

Читать
онлайнRead
onlineРыбалкина Е.И.¹, Польшина Т.Н.², Сушкова С.Н.¹, Казеев К.Ш.¹

Биоиндикация пригодности донных отложений реки Дон для сельского хозяйства

¹ФГОАУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия;²ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», 344006, Ростов-на-Дону, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Донные отложения богаты органическими соединениями, однако за счёт их накопления на дне водоёма ухудшается качество воды. Один из методов очистки водоёмов — дноуглубительные работы, при которых полученный грунт выгружается по берегам с возможной последующей транспортировкой на полигоны твёрдых бытовых отходов. Данный метод утилизации нерационален, поскольку качественный состав некоторых илов позволяет использовать их в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Материалы и методы. Изучали загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) и тяжёлыми металлами (ТМ) донных отложений нижнего течения реки Дон для оценки их потенциального использования в качестве удобрений в сельском хозяйстве. Осадки анализировали на содержание гумуса, тяжёлых металлов, ПАУ и фитотоксичность, оценивали pH. Для этого отбирали пробы донных отложений в Цимлянском водохранилище и нижнем течении реки Дон и её притока реки Аксай. В качестве тест-объекта использована озимая пшеница сорта Бумба ЭС. Для определения фитотоксичности донных отложений использовали зарубежные нормативы их качества, а также фоновые региональные значения почв Ростовской области.

Результаты. Исследования показали, что отложения имеют органоминеральный характер, содержат в высоких концентрациях кремний, кальций и магний. Значения pH варьировались в нейтральном и слабощелочном диапазоне. Содержание ТМ в основном не выходило за границы допустимых значений. Исключение составили цинк и стронций, обнаруженные в повышенных количествах, причём самые высокие концентрации выявлены в средней части Цимлянского водохранилища. Содержание ПАУ существенно варьировалось, в нижнем течении реки наблюдали самые высокие уровни. Отложения показали различную степень фитотоксичности, при этом во всех образцах отмечено уменьшение длины корней пшеницы.

Ограничения исследования связаны с тем, что изменения и дополнения, внесённые в санитарно-эпидемиологические требования к различным видам почв и донных отложений, не являются исчерпывающими и могут пересматриваться по мере появления нормативов новых веществ, данных о токсичности и опасности нормированных соединений.

Заключение. Проведённая экологическая оценка состояния донных отложений реки Дон, основанная на расчётах суммарного коэффициента загрязнения, свидетельствует о низком уровне загрязнения исследуемых объектов, что допускает их использование в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: донные отложения; загрязнение; тяжёлые металлы; полициклические ароматические углеводороды; фитотоксичность; биотестирование

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Рыбалкина Е.И., Польшина Т.Н., Сушкова С.Н., Казеев К.Ш. Биоиндикация пригодности донных отложений реки Дон для сельского хозяйства. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(2): 155–161. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-2-155-161> <https://elibrary.ru/oqjbhw>

Для корреспонденции: Казеев Камил Шагидулович, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Участие авторов: Рыбалкина Е.И. — сбор материала и обработка данных, написание текста; Польшина Т.Н. — сбор материала и обработка данных; Сушкова С.Н. — получение и обработка данных; Казеев К.Ш. — планирование и руководство, сбор материала, написание текста, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета «Приоритет 2030» (№ СП03/С4_0708Приоритет_15).

Поступила: 06.05.2024 / Принята к печати: 02.10.2024 / Опубликовано: 07.03.2025

Ekaterina I. Rybalkina¹, Tatyana N. Polshina², Svetlana N. Sushkova¹, Kamil Sh. Kazeev¹

Bioindication of the suitability of bottom sediments of the Don River in agriculture

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation;²Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Bottom sediments are rich in organic compounds, but due to their accumulation at the bottom of the reservoir, water quality deteriorates. Dredging is one of the methods of cleaning water bodies, during which the resulting soil is unloaded along the banks with possible subsequent transportation to solid waste landfills. This method of waste disposal is not rational, since the qualitative composition of some sludge allows it being used as fertilizer in agriculture.

Materials and methods. Contamination of bottom sediments of the lower Don River with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals (HMs) was studied to assess their potential use as fertilizers in agriculture. Sediments were analyzed for pH, humus content, HMs, PAHs, and phytotoxicity. For this purpose, samples of bottom sediments were taken in the Tsimlyansk Reservoir and the lower reaches of the Don River and its tributary, the Aksai River. Winter wheat of the Bumba ES variety was chosen as a test object. To assess the phytotoxicity of bottom sediments, there were used foreign standards for the quality of bottom sediments and background regional values of soils in the Rostov region.

Results. Studies have shown that the deposits are of an organomineral nature, with a high content of silicon, calcium, and magnesium. The pH values varied between the neutral and slightly alkaline ranges. In the sediments, all HMs are within acceptable limits, and only zinc and strontium have increased contents, with the highest concentrations found in the middle part of the Tsimlyansk Reservoir. PAHs level varied significantly, with the highest levels observed in the lower reaches of the river. The sediments showed varying degrees of phytotoxicity, with all samples showing a decrease in root length.

Limitations. The limitations of the study are due to the fact that the changes and additions made to the sanitary and epidemiological requirements for various types of soils and bottom sediments are not exhaustive and can be revised as standards for new substances appear; data on the toxicity and danger of standardized compounds.

Conclusion. The conducted ecological assessment of the state of bottom sediments of the Don River, based on calculations of the total pollution coefficient, indicates a low level of pollution of the studied objects, which allows their using in agriculture.

Keywords: bottom sediments; pollution; heavy metals; polycyclic aromatic hydrocarbons; phytotoxicity; biotesting

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Rybalkina E.I., Polshina T.N., Sushkova S.N., Kazeev K.Sh. Bioindication of the suitability of bottom sediments of the Don River in agriculture. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(2): 155–161. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-2-155-161> <https://elibrary.ru/oqjbhw> (In Russ.)

