

Оригинальная статья / Original article

УДК 57.044

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-12



Уровни содержания и закономерности распространения тяжелых металлов в воде и донных отложениях озера Селигер

Юлия И. Баева, Наталья А. Черных

МГИМО МИД России, Москва, Россия

Контактное лицо

Юлия И. Баева, кандидат биологических наук, доцент кафедры демографической и миграционной политики, МГИМО МИД России; 119454 Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 76. Тел. +79167888129
Email baeva_yulya@mail.ru;
yu.baeva@inno.mgimo.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6137-2321>

Формат цитирования

Баева Ю.И., Черных Н.А. Уровни содержания и закономерности распространения тяжелых металлов в воде и донных отложениях озера Селигер // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 3. С. 133-144. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-12

Получена 10 февраля 2025 г.

Прошла рецензирование 24 апреля 2025 г.

Принята 25 июля 2025 г.

Резюме

Цель: определение и сравнительный анализ концентраций ряда тяжелых металлов (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd) в воде и донных отложениях оз. Селигер в зависимости от уровня техногенной нагрузки.

Содержание тяжелых металлов (ТМ) определяли в летние периоды 2023 и 2024 гг. в воде и донных отложениях пяти плесов оз. Селигер, испытывающих различную техногенную нагрузку. Количественный химический анализ проводили методами атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией и атомной эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой.

Пространственная неоднородность в распределении химических элементов в воде Селигера обусловлена, главным образом, расположением источников загрязнения и сложной конфигурацией самого озера. Максимальные концентрации ТМ в воде и донных отложениях приурочены к Слободскому и Осташковскому плесам, вблизи мест расположения промышленных предприятий; минимальные – для Березовского и Полновского плесов. Повышенные концентрации элементов характерны для Селижаровского плеса, который, по сути, является транзитным – через него осуществляется вынос загрязняющих веществ в р. Селижаровку. Территориальное распространение ТМ в донных отложениях озера практически повторяет закономерности распределения элементов в воде. На основании анализа полученных авторами значений коэффициентов донной аккумуляции (КДА) установлен высокий уровень хронического загрязнения озера всеми изучаемыми металлами.

Полученные результаты подчеркивают необходимость всестороннего изучения экологического состояния водоема и дальнейших систематических наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в воде и донных отложениях озера Селигер.

Ключевые слова

Тяжелые металлы, загрязнение водных экосистем, озеро Селигер, промышленные предприятия.

Levels and distribution patterns of heavy metals in water and bottom sediments of Lake Seliger, Tver and Novgorod Regions, Russia

Yulia I. Baeva and Natalia A. Chernykh

MGIMO University, Moscow, Russia

Principal contact

Yulia I. Baeva, PhD in Biology, Associate Professor, Department of Demographic and Migration Policy, MGIMO University; 76 Prospect Vernadskogo, Moscow, Russia 119454.

Tel. +79167888129

Email baeva_yulya@mail.ru

yu.baeva@inno.mgimo.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6137-2321>

How to cite this article

Baeva Yu.I., Chernykh N.A. Levels and distribution patterns of heavy metals in water and bottom sediments of Lake Seliger, Tver and Novgorod Regions, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(3):133–144. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-3-12

Received 10 February 2025

Revised 24 April 2025

Accepted 25 July 2025

Abstract

Aim. This study sets out to determine and compare the concentrations of several heavy metals (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd) in the water and bottom sediments of Lake Seliger, with a particular focus on the impact of technogenic load.

The present study was conducted with the aim of determining the levels of heavy metals (HM) in the water and bottom sediments of five reaches of Lake Seliger during the summer periods of 2023 and 2024. The levels of HM were determined in order to ascertain the effects of different anthropogenic loads on the environment. Atomic absorption spectrometry with electrothermal atomisation and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry were used to conduct the quantitative chemical analysis.

The results of the study indicate that spatial heterogeneity in the distribution of chemical elements in Seliger water is primarily attributable to the location of pollution sources and the complex configuration of the lake itself. Maximum concentrations of heavy metals in water and bottom sediments are observed in the Slobodskoy and Ostashkovskoy reaches, in proximity to industrial enterprises, while minimum concentrations are recorded in the Berezovskoy and Polnovskoy reaches. Elevated concentrations of elements are characteristic of the Selizharovskoy reach, which is, in fact, a transit reach, through which pollutants are transported to the Selizharovka River. The distribution of heavy metals in the bottom sediments of the lake practically mirrors the distribution of elements in water. Based on the analysis of the values of bottom accumulation coefficients obtained by the authors, a high level of chronic pollution of the lake by all studied metals was established.

The results obtained underline the necessity for a thorough investigation into the ecological condition of the reservoir, in conjunction with the implementation of additional systematic observations pertaining to the content of pollutants in the water and bottom sediments of Lake Seliger.

Key Words

Heavy metals, pollution of aquatic ecosystems, Lake Seliger, industrial enterprises.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее серьезных глобальных экологических проблем является загрязнение водных и наземных экосистем тяжелыми металлами (ТМ) [1–13]. Высокая токсичность, устойчивость в окружающей среде, способность к биоаккумуляции, канцерогенность, многочисленные источники поступления, сложные механизмы и пути распространения делает данную группу веществ типичным загрязнителем водных объектов [1–3; 14–17]. Тяжелые металлы попадают в реки и озера как из природных, так и из антропогенных источников с атмосферными осадками и поверхностным стоком. Они оседают и накапливаются в донных отложениях, что приводит к увеличению их концентрации в водных экосистемах по всему миру [15–25].

Селигер является самым крупным озером Тверской области, обеспечивающим большую часть стока Верхневолжской водной системы, которая, в свою очередь, служит основным источником водоснабжения Московского региона. Его площадь составляет 222 км² (площадь озера с островами – 250 км²), а запасы пресной воды достигают 1,3 млн. м³ [26]. Водные ресурсы оз. Селигер интенсивно используются для питьевого и промышленного водоснабжения, судоходства и в рыбохозяйственных целях. Территория озера представляет собой один из крупнейших объектов туризма, спорта, рыболовства и охоты Центральной России. В 1974 г. район оз. Селигер был включен в перечень курортов, имеющих республиканское значение⁷. В настоящее время, наряду с Верхневолжскими озерами, Селигер имеет статус курорта местного значения в Тверской области⁸.

Основные источники поступления загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов, в акваторию озера сосредоточены в центральной и юго-западной частях Слободского плеса. Главным образом, это предприятия г. Осташков: очистные сооружения канализации (МУП Осташковского городского округа «Жилищно-коммунальное хозяйство») и АО «Верхневолжский кожевенный завод».

Еще в 60-х гг. прошлого века был установлен достаточно высокий уровень эвтрофирования западной части Городского плеса (центральной части озера, включающей Осташковский и Слободской плесы), обусловленный сбросом неочищенных вод кожевенного завода и поступлением бытовых сточных вод г. Осташкова [27]. В 90-х гг. началось изучение загрязнения озера тяжелыми металлами. При анализе влияния промышленных сбросов на оз. Селигер было выделено три участка, отличающиеся по степени нагрузки: I – Городской и Селижаровский плесы,

II – Березовский, Елецкий и Троицкий плесы, III – Сосницкий, Кравотынский и Полновский плесы (рис. 1). При этом наибольшая техногенная нагрузка приходилась на Городской плес [28; 29].

В настоящее время Тверским центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды проводятся регулярные наблюдения за качеством воды в оз. Селигер по гидрохимическим показателям на гидрологическом посту в г. Осташков [30]. В пробах воды определяются 40 показателей состава и свойств воды, в том числе железо общее, медь, цинк, никель, хром общий, свинец и марганец. Для оценки уровня загрязненности воды используются такие комплексные показатели, как удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) и класс качества воды [31]. Результаты гидрохимической оценки качества вод оз. Селигер по данным официального мониторинга, отраженным в ежегодных докладах Министерства природных ресурсов и экологии Тверской области⁹, представлены на рис. 2.

