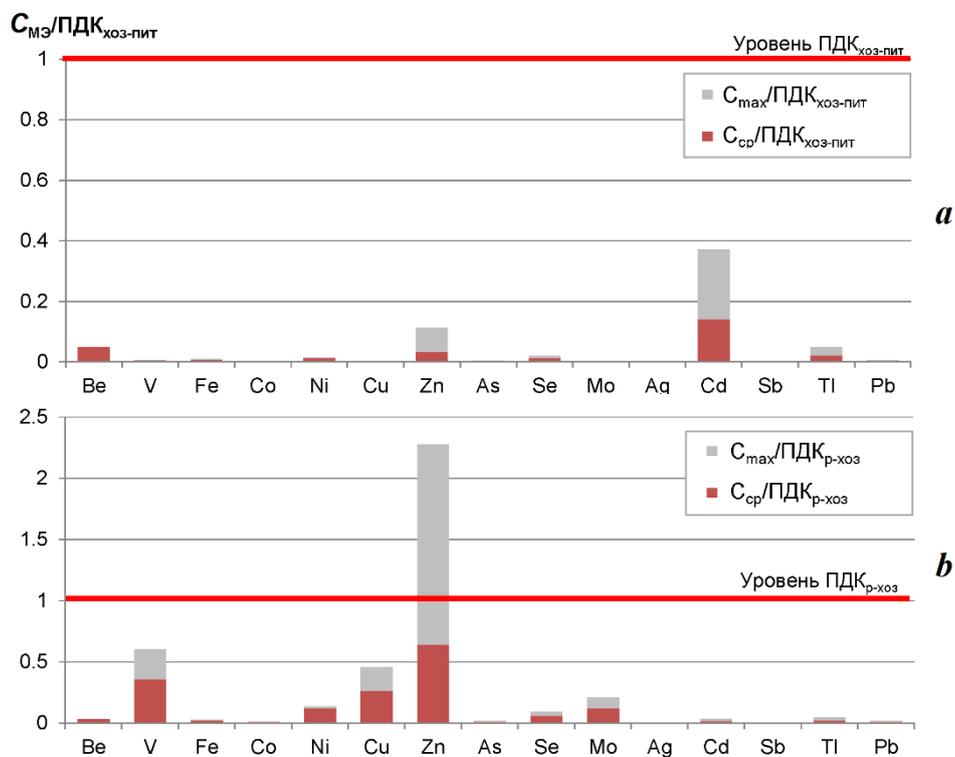
Элемент / Element	Вода / Water		Почва / Soil	С/х культуры / Agricultural crops
	Растворенная форма микроэлемента / Dissolved form	Суммарная кон- центрация / Total concentration		
Pb	0.05–0.19	0.70–1.96	8.63–70.82	0.86–7.68
Cd	0.02–0.37	0.10–0.61	0.56–6.64	0.07–1.00
Zn	6.42–113.83	8.51–117.38	63.47–122.07	3.70–26.79
Cu	0.64–2.29	1.16–3.01	20.02–59.43	1.24–12.87
Fe	0.63–2.83	36.69–230.71	$10.2\cdot 10^3$ – $42.7\cdot 10^3$	33–2941
Co	0.02–0.06	0.04–0.14	11.33–15.42	0.02–0.89
Ni	0.76–1.39	1.24–2.26	38.22–51.65	0.39–4.21
Mo	0.02–0.21	0.34–0.65	0.45–2.85	0.03–1.33
Sb	0.008–0.015	0.014–0.023	0.03–0.22	<0.01–0.03
As	0.01–0.20	0.06–0.27	4.91–10.91	<0.10–0.85
V	0.16–0.61	0.33–0.96	43.94–76.39	<0.10–5.40
Tl	<0.001–0.005	0.001–0.006	0.11–0.27	<0.001–0.017
Se	<0.03–0.19	<0.03–0.19	0.75–3.29	<0.30–0.32
Ag	<0.001	<0.001–0.11	0.12–0.32	<0.01
Be	<0.01	<0.01–0.01	0.80–1.30	<0.001–0.086

Следует отметить, что нормативные документы РФ регламентируют^{2), 3), 5), 6)} содержание только растворенных форм элементов. На основе анализа полученных данных определено, что концентрации микроэлементов в воде (их растворенная, а также и суммарная (со взвешенной) формы) за весь период исследований не превышали ПДК_{хоз-пит}^{2), 5), 6)}.

