



УДК 504.5:546.49

Среда обитания водных биологических ресурсов

Результаты многолетнего мониторинга загрязнения ртутью компонентов экосистемы Нижнего Дона

Ю.В. Косенко, Л.Г. Горгола, И.В. Кораблина, Т.Е. Баскакова

Азово-Черноморский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), ул. Береговая, 21В, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия

E-mail: kosenkov@azniirkh.vniro.ru

SPIN-код: Ю.В. Косенко – 4638-7175; Л.Г. Горгола – 7816-5379; И.В. Кораблина – 5040-4170

Целью работы является изучение загрязнения ртутью компонентов водных экосистем Нижнего Дона, поскольку ртуть относится к широко распространённому в водоёмах загрязняющему веществу с высокой токсичностью для живых организмов и способностью к биоаккумуляции. **Материалы и методы:** представлены результаты исследований содержания ртути в воде, донных отложениях и гидробионтах нижнего течения р. Дон, собранные на 10-25 станциях за период 1995-2024 гг. в весенний, летний и осенний сезоны. Определение ртути проводилось методом атомной абсорбции в «холодном паре». **Результат:** в 1995-2005 гг. концентрация ртути в воде Нижнего Дона в среднем была высокой, затем в течение 15-ти лет её содержание находилось на низком уровне, а с 2020 г. по 2024 г. вновь стали фиксироваться случаи повышенных концентраций ртути, с максимумами в районе ст. Романовская (до 62 ПДК_{р/х}) и г. Семикаракорск (до 140 ПДК_{р/х}). В 2022 г. в весенне-летний период года в районе ст. Романовская выявлена повышенная концентрация ртути не только в воде, но и донных отложениях. В современный период отмечено более высокое содержание ртути в мышцах хищных видов рыб без превышения допустимого уровня. **Новизна:** впервые обобщены и проанализированы данные по содержанию ртути в воде и донных отложениях Нижнего Дона за 30 лет наблюдений и водных биоресурсах в современный период (2020-2024 гг.). **Практическая значимость:** полученные результаты использованы для установления критериев безопасности вод Нижнего Дона и промысловых рыб в соответствии с принятым в России нормативом предельно-допустимой концентрации ртути для рыбохозяйственных водоёмов и требованием Технического регламента Таможенного союза.

Ключевые слова: река Дон, вода, донные отложения, водные биологические ресурсы, антропогенное загрязнение.

Results of long-term monitoring of mercury contamination of components of the Lower Don ecosystem

Julia V. Kosenko, Lily G. Gorgola, Irina V. Korablina, Tatyana E. Baskakova

Azov-Black Sea Branch of VNIRO («AzNIIRKH»), 21b Beregovaya st., Rostov-on-Don, 344002, Russia

The aim of the work is to study mercury pollution of components of aquatic ecosystems of the Lower Don, since mercury is a widespread pollutant in water bodies with high toxicity for living organisms and the ability to bioaccumulate. **Materials and methods.** The results of studies of mercury content in water, bottom sediments and aquatic organisms in the lower reaches of the Don River, collected at 10-25 stations during the period 1995-2024 in the spring, summer and autumn seasons, are presented. Mercury was determined using the cold vapor atomic absorption method. **Results:** in 1995-2005, the mercury concentration in the water of the Lower Don was high on average, then for 15 years its content was at a low level, and from 2020 to 2024, cases of high mercury concentrations began to be recorded again, with maximums in the area of the Romanovskaya station (up to 62 MPC) and the city of Semikarakorsk (up to 140 MPC). In 2022, in the spring-summer period of the year in the area of st. Romanovskaya, mercury accumulation was detected not only in the water, but also in bottom sediments. In the modern period, a higher mercury content has been noted in the muscles of predatory fish species without exceeding the permissible level. **The novelty:** for the first time, data on mercury content in water and bottom sediments of the Lower Don over 30 years of observations and aquatic bioresources in the modern period (2020-2024) were summarized and analyzed. **Practical significance:** the obtained results were used to establish safety criteria for the waters of the Lower Don and commercial fish in accordance with the standard of maximum permissible mercury concentration for fishery waters adopted in Russia and the requirements of the Technical Regulations of the Customs Union.

Keywords: Don River, water, bottom sediments, aquatic biological resources, anthropogenic pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть относится к широко распространённому в естественных водоёмах загрязняющему веществу в связи с высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях и способностью к биоаккумуляции [Решетняк, 2022]. Уже в классических трудах Ю.А. Израэля и А.В. Цыбань [1993] в перечне химических веществ, подлежащих определению в природных средах, названа ртуть. Всемирная организация здравоохранения рассматривает ртуть в качестве одного из десяти основных химических веществ или групп химических веществ, представляющих значительную экологическую проблему.

Ртуть – относительно редкий элемент земной коры. Наиболее богатые руды содержат всего до 2,5 % ртути. В природных водоёмах фоновое содержание ртути в воде колеблется в широком диапазоне от 0,001 до 0,05 мкг/дм³, в донных осадках – от 0,01 до 0,25 мг/кг сухой массы, в гидробионтах – от 0,01 до 1 мг/кг сырой массы [Перевозников, Богданова, 1999].

Наиболее распространённой формой ртути в пресных водоёмах является метилртуть. Метилирование ртути происходит на поверхностях тела рыб и в верхнем слое донных отложений. Данная форма ртути чаще всего накапливается в организме рыб и моллюсков, а также птиц и млекопитающих, которые ими питаются [Горбунов и др., 2018]. Гидробионты способны накапливать органические соединения ртути в концентрациях, значительно превышающих её содержание в воде и низшем звене трофической цепи. Места преимущественного накопления ртути – мышцы и печень (до 25 % от общего количества) [Немова и др., 2014]. Согласно некоторым данным, с увеличением возраста рыб её концентрация во всех органах возрастает [Короткова и др., 2019].

Объектом нашего исследования явилась акватория р. Дон, для которой характерно как природное загрязнение ртутью, так и антропогенное. К природным источникам поступления ртути в р. Дон относятся вымывание рекой и её притоками каменноугольных терригенных комплексов Донбасса и черной сарматской глины в водосборных бассейнах. К антропогенным факторам загрязнения ртутью можно отнести сбросы в р. Дон неочищенных и недостаточно очищенных сточных вод в районе крупных городов [Косенко и др., 2024]. На территории Ростовской области в водные объекты бассейна Нижнего Дона сбрасывается ежегодно около 3,5 км³ сточных вод

(примерно третья часть естественного водного стока). На качество воды р. Дон в значимой степени влияет смыв с сельскохозяйственных угодий пестицидов, содержащих ртуть (фунгициды и бактерициды) [Волгина и др., 2009], а также сток ливневых, шахтных, дренажных вод, сжигание ртутьсодержащих углей в ГРЭС и частных домовладениях. Немаловажный источник загрязнения ртутью – судоходство, которое с каждым годом становится интенсивнее. Возросшая нагрузка чревата коренной перестройкой ложа русла (вынос донных отложений из зоны фарватера с последующим отложением в относительно спокойных и удалённых от судоходных трасс местах – на мелководьях, в ериках, где находятся основные нерестилища) [Павленко и др., 2022]. Ещё одним важным фактором является рециклинг металла, при котором почвенный покров выступает в качестве промежуточного коллектора [Михайленко, 2020].