For correspondence: Kamil Sh. Kazeev, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Contributions: Rybalkina E.I. — collection of material and data processing, writing the text; Polshina T.N. — collection of material and data processing; Sushkova S.N. — data processing; Kazeev K.Sh. — collection of material and data processing, text writing, editing. All co-authors — approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Acknowledgment. The research was carried out with the financial support of the project of the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University "Priority 2030" (No. SP03/S4_0708Prioritet_15).

Conflict of interest. The authors declare that there are no obvious or potential conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Received: May 6, 2024 / Accepted: October 2, 2024 / Published: March 7, 2025

Введение

Антропогенное воздействие на водохозяйственный комплекс Дона возрастает с каждым годом. В целях сохранения биоразнообразия и повышения водности с 2021 г. в Ростовской области реализуется план мероприятий по оздоровлению бассейна реки Дон. Накопленный опыт будет использован в новом федеральном проекте комплексного оздоровления водных объектов России, который стартует в 2025 г. Наряду с масштабным ремонтом и строительством очистных и гидротехнических сооружений реконструкция предполагает расчистку притоков в бассейне р. Дон. Дноуглубительные работы являются эффективным методом в борьбе с маловодьем и загрязнением рек. Полученный грунт технический флот выгружает по берегам с возможной последующей транспортировкой на полигоны ТБО. Однако данный метод утилизации отходов не является рациональным, поскольку качественный состав некоторых илов позволяет использовать их в качестве удобрения в сельском хозяйстве. Лимитирующим фактором вторичного применения донных отложений могут стать полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и тяжёлые металлы (ТМ).

Донные отложения играют ключевую роль в водной экосистеме, накапливая загрязняющие вещества. Изучение донных отложений Дона имеет большое значение для понимания процессов, происходящих в реке и в регионе в целом. Эта тема остаётся актуальной для дальнейших исследований. Для разработки адекватных мер управления донными отложениями необходимо изучить их загрязнение и токсичность, которые влияют на окружающую среду. ПАУ и ТМ являются важным компонентом донных отложений и могут быть использованы в качестве индикаторов загрязнения водной среды [1]. К наиболее распространённым ПАУ относятся нафталин, аценафтилен, фенантрен, антрацен, флуорен, пирен и др. Изучение содержания и распределения ПАУ и ТМ в донных отложениях даёт информацию о различных источниках загрязнения и позволяет оценить уровни антропогенного воздействия на водную среду [2, 3]. Также возможно использование ПАУ и ТМ для мониторинга здоровья водной биологической среды и оценки эффективности защиты окружающей среды.

Биотестирование является эффективным способом оценки донных отложений, имеет ряд преимуществ в сравнении с другими аналитическими методами мониторинга [4]. Биоиндикация позволяет оценить интегральное влияние загрязнителей на окружающую среду с помощью чувствительных тест-организмов, отвечающих даже на минимальное негативное воздействие. Данный метод оценки используют как самостоятельно, так и в комплексе с другими при изучении качества донных отложений. Ответ каждого вида организмов на воздействие уникален [5–7].

Цель исследования — определение физико-химических характеристик донных отложений нижнего течения р. Дон для оценки их потенциального использования в сельском хозяйстве. Прикладной аспект применения донных отложений в пахотных почвах до сих пор слабо изучен в литературе [8].

Материалы и методы

Объектом исследования были донные отложения Цимлянского водохранилища и Нижнего течения р. Дон и её притока р. Аксай (рис. 1).

Донные отложения отбирали согласно ГОСТ 17.1.5.01–801 и РД 52.24.609–2013^{1,2}.

Полевой материал собирали в период с 11 мая по 16 августа 2023 г. Объём работ, выполненный в ходе четырёх экспедиций, представлен в таблице. В Цимлянском водохранилище пробы донных отложений отбирали в рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Денеб» (с 11.05 по 18.05.2023 г.) при помощи дночерпателя Петерсена. Из помещённого в бентосный таз массива грунта пластиковым черпаком отбирали пробу произвольного объёма. В период с 10 по 16 мая 2023 г. с борта НИС ПТР «Денеб» был собран полевой материал с помощью проточного гидрологического зонда SBE21. В р. Дон пробы донных отложений отбирали вручную при помощи десятилитрового металлического ведра. Для хранения пробы использовали пластиковую тару (бентосные вёдра). Пробы не фиксировали и не высушивали. Всего было отобрано 11 проб.

Для определения экологического и гигиенического состояния донных отложений оценивали pH, удельный вес гумуса, содержание ТМ, ПАУ, выполняли тест на фитотоксичность [9]. Реакцию среды устанавливали с помощью pH-метра Hanna HI2211-02. Количество органического углерода оценивали по методу Тюрина в модификации Никитина. Содержание химических элементов определяли вакуумным волнодисперсионным рентгенофлуоресцентным спектрометром СПЕКТРОСКАН МАКС-GV. Для анализа содержания ПАУ в образцах донных отложений использована высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) на хроматографе Agilent 1260. Предварительная экстракция ПАУ из донных отложений выполнена методом омыления посредством кипячения образца в 2%-м спиртовом растворе щёлочи КОН с последующей трёхкратной экстракцией

¹ ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость (с Изменением № 1). М.: 1980.

² РД 52.24.609–2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. Утв. заместителем руководителя Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 7 августа 2013 г. М.: 2013.