Однако, несмотря на ежегодный мониторинг качества озерной воды, провести комплексную оценку загрязнения Селигера тяжелыми металлами невозможно в силу недостаточности проведенных исследований по содержанию и распределению элементов в других компонентах водной экосистемы. В настоящее время многочисленными исследованиями установлено, что донные отложения играют важную роль в поглощении тяжелых металлов, адсорбируя оседающие взвешенные частицы органических и неорганических веществ [15–17; 19; 23; 32]. При этом во многих странах мира определение концентрации тяжелых металлов в воде и донных отложениях является обязательным компонентом программ мониторинга качества воды и относится к числу приоритетных.

В связи с этим целью исследования является определение и сравнительный анализ концентраций ряда тяжелых металлов (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd) в воде и донных отложениях оз. Селигер в зависимости от уровня техногенной нагрузки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются вода и донные отложения пяти плесов оз. Селигер, испытывающих различную техногенную нагрузку: Полновского (минимальная нагрузка), Березовского (средняя нагрузка), Слободского, Осташковского и Селижаровского (максимальная нагрузка) (рис. 1).

Отбор проб воды проводили летом (в конце каждой декады июня и августа) в соответствии с [33–35]. Для отбора проб воды закладывали по 5–9 створов в каждом плесе. При отсутствии крупных источников сброса сточных вод пять створов располагали равномерно по акватории плеса; при

⁷ Постановление Совета Министров РСФСР от 13.02.1974 № 104 «О мерах по усилению охраны природы и улучшению использования природных богатств в бассейне озера Селигер Калининской области, а также развитию зоны отдыха и туризма в этом районе»

On measures to strengthen nature conservation and improve the use of natural resources in the Seliger Lake basin in the Kalinin Region, as well as to develop recreation and tourism in this area. Decree of the Council of Ministers of the RSFSR No.104 of February 13, 1974. (In Russian)

⁸ Постановление Администрации Тверской области от 11.09.2002 г. № 305-па «О признании территории озера Селигер и Верхневолжских озер курортом местного значения «Селигер» в Тверской области» On recognizing the territory of Lake Seliger and the Upper Volga Lakes as a resort of local significance "Seliger" in the Tver Region. Resolution of the Administration of the Tver Region No. 305-pa of September 11, 2002. (In Russian)

⁹ Доклады об экологической ситуации в Тверской области в 2011–2014 гг.; Государственные доклады «О состоянии и об охране окружающей среды в Тверской области в 2014–2023 гг.; Обзоры состояния окружающей среды в Тверской области по данным наблюдательной сети Росгидромета в 2018–2023 гг. Reports on the environmental situation in the Tver Region in 2011–2014; On the state and environmental protection in Tver Region in 2014–2023. State reports; Reviews of the state of the environment in the Tver Region based on data from the observation network of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring in 2018–2023. (In Russian)

сбросе городских и промышленных сточных вод три створа закладывали вне зоны влияния источника или группы источников загрязнения, два створа совмещали со створом сброса сточных вод, четыре створа располагали параллельно ему по обе стороны на расстоянии 0,3–0,5 км от места сброса и непосредственно за границей зоны загрязненности.

Количество горизонтов отбора водных проб определяли с учетом глубины водного объекта. При

глубине до 5 м устанавливали один горизонт – 0,3 м от поверхности воды; при глубине от 5 до 10 м – два горизонта: у поверхности (0,3 м) и на расстоянии 0,5 м от дна; при глубине более 10 м – три горизонта, с промежуточным горизонтом, расположенным на половине глубины водного объекта. Отбор проводили с помощью батометра. До передачи в лабораторию пробы хранили в полиэтиленовых бутылках после консервирования раствором азотной кислоты.

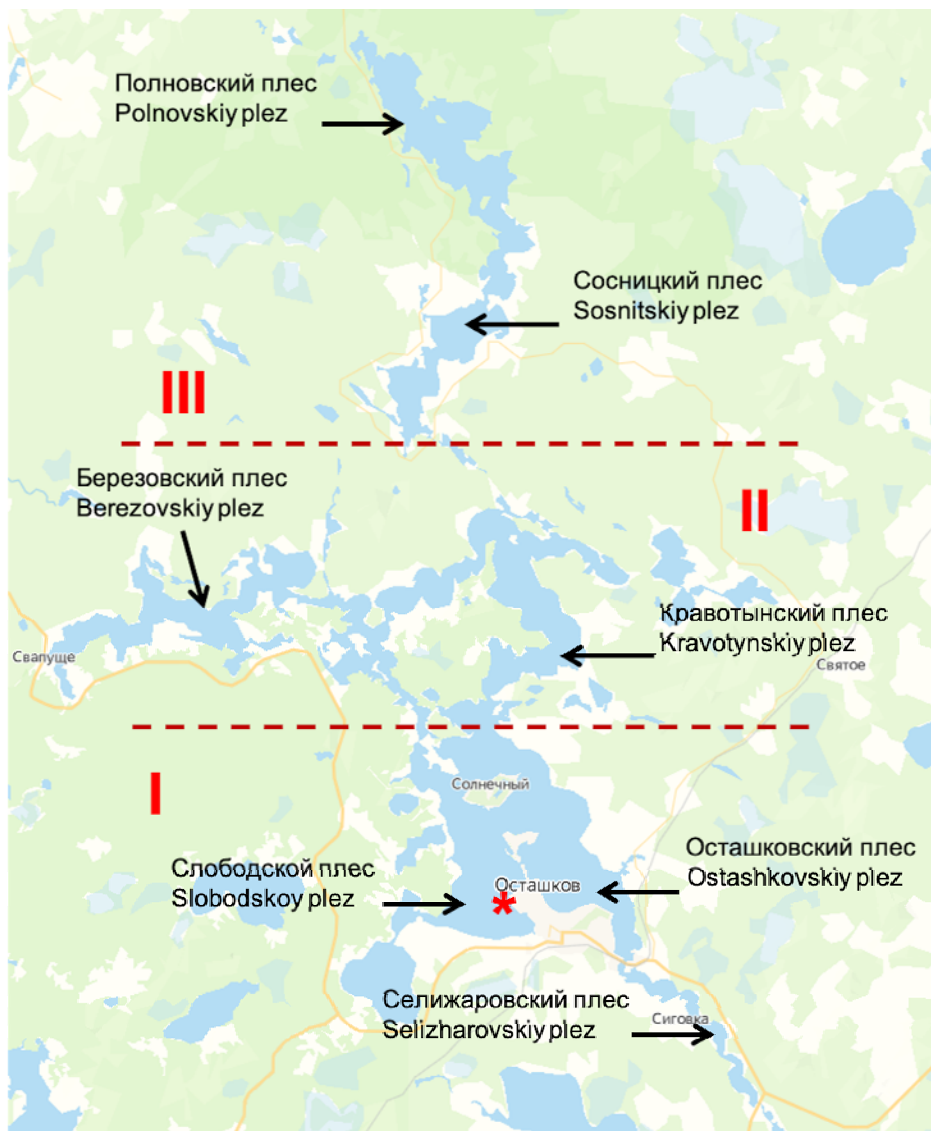


Рисунок 1. Участки оз. Селигер с различной антропогенной нагрузкой (I – максимальная нагрузка;

II – средняя степень воздействия; III – участок с минимальным воздействием;

* отмечены источники поступления ТМ). Схема составлена авторами на основе имеющихся в литературе данных [28; 29]

Figure 1. Lake Seliger sites with different anthropogenic loads (I – maximum load; II – average degree of impact; III – site with minimal impact; * marked source of TM input). The scheme was compiled by the authors on the basis of available data in the literature [28; 29]

Пробы донных отложений отбирали в тех же створах и в те же сроки, что и пробы воды, с помощью ковша для взятия образцов. Для анализа был взят слой донных отложений 0–5 см, представляющий собой интегральную пробу донных отложений, характеризующую накопление тяжелых металлов в донных отложениях за несколько десятилетий. После отбора проб образцы хранили в полиэтиленовых пакетах с

охлаждением ($< 4^{\circ}\text{C}$) и передавали в лабораторию для анализа.