В отношении ПДК_{р-хоз}³⁾ однократно наблюдалось превышение в два раза нормы концентрации цинка в воде (растворенная форма) в условиях низкого уровня до запуска подачи воды в марте 2023 г.

⁵⁾ ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: утв. Постановлением гл. гос. санитар. врача РФ от 30 апреля 2003 г. № 79. Москва : Нефтяник, 2003. 152 с.

⁶⁾ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 26 сентября 2001 г. № 24)



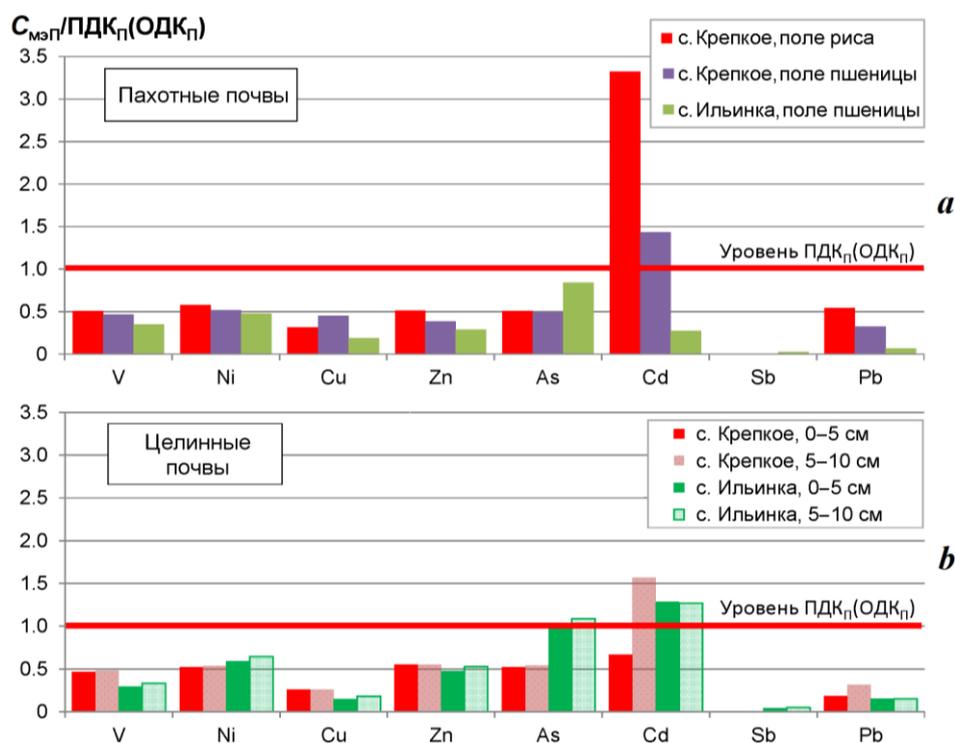
Р и с . 2 . Отношение средних и максимальных концентраций растворенных форм микроэлементов (МЭ) в воде СКК к ПДК_{хоз-пит} (а) и ПДК_{р-хоз} (б) в 2022–2023 гг.

F i g . 2 . Ratio of average and maximum concentrations of dissolved forms of trace elements in the North Crimean Canal water to maximum permissible concentrations (MPC) for utility and drinking water use ПДК_{хоз-пит} (а) and MPC for fisheries ПДК_{р-хоз} (б) in 2022–2023

Определено, что максимальные коэффициенты накопления (K_n) элементов взвесьми наблюдались в отношении Fe – $n \cdot 10^7$, несколько меньшие значения K_n наблюдались в отношении As, Mo, Cd и Pb – $n \cdot (10^5 \div 10^6)$, для V, Co, Ni, Cu, Se, Sb и Tl значения K_n не превышали $n \cdot 10^5$, а для Zn значения этого показателя были минимальными и лежали в пределах $n \cdot (10^3 \div 10^4)$. Такие высокие значения K_n обуславливают наиболее эффективное седиментационное самоочищение вод СКК от Fe, As, Mo, Cd и Pb, в меньшей степени – от V, Co, Ni, Cu, Se, Sb и Tl и наименее эффективное – от Zn.