Загрязнение р. Дон ртутью имеет множество негативных факторов, таких как: ухудшение качества питьевой воды и рекреационной деятельности, дальнейшее ртутное загрязнение Азовского моря, а также ухудшение качества рыбной продукции и риск попадания ртути в организм человека.

Следует отметить, что данная проблема характерна для ряда регионов России. В частности, наблюдается широкая вариабельность результатов содержания ртути в воде и донных отложениях р. Иртыш [Эйрих, 2024]. В Волго-Каспийском бассейне при сравнительно невысоком уровне ртутного загрязнения обнаружено усиление загрязнения ртутью в период половодья в средней и нижней зоне дельты Волги, а также летом в мелководной части Северного Каспия [Львова, Карыгина, 2020]. Современные исследования р. Миус выявили локальное увеличение содержания ртути в воде с кратностью до 4,0 ПДК_{р/х} [Кулик и др., 2025].

В связи с вышесказанным, целью нашего исследования явилось изучение загрязнения ртутью экосистемы Нижнего Дона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на обобщении материалов, собранных в ходе экспедиционных работ в нижнем течении р. Дон на участке от ст. Романовская до места впадения в Азовское море (отметка «нулевой км») за период 1995-2024 гг. Пробы воды отбирались дважды или трижды в год (весной, летом, осенью) на 10-25 станциях (табл. 1).

Проба воды на определение ртути отбиралась суммарно со всего столба воды (сливная проба), донных отложений – с верхнего 0-2 см слоя. Всего было

Таблица 1. Станции отбора проб воды и донных отложений в р. Дон
Table 1. Stations for sampling water and bottom sediments in the river Don

Станция отбора проб	Координаты точек отбора	
	северная широта	восточная долгота
Район ст. Романовская	47°32'16"	42°01'55"
Верхний бьеф Николаевского гидроузла	47°36'10"	41°29'16"
Нижний бьеф Николаевского гидроузла	47°36'13"	41°29'06"
Район х. Ведерников, выше Константиновского гидроузла	47°35'03"	41°09'28"
Район г. Константиновск, ниже Константиновского гидроузла	47°34'33"	41°04'49"
Устье р. Северский Донец	47°36'04"	40°53'48"
Выше Кочетовского гидроузла	47°34'16"	40°50'38"
Ниже Кочетовского гидроузла	47°34'19"	40°50'14"
Район г. Семикаракорск	47°31'20"	40°47'54"
Устье р. Сал	47°29'28"	40°45'51"
Район ст. Мелиховская	47°28'00"	40°28'12"
Район ст. Багаевская	47°19'39"	40°21'28"
Устье р. Маныч	47°15'19"	40°14'54"
Район ст. Манычская	47°16'18"	40°16'12"
Район ст. Старочеркасская	47°14'30"	39°59'48"
Устье пр. Аксай	47°15'15"	39°52'17"
Устье р. Темерник	47°18'02"	39°44'17"
г. Ростова-на-Дону, ниже Западного (Гниловского) моста	47°11'03"	39°38'06"
Ниже сброса городской канализации (ГК) г. Ростова-на-Дону	47°09'25"	39°32'52"
Район Кумжинской рощи	47°10'35"	39°35'26"
Напротив х. Шмат	47°08'41"	39°30'20"
Рукав Мокрая Каланча	47°09'55"	39°20'03"
«Нулевой километр» р. Дон	47°05'11"	39°14'19"

собрано и обработано около 2000 проб воды и донных отложений и около 200 проб водных биоресурсов.

Отбор проб воды выполнен в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020¹. Оценка содержания ртути в пробах воды проводилась в соответствии с Приказом Минсельхоза России от 13 декабря 2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»² (с изменениями на 13.06.2024). Отбор проб донных отложений выполнен в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80³ дночерпателем Петерсена. Сравнительный анализ проводился относительно среднемноголетних значений для данного грануло-

метрического типа отложений р. Дон. Отбор проб водных биологических ресурсов на анализ загрязнённости ртутью выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ 31339-2006⁴. Для отбора проб использовались обычные орудия лова (ставные сети, мальковые волокуши), изготовленные из химически нейтральных материалов. Вылов рыбы проводился уполномоченным специалистом, имеющим соответствующее разрешение. Безопасность накопления ртути в тканях промысловых видов рыб оценивалась в соответствии с ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции»⁵ (с изменениями на 22.04.2024).

После отбора законсервированные пробы воды хранились в холодильнике не более 2-х недель, при комнатной температуре – в тёмном месте не более 5

¹ <https://docs.cntd.ru/document/1200175475>

² <https://docs.cntd.ru/document/1306888709>

³ <https://docs.cntd.ru/document/1200012787>

⁴ <https://docs.cntd.ru/document/1200049977>

⁵ <https://docs.cntd.ru/document/902320560>

дней при условии сохранения жёлтой окраски консерванта. Пробы донных отложений хранились в холодильнике до 2-х месяцев, водных биологических ресурсов – анализировались не позднее 24 час. после отбора или хранились в морозильной камере не более 4-х месяцев.

Определение общей растворенной ртути в воде и общей ртути в донных отложениях и гидробионтах проводилось в соответствии с требованиями руководящих документов, принятых и утверждённых для мониторинговых природоохранных исследований на федеральном уровне: в воде – согласно РД 52.24.479-95⁶, РД 52.24.479-2008⁷; в донных отложениях – согласно РД 15.226-91⁸; в тканях гидробионтов – согласно ФР.1.31.2015.21649⁹. Во всех случаях определение ртути проводилось методом атомной абсорбции в «холодном паре». Метод основан на кислотной минерализации пробы с последующим восстановлением катионов ртути раствором хлорида олова (II), переносе атомарной ртути в аналитическую кювету анализатора током воздуха и измерении в газовой фазе по величине поглощения паров при длине волны 253,7 нм. Количественное определение ртути проводилось на ртутном анализаторе типа HG-1 («Хиранума», Япония), анализаторе ртути «Юлия-5К» (ООО «ОКБ Спектр», Россия), анализаторе ртути РА-915М (ООО «Люмэкс-маркетинг», Россия) с зеемановской коррекцией неселективного поглощения.