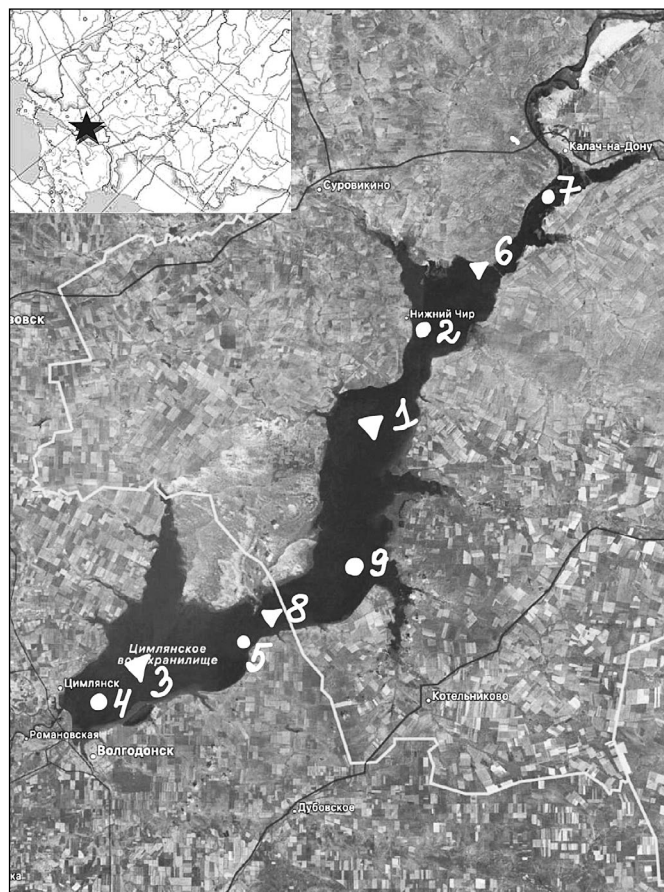


Рис. 1. Карта отбора донных отложений в Цимлянском водохранилище.

Fig. 1. Chart of the sediment sampling in the Tsimlyan reservoir.

гексаном (ISO 13877–2005). Полнота экстракции ПАУ определена методом добавок. Определено содержание 12 приоритетных ПАУ (2-, 3-, 4-, 5-, 6-кольчатых): нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, бенз(а)пирен, дибенз(а,һ)антрацен, бенз(г,һ,і)перилен.

Согласно цели исследования, в данной работе тест-объектом выступила озимая пшеница сорта Бумба ЭС (урожай 2022 г.) как одна из ведущих культур в сельском хозяйстве Ростовской области.

Места отбора проб и их характеристика

Sampling sites and their characteristics

Место отбора проб Sampling location	№ станции Station number	№ образца Sample number	Широта Latitude	Долгота Longitude	Глубина, м Depth, m	Прозрачность воды, м Water clarity in meters	pH
Цимлянское водохранилище Tsimlyan Reservoir	Экспедиция 1 Expedition 1	54	47.36995	42.12201	15.0	2.5	7.34
		52	47.44672	42.38169	15.7	1.5	7.8
		50	47.52041	42.55708	11.2	1.4	7.66
		47	48.21190	43.07298	6.3	0.7	6.84
		45	48.35661	43.28243	7.2	0.7	7.74
	Экспедиция 2 Expedition 2	53	47.40770	42.22630	14.9	0.6	7.63
		51	47.45694	42.41368	19.6	0.5	7.67
		49	48.06375	43.00831	6.8	0.3	0
		46	48.21625	43.08958	1.6	0.25	8.27
р. Дон / River Don		11	47.227758	40.053443	1.0	0.3	7.42
р. Аксай / River Aksai		10	47.290992	39.956117	1.2	0.3	7.55

Для анализа фитотоксичности донные отложения помещали в полипропиленовые контейнеры объемом 500 мл. В каждый сосуд сеяли 20 зёрен озимой пшеницы сорта Бумба ЭС. Контейнеры помещали под фитолампы. Влажность донных отложений составляла 40% на протяжении всего времени опыта. Повторность анализа двух-, четырёхкратная. Через семь суток определяли длину проростков, корней, количество проросших семян и фитомассу. Поскольку в Российской Федерации отсутствуют нормативы, регламентирующие ПДК ТМ и ПАУ в донных отложениях, для эколого-гигиенической оценки использованы канадские и нидерландские нормативы качества донных отложений [10, 11].

Для оценки степени химического загрязнения почвы использованы коэффициенты содержания химических веществ (K_c) и общий показатель загрязнения (Z_c). Коэффициент концентрации химического вещества (K_c) выражается с помощью формулы (1):

$$K_c = C_i / C_{fi}, \quad (1)$$

где C_i – фактическое содержание исследуемого вещества в донных отложениях; C_{fi} – фоновое содержание исследуемого вещества в донных отложениях.

В качестве фона использовали значения регионального фонового содержания ТМ в почвах. Общий показатель загрязнения (Z_c) выражается как сумма коэффициентов концентраций основных элементов-загрязнителей и рассчитывается по формуле (2):

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n - 1), \quad (2)$$

где n – количество изучаемых суммируемых веществ; K_{ci} – коэффициент содержания i -го загрязняющего компонента.

Оценку уровня загрязнения донных отложений проводили в соответствии со стандартной шкалой оценки почв. Фоновые значения, ПДК и ОДК ТМ в донных отложениях сравнивали с данными С.Н. Горбова, О.С. Безугловой [12] и СанПиН 1.2.3685–21³. Норматива ПДК марганца в донных отложениях не существует, поэтому за эталон брали значения ПДК СанПиН 1.2.3685–21 для почв Российской Федерации (1500 мг/кг). Статистическая обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel. Влияние свойств донных отложений на накопление ПАУ и ТМ оценивали с помощью коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, что позволило лучше понять факторы, влияющие на накопление токсичных элементов в почвах исследуемой территории.

³ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28 января 2021 г. (с изменениями на 30 декабря 2022 г.). М., 2022.