Определение содержания растворенных форм соединений Cu, Zn, Cd и Pb в воде проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией в соответствии с [36]; Cr – методом атомной эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой в соответствии с [37].

Количественный химический анализ донных отложений (общее содержание металлов) проводили методом атомной эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в соответствии с Методикой измерения массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011, 2011).

Каждую пробу воды и донных отложений исследовали в трехкратной повторности. Полученные результаты отображали в виде среднего арифметического и стандартного отклонения ($M \pm m$). Данные обрабатывались с помощью программ Microsoft Excel 2010, SPSS и Statistica.

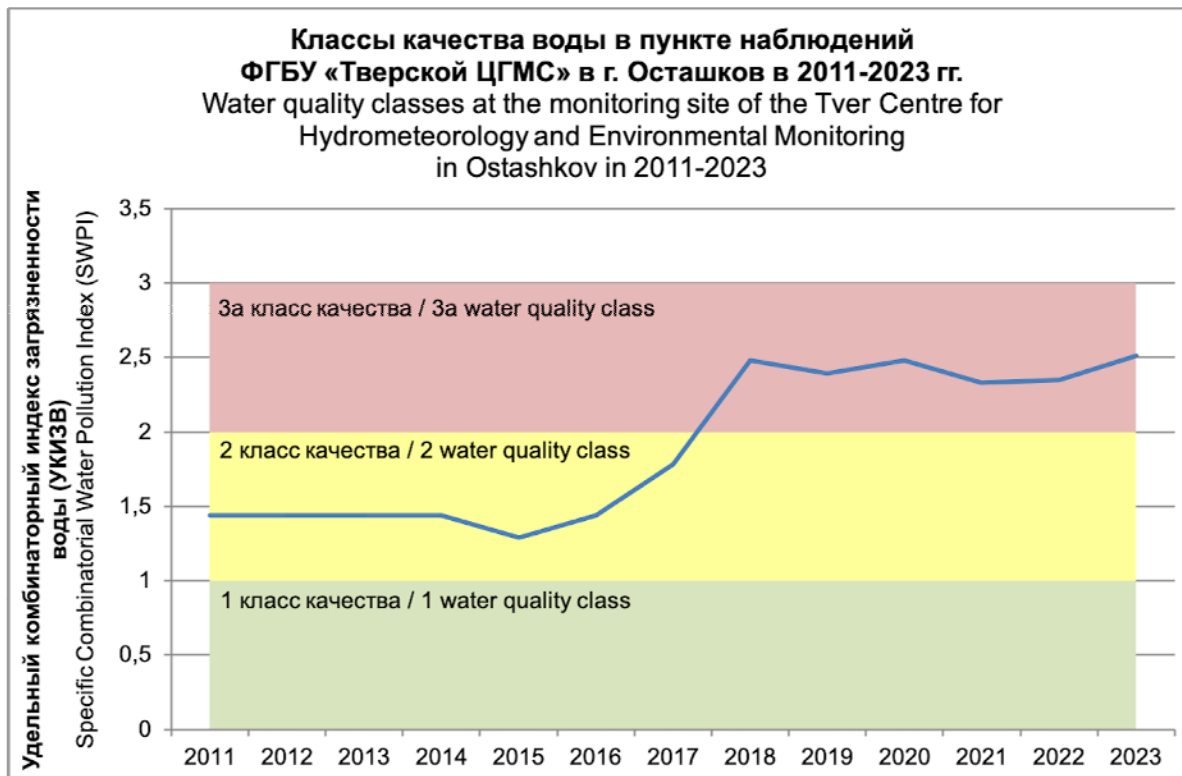


Рисунок 2. Качество воды озера Селигер в 2011–2023 гг. 1 класс – очень чистые воды, 2 класс – чистые воды, 3 класс – умеренно загрязненные воды. Диаграмма составлена авторами на основе данных официального мониторинга

Figure 2. Water quality of Lake Seliger in 2011–2023. Class 1 – very clean waters, Class 2 – clean waters, Class 3 – moderately polluted water. Diagram compiled by the authors based on official monitoring data

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основными природными процессами, в результате которых металлы попадают в воды, являются химическое выветривание горных пород и выщелачивание почвы, в значительной степени контролируемые биологическими и микробиологическими факторами. Антропогенные источники поступления химических элементов в водные объекты в значительной степени связаны с производственными и бытовыми сточными водами [1–8; 38]. Часто сброс неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод является основной причиной возникновения чрезвычайных экологических ситуаций. При этом современный уровень очистки сточных вод не всегда может обеспечить отсутствие экологических рисков химического загрязнения [14; 39].

В 2023 г. общий вклад тяжелых металлов (Mn, Zn, Cu, Ni, Fe, Hg, Mo) в загрязнение поверхностных вод на территории Российской Федерации составил 50 % от общего числа случаев высокого и экстремально высокого загрязнения. При этом 20 % всех случаев такого загрязнения пришлось на водные объекты бассейна реки Волга [40]. В частности, на всех водных объектах Тверской области, где проводился мониторинг качества воды в 2023 году, она

оценивалась как «загрязненная», «грязная» или «очень грязная» [31].

Уровни содержания тяжелых металлов в воде оз. Селигер

Результаты исследований содержания металлов в озерной воде, проведенных авторами в 2023 и 2024 годах, приведены в табл. 1.

Сравнение данных со значениями концентраций элементов, полученных ранее другими исследователями [29; 41; 42], позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время в общем виде повторяются отмеченные еще в конце 90-х гг. прошлого века следующие закономерности распределения загрязняющих веществ: максимальные концентрации ТМ приурочены к подверженным воздействию промышленных и бытовых сточных вод частям Слободского и Осташковского плесов; минимальные значения характерны для Березовского и Полновского плесов; повышенные концентрации металлов отмечены в Селижаровском плесе, по которому происходит значительный их перенос в р. Селижаровку. Так, в 2024 году содержание хрома в воде Слободского плеса превысило концентрацию данного элемента в воде Полновского плеса в 47 раз, меди – в 4 раза, цинка – в 4 раза, свинца – в 7,8 раза, кадмия – в 3,5 раза.