Концентрации растворенных форм Be и Ag были ниже пределов их детектирования: для Be – $0.01 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, Ag – $0.001 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Для этих элементов на рис. 2 приведены отношения пределов их детектирования к соответствующим значениям ПДК.

Оценка качества пахотных почв сельхозугодий и смежных целинных участков земли на севере Крыма в отношении содержания в них микроэлементов приводится на рис. 3.



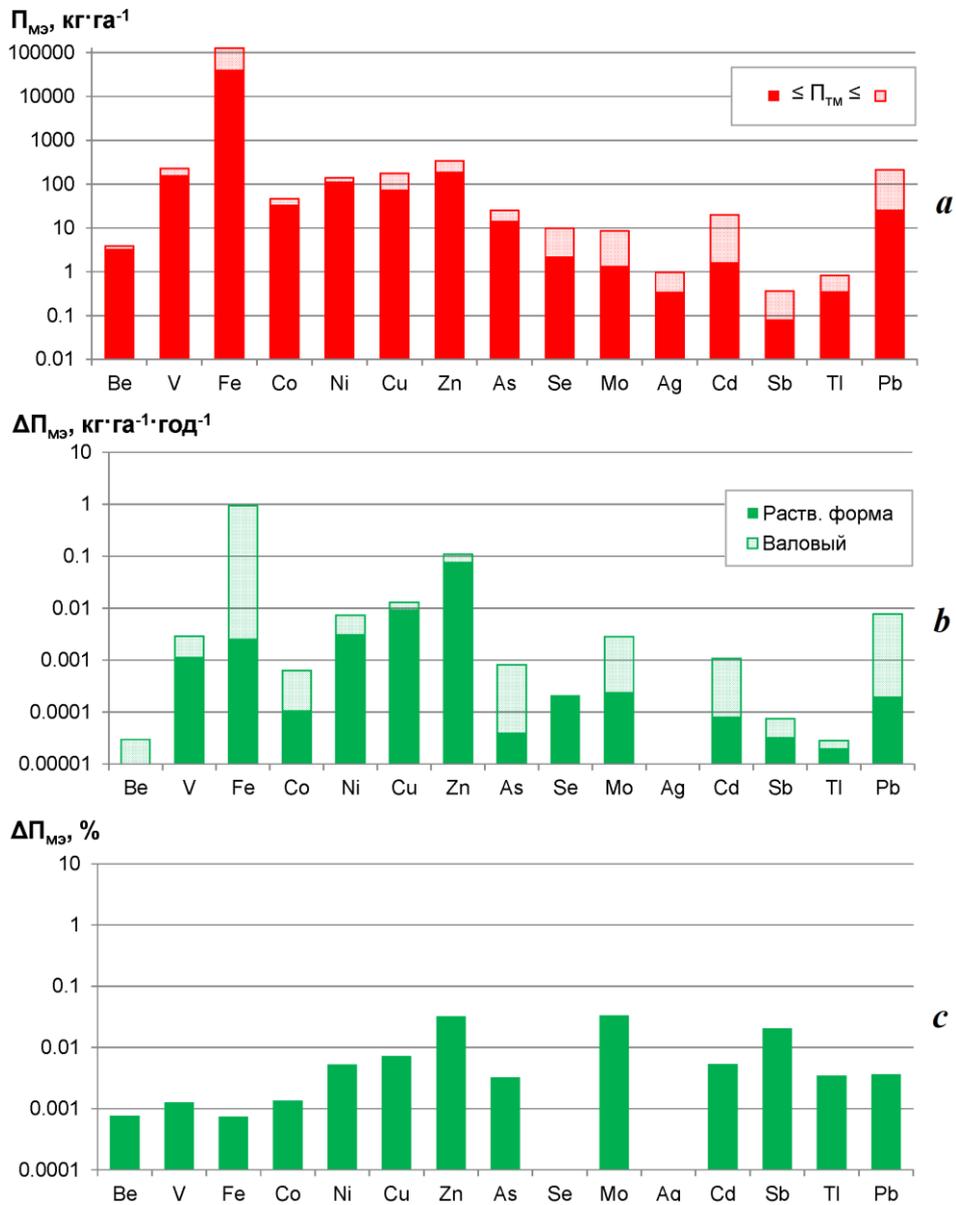
Р и с . 3 . Отношение концентраций микроэлементов ($C_{мэ}$) в почвах пахотных (a) и целинных (b) земельных участков севера Крыма к предельно (ПДК_n) и ориентировочно (ОДК_n) допустимым концентрациям МЭ в почвах в 2022–2023 гг.