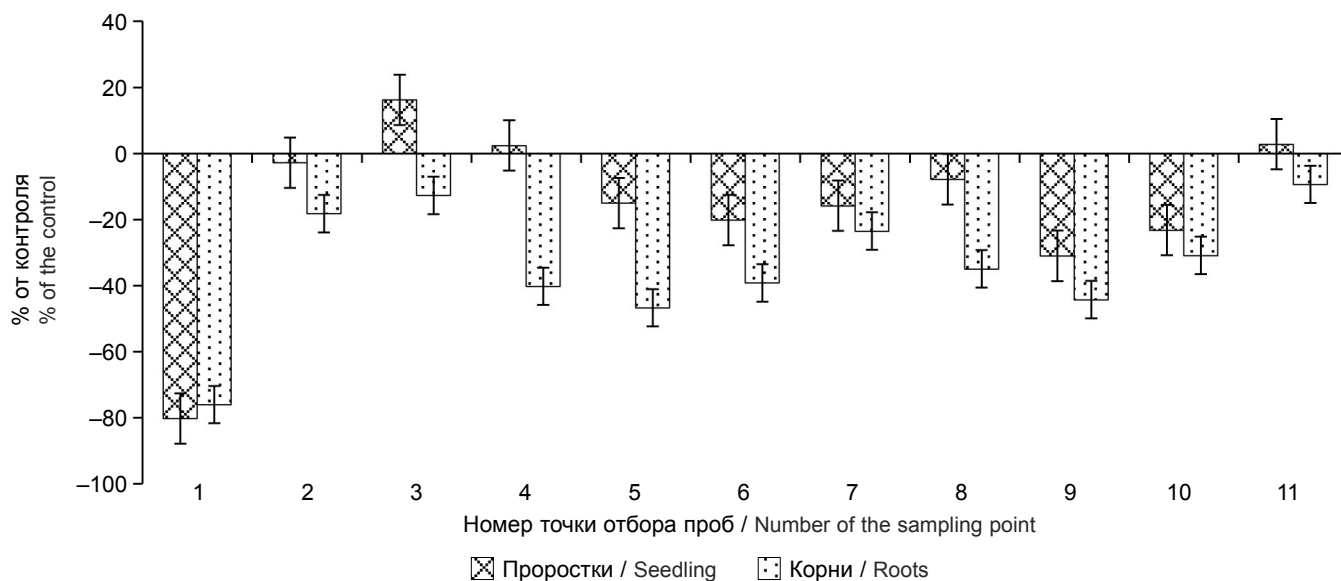


Рис. 2. Фитотоксичность донных отложений по значениям длины проростков и корней пшеницы.

Fig. 2. Phytotoxicity of bottom sediments based on the length of seedlings and roots.

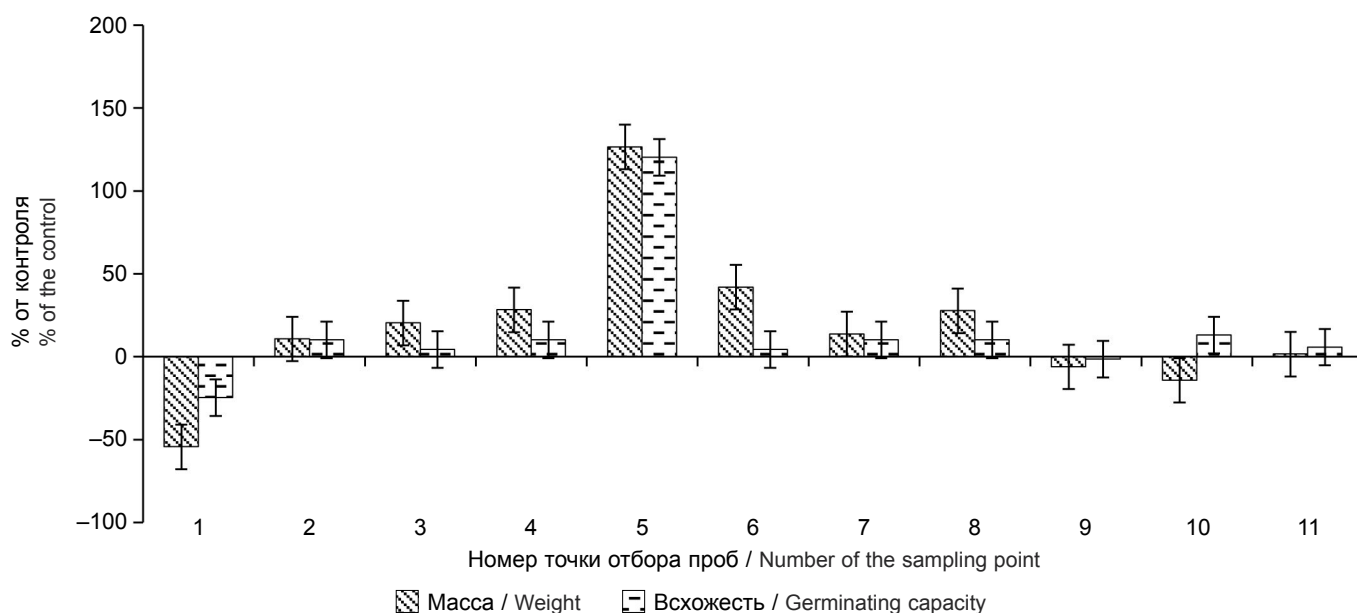


Рис. 3. Фитотоксичность донных отложений по значениям массы и всхожести семян пшеницы.

Fig. 3. Phytotoxicity of bottom sediments based on weight and germination capacity.

Результаты

Донные отложения имели следующий элементный состав: SiO_2 (31–86%), CaO (5–27%), Al_2O_3 (1–12%), Fe_2O_3 (0,6–5,1%), MgO (0,3–1,9%), Na_2O (0,6–1,5%), K_2O (0,4–1,8%), TiO_2 (0,1–0,73%), P_2O_5 (0,05–0,53%). В сумме содержание кремния, кальция, магния, алюминия, фосфора, натрия и железа составило 75–91%. Установлено, что по валовому составу изучаемые илы можно отнести к органоминеральным. Большая часть полученных донных отложений относится к глеевым илам карбонатного типа. Они характерны для лесостепной и северной части степной зоны [13]. Исключениями стали образцы № 1 и № 9, состоящие преимущественно из раковин двустворок и брюхоногих, а также образец № 6, в составе которого было 86% диоксида кремния. Высокое содержание диоксида кремния в большинстве образцов является типичным для данной местности.