Для определения растворенных форм ртути в воде в диапазоне 0,010-0,100 мкг/дм³ пробы не позднее 2 час. после отбора фильтровались через очищенный кипячением в растворе азотной кислоты мембранный фильтр 0,45 мкм. В качестве консерванта к фильтрату добавлялся 20%-ный раствор дихромата калия в азотной кислоте (1:1) из расчёта 5 см³ на 1 дм³ пробы воды. Для определения общей растворенной ртути законсервированные пробы воды подвергались минерализации кипячением с дихроматом калия и азотной кислотой, после остывания избыток окислителя удалялся добавлением раствора гидроксиамины гидрохлорида. Для определения ртути в донных отложениях в диапазоне 0,10-1,10 мг/кг (на сухую массу) и в водных биологических ресурсах

в диапазоне 0,005-0,200 мг/кг (на сырую массу) проводилась «мокрая» минерализация высушенных проб донных отложений и проб водных биологических ресурсов естественной влажности кипячением в концентрированной азотной кислоте до состояния «влажных солей». Для полного разрушения органических компонентов к пробам добавлялся 5%-ный раствор перманганата калия, затем, но не ранее, чем через 12 час., к пробам по каплям прибавлялся 8%-ный раствор гидроксиламины гидрохлорида до обесцвечивания раствора.

Построение рисунков проводили с использованием программы Surfer 8.0. Достоверность различий между выборками оценивали по критерию Стьюдента, различия считались достоверными при $p < 0,05$. Превышение полученного результата относительно норматива оценивали с использованием бинарного утверждения (простое утверждение, когда предел приемлемости совпадает с пределом допуска) с учётом методической погрешности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 1995-2005 гг. ежегодно фиксировалось локальное увеличение концентрации ртути в воде с превышением ПДК_{р/х} от 15 до 360 раз. Среднегодовой уровень ртути в воде Нижнего Дона был высоким (0,125-0,651 мкг/дм³) с кратностью ПДК_{р/х} до 65 раз, а в отдельные годы (1997 г., 1999 г., 2003 г.) – крайне высокий (1,013-1,825 мкг/дм³) с превышением ПДК_{р/х} до 182,5 раз. Максимумы наблюдались в весенний и осенний периоды преимущественно в районе ст. Манычская, ниже устья р. Аксай, ниже сброса ГК г. Ростова-на-Дону и ниже устья р. Темерник. Данный период условно можно охарактеризовать как период высокой концентрации ртути в воде Нижнего Дона.

С 2006 по 2019 гг. (за исключением 2013 г.) отмечен период низкого содержания ртути в воде р. Дон. Концентрация ртути в воде была умеренной, низкой или вообще отсутствовала, фиксировалась только в крайне редких единичных случаях (2013 г.)¹⁰ [Горгола и др., 2023 а].

В течение последних лет наблюдений (2020-2024 гг.) на некоторых участках Нижнего Дона вновь стала фиксироваться повышенная концентрация ртути в воде [Горгола, Барабашин, 2021]. Так, среднегодовая концентрация ртути в воде Нижнего Дона в 2020 г. по усреднённым данным составила 0,020 мкг/дм³, в 2021 г. – 0,116 мкг/дм³, в 2022 г. – 0,053 мкг/дм³,

⁶ <https://gostassistant.ru/doc/8735434f-e961-4b6c-9504-13086b6c593d?ysclid=mbhoaace8a513743872>

⁷ <https://gostassistant.ru/doc/611e6ee3-bfc3-420f-9af9-afbf9652fb2>

⁸ РД 15-226-91. Методические указания по выполнению измерений массовой концентрации общей ртути в донных отложениях методом беспламенной атомной абсорбции. 2010. Ростов н/Д.: Изд-во АЗНИИРХ. 15 с.

⁹ ФР.1.31.2015.21649 (НДИ 05.26-2014). Методика выполнения измерений массовой доли ртути в пробах гидробионтов методом беспламенной атомной абсорбции. 2014. Ростов н/Д.: Изд-во Вираз. 14 с.

¹⁰ Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2018 году». 2019 / Под ред. М.В. Фишкина. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростоблкомприрода. 372 с.

в 2024 г. – 0,013 мкг/дм³. В 2023 г. ртуть в воде р. Дон на всех точках забора была ниже предела определения по методике измерений (рис. 1).

В 2020 г. в летний и осенний периоды концентрация ртути в воде превышала ПДК_{р/х} до 5 раз и фиксировалась в верхнем и среднем участках Нижнего Дона – ст. Романовская, г. Семикаракорск, устья рек Сал и Маныч. В 2021 г. и 2022 г. отмечено более высокое содержание ртути в воде, отмечающееся уже практически на всем участке Нижнего Дона, с максимумами в районе г. Семикаракорск (140 ПДК_{р/х}) и ст. Романовская (62 ПДК_{р/х}). Данные максимумы были зафиксированы в весенне-летний период года. Среднегодовые концентрации ртути в воде Нижнего Дона в 2020-2022 гг. представлены на рис. 2. В 2024 г. в летний период в районе устья р. Аксай зафиксирован единичный случай превышения ПДК_{р/х} ртути до 5 раз.

Отмечена также выраженная сезонная и пространственная вариабельность содержания ртути

в воде вследствие лабильности данного компонента в водных экосистемах [Boszke et al., 2022]. На примере 2022 г. установлено, что в мае-июне отмечен локальный максимум концентрации ртути в воде в районе ст. Романовская (62 ПДК_{р/х}) и её незначительное содержание в гирле рук. Мокрая Каланча (3 ПДК_{р/х}). В летний период года (август) ярко выраженных максимумов ртути в воде не отмечено, однако, её концентрация варьировала от 0,01 до 0,18 мкг/дм³ на всей акватории нижнего течения р. Дон. Вследствие летней межени и формирования в дельте Дона вод застойного характера, зафиксировано повышенное содержание ртути в гирле рук. Мокрая Каланча – до 18 ПДК_{р/х}. В осенний период года отмечено остаточное содержание ртути в воде в районе г. Семикаракорск и ст. Романовская (0,05 мкг/дм³ с кратностью 5 ПДК_{р/х}) (рис. 3).