Таблица 1. Средние концентрации тяжелых металлов в воде различных плесов озера Селигер**Table 1.** Heavy metal concentrations in the water of different reaches of Lake Seliger

Плес Plez	Средняя концентрация, мг/л / Mean concentration, mg/l				
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd
2000 г.					
Косов и Косова, 2001 / Kosov and Kosova, 2001 [29]					
Слободской и Осташковский плесы Slobodskoy plez and Ostashkov plez	0,003	0,0042	0,007	0,0003	0,0001
2011 г.					
Цыганов, 2016 / Tsyganov, 2016 [41]					
Полновский плес Polnovskiy plez	-	0,0020	0,002	0,0002	0,0001
Слободской плес Slobodskoy plez	0,001	0,0056	0,021	0,0230	0,0017
Осташковский плес Ostashkov plez	0,001	0,0036	0,004	0,0230	0,0016
2006–2014 гг.					
Суслова и др., 2015 / Suslova et al., 2015 [42]					
Березовский плес Berezovsky plez	0,003	0,0013	0,001	н/д n/a	н/д n/a
Осташковский плес Ostashkov plez	0,003	0,0022	0,002	н/д n/a	н/д n/a
Селижаровский плес Selizharovskiy plez	0,005	0,0014	0,002	н/д n/a	н/д n/a
2023 г.					
данные авторов / authors' data					
Полновский плес Polnovskiy plez	0,0020 ± 0,0005	0,0015 ± 0,0003	0,0020 ± 0,0005	0,0004 ± 0,0001	0,0003 ± 0,0001
Березовский плес Berezovsky plez	0,0030 ± 0,0004	0,0009 ± 0,0002	0,0020 ± 0,0003	0,0006 ± 0,0001	0,0003 ± 0,0001
Слободской плес Slobodskoy plez	0,0510 ± 0,0042	0,0077 ± 0,0011	0,0090 ± 0,0015	0,0043 ± 0,0007	0,0019 ± 0,0004
Осташковский плес Ostashkov plez	0,0230 ± 0,0032	0,0053 ± 0,0012	0,0080 ± 0,0017	0,0036 ± 0,0005	0,0016 ± 0,0004
Селижаровский плес Selizharovskiy plez	0,0070 ± 0,0030	0,0034 ± 0,0008	0,0080 ± 0,0015	0,0007 ± 0,0002	0,0009 ± 0,0003
2024 г.					
данные авторов / authors' data					
Полновский плес Polnovskiy plez	0,0010 ± 0,0003	0,0017 ± 0,0002	0,0020 ± 0,0003	0,0005 ± 0,0001	0,0004 ± 0,0001
Березовский плес Berezovsky plez	0,0030 ± 0,0005	0,0008 ± 0,0002	0,0010 ± 0,0002	0,0005 ± 0,0001	0,0007 ± 0,0001
Слободской плес Slobodskoy plez	0,0470 ± 0,0040	0,0068 ± 0,0009	0,0080 ± 0,0009	0,0039 ± 0,0004	0,0014 ± 0,0005
Осташковский плес Ostashkov plez	0,0250 ± 0,0021	0,0055 ± 0,0008	0,0080 ± 0,0010	0,0029 ± 0,0003	0,0018 ± 0,0003
Селижаровский плес Selizharovskiy plez	0,0050 ± 0,0027	0,0027 ± 0,0006	0,0060 ± 0,0016	0,0005 ± 0,0002	0,0011 ± 0,0002
ПДК рыбхоз. MPC fishery	-	0,001	0,01	0,006	0,005

Примечание: жирным шрифтом в таблице выделены средние концентрации ТМ, превышающие предельно-допустимые значения для водных объектов рыбохозяйственного значения; н/д – нет данных

Note: mean HM concentrations exceeding the maximum permissible values for water bodies of fishery significance are marked in bold; n/a – no data available

Необходимо отметить, что средние концентрации цинка, свинца и кадмия в воде даже наиболее загрязненных плесов не превышают установленных нормативных значений (ПДК) для вод водных объектов рыбохозяйственного значения¹⁰ тогда как концентрация меди в воде

Слободского и Осташковского плесов достигает 6,8 и 5,5 ПДК соответственно. По среднему содержанию в воде озера ТМ составляют следующий убывающий ряд: Cr > Zn > Cu > Pb > Cd.

Уровни содержания тяжелых металлов в донных отложениях оз. Селигер

Активными накопителями металлов в водных объектах являются донные отложения, при этом содержание

¹⁰ Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. №552. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»
On the approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations

of harmful substances in waters of water bodies of fishery significance.
Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 of December 13, 2016. (In Russian)

загрязняющих веществ в них может превышать концентрацию в толще воды в несколько раз.

В то же время донные отложения – это потенциальный источник вторичного загрязнения водоемов, так как при определенных условиях возможен процесс десорбции элементов и их переход в растворенном состоянии в воду [15; 17; 19; 23; 32].

Сравнительная оценка полученных авторами данных со значениями, полученными в 2000 году [29], показывает, что в последние десятилетия на фоне снижения интенсивности промышленного производства в акватории оз. Селигер содержание тяжелых металлов в донных отложениях увеличилось (рис. 3–7).

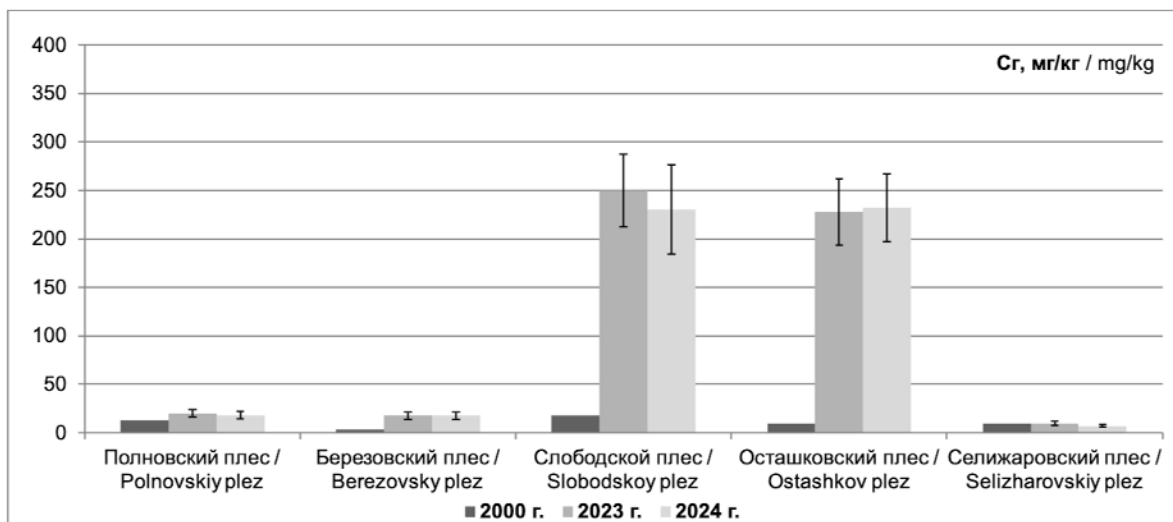


Рисунок 3. Сравнение средних содержаний хрома в донных отложениях различных плесов озера Селигер в 2000 [29], 2023 и 2024 гг. (данные авторов)

Figure 3. Comparison of the mean chromium content in bottom sediments of different reaches of Lake Seliger in 2000 [29], 2023 and 2024 (authors' data)

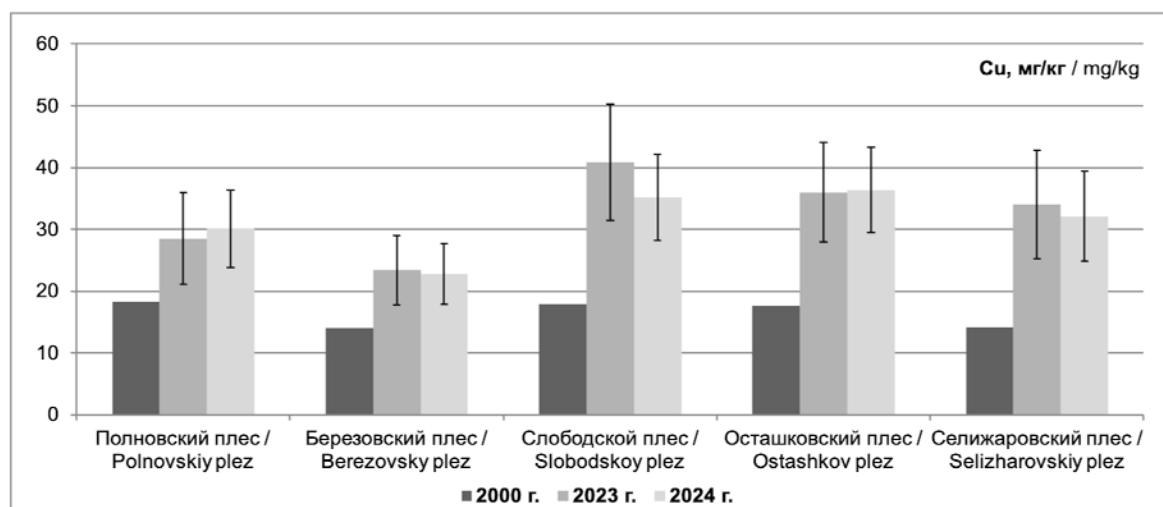


Рисунок 4. Сравнение средних содержаний меди в донных отложениях различных плесов озера Селигер в 2000 [29], 2023 и 2024 гг. (данные авторов)