F i g . 3 . Ratio of trace elements concentrations ($C_{мэ}$) in soils of arable (a) and virgin (b) land plots in the north of Crimea to the maximum (ПДК_n) and approximately (ОДК_n) permissible concentrations of elements in soils in 2022–2023

Наблюдалось систематическое превышение ПДК_n Cd – до 230 % – на рисовых и пшеничных полях (с. Крепкое, рис. 1, табл. 1), а также в целинных почвах (с. Крепкое, с. Ильинка, рис. 1, табл. 1). Вертикальное распределение Cd в пахотных землях свидетельствовало о повышении его концентрации с глубиной слоя залегания. Максимальное превышение ПДК_n Cd на рисовом поле в этом районе, по всей видимости, было обусловлено гомогенизацией поверхностных слоев почвы при механической обработке. Незначительное превышение ПДК_n As наблюдалось только в целинной почве, прилегающей к рисовому полю у с. Ильинки (рис. 1, табл. 1), при этом в самой пахотной почве превышения не наблюдалось.

Результаты расчета диапазонов удельных пулов микроэлементов в пахотном слое почв изучаемых полей и приноса элементов с водами СКК, используемыми для орошения, приведены на рис. 4.

Результаты расчетов (рис. 4) показывают, что максимальные значения поступления металлов в орошаемую почву с поливной водой ожидаются для Fe – $0.43 \div 0.95 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ (0.001 % от пула) и Zn – $0.05 \div 0.11 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$ (0.03 % от пула).



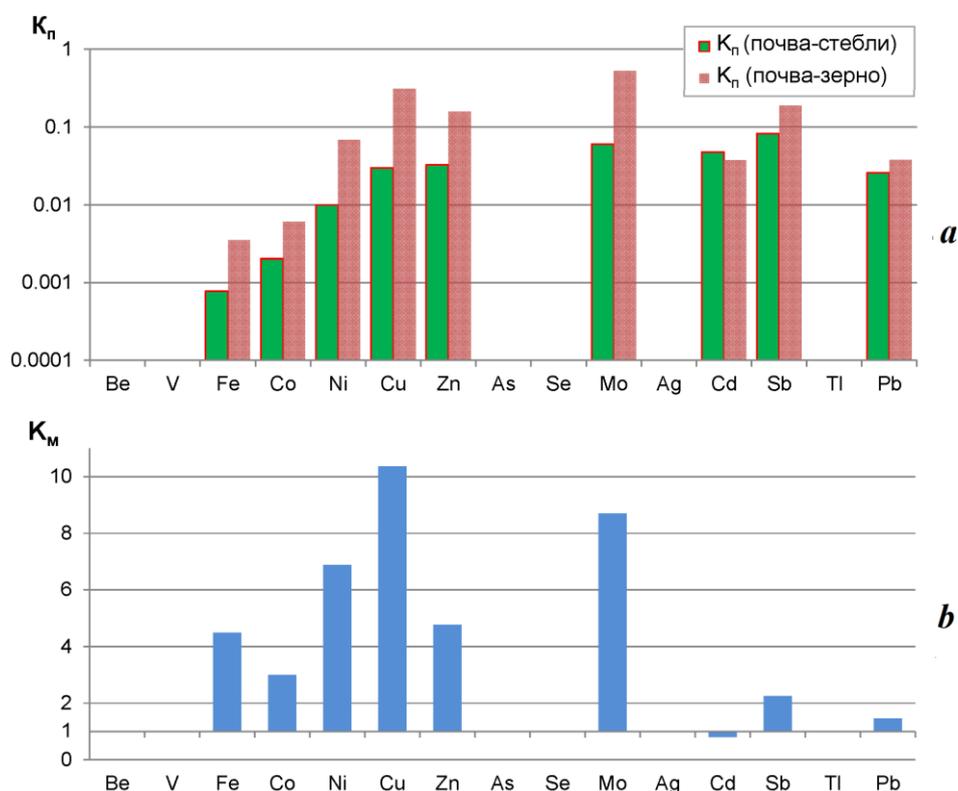
Р и с . 4 . Диапазоны удельных пулов микроэлементов (а) в пахотных почвах Крыма ($P_{MЭ}$) и оценка абсолютного (b) и относительного (c) изменения этих пулов ($\Delta P_{MЭ}$) за счет приноса элементов с водами СКК, используемыми для орошения