Известно, что ртутной интоксикации наиболее подвержены гидробионты на стадии личинки, эмбрионы рыб не так чувствительны к загрязняющим ве-

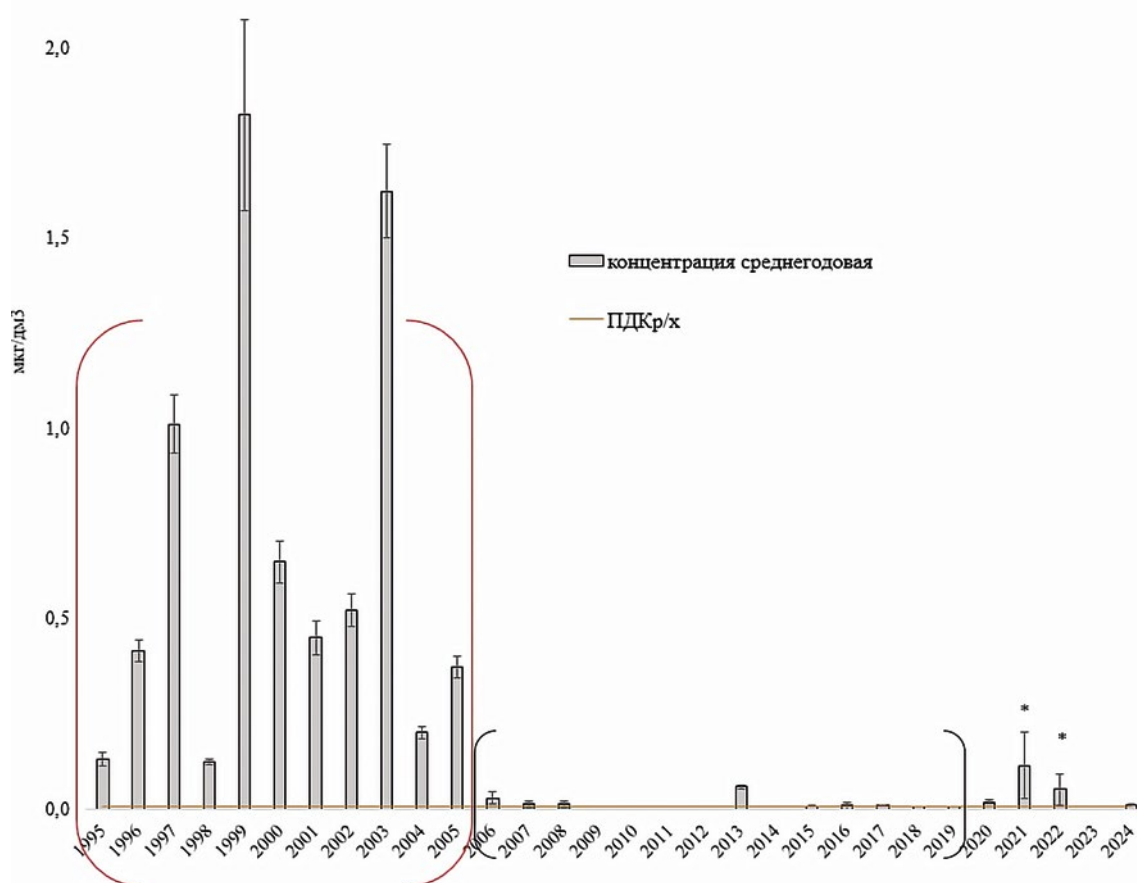


Рис. 1. Среднегодовая концентрация ртути (мкг/дм³) в воде Нижнего Дона в 1995-2024 гг.:

* – отличия достоверны относительно 2006-2019 гг.

Fig. 1. Average annual mercury concentration (μg/dm³) in the water of the Lower Don in 1995-2024:

* – differences are significant relative to 2006-2019

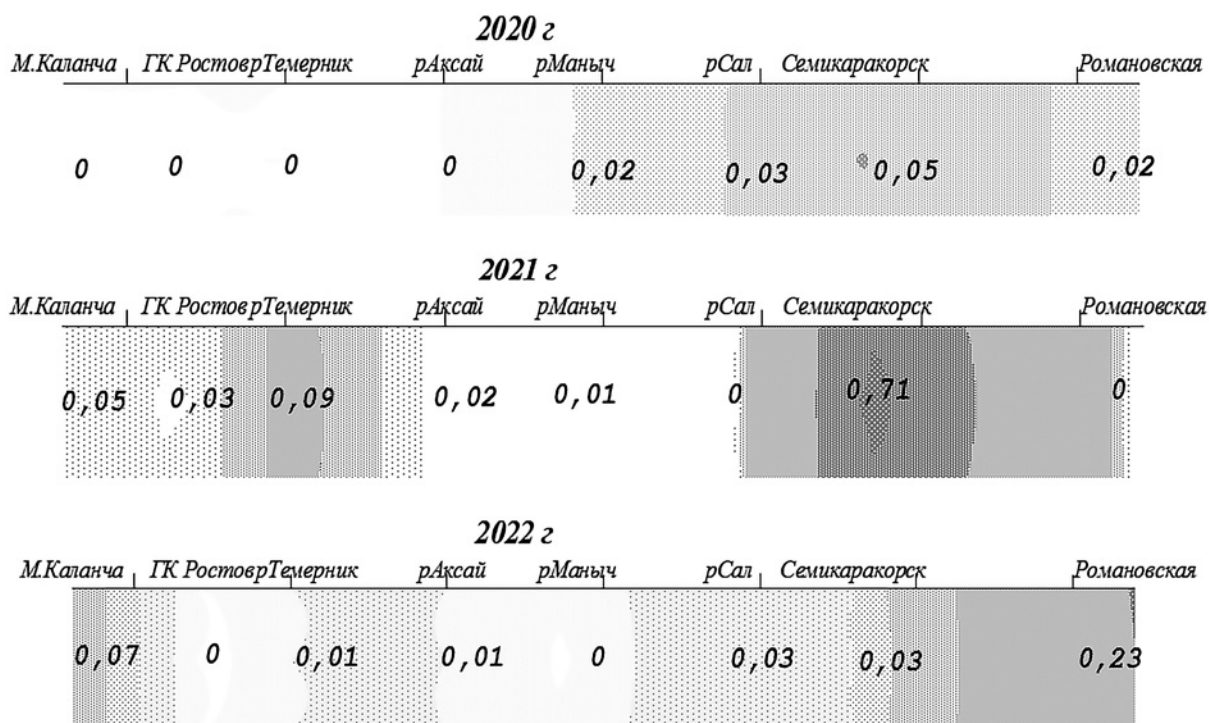


Рис. 2. Пространственное среднегодовое распределение концентрации ртути ($\mu\text{г}/\text{дм}^3$) в воде Нижнего Дона в 2020-2022 гг.
Fig. 2. Spatial average annual distribution of mercury concentration ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in the water of the Lower Don in the period 2020-2022