Figure 4. Comparison of the mean copper content in bottom sediments of different reaches of Lake Seliger in 2000 [29], 2023 and 2024 (authors' data)

Территориальное распространение ТМ в донных отложениях озера в целом повторяет закономерности распределения элементов в воде. Максимальные концентрации загрязняющих веществ отмечены в Слободском и Осташковском плесе, что связано со сбросами сточных вод предприятий г. Осташкова. Минимальные значения характерны для Полновского и Березовского плесов.

Сравнительный анализ средних содержаний хрома в 2000, 2023 и 2024 гг. выявил высокие значения содержания элемента в донных отложениях Слободского и Осташковского плесов (Городского плеса) в 2023 и 2024 гг. Так, превышение в 2024 г. по

сравнению с 2000 г. составило 10,1–20,9 раза. Вблизи места сброса промышленных и бытовых сточных вод г. Осташкова содержание хрома достигает 2128–2140 мг/кг, что соответствует высокому уровню загрязнения. На высокие концентрации хрома в донных отложениях Городского плеса указывают и имеющиеся литературные данные. Так, в работе Б.И. Корженевского и др. [43] содержание хрома в донных отложениях южной части оз. Селигер (Городской плес) в районе кожевенного завода и промышленной площадки г. Осташкова в 2022 г. достигало 12013 и 12134 мг/кг соответственно.

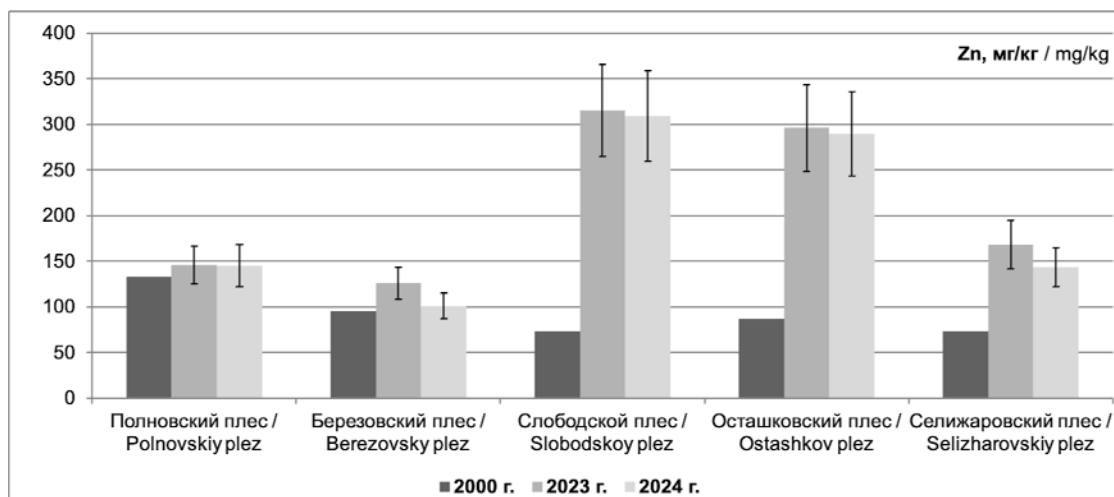


Рисунок 5. Сравнение средних содержаний цинка в донных отложениях различных плесов озера Селигер в 2000 [29], 2023 и 2024 гг. (данные авторов)

Figure 5. Comparison of the mean zinc content in bottom sediments of different reaches of Lake Seliger in 2000 [29], 2023 and 2024 (authors' data)

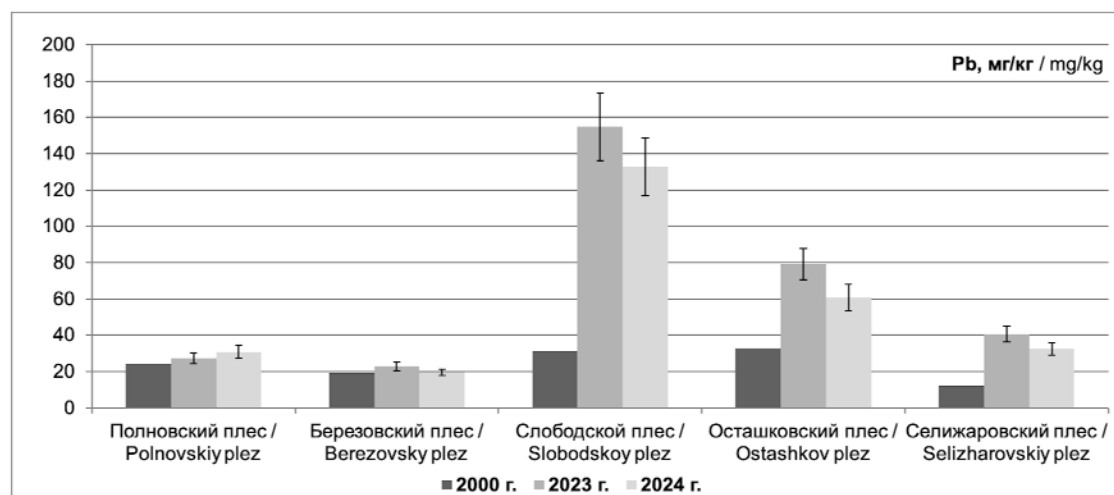


Рисунок 6. Сравнение средних содержаний свинца в донных отложениях различных плесов озера Селигер в 2000 [29], 2023 и 2024 гг. (данные авторов)

Figure 6. Comparison of the mean lead content in bottom sediments of different reaches of Lake Seliger in 2000 [29], 2023 and 2024 (authors' data)

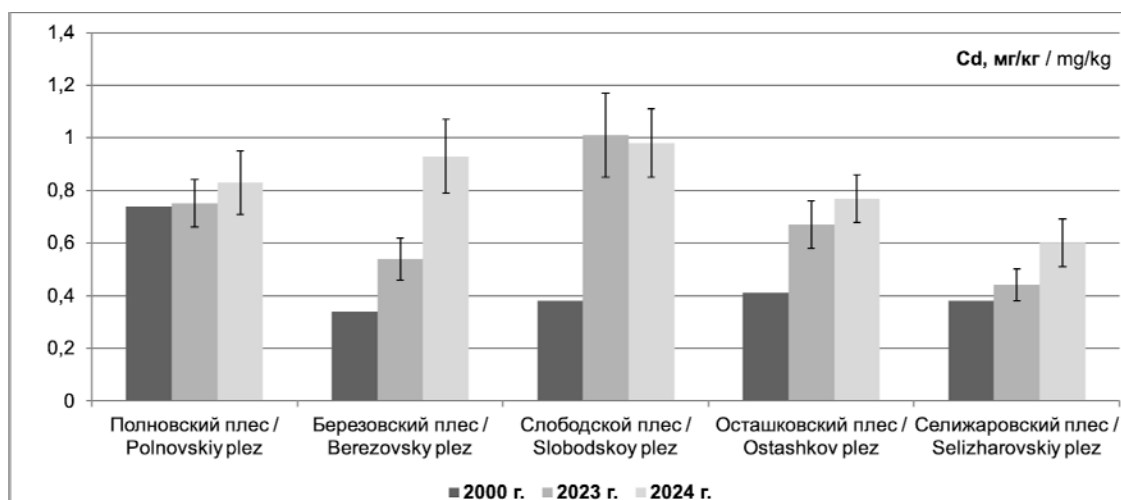


Рисунок 7. Сравнение средних содержаний кадмия в донных отложениях различных плесов озера Селигер в 2000 [29], 2023 и 2024 гг. (данные авторов)