F i g . 4 . Ranges of specific pools of trace elements (a) in arable soils of Crimea ($P_{MЭ}$) and assessment of the absolute (b) and relative (c) changes in these pools ($\Delta P_{MЭ}$) due to the supply with the North Crimean Canal waters used for irrigation

При этом максимальное относительное увеличение пула микроэлементов за счет орошения ожидается для Mo (до 0.1 %), Zn, Sb и Pb (не более 0.04 %), что, очевидно, не повлияет на экологическое состояние орошаемых земель.

Расчеты коэффициентов перехода (K_n) элементов из орошаемых почв в выращиваемые на них культуры риса и пшеницы показали, что в отношении многих элементов наблюдается их концентрирование в зерне по отношению к стеблю исследуемых культур. Для количественной оценки этого концентрирования рассчитывали коэффициенты магнификации (K_m) как отношение концентрации МЭ в зерне к концентрации в стебле растений. Результаты этих расчетов приведены на рис. 5 и 6.

Показано (рис. 5, 6), что из достоверно определявшихся в культуре риса микроэлементов (Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Mo, Sb, Cd и Pb) все элементы, кроме Cd, в зерне накапливаются более интенсивно, чем в стеблях. Для пшеницы определялось иное: в зерне Cd накапливался более интенсивно, чем все остальные определяемые элементы, а Sb и Mo в большей степени концентрировались в стеблях растений. Такое различие указывает на особенности физиологии культур риса и пшеницы [10–12].



Р и с . 5 . Коэффициенты K_n (a) и K_m (b) микроэлементов для культуры риса у с. Крепкого

F i g . 5 . Coefficients K_n (conversion factor) (a) and K_m (magnification coefficient) (b) of the trace elements for rice crops in the village of Krepkoe



Р и с . 6 . Коэффициенты K_p (a) и K_m (b) микроэлементов для культуры пшеницы у с. Ильинки (район г. Красноперекопска) и с. Победного (район г. Джанкоя)

F i g . 6 . Coefficients K_p (conversion factor) (a) and K_m (magnification coefficient) (b) of the trace elements for wheat crop in the village of Ilyinka (Krasnoperekopsk area) and the village of Pobednoye (Dzhankoy area)

Результаты оценки качества изучаемых культур в отношении содержания в них микроэлементов представлены на рис. 7.

В культуре риса из с. Крепкого МДУ содержания Fe в зерне и зернофураже как кормов для животных были превышены в зерне на 49 %, а Ni – на 214 %, при этом в стеблях риса концентрации Cd достигли МДУ⁴⁾.