По водородному показателю илы можно отнести к нейтральным и слабощелочным. Наблюдались различия в значениях pH – в среднем от 7,3 до 7,8. Самый низкий уровень pH (6,8) выявлен в районе станицы Нижний Чир, самый высокий (8,3) – рядом с заливом Жуковское Убежище. По солёности донные отложения являются маломинерализованными или кальциевыми.

Анализ загрязнения донных отложений ТМ показал превышение ПДК стронция в образце № 1 на 19% – 716 мг/кг. Поскольку нормативы ПДК стронция в донных отложениях и почвах не установлены, 600 мг/кг принято считать верхней границей нормального содержания валового стронция в почвах, поэтому мы не принимаем данное превышение как лимитирующий фактор использования донных отложений в качестве удобрения. В образце № 5 обнаружено четырёхкратное превышение предельно допустимого содержания цинка – 409 мг/кг. С учётом канадского норматива содер-

жания хрома в донных отложениях (52,3 мг/кг) превышение в два раза отмечено в образцах № 2, 3, 4, 8, 10, но если принимать за эталон ПДК хрома в почве (100 мг/кг), все исследованные донные отложения не являются загрязнёнными.

Аналогичный вывод можно сделать и о содержании в донных отложениях никеля и меди, так как их содержание остаётся в границах ПДК для почвы, но превышает канадские нормативы для донных отложений. Суммарный коэффициент загрязнения (Zc) варьировался от 1,4 до 3,6. Самые высокие значения коэффициента загрязнения (6,6) отмечены в образце № 5, что связано с превышением ПДК хрома в четыре раза. Все изученные донные отложения по сумме загрязнения не превысили показателя 16, следовательно, их можно отнести к допустимой категории загрязнения.

Сумма ПАУ находилась в диапазоне 954–1816 мкг/кг. Наиболее высокое загрязнение среди проб изученных донных отложений обнаружено в образце, который отобран в самом нижнем течении р. Дон. По суммарному содержанию отдельных ПАУ в донных отложениях превышение PEL в два раза зафиксировано только в значениях флуорена – 257–339 мкг/г. Превышение ISQG в 10 раз по суммарному значению отмечено по фенантрону и флуорену. Содержание остальных ПАУ остаётся в границах существующих PEL и ISQG.

В России гигиенические нормативы содержания ПАУ в почвах приняты только для бенз(а)пирена (20 мкг/кг). Содержание этого вещества оставалось в границах почвенных ПДК во всех образцах, за исключением донных отложений р. Аксай – 2 ПДК почвенных санитарно-гигиенических нормативов и 1,13 ISQG канадских нормативов качества донных отложений. Сумма 9 ПАУ, по которым существуют допустимые пределы воздействия (нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, бенз(а)пирен, дибенз(а,h)антрацен), не превышает ISQG и PEL.

Снижение длины корней тестовой культуры пшеницы на 9–76% обнаружено на всех образцах донных отложений. Самые высокие значения фитотоксичности обнаружены в двух образцах из Цимлянского водохранилища, расположенных в среднем течении. В одном образце подавление длины корней и проростков достигало 80%, в образце № 9 – 44% (рис. 2). Показатели массы и всхожести семян находились на уровне 2–42% выше контроля, в образце № 5 наблюдали увеличение массы на 126% (рис. 3).

Если суммировать значения по всем донным отложениям, можно сделать заключение о практическом отсутствии влияния донных отложений на всхожесть. В сумме фитотоксическое действие наблюдали в значениях длины корней на 34% и длины проростков на 16%. Не зафиксировано достоверной корреляции между количеством гумуса в донных отложениях и значениями фитотоксичности. Содержание органического углерода варьировалось от 0,4 до 4,3%. В образце № 1, содержащем 26,5% оксида кальция, гумуса не обнаружено.

Обсуждение

Оценка экологического состояния донных отложений затруднена из-за отсутствия для них общепризнанных фоновых значений приоритетных ПАУ и ТМ. Определение фоновых значений актуально для всех исследований, особенно для санитарно-гигиенической оценки. Таганрогский залив, Нижний Дон и дельта Дона являются критически важными участками на пути транзита крупнотоннажных нефтяных танкеров из Азовского и Чёрного морей в глубь России. Ежегодно через дельту Дона проходит более 200 тыс. единиц водного транспорта, что соответствует грузопотоку Финского залива и способствует накоплению канцерогенных ПАУ в донных отложениях прибрежных территорий [14]. На донные отложения исследуемой территории оказывают влияние промышленные предприятия угольной промышленности, чёрной металлургии, химической и энергетической отраслей, в том числе крупнейшая электростанция юга России

Новочеркасская ГРЭС, которая является основным источником загрязнения ПАУ и ТМ [15, 16].

Среднее валовое содержание выявленных металлов в донных отложениях р. Дон располагается в следующем порядке по убыванию: $Mn > Sr > Zn > Cr > V > Ni > Cu > Co > As$. Для пойменных и дельтовых ландшафтов устьевых экосистем р. Дон характерно аналогичное распределение марганца и цинка в ряду убывания $Mn > Cr > Zn > Ni > Cu > Pb > As > Cd$ [17].

Такая закономерность обусловлена формированием донных отложений и дельтовых ландшафтов в однотипных биогеохимических условиях пойменного режима. В крупных городах на относительно небольшой площади располагается множество источников загрязнения различной природы, что определяет неоднородность состава почвенных и донных загрязнений.

Высокая концентрация цинка (Zn) в образце № 5 обусловлена в значительной степени твёрдым стоком, который накапливается в водохранилище и дельте реки. В верхнем течении реки поступают Mn (100700 мг/с), Zn (8430 мг/с), Ni (1410 мг/с) [18]. Поскольку донные отложения предполагается использовать в качестве удобрения и мелиоранта почв, можно считать, что концентрации стронция, хрома, никеля и меди в изученных образцах ила не превышают допустимых значений.