Figure 7. Comparison of the mean cadmium content in bottom sediments of different reaches of Lake Seliger in 2000 [29], 2023 and 2024 (authors' data)

Таблица 2. Коэффициенты донной аккумуляции (КДА) химических элементов в экосистемах озера Селигер
Table 2. Bottom accumulation coefficients of chemical elements in Lake Seliger ecosystems

Плес Plez	Коэффициенты донной аккумуляции Bottom accumulation coefficients					Оценка загрязнения водного объекта Assessment of water body pollution
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	
2023 год						
Полновский плес Polnovskiy plez	1,0·10 ⁴	1,9·10 ⁴	7,3·10 ⁴	6,8·10 ⁴	2,5·10 ³	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Березовский плес Berezovsky plez	5,9·10 ³	2,6·10 ⁴	6,3·10 ⁴	3,8·10 ⁴	1,8·10 ³	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Слободской плес Slobodskoy plez	4,9·10 ³	5,3·10 ³	3,5·10 ⁴	3,6·10 ⁴	5,3·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Осташковский плес Slobodskoy plez	9,1·10 ³	6,8·10 ³	3,7·10 ⁴	2,2·10 ⁴	4,2·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Селижаровский плес Selizharovskiy plez	1,4·10 ³	1,0·10 ⁴	2,1·10 ⁴	5,8·10 ⁴	4,9·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
2024 год						
Полновский плес Polnovskiy plez	1,8·10 ⁴	1,8·10 ⁴	7,3·10 ⁴	6,2·10 ⁴	2,1·10 ³	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Березовский плес Berezovsky plez	6,0·10 ³	2,9·10 ⁴	1,0·10 ⁵	3,9·10 ⁴	1,3·10 ³	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Слободской плес Slobodskoy plez	4,9·10 ³	5,2·10 ³	3,9·10 ⁴	3,4·10 ⁴	7,0·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Осташковский плес Slobodskoy plez	9,3·10 ³	6,6·10 ³	3,6·10 ⁴	2,1·10 ⁴	4,3·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution
Селижаровский плес Selizharovskiy plez	1,4·10 ³	1,2·10 ⁴	2,4·10 ⁴	6,5·10 ⁴	5,5·10 ²	высокий уровень хронического загрязнения high level of chronic pollution

Примечание: жирным шрифтом выделены невысокие значения КДА, которые, согласно приказу от 24.02.2014 №112 Министерства природных ресурсов и экологии РФ, указывают на поступление в водный объект свежего загрязнения
Note: low values of bottom accumulation coefficients are highlighted in bold, which, according to the order from 24.02.2014 №112 of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, indicate the inflow of fresh pollution into the water body

По данным проведенных в 2023 и 2024 гг. исследований авторами были рассчитаны коэффициенты донной аккумуляции (КДА), которые представляют собой отношение концентрации загрязняющего вещества в донных отложениях к концентрации этого вещества в воде¹¹. Результаты расчетов в 2024 году представлены в таблице 2.

ВЫВОДЫ

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- Пространственная неоднородность в распределении тяжелых металлов в воде оз. Селигер

обусловлена, главным образом, близостью крупных источников загрязнения, таких как промышленные и бытовые сточные воды г. Осташкова. Максимальные концентрации тяжелых металлов (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd) в воде и донных отложениях характерны для Слободского и Осташковского плесов (Городского плеса); минимальные – для Березовского и Полновского плесов. Вода Селижаровского плеса, через который осуществляется вынос значительной части загрязняющих веществ в р. Селижаровку, по уровню содержания изучаемых металлов занимает промежуточное положение.

- Несмотря на существующую тенденцию накопления металлов в компонентах озерной экосистемы, среднее содержание цинка, свинца и кадмия в воде даже наиболее загрязненных плесов не превышает значения предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для вод водных объектов рыбохозяйственного значения. Содержание меди при этом в воде Слободского и Осташковского плесов в 2024 году достигает уровней 6,8 и 5,5 ПДК соответственно.

¹¹ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 24.02.2014 г. №112. «Об утверждении Методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов»
On the Approval of Methodological Guidelines for the Implementation of State Monitoring of Water Bodies in Terms of Organizing and Conducting Observations of the Content of Pollutants in Bottom Sediments of Water Bodies. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 112 of February 24, 2014. (In Russian)