В культуре пшеницы из с. Ильинка МДУ содержания Fe в колосе были превышены на 24 %, Ni – на 110 %, As – на 70 %, а в стеблях пшеницы превышение МДУ содержания Fe и As составило 52 и 68 % соответственно. ПДК_{прод}^{7), 8)} Cu в зерне риса были превышены на 29 %, Cd – на 150 % и Pb –

⁷⁾ Трухачев В. И., Толоконников В. П., Лысенко И. О. Пища как экологический фактор : учебное пособие по дисциплине «Биология и биоэкология». Ставрополь : АГРУС, 2005.182 с.

⁸⁾ Санитарные правила и нормы. «2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов». СанПиН 2.3.2.560-96. Москва : Госкомэпиднадзор России, 1997. 269 с.

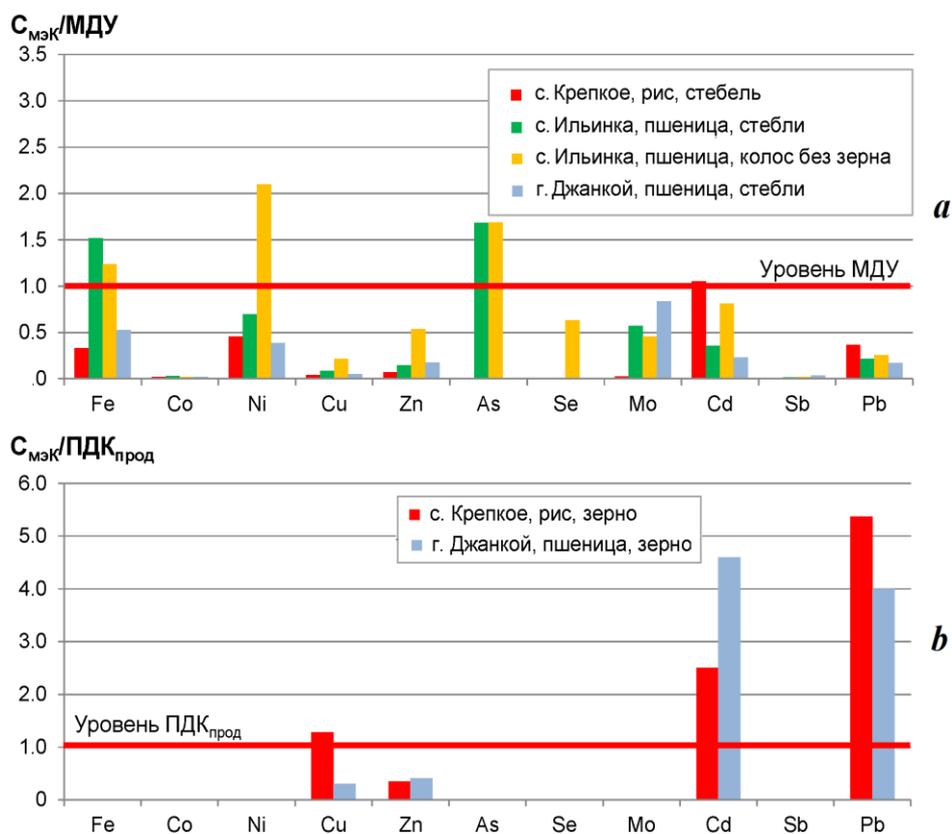


Рис. 7. Отношение концентраций микроэлементов в культурах риса и пшеницы к МДУ (для зерна и зернофуража на корм скоту) (а) и ПДК_{прод} (для зерновых и круп как продуктов питания человека) (б)

Fig. 7. Ratio of trace elements concentrations in rice and wheat crops to МДУ (maximum permissible levels for grain and grain fodder for livestock feed) (а) and ПДК_{прод} (MPC for grains and cereals as human food products) (б)

на 438 %, а в зерне пшеницы с поля близ Джанкоя содержание Cd превысило ПДК_{прод} на 360 %, Pb – на 300 %.