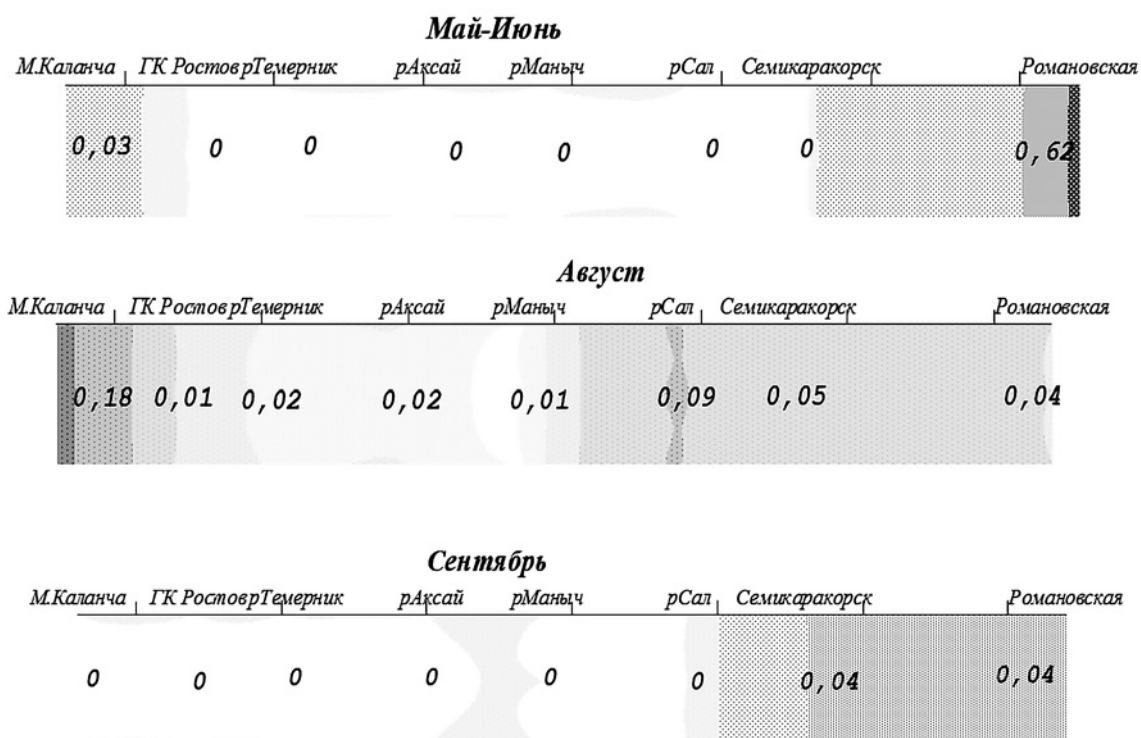


Рис. 3. Пространственное распределение ртути ($\mu\text{г}/\text{дм}^3$) в воде Нижнего Дона в 2022 г. в разные сезоны мониторинга
Fig. 3. Spatial distribution of mercury ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in the water of the Lower Don in 2022 in different monitoring seasons

ществам ввиду защитного эффекта эмбриональной мембраны [Jezierska et al., 2009]. Однако, есть и противоположные явления, что описано на японской камбале [Ren et al., 2019]. Летальная концентрация LC_{50} ртути для икры лососевых в остром эксперименте (24 часа) составляет минимум 84 мкг/дм^3 , в хроническом эксперименте (168 часов) – 4 мкг/дм^3 [Мур, Рамамурти, 1987; Kidd, Batchelar, 2011; Грициняк и др., 2015]. Исследованиями J.E. Schindler, J.J. Alberts [1977] установлено, что концентрация ртути 30 мкг/дм^3 является порогом токсического действия для различных видов рыб. Значение LC_{50} (96 ч) ртути для пресноводных рыб варьировали от 33 до 400 мкг/дм^3 [Нгуен Тхи Тхунг, 2024].

Таким образом, обнаруженная в воде р. Дон максимально высокая концентрация ртути – $1,4 \text{ мкг/дм}^3$ значительно ниже LC_{50} для пресноводных видов рыб. Тем не менее, случаи высоких концентраций ртути в воде на акватории Нижнего Дона в последние годы не могут не вызывать опасений. Данный факт диктует необходимость продолжения проведения мониторинга содержания ртути не только в воде, но и в донных отложениях, установления источников поступления ртути в водоём, тщательного анализа содержания ртути в тканях водных биоресурсов и соответствующих мер очистки воды в питьевых целях для недопущения поступления этого крайне токсичного элемента в организм человека.

В связи с этим было проведено исследование содержания ртути в донных отложениях и тканях промысловых видов рыб. В донных осадках в период 1995-2024 гг. ртуть фиксировалась в диапазоне от $<0,10$ до $1,2 \text{ мг/кг}$ сухой массы. Повышенный уровень ртути в донных отложениях зафиксирован в 1995 г., 1998-1999 гг. и 2022 г. В другие годы мониторинга содержание ртути в донных отложениях не превышало среднееголетного уровня для данного типа гранулометрического состава донных отложений р. Дон ($p>0,05$). В современный период исследований в 2022 г. на единичной станции в районе ст. Романовская в весенне-летний период года на фоне повышенной концентрации ртути в воде ($0,62 \text{ мкг/дм}^3$), её содержание в донных осадках было максимально высоким ($1,2 \text{ мг/кг}$; $p<0,05$ относительно среднееголетного уровня) (рис. 4). Ртуть, как и другие тяжёлые металлы, накапливается, большей частью, в мелко-левритовой и пелитовой фракции илов и, в меньшей степени, в песчаных осадках. Мы не исключаем, что ртуть оседает в донных отложениях на илистых, низкопроточных участках Нижнего Дона или его рукавов, ериков, притоков, которые не охвачены нашей стандартной сеткой станций.