- Территориальное распространение изучаемых тяжелых металлов в донных отложениях озера практически повторяет закономерности распределения элементов в воде.
- Сравнение средних содержаний хрома в 2000, 2023 и 2024 гг. выявило тенденцию накопления данного элемента в донных отложениях Слободского и Осташковского плесов в 2024 г. – превышение по сравнению с 2000 г. составляет 10,1–20,9 раза. При этом вблизи места сброса промышленных и бытовых сточных вод г. Осташкова содержание хрома достигает высоких значений – до 2128–2140 мг/кг.
- На основании расчета значений коэффициентов донной аккумуляции (КДА) и методических указаний по осуществлению государственного мониторинга водных объектов в части организации и проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов, установлен высокий уровень хронического загрязнения озера всеми изучаемыми металлами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Москва: Агроконсалт, 2000. 200 с.
2. Черных Н.А., Челтыгмашева И.С., Баева Ю.И. Загрязнение почв тяжелыми металлами и качество растениеводческой продукции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2003. N 9. С. 179–187.
3. Wang L.K., Chen J.P., Hung Y.-T. and Shammas N.K. Heavy Metals in the Environment. CRC Press, 2009, 516 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073195>
4. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, 2010, 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
5. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In: Luch A. (eds) Molecular, Clinical and Environmental Toxicology // Experientia Supplementum. 2012. V. 101. P. 133–164. Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
6. Kabata-Pendias A., Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 468 p. <https://doi.org/10.1201/b18198>
7. Koller M., Saleh H.M. Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals. Heavy Metals. In Tech. 2018. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74783>
8. Masindi V., Muedi K.L. Environmental Contamination by Heavy Metals. Heavy Metals. InTech. 2018. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76082>
9. Baeva Yu., Chernykh N., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Ovspeyan L. The content of heavy metals and arsenic in post-agrogenic soils of various climatic zones in Russia // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Sophia, 2019. P. 483–490. doi: 10.5593/sgem2019/3.2/S13.063
10. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // Heliyon. 2020. V. 6(9). Article ID: e04691. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
11. Вертинский А.П. Проблемы загрязнения окружающей природной среды Российской Федерации тяжелыми металлами // Инновации и инвестиции. 2020. N 1. С. 232–237.
12. Chernykh N., Baeva Yu., Thoma A. Change of elemental composition of plants under the action of heavy metal // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020. P. 123–130. doi: 10.5593/sgem2020/5.1/s20.016
13. Li Y., Ye Z., Yu Y., Li Y., Jiang J., Wang L., Wang G., Zhang H., Li N., Xie X., Cheng X., Liu K., Liu M. A combined method for human health risk area identification of heavy metals in urban environments // Journal of Hazardous Materials. 2023. V. 449. Article ID: 131067. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131067>
14. Chernykh N.A., Baeva Yu.I. and Thoma A. Influence of a Municipal Solid Waste Landfill on the Soil Levels of Heavy Metals at Adjacent Territories // Russian Journal of General Chemistry. 2021. V. 91. P. 2917–2923. <https://doi.org/10.1134/S107036322113020X>
15. Yu Z., Liu E., Lin Q., Zhang E., Yang F., Wei C., Shen J. Comprehensive assessment of heavy metal pollution and ecological risk in lake sediment by combining total concentration and chemical partitioning // Environmental Pollution. 2021. V. 269. Article ID: 116212. doi: 10.1016/j.envpol.2020.116212
16. Jiang M., Wang Q., Tian X., Zhu X., Dong X., Wu Z., Yuan Y. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. V. 10. Article ID: 1005194. doi: 10.3389/fevo.2022.1005194
17. Miranda L.S., Ayoko G.A., Egodawatta P., Goonetilleke A. Adsorption-desorption behavior of heavy metals in aquatic environments: Influence of sediment, water and metal ionic properties // Journal of Hazardous Materials. 2022. V. 421. Article ID: 126743. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126743>
18. Zachmann D., Van der Veen A., Friese K. Floodplain lakes as an archive for the metal pollution in the River Elbe (Germany) during the 20th century // Applied Geochemistry. 2013. V. 35. P. 14–27.
19. Буфетова М.В. Анализ изменения коэффициента донной аккумуляции тяжелых металлов от их концентрации в воде Азовского моря // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6 (72). N 2. С. 191–204.
20. Санин А.Ю., Строков А.А., Терский П.Н. Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. 65(1). С.146–171. doi: 10.21638/spbu07.2020.108
21. Zhou Q., Yang N., Li Y., Ren B., Ding X., Bian H., Yao X. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017 // Global Ecology and Conservation. 2020. V. 22. Article ID: e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>
22. Атабиева Ф.А., Отарова А.С. Содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (бассейн реки Терек) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. N 3. С. 89–101. doi: 10.35567/19994508_2023_3_6
23. Tereshchenko N.N., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Proskurnin, V.Y., Hiep N.T. Heavy Metals and Metalloids in Water and Bottom Sediments in the Rivers in the Can Gio Biospheric Reserve, Vietnam // Water Resources. 2023. V. 50. P. 330–343. <https://doi.org/10.1134/S009780782302015X>
24. Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Дружинина А.С., Зыков С.Б. Сезонная динамика содержания тяжелых металлов и оценка загрязнения воды в реке Северная Двина (Архангельск) // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. N 2. С. 223–233. doi: 10.25283/2223-4594-2023-2-223-233
25. Тихомиров О.А. Анализ влияния г. Твери на химический состав реки Волги // Вестник Тверского государственного университета. Серия «География и геоэкология». 2024. N1 (45). С. 5–12. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2024-1-5-12>
26. О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году. Государственный доклад. М.: НИИ-Природа, 2018. 298 с.
27. Россолимо Л.Л., Покровская Т.В. Черты эвтрофирования озера Селигер // Типология озер. М.: Наука, 1967. С. 27–52.
28. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Золотарева Н.С. Современное экологическое состояние озера Селигер // Водные ресурсы. 1997. Т. 24 (3). С. 344–351.
29. Косов В.И., Косова И.В. Экология озера Селигер. Тверь: Изд. дом «Булат», 2001. 344 с.
30. Официальный сайт Тверского центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. URL: <http://www.tvermeteo.ru/> (дата обращения: 27.01.2025)
31. О состоянии и об охране окружающей среды в Тверской области в 2023 году. Государственный доклад. Тверь, 2024. 135 с.
32. Chernykh N.A., Baeva Yu.I. and Ngo The Cuong. Seasonal Dynamics of Heavy Metal and Arsenic Content of Water and Sediments of the Srepok River (Vietnam) // Russian Journal of General Chemistry.

2020. V. 90 (13). P. 2598–2605.
<https://doi.org/10.1134/S1070363220130113>
33. ГОСТ 17.1.3.07-82. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.
34. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.
35. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб.
36. ГОСТ 31870-2012. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии.
37. ГОСТ 31956-2012. Вода. Методы определения содержания хрома (VI) и общего хрома.
38. Янтурин С.И., Хисаметдинова А.Ю., Бускунова Г.Г. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах малых рек западного склона хребта Ирандек // Самарский научный вестник. 2021. Т. 10. N 2. С. 131–135. doi: 10.17816/snv2021102120
39. Тихомирова В.В., Смирнова П.С. Загрязнение поверхностных и сточных вод Российской Федерации тяжелыми металлами // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. N10 (124). С. 1–5.
40. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с.
41. Цыганов А.А. Гидрохимическое состояние озера Селигер // Вестник Тверского государственного университета. Серия «География и геоэкология». 2016. N 2. С. 161–175.
42. Суслова С.Б., Шилькрот Г.С., Кудерина Т.М. Гидрогеохимическая характеристика вод Селигера и Верхневолжских озер (по многолетним данным) // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах: Материалы VI Международной научной конференции, Белгород, 2015. С. 324–328.
43. Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В., Толкачев Г.Ю., Ильина Т.А. Геоэкологические характеристики современных донных отложений озера Селигер вблизи города Осташкова // Экологические системы и приборы. 2022. N 1. С. 15–23. <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1278>
- REFERENCES**
- Chernykh N.A., Ovcharenko M.M. *Tyazhelye metally i radionuklidy v biogeocenoze* [Heavy metals and radionuclides in biogeocenoses]. Moscow, Agrokonsalt Publ., 2000, 200 p. (In Russian)
 - Chernykh N.A., Cheltygmasheva I.S., Baeva Yu.I. Soil pollution by heavy metals and quality of crop production. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety]. 2003, no. 9, pp. 179–187. (In Russian)
 - Wang L.K., Chen J.P., Hung Y.-T., Shammass N.K. *Heavy Metals in the Environment*. CRC Press, 2009, 516 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073195>
 - Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, 2010, 548 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
 - Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In: Luch A. (eds.) *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. Experientia Supplementum*, 2012, vol. 101, pp. 133–164. Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
 - Kabata-Pendias A., Szteke B. *Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments*. CrC Press, Taylor & Francis Group, 2015, 468 p. <https://doi.org/10.1201/b18198>
 - Koller M., Saleh H.M. Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals. *Heavy Metals*. In Tech. 2018. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74783>
 - Masindi V., Muedi K.L. Environmental Contamination by Heavy Metals. *Heavy Metals*. In Tech. 2018. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76082>
 - Baeva Yu., Chernykh N., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Ovsepyan L. The content of heavy metals and arsenic in post-agrogenic soils of various climatic zones in Russia. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings. Sophia, 2019, pp. 483–490. doi:10.5593/sgem2019/3.2/S13.063
 - Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 2020, no. 6(9), article id: e04691. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
 - Vertinsky A.P. Problems of environmental pollution of the Russian Federation by heavy metals. *Innovacii i investicii* [Innovations and Investments]. 2020, no. 1, pp. 232–237. (In Russian)
 - Chernykh N., Baeva Yu., Thoma A. Change of elemental composition of plants under the action of heavy metal. 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020, pp. 123–130. doi:10.5593/sgem2020/5.1/s20.016
 - Li Y., Ye Z., Yu Y., Li Y., Jiang J., Wang L., Wang G., Zhang H., Li N., Xie X., Cheng X., Liu K. and Liu M. A combined method for human health risk area identification of heavy metals in urban environments. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 449, article id: 131067. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131067>
 - Chernykh N.A., Baeva Yu.I., Thoma A. Influence of a Municipal Solid Waste Landfill on the Soil Levels of Heavy Metals at Adjacent Territories. *Russian Journal of General Chemistry*, 2021, vol. 91, pp 2917–2923. <https://doi.org/10.1134/S107036322113020X>
 - Yu Z., Liu E., Lin Q., Zhang E., Yang F., Wei C., Shen J. Comprehensive assessment of heavy metal pollution and ecological risk in lake sediment by combining total concentration and chemical partitioning. *Environmental Pollution*, 2021, no. 269, article id: 116212. doi: 10.1016/j.envpol.2020.116212
 - Jiang M., Wang Q., Tian X., Zhu X., Dong X., Wu Z. and Yuan Y. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of sediment heavy metals in two hydrologically connected lakes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, vol. 10, article id: 1005194. doi: 10.3389/fevo.2022.1005194
 - Miranda L.S., Ayoko G.A., Egodawatta P., Goonetilleke A. Adsorption-desorption behavior of heavy metals in aquatic environments: Influence of sediment, water and metal ionic properties. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 421, article id: 126743. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126743>
 - Zachmann D., Van der Veen A., Frieze K. Floodplain lakes as an archive for the metal pollution in the River Elbe (Germany) during the 20th century. *Applied Geochemistry*, 2013, vol. 35, pp. 14–27.
 - Bufetova M.V. Analysis of changes in the coefficient of bottom accumulation of heavy metals from their concentration in the water of the Azov Sea. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya* [Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology]. 2020, vol. 6 (72), no. 2, pp. 191–204. (In Russian)
 - Sanin A.Y., Strokov A.A., Terskii P.N. Assessment of natural processes impact on content of heavy metals in water of Lake Onego. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2020, vol. 65(1), pp. 146–171. (In Russian) doi: 10.21638/spbu07.2020.108
 - Zhou Q., Yang N., Li Y., Ren B., Ding X., Bian H., Yao X. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 2020, vol. 22, article id: e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>
 - Atabieva F.A., Otarov A.S. Heavy metals content in the water of the rivers of the Central Caucasus (the Terek River basin). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2023, no. 3, pp. 89–101. (In Russian) doi: 10.35567/19994508_2023_3_6
 - Tereshchenko N.N., Chuzhikova-Proskurnina O.D., Proskurnin, V.Y., Hiep N.T. Heavy Metals and Metalloids in Water and Bottom Sediments in the Rivers in the Can Gio Biospheric Reserve, Vietnam. *Water Resources*, 2023, vol. 50, pp. 330–343. <https://doi.org/10.1134/S009780782302015X>
 - Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V., Druzhinina A.S., Zykov S.B., Ivanchenko N.L. Seasonal dynamics of heavy metals content and assessment of water pollution in the Northern Dvina River (Arkhangelsk). *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 223–233. (In Russian) doi: 10.25283/2223-4594-2023-2-223-233
 - Tikhomirov O.A. Analysis of the influence of the city of Tver on the chemical composition of the Volga River. *Bulletin of Tver State University. Series Geography and Geoecology*, 2024, no. 1 (45), pp. 5–12. (In Russian) <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2024-1-5-12>
 - O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossijskoj Federacii v 2017 godu. *Gosudarstvennyj doklad* [On the state and use of water