Таким образом, результаты исследования показали, что в 2022–2023 гг. днепровская вода в СКК соответствовала нормам, установленным в РФ в отношении содержания микроэлементов в воде хозяйственно-питьевого водопользования и орошения. Обнаружены превышения ПДК_п Cd и As как в пахотных, так и целинных почвах, что, как отмечалось ранее, обусловлено деятельностью промышленных предприятий, в том числе химической отрасли, расположенных на севере полуострова [13, 14]. Также отмечено превышение МДУ отдельных микроэлементов в с/х культурах, которое связано с переходом этих элементов из почв и их концентрированием растениями.

Заключение

В 2022–2023 гг. в период работы СКК с момента возобновления поступления днепровской воды по системе канала (март 2022 г., после восьми лет ее отсутствия с 2014 г.) и до прекращения подачи воды в экосистему канала (после разрушения Каховской ГЭС в июне 2023 г.) проведены исследования по определению концентраций, миграции и распределения микроэлементов (Be, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb, Ag), включая ТМ, в воде СКК, орошаемых почвах и выращиваемых поливных с/х культурах.

Определено, что концентрации ТМ и микроэлементов в водной экосистеме СКК были безопасны для использования днепровской воды в качестве питьевой, а также для других хозяйственных нужд Крыма.

Определена концентрирующая способность взвешенного вещества в воде СКК, выраженная коэффициентами накопления (K_n), значения которых изменялись в диапазоне от $n \cdot 10^7$ (для Fe) до $n \cdot 10^3$ (для Zn). Такие высокие значения K_n исследуемых элементов обуславливают эффективное седиментационное самоочищение вод СКК от ТМ и других загрязняющих веществ.

В почвах наблюдалось систематическое превышение ПДК_п Cd – до 230 % как на рисовых и пшеничных полях, так и в целинных почвах. В зерне риса были отмечены превышения ПДК_{прод} Cu (на 29 %), Cd (на 150 %) и Pb (на 438 %), а в зерне пшеницы с поля близ Джанкоя – ПДК_{прод} Cd (на 360 %) и Pb (300 %). Обнаруженные превышения ПДК и МДУ микроэлементов в почвах и с/х культурах обусловлены, вероятно, деятельностью промышленных предприятий на севере полуострова.

Результаты расчетов поступления пулов микроэлементов и ТМ на орошаемые почвы показали, что даже максимальные значения поступления металлов с поливной водой (для Fe не превышают 0.001 % от пула) не повлияют на экологическое состояние орошаемых земель. Другими словами, незначительные количества элементов, приносимые с днепровской водой по СКК, не могут оказать ощутимого эффекта на орошаемые сельхозугодья Крыма. При этом оценка содержания микроэлементов в зерне с/х культур и зернофураже требует дополнительных мониторинговых исследований.

Полученные результаты можно использовать для разработки мер по предотвращению химического загрязнения орошаемых с/х земель Крыма с целью решения проблем устойчивого развития как Крымского региона, так и причерноморских районов России в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ / А. И. Денисова [и др.]. Киев : Наукова думка, 1989. 216 с.
2. Коба В. П., Сахно Т. М. Почвенное плодородие и урожайность зерновых и зернобобовых культур в Крыму // АгроЭкоИнфо, 2020. № 2. EDN JJHCLL.
3. Родин И. К., Клёнова И. К. Распределение посевных площадей сельскохозяйственных культур в Республике Крым после 2014 года // VII Международная научно-практическая конференция «Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий», Рязань, 06 апреля 2023 года. Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2023. С. 351–354. EDN SSDQBW.