В мышцах обследованных видов рыб, выловленных в Нижнем Дону за последние 5 лет исследований, концентрация ртути не превысила допустимого уровня по ТР ТС 021/2011 [Горгола и др., 2022, 2023 б]. Однако,

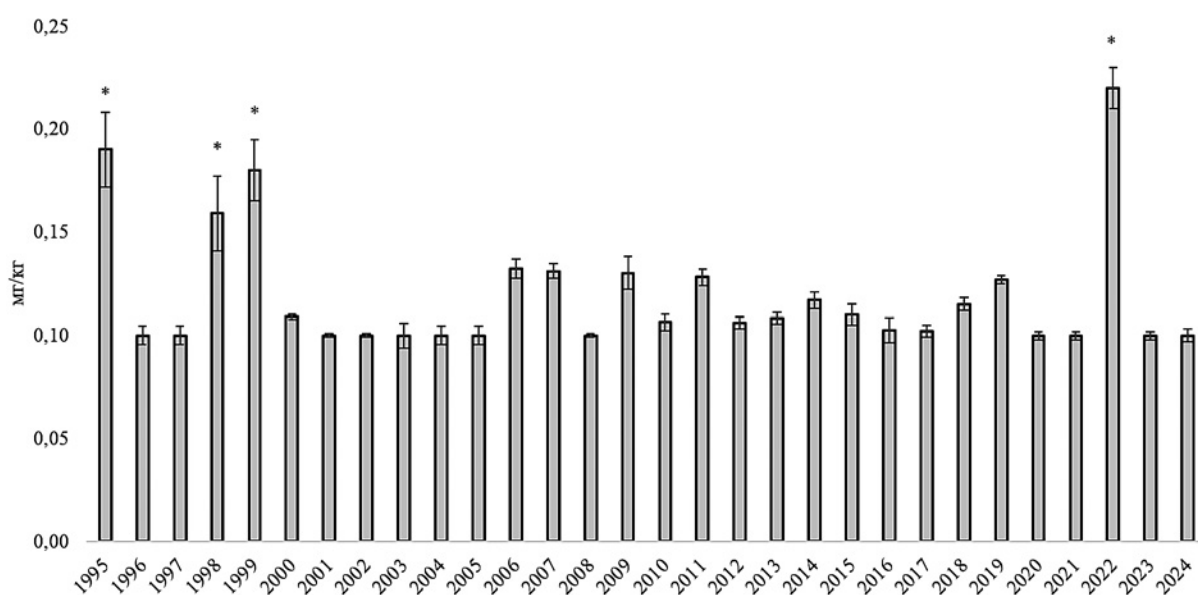


Рис. 4. Среднегодовое содержание ртути (мг/кг) в донных отложениях Нижнего Дона в 1995-2024 гг.:

* – отличия достоверны относительно среднееголетного уровня

Fig. 4. Average annual mercury content (mg/kg) in the bottom sediments of the Lower Don in 1995-2024:

* – differences are reliable relative to the average long-term level

следует отметить факт более высокого содержания ртути в мышцах хищных видов рыб – окунь, судак, сом, жерех, черноморско-азовская проходная сельдь (на 37%; $p<0,05$), за исключением рыбца, выловленного в 2023 г. (табл. 2). Биоиндикация содержания ртути в тканях рыб позволяет оценить не только степень их загрязнения ртутью, но и возможные риски для сохранения биоресурсов и здоровья населения [Немова и др., 2014]. Согласно нашим исследованиям, качество водных биоресурсов, выловленных в р. Дон, признано удовлетворительным по показателям загрязнения ртутью и не представляет опасности для здоровья человека.

Сравнение накопления ртути в водных биологических ресурсах Нижнего Дона относительно других

водоёмов России показало сопоставимость результатов при близких показателях в воде и донных отложениях. Так, средние концентрации ртути в мышцах основных видов промысловых рыб р. Волга соответствуют диапазону 0,011-0,026 мг/кг. Более высокие значения характерны для карпа, сазана, щуки, окуня, осетра и сома, наименьшие – для ерша [Горбунов и др., 2018]. Согласно исследованиям [Гремячих и др., 2019] содержание ртути в мышцах речного окуня из Рыбинского водохранилища и р. Северная Двина сопоставимо с данными, полученными для гидробионтов из р. Дон. Концентрация ртути в мышцах хищных рыб р. Обь (щука, судак, окунь) достоверно выше, чем у бентофагов, но во всех случаях

Таблица 2. Содержание ртути (на сырую массу) в мышцах рыб, выловленных на акватории Нижнего Дона в 2020-2024 гг.
Table 2. Mercury content (for the raw mass) in the muscles of fish caught in the Lower Don in 2020-2024

Вид рыбы, характеристика	Концентрация*, мг/кг
2020 г.	
Карась; $n=10$, ♂+♀, длина 20-24 см, масса 0,29-0,36 кг	<0,005
Лещ; $n=10$, ♂+♀, длина 25-28 см, масса 0,30-0,47 кг	<0,005
2021 г.	
Сазан; $n=10$, ♂+♀, длина 30-37 см, масса 0,64-0,82 кг	0,008±0,002
Карась; $n=10$, ♂+♀, длина 28-31 см, масса 0,48-0,61 кг	0,031±0,008
2022 г.	
Окунь; $n=10$, ♂+♀, длина 18-19 см, масса 0,10-0,11 кг	0,043±0,011
Густера; $n=10$, ♂+♀, длина 19-20 см, масса 0,09-0,10 кг	0,041±0,011
2023 г.	
Судак; $n=10$, ♂, длина 40-50 см, масса 2,5-3,0 кг	0,009±0,002
Окунь; $n=10$, ♂+♀, длина 14-27 см, масса 0,06-0,29 кг	0,075±0,020
Карась; $n=10$, ♂+♀, длина 19-37 см, масса 0,11-0,48 кг	<0,005
Лещ; $n=10$, ♂+♀, длина 26-36 см, масса 0,19-0,65 кг	<0,005
Рыбец; $n=10$, ♂+♀, длина 28-32 см, масса 0,21-0,32 кг	0,084±0,022
Тарань; $n=10$, ♂+♀, длина 23-28 см, масса 0,15-0,26 кг	0,031±0,008
Пиленгас; $n=10$, ♂+♀, длина 37-39 см, масса 0,54-0,81 кг	0,005±0,001
Сазан; $n=10$, ♂+♀, длина 37-58 см, масса 0,97-2,90 кг	<0,005
Сом; $n=10$, ♂+♀, длина 47-48 см, масса 0,91-1,50 кг	<0,005
2024 г.	
черноморско-азовская проходная сельдь, $n=10$, ♂+♀, длина 19-27 см, масса 0,05-0,21 кг	0,046±0,012
Рыбец, $n=10$, ♂+♀, длина 10-17 см, масса 0,25-0,31 кг	0,020±0,005
Окунь, $n=10$, ♂+♀, длина 14-27 см, масса 0,04-0,25 кг	0,024±0,006
Судак, $n=10$, ♂+♀, длина 42-51 см, масса 0,61-1,13 кг	0,023±0,006
Жерех, $n=10$, ♂+♀, длина 36-49 см, масса 0,54-1,33 кг	0,021±0,005
Лещ, $n=10$, ♂+♀, длина 37-49 см, масса 0,84-0,89 кг	0,025±0,007
Допустимый уровень по ТР ТС 021/2011	0,3 (нехищная) 0,6 (хищная)

Примечание: * – представлен результат анализа объединенной пробы, указана методическая погрешность.