По суммарному показателю загрязнения коэффициент Zc составляет от 1,41 до 6,64. Это меньше 16, то есть соответствует допустимой категории загрязнения и позволяет считать донные отношения безопасными для сельскохозяйственного использования.

Концентрации отдельных соединений ПАУ на территории исследований существенно различались, что указывает на антропогенное происхождение загрязняющих веществ в донных отложениях [19]. При этом высокомолекулярные ПАУ, образовавшиеся в результате техногенных процессов, имели изменчивость более 200%. По мере увеличения изменчивости ПАУ наблюдался рост разницы между средним значением и медианой, что указывает на наличие точечных источников загрязнения в нижнем течении р. Дон [20].

Наибольший вклад в суммарное загрязнение донных отложений ПАУ внесли флуорен и фенантрен. Данные ПАУ относятся к низкомолекулярным с тремя бензольными кольцами. Данная тенденция может быть связана с географическим расположением точек отбора проб. Средняя часть водохранилища имеет наибольшую глубину и слабое течение, следовательно, и низкую степень потока воды и фильтрации грунта [21].

Определённое по длине проростков и корней пшеницы снижение показателей фитотоксичности донных отложений при использовании в чистом виде отмечалось в ранее проведённых исследованиях [22, 23]. Следовательно, длину корней можно рассматривать как ключевой показатель в оценке качества и безопасности донных отложений. Такие же результаты на корнях тест-культур растений ранее получены для загрязнённых почв [24, 25].

ПАУ в силу своей гидрофобной природы преимущественно связаны с органическим веществом, а более мелководные отложения накапливают ПАУ в более высоких концентрациях по сравнению с крупнозернистыми песками. Однако достоверной корреляции между составом донных отложений, количеством органического вещества и степенью загрязнения ПАУ не выявлено.

Показатели всхожести в более загрязнённых районах отбора донных отложений либо статистически не отличались от контроля, либо были выше экологически более благополучных районов. Следовательно, существуют и другие факторы, не определённые в данном исследовании, влияющие на фитотоксичность анализируемых отложений, такие как химические формы ТМ, которые определяют их подвижность и биодоступность.

Антагонистические эффекты возникают при совокупном воздействии нескольких загрязнителей на уровне, меньшем суммы их индивидуальных эффектов. Синергетические эф-

фекты, напротив, возникают, если совокупное воздействие загрязнителей превышает сумму их индивидуальных эффектов. Эти взаимодействия могут быть трудно предсказать из-за сложной и динамичной природы экологических систем, а также из-за того, что взаимодействия могут варьироваться в зависимости от нескольких факторов (конкретные вовлечённые загрязнители, их концентрации и условия окружающей среды).

Этот вывод подчёркивает сложность взаимосвязи между загрязнителями и их воздействием на рост растений, а также необходимость дальнейших исследований для выявления и понимания иных факторов, которые могут влиять на фитотоксичность анализируемых отложений. Выявление и понимание этих факторов позволит разработать стратегии смягчения негативного воздействия загрязнителей на рост растений и здоровье экосистем.

Заключение

Исследование качества донных отложений р. Дон позволило сделать несколько важных выводов об уровне загрязнения реки и потенциальном использовании донных отложений в качестве удобрений. Отложения относятся преимущественно к органоинеральным карбонатного типа с высоким содержанием диоксида кремния, кальция и магния. Значения pH колеблются от 6,8 до 8,3, что позволяет отнести илы к нейтральным и слабощелочным. Содержание в отложениях ТМ, в том числе стронция, хрома, ванадия, никеля, меди, кобальта и мышьяка, находится в пределах допустимых значений, за исключением цинка, который превышает почвенные ПДК в четыре раза. Содержа-

ание ПАУ в отложениях существенно варьируется, причём самые высокие уровни наблюдаются в нижнем течении реки. Сумма ПАУ колеблется от 954 до 1816 мкг/кг, а содержание флуорена, фенантрена и пирена превышает установленные пределы безопасности. Фитотоксичность осадков тестировали на озимой пшенице: все образцы отложений вызвали уменьшение длины корней, при этом наибольшее ингибирование вызвали два образца из Цимлянского водохранилища.

Результаты исследования показывают, что концентрации ТМ в отложениях соответствуют допустимому уровню, но содержание ПАУ находится на границе допустимых значений. На фитотоксичность осадков могут влиять и другие факторы, например, химические формы ТМ, определяющие их подвижность и биодоступность. Необходимы дальнейшие исследования для полного понимания факторов, влияющих на фитотоксичность отложений, и разработки стратегии снижения негативного воздействия загрязнителей на рост растений и здоровье экосистем.

Результаты исследования подчёркивают важность установления фоновых значений ТМ и ПАУ в отложениях, поскольку это необходимо для точных экологических и гигиенических оценок. Река Дон является критически важным районом движения крупных нефтяных танкеров, а отложения реки подвергаются воздействию промышленной деятельности, в том числе крупнейшей электростанции юга России – Новочеркасской ГРЭС. Поэтому мониторинг качества отложений и понимание факторов, влияющих на уровень их загрязнения, имеют решающее значение для защиты экосистемы реки и обеспечения безопасного использования отложений в качестве удобрений.