- resources of the Russian Federation in 2017. State report]. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2018, 298 p. (In Russian)
27. Rossolimo L.L., Pokrovskaya T.V. Features of eutrophication of Lake Seliger. In: *Tipologiya ozer* [Typology of lakes]. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 27–52. (In Russian)
28. Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Zolotareva N.S. Modern ecological state of Lake Seliger. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 1997, vol. 24 (3), pp. 344–351. (In Russian)
29. Kosov V.I., Kosova I.V. *Ekologiya ozera Seliger* [Ecology of Lake Seliger]. Tver, 2001, 344 p. (In Russian)
30. *Ofitsial'nyi sait Tverskogo tsentra gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchei sredy* [Official website of the Tver Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. Available at: <http://www.tvermeteo.ru/> (accessed 27.01.2025)
31. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy v Tverskoi oblasti v 2023 godu. Gosudarstvennyi doklad* [On the state and environmental protection in Tver Oblast in 2023. State report]. Tver, 2024, 135 p. (In Russian)
32. Chernykh N.A., Baeva Yu.I., Ngo The Cuong. Seasonal Dynamics of Heavy Metal and Arsenic Content of Water and Sediments of the Srepok River (Vietnam). *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, vol. 90 (13), pp. 2598–2605. <https://doi.org/10.1134/S1070363220130113>
33. GOST 17.1.3.07-82. *Mezhgosudarstvennyi standart. Okhrana prirody. Gidrosfera. Pravila kontrolya kachestva vody vodoemov i vodotokov* [GOST 17.1.3.07-82. Interstate standard. Nature protection. Hydrosphere. Rules for water quality control of water bodies and watercourses]. (In Russian)
34. GOST 17.1.5.01-80. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob"ektov dlya analiza na zagryaznennost'* [GOST 17.1.5.01-80 Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water bodies for pollution analysis]. (In Russian)
35. GOST R 59024-2020. *Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [GOST R 59024-2020. Water. General requirements for sampling]. (In Russian)
36. GOST 31870-2012. *Voda pit'evaya. Opredelenie soderzhaniya elementov metodami atomnoi spektrometrii* [GOST 31870-2012. Drinking water. Determination of elements content by atomic spectrometry methods]. (In Russian)
37. GOST 31956-2012. *Voda. Metody opredeleniya soderzhaniya khroma (VI) i obshchego khroma* [GOST 31956-2012. Water. Methods for determination of chromium (VI) and total chromium content]. (In Russian)
38. Yanturin S.I., Khisametdinova A.Yu., Buskunova G.G. Heavy metals content in surface waters of small rivers of the western slope of the Iradek Ridge. *Samara Journal of Science*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 131–135. (In Russian) doi: 10.17816/snv202121102120
39. Tikhomirova V.V., Smirnova P.S. Pollution of surface and wastewater of the Russian Federation with heavy metals. *International Research Journal*, 2022, no. 10(124), pp. 1–5. (In Russian) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.55>
40. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2023 godu. Proekt Gosudarstvennogo doklada* [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2023. Draft State Report]. Moscow, 2024, 707 p. (In Russian)
41. Tsyganov A.A. Hydrochemical condition of Lake Seliger. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Geografiya i geoekologiya»* [Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology]. 2016, no. 2, pp. 161–175. (In Russian)
42. Suslova S.B., Shilkrot G.S., Kuderina T.M. Gidrogeohimicheskaya harakteristika vod Seligera i Verhnevolzhskikh ozer (po mnogoletnim dannym) [Hydrogeochemical characterisation of waters of Seliger and Upper Volga lakes (based on long-term data)]. *Problemy prirodopol'zovaniya i ekologicheskaya situatsiya v Evropejskoj Rossii i sopredel'nyh stranah: Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Problems of nature management and environmental situation in European Russia and adjacent countries: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Belgorod, 2015, pp. 324–328. (In Russian)
43. Korzhenevskiy B.I., Kolomiitsev N.V., Tolkachev G.Yu., Ilyina T.A. Geoecological characteristics of modern bottom sediments of Lake Seliger near the town of Ostashkov. *Ecological systems and devices*, 2022, no. 1, pp. 15–23. (In Russian) <https://doi.org/10.25791/esip.1.2022.1278>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Юлия И. Баева собрала и обработала полевые данные, проанализировала результаты, написала рукопись статьи. Наталья А. Черных подготовила обзор литературы по проблеме исследования, провела вычисления, доработала текст, представила данные, подготовила текст статьи. Оба автора в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yulia I. Baeva collected material and processed field data, undertook analysis of results and writing the article. Natalia A. Chernykh review the literature on the research topic, performed computations, revised the text, presented the data, prepared the text of the article. Both authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Юлия И. Баева / Yulia I. Baeva <https://orcid.org/0000-0002-6137-2321>

Наталья А. Черных / Natalia A. Chernykh <https://orcid.org/0000-0003-1380-2291>