не превышает принятые нормативные значения [Попов и др., 2019]. Среднее содержание общей ртути в мышцах рыб из Каспийского и Баренцева морей не превысило установленного норматива допустимого содержания. При значительном разбросе концентраций ртути в воде и донных отложениях обоих морей (как и в р. Дон) признаков антропогенного загрязнения морских рыб не обнаружено [Чаплыгин и др., 2016; Новиков и др., 2023]. В малых озёрах Северо-Запада России содержание ртути в мышцах окуня было повышенным, варьировало от 0,032 до 0,610 мг/кг, вследствие высокого содержания гумусовых веществ и закисления воды, что существенным образом влияло на биоаккумуляцию ртути в тканях рыб [Немова и др., 2014]. Во всех случаях причины вариабельности концентрации ртути в мышцах промысловых видов рыб обусловлены рационом питания, видовой принадлежностью, содержанием жира в тканях, региональными особенностями среды обитания. Дополнительно следует отметить, что акватория Нижнего Дона характеризуется низким содержанием гумусовых веществ и отсутствием процессов закисления воды [Косенко и др., 2024], что в значительной степени снижает биодоступность и биоаккумуляцию ртути в мышцах водных биоресурсов.

Согласно вышеприведённым результатам, в современный период (2020-2024 гг.) максимум содержания ртути в воде Нижнего Дона зафиксирован в районе ст. Романовская и г. Семикаракорск.

Станица Романовская расположена в непосредственной близости от г. Цимлянск, где имеется одна тепловая сеть, которая использует уголь в качестве сырья¹¹. При сжигании угля в топках вместе с золой в атмосферу поступает несгоревшее топливо (так называемый недожог). При охлаждении пылегазовых выбросов (в газоходах и очистных аппаратах) газообразные соединения ртути могут накапливаться, например, на поверхности твёрдых частиц. Известно, что высокие концентрации ртути характерны для, так называемой, летучей золы, которая образуется при сжигании угля. Весьма часто отмечается вторичное обогащение летучей золы ртутью по сравнению с ее концентрациями в исходном топливе, причём, чем меньше размеры частиц золы, тем интенсивнее обогащение их ртутью. Уровни содержания ртути в летучей золе варьируются в пределах 0,05-0,55 мг/кг [Янин, 2006]. Помимо тепловых станций, на состояние воды в р. Дон в районе ст. Романовская определённое влияние могут оказывать другие антропогенные факторы, например, химические заводы

(в г. Волгодонск расположен крупнейший химический завод «Кристалл») [Михайленко, Рубан, 2019].

Семикаракорский район является одним из ведущих сельскохозяйственных районов Ростовской области с орошаемым земледелием. Предполагается, что загрязнение воды р. Дон ртутью в районе г. Семикаракорск может происходить по причине нерационального ведения сельского хозяйства. Некоторые виды пестицидов содержат органические соединения ртути. К ним относятся фунгициды и бактерициды, которые делятся на две группы: галоидзамещенные соединения ртути (этилмеркурхлорид, фенилмеркурбромид) и производные уксусной кислоты с ртутью (изопропилмеркурцетат, фенилмеркурацетат). Ртуть, попадая в почву, может проникать в подземные воды и вымываться вместе с осадками и поливными водами непосредственно в р. Дон. Кроме того, инженерное преобразование почв при строительстве, промышленном, инфраструктурном развитии, создании рекреационных зон, приводит к поступлению ртути из нарушенных почв, при сельскохозяйственном использовании которых использовались ртутьсодержащие пестициды [Михайленко, 2020].

Природные источники поступления ртути в р. Дон – её вымывание из чёрных сарматских глин и угленосных районов. Сарматские глины распространены на территории Предкавказья, где они залегают неглубоко от поверхности или выходят на поверхность. Территория их распространения: на севере – граница Ставропольского края, с. Ипатово, на юге – севернее г. Черкесск, на западе – западнее г. Армавир, на востоке – Калаус-Кумское междуречье [Шекочихина, 2011]. В Восточном Донбассе выделяются 9 угленосных районов: Миллеровский, Каменско-Гундоровский, Белокалитвенский, Тагинский, Краснодонецкий, Гуково-Зверевский, Сулино-Садкинский, Шахтинско-Несветаевский и Задонский¹². Таким образом, акватория Нижнего Дона, в местах наибольших концентраций ртути в воде – ст. Романовская и г. Семикаракорск, является территорией распространения чёрных сарматских глин и угленосных месторождений, служащих природными источниками поступления ртути в водную экосистему

Исходя из вышесказанного, источником поступления ртути на акваторию нижнего течения р. Дон в 2020-2024 гг. могут являться как природные, так и антропогенные факторы. Тем не менее, в 1995-2005 гг. высокие концентрации ртути были зафик-

¹¹ https://vk.com/wall-39238439_366389

¹² *Природные ресурсы Ростовской области*. 2003. Комитет по охране окружающей среды и природных ресурсов Администрации Ростовской области. Ростов-на-Дону. С. 78–120.

сированы на участках Нижнего Дона, подверженных значительному антропогенному прессингу.

ВЫВОДЫ

1. В 1995-2005 гг. ежегодно выявлялись высокие локальные концентрации ртути в воде с превышением ПДК_{р/х} от 15 до 360 раз. Максимумы зафиксированы в весенний и осенний периоды преимущественно в районе ст. Манычская, ниже устья р. Аксай, ниже сброса очистных сооружений г. Ростов-на-Дону и ниже устья р. Темерник – участках наибольшего антропогенного прессинга на акваторию.

2. В современный период 2020-2024 гг. на акватории Нижнего Дона вновь фиксируются локальные повышенные концентрации ртути в воде с максимумами в весенне-летний период года в районе ст. Романовская (до 62 ПДК_{р/х}) и г. Семикаракорск (до 140 ПДК_{р/х}). Источником поступления ртути в воду нижнего течения р. Дон в 2020-2024 гг. на данных точках забора могут являться как природные, так и антропогенные факторы.

3. Отмечена выраженная сезонная и пространственная вариабельность содержания ртути в воде, вследствие лабильности данного компонента в водных экосистемах.

4. Накопление ртути в донных отложениях Нижнего Дона в период повышенных концентраций ртути в воде зафиксировано в отдельные годы (1995 г., 1998-1999 гг.), в современный период – в 2022 г. В другие годы мониторинга содержание ртути в донных отложениях не превышало среднемноголетнего уровня для данного типа гранулометрического состава донных отложений р. Дон. Не исключено оседание ртути в донных отложениях на илистых, низкопроточных участках Нижнего Дона или его рукавов, ериков, притоков, которые не охвачены нашей стандартной сеткой станций.