Литература

(п.п. 22–25 см. References)

- Соловьёва О.В., Тихонова Е.А., Миронов О.А., Барабашин Т.О. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Чёрное море). *Морской гидрофизический журнал*. 2021; 37(3): 362–72. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-3-362-372> <https://elibrary.ru/vyhdoc>
- Волкова Н. А., Иванова И.С., Соколов Д.А., Колубаева Ю.В., Чуйкина Д.И. Концентрации и источники полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях рек северных нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023; 334(4): 135–48. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3924> <https://elibrary.ru/nqcutr>
- Халиков И.С., Лукьянова Н.Н. Содержание полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях озера Байкал по результатам мониторинга в 2017–2018 гг. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020; (6–2): 69–73. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050> <https://elibrary.ru/kdhdrk>
- Савостикова О.Н., Ушакова О.В., Трегубова Л.Ю. Мониторинг химического и биологического состава придонного ила (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2022; 101(5): 511–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-511-514> <https://elibrary.ru/iosgdb>
- Аль-Раммахи А.А.К., Сазыкина М.А., Барабашин Т.О., Карчава Ш.К., Климова М.В., Хаммаи М.И. и др. Оценка загрязнения донных отложений Азовского моря методом биотестирования с использованием биолуминесцентных тестов. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2022; 5(3): 14–23. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2022_5_3_14 <https://elibrary.ru/ldeuaj>
- Хаматова А.В. Оценка качества вод и донных отложений р. Каменка методом биотестирования. *Антропогенная трансформация природной среды*. 2023; 9(1): 54–64. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-54-64>
- Горбачева Е.А., Лаптева А.М. Экологические исследования донных отложений прибрежных районов Кольского п-ова (химический состав и биотестирование). *Экологическая химия*. 2022; 31(4): 197–208. <https://elibrary.ru/pocdpg>
- Рыбалкина Е.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние сапротеля на биологическую активность каштановой почвы. *Агрохимический вестник*. 2023; (4): 39–46. <https://elibrary.ru/jzfwze>
- Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. *Методы биодиагностики наземных экосистем*. Ростов-на-Дону; 2016. <https://elibrary.ru/xvoux>
- Neue Niederländische Liste. Altlasten Spektrum 3/95. Rules for Building SP 11-102-97, Annex B (State Committee of the Russian Federation for Building, 1997.
- Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001.
- Горбов С.Н., Безуголова О.С. Тяжелые металлы и радионуклиды в почвах Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону, Таганрог; 2020. <https://doi.org/10.18522/801273349> <https://elibrary.ru/cnnmrv>
- Перельман А.И. *Биокосные системы Земли*. М.: Наука; 1977.
- Росстат. *Транспорт по России. Информационно-статистический бюллетень*. М.; 2023.
- Дудникова Т.С., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Барбашев А.И., Попилешко Я.А. и др. Анализ содержания полициклических ароматических углеводородов в различных типах почв импактной зоны Новочеркасской ГРЭС. В кн.: *Материалы по изучению русских почв*. СПб.; 2020: 28–34. <https://elibrary.ru/pacedid>
- Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С., Назаренко О.Г., Бурачевская М.В., Антоненко Е.М. Фракционно-групповой состав соединений Мп, Сг, Ni и Cd в почвах техногенных ландшафтов (район Новочеркасской ГРЭС). *Почвоведение*. 2013; (4): 414. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13040102> <https://elibrary.ru/pwndbz>
- Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Манджиева С.С., Козлова М.Н. Особенности содержания и подвижность тяжелых металлов в почвах поймы реки Дон. *Аридные экосистемы*. 2016; 22(1): 86–98. <https://elibrary.ru/vwbzev>
- Ткаченко А.Н., Ткаченко О.В., Лычагин М.Ю., Касимов Н.С. Потоки тяжелых металлов в водных системах дельты Дона и Кубани. В кн.: *Доклады наук о Земле*. 2017; 474(2): 587–90. <https://doi.org/10.7868/S0869565217140201> <https://elibrary.ru/yrvpvl>
- Константинова Е.Ю., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Константинов А.О., Хорошавин В.Ю. Полициклические ароматические углеводороды в почвах промышленных и селитебных зон Тюмени. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018; 329(8): 66–79. <https://elibrary.ru/uwpbxi>
- Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость. *Водные ресурсы*. 2020; 47(6): 694–709. <https://doi.org/10.31857/S0321059620060152> <https://elibrary.ru/bbjotb>
- Гайворонский В.Г., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Неведомая Е.Н., Казеев К.Ш. Способ определения экологически безопасного остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в почвах. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(9): 987–92. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-987-992> <https://elibrary.ru/fztgen>