4. *Mirzoeva N., Tereshchenko N., Korotkov A.* Artificial Radionuclides in the System: Water, Irrigated Soils, and Agricultural Plants of the Crimea Region // *Land*. 2022. Vol. 11, iss. 9. 1539. <https://doi.org/10.3390/land11091539>
5. Проблема повышения уровня тяжелых металлов в воде, предназначенной для орошения сельскохозяйственных культур / А. С. Улесов [и др.] // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАНКС академиком МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В., Рязань, 09 декабря 2020 года. Часть II. Рязань : РГАТУ, 2020. С. 340–343. EDN QTZWKY.
6. The regularities of heavy metals and arsenic accumulation in the vegetation of riverside depending on the level of technogenic load / N. A. Chernykh [et al.] // *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018. Vol. 10, iss. 4. P. 800–804 p. URL: <https://www.jpsr.pharmainfo.in/Documents/Volumes/vol10Issue04/jpsr10041823.pdf> (Date of access: 8.09.2024).
7. *Переволоцкая Т. В., Анисимов В. С.* Закономерности миграционных процессов тяжелых металлов в системе «почва – сельскохозяйственные растения» на примере коэффициента накопления Cu, Zn, Pb, Cd в зерновых культурах (зерно пшеницы и ячменя) // *Проблемы современной науки и образования*. 2017. № 10(92). С. 27–32. EDN YFURAD.
8. *Корецкая А. С., Андреева Г. Ю., Никонова Г. Н.* Содержание тяжелых металлов в системе почва–зерновые культуры // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2023. № 4. С. 96–100. EDN OIJWJC.
9. *Лукьянова Е. С., Федотов В. А.* Особенности накопления тяжелых металлов в почве и зерновых культурах // *Микроэлементы в медицине*. 2024. Т. 25, № 2. С. 54–55. EDN JHWFED. <http://doi.org/10.19112/2413-6174-2024-25-2-23>
10. *Башмаков Д. И., Лукаткин А. С.* Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск : Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, 2009. 236 с. EDN QCNYFZ.
11. Распределение некоторых тяжелых металлов в озимой пшенице на разных стадиях ее развития / Т. Г. Крупнова [и др.] // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Химия. 2023. Т. 15, № 3. С. 148–158. EDN UNIELM. <https://doi.org/10.14529/chem230308>
12. Адсорбционные свойства риса по отношению к солям тяжелых металлов / В. Д. Инишева [и др.] // *Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения* : Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, III Форума медицинских и фармацевтических ВУЗов России «За качественное образование», Екатеринбург, 03–05 апреля 2018 года. Екатеринбург : УГМУ, 2018. С. 592–595. EDN MHZQNV.
13. Содержание тяжелых металлов в почвах селитебных территорий Республики Крым / Е. В. Евстафьева [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 10. С. 19–29. EDN YNVYBN. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2101>
14. Comparative evaluation of pollution by heavy metals of ploughed and fallow land at various duration of agropedogenesis / F. N. Lisetskii [et al.] // *Journal of Agriculture and Environment*, 2020. Iss. 3. <https://doi.org/10.23649/jae.2020.3.15.2>

Поступила 29.02.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.03.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Проскурнин Владислав Юрьевич, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-2176-9228**, **Scopus Author ID: 55653290000**, **ResearcherID: H-4611-2018**, **SPIN-код: 5130-1015**, *v_proskurnin@ibss-ras.ru*

Мирзоева Наталья Юрьевна, ведущий научный сотрудник, руководитель ОРХБ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8538-2436**; **Scopus Author ID: 55623414000**; **ResearcherID: Q-9393-2016**, **SPIN-код: 8874-6381**, *natmirz@mail.ru*

Чужикова Ольга Дмитриевна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-4518-2624**, **Scopus AuthorID: 57205198922**, **Researcher ID: X-4583-2019**, **SPIN-код: 2088-6728**, *olga88.chp@ya.ru*

Вахрушев Максим Олегович, ведущий инженер, аспирант, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **SPIN-код: 8352-6467**, *140393@inbox.ru*

Заявленный вклад авторов:

Проскурнин Владислав Юрьевич – постановка цели и задач, выполнение химического анализа и измерение концентраций по определению микроэлементов, включая ТМ, аналитическая обработка данных, написание рукописи

Мирзоева Наталья Юрьевна – постановка цели, задач, анализ полученных результатов, обсуждение результатов, написание статьи

Чужикова Ольга Дмитриевна – подготовка проб и проведение химического анализа для определения концентраций ТМ и микроэлементов, оформление статьи

Вахрушев Максим Олегович – участие в экспедициях, отбор и подготовка проб, участие в химическом анализе для определения концентраций ТМ и микроэлементов в исследуемых объектах

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.