References

- Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Mironov T.O., Barabashin T.O. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of the river – sea mixing zone on the example of the river Chernaya and the Sevastopol bay (The Black Sea). *Phys. Oceanogr.* 2021; 28(3): 338–47. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-3-338-347> <https://elibrary.ru/gpyrey>
- Volkova N.A., Ivanova I.S., Sokolov D.A., Kolubaeva Yu.V., Chuikina D.I. Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of rivers of northern oil and gas producing territories of western Siberia. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov.* 2023; 334(4): 135–48. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/4/3924> <https://elibrary.ru/nqcutr> (in Russian)
- Khalikov I.S., Lukyanova N.N. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in bottom sediments of Baikal Lake according to results of monitoring in 2017–2018. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal.* 2020; (6–2): 69–73. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050> <https://elibrary.ru/kdhrk> (in Russian)
- Savostikova O.N., Ushakova O.V., Tregubova L.Ju. Monitoring of chemical and biological composition of bottom silt (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2022; 101(5): 511–4. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-511-514> <https://elibrary.ru/iosgdb> (in Russian)
- Al-Rammahi A.A.K., Sazykina M.A., Barabashin T.O., Karchava Sh.K., Klimova M.V., Khammami M.I., et al. Assessment of the pollution of the bottom sediments in the Azov sea by biotesting using bioluminescent tests. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya.* 2022; 5(3): 14–23. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2022_5_3_14 <https://elibrary.ru/ldeuaj> (in Russian)
- Khamatova A.V. Assessment of the quality of waters and bottom sediments of the Kamenka river by biotesting. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy.* 2023; 9(1): 54–64. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-54-64> (in Russian)
- Gorbacheva E.A., Lapteva A.M. Environmental investigations of the coastal areas sediments of the Kola peninsula (chemical composition and bioassay). *Ekologicheskaya khimiya.* 2022; 31(4): 197–208. <https://elibrary.ru/pocdpg> (in Russian)
- Rybalkina E.I., Kazeev K.Sh., Agrosnikov S.I. Influence of sapropel on biological activity of chestnut soil. *Agrokhimicheskii vestnik.* 2023; (4): 39–46. <https://elibrary.ru/jzfzve> (in Russian)
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of Biodiagnostics of Terrestrial Ecosystems [Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem]*. Rostov-na-Donu; 2016. <https://elibrary.ru/xvousx> (in Russian)
- Neue Niederländische Liste. Altlasten Spektrum 3/95. Rules for Building SP 11-102-97, Annex B (State Committee of the Russian Federation for Building, 1997).
- Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001.
- Gorbov S.N., Bezuglova O.S. *Heavy Metals and Radionuclides in the Soils of Rostov Agglomeration [Tyazhelye metally i radionuklidy v pochvakh Rostovskoi aglomeratsii]*. Rostov-na-Donu, Taganrog; 2020. <https://doi.org/10.18522/801273349> <https://elibrary.ru/cnnmrv> (in Russian)
- Perelman A.I. *Bioinert Systems of the Earth [Biokosnye sistemy Zemli]*. Moscow: Nauka; 1977. 160 p. (in Russian)
- Rosstat. *Transport in Russia. Information and Statistical Bulletin.* Moscow; 2023 (in Russian)
- Dudnikova T.S., Sushkova S.N., Minkina T.M., Antonenko E.M., Barbashev A.I., Popileshko Ya.A., et al. Study of the content of polycyclic aromatic hydrocarbons in various types of soils of the impact zone of the Novocherkassk hydroelectric station. In: *Materials on the Study of Russian Soils [Materialy po izucheniyu russkikh pochv]*. St. Petersburg; 2020: 28–34. <https://elibrary.ru/paccid> (in Russian)
- Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Motuzova G.V., Nazarenko O.G., Antonenko E.M. Fractional and group composition of the Mn, Cr, Ni, and Cd compounds in the soils of technogenic landscapes in the impact zone of the Novocherkassk power station. *Eurasian Soil Sci.* 2013; 46(4): 375–85. <https://doi.org/10.1134/S1064229313040108> <https://elibrary.ru/rfdhly>
- Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Kozlova M.N. Specific features of content and mobility of heavy metals in soils of floodplain of the Don river. *Arid Ecosystems.* 2016; 6(1): 70–9. <https://doi.org/10.1134/S2079096115040095> <https://elibrary.ru/wxstsj>
- Tkachenko A.N., Tkachenko O.V., Lychagin M.Y., Kasimov N.S. Heavy metal flows in aquatic systems of the don and Kuban river deltas. *Doklady nauk o Zemle.* 2017; 474(1): 587–90. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1705018X> <https://elibrary.ru/xmyron>
- Konstantinova E.Yu., Sushkova S.N., Minkina T.M., Antonenko E.M., Konstantinov A.O., Khoroshavin V.Yu. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of industrial and residential areas of Tyumen. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov.* 2018; 329(8): 66–79. <https://elibrary.ru/uwpbxi> (in Russian)
- Dudnikova T.S., Minkina T.M., Sushkova S.N., Barbashev A.I., Antonenko E.M., Konstantinova E.Yu., et al. Background content of polycyclic aromatic hydrocarbons during monitoring of natural and anthropogenically transformed landscapes in the coastal area soils. *Water.* 2023; 15(13): 2424. <https://doi.org/10.3390/w15132424> <https://elibrary.ru/tdeaky>
- Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility. *Water Res.* 2020; 47(6): 953–67. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060159> <https://elibrary.ru/gppykm>
- Czerniawska-Kusza I., Ciesielczuk T., Kusza G., Cichon A. Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments. *Environ. Toxicol.* 2006; 21(4): 367–72. <https://doi.org/10.1002/tox.20189>
- Ali A., Phull B.A.R., Zia M., Shah A.M.A., Malika R.N., ul-Haq I. Phytotoxicity of River Chenab sediments: In vitro morphological and biochemical response of Brassica napus L. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2015; (4): 74–84. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4637.2320>
- Gaivoronskiy V.G., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Nevedomaya E.N., Kazeev K.Sh. A method for determining the environmentally safe residual content of oil and petroleum products in soils. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2023; 102(9): 987–92. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-9-987-992> <https://elibrary.ru/fztgen> (in Russian)
- Moshchenko D.I., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.S., Minkina T.M., Mezhenkov A.A., et al. Comparative assessment of the resistance to lead (Pb) pollution of forest, forest-steppe, steppe, and mountain-meadow soils of the Central Ciscaucasia and the Caucasus regions. *Forests.* 2022; 13(10): 1528. <https://doi.org/10.3390/f13101528> <https://elibrary.ru/gxnfbd>

Сведения об авторах

Рыбалкина Екатерина Игоревна, аспирант, ФГОАУ ВО «ЮФУ», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: e-ra7@mail.ru

Польшина Татьяна Николаевна, науч. сотр., ФГБУН ЮНЦ РАН, 344006, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: tanja0701@mail.ru

Сушкова Светлана Николаевна, профессор, ФГОАУ ВО «ЮФУ», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: snsushkova@sfnedu.ru

Казеев Камил Шигидулович, доктор геогр. наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ФГОАУ ВО «ЮФУ», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Information about the authors

Ekaterina I. Rybalkina, postgraduate student, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. E-mail: e-ra7@mail.ru

Tatyana N. Polshina, research fellow, Federal Research Center The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 344006, Rostov-on-Don, Russian Federation. E-mail: tanja0701@mail.ru

Svetlana N. Sushkova, Professor, Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3470-9627> E-mail: snsushkova@sfnedu.ru

Kamil Sh. Kazeev, DSc (Geology), Professor, Director of the Academy of Biology and Biotechnology named after D.I. Ivanovsky, Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212> E-mail: kamil_kazeev@mail.ru