5. Повышенные концентрации ртути в воде нижнего течения р. Дон в современный период не представляют угрозу для жизнедеятельности гидробионтов. Качество водных биоресурсов, выловленных в р. Дон за последние 5 лет, признано удовлетворительным по показателям загрязнения ртутью и не представляет опасности для здоровья человека.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» на базе Азово-Черноморского филиала («АзНИИРХ»).

ЛИТЕРАТУРА

- Волгина Т.Н., Новиков В.Т., Денекова А.Ю. 2009. Один из путей решения проблемы уничтожения металлоорганических пестицидов // Современные наукоёмкие технологии. № 3. С. 55-56.
- Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И. 2018. Биоаккумуляция ртути в тканях пресноводных рыб // Экология человека. Т. 25. № 11. С. 23-31. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-11-23-31
- Горгола Л.Г., Барабашин Т.О. 2021. Оценка степени накопления тяжёлыми металлами реки Дон в период с 2019 по 2021 гг. // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. мат. ЮФУ. / Казеев К.Ш. ред. Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ. С. 24.
- Горгола Л.Г., Барабашин Т.О., Кораблина И.В. 2023 а. Оценка накопления ртути в воде нижнего течения реки Дон для целей аквакультуры и искусственного воспроизводства гидробионтов // Современные аспекты в рыбохозяйственной науке и геномные технологии в аквакультуре и рыболовстве. Мат. IV науч. школы-конф. молодых учёных и специалистов. Московская область, д. Аносино, 30 ноября – 4 декабря 2023 г. М.: Изд-во ВНИРО. С. 25.
- Горгола Л.Г., Барабашин Т.О., Кораблина И.В., Петренко А.А., Слепухина Е.А. 2023 б. Оценка накопления тяжёлых металлов (Hg, Cd, Pb) в органах и тканях рыб нижнего течения р. Дон в летний период 2023 года // Актуальные вопросы водных и прибрежных экосистем. Мат. всеросс. конф., посвящённой 90-летию со дня рождения О.Г. Миронова. Севастополь, 2-5 октября 2023 г. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ. С. 88-90.
- Горгола Л.Г., Кораблина И.В., Барабашин Т.О. 2022. Сравнительная оценка накопления кадмия и ртути в рыбах Веселовского водохранилища и нижнего течения реки Дон // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса. Мат. X межд. науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов. г. Москва, 10-11 ноября 2022. М.: Изд-во ВНИРО. С. 268-271.
- Гремячих В.А., Ложкина Р.А., Комов В.Т. 2019. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX-XXI веков // Трансформация экосистем. № 2 (2). С. 85-95. DOI: 10.23859/estr-180816.
- Грициняк И.И., Янович Д.А., Бех В.В. 2015. Влияние неэссенциальных элементов (ртуть, мышьяк) на организм лососевых (*Salmonidae*) рыб (обзор) // Рыбохозяйственная наука Украины. № 3(33). С. 18-33. DOI: 10.15407/fsu2015.03.018.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В. 1993. Обзор экологического состояния морей Российской Федерации и отдельных райо-

- нов Мирового океана за 1992 г. М.: Гидрометеиздат. 173 с.
- Короткова Л.И., Кораблина И.В., Барабашин Т.О. 2019. Аккумуляция приоритетных поллютантов в рыбах Азовского моря за последнее десятилетие // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 2. № 3. С. 20-32.
- Косенко Ю.В., Кораблина И.В., Горгола Л.Г., Баскакова Т.Е., Елфимова Н.С. 2024. Условия среды обитания водных биоресурсов на акватории Нижнего Дона (2015-2024 гг.) // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 7. № 4. С. 40-53. DOI: 10.47921/2619-1024_2024_7_4_40.
- Кулик Я.С., Косенко Ю.В., Кораблина И.В., Трушков А.В., Баскакова Т.Е., Должанов П.Б., Алексеева Н.В. 2025. Характеристика условий среды обитания водных биоресурсов в р. Миус в 2024 г. // Водные ресурсы и среда обитания. Т. 8. № 1. С. 26-40. DOI: 10.47921/2619-1024_2025_8_1_26.
- Львова О.А., Карыгина Н.В. 2020. Содержание ртути в различных компонентах экосистемы Волго-Каспия (вода, донные отложения, гидробионты) // Мат. межд. науч.-практ. конф. «Экология и природопользование». Магас, 21-23 октября 2020 г. Магас: ООО «КЕП». С. 264-271.
- Михайленко А.В. 2020. Ртутное загрязнение водных объектов как фактор устойчивого развития урбанизированного пространства юго-запада Ростовской области // Экология XXI ВЕКА: синтез образования и науки. Мат. VI межд. науч.-практ. конф. г. Челябинск. 18-21 мая 2020. Челябинск: Изд-во ЮУрГПУ. С. 215-217.
- Михайленко А.В., Рубан Д.А. 2019. Ртутное загрязнение водных объектов как фактор устойчивого развития урбанизированного пространства юго-запада Ростовской области // Экологические проблемы промышленных городов. Мат. 9-й Межд. науч.-практ. конф. Саратов, 10-12 апреля 2019 г. / Е.И. Тихомирова ред. Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина. С. 70-74.
- Мур Дж. В., Рамамурти С. 1987. Тяжёлые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир. 288 с. (Moore J.W., Ramamoorthy S. 1984. Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment. Springer-Verlag: New York-Berlin-Heidelberg-Nokyo. 286 p.).
- Нгуен Тхи Тхуи Ньунг. 2024. Особенности миграции и трансформации ртути в водной экосистеме устьевой области реки Красная (Вьетнам). Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Махачкала: ДагФИЦ РАН. 24 с.
- Немова Н.Н., Лысенко Л.А., Мещерякова О.В., Комов В.Т. 2014. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // Биосфера. Т. 6. № 2. С. 176-185.
- Новиков М.А., Горбачева Е.А., Харламова М.Н. 2023. Содержание ртути в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // ТРУДЫ ВНИРО. Т. 191. С. 112-123. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-112-123.
- Павленко Л.Ф., Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Экилик В.С. 2022. Приоритетные токсиканты в элементах экосистемы Нижнего Дона // Водные ресурсы. Т. 49, № 3. С. 298-304. DOI: 10.31857/S0321059622030117.
- Перевозников М.А., Богданова Е.А. 1999. Тяжёлые металлы в пресноводных экосистемах. СПб: Изд-во ГосНИОРХ. 228 с.
- Попов П.А., Андросова Н.В., Попов В.А. 2019. Характер накопления ртути в рыбах реки Оби // Российский журнал прикладной экологии. № 4 (20). С. 51-56.
- Решетняк О.С. 2022. Многолетняя изменчивость содержания соединений ртути в речных экосистемах России по данным мониторинга // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 2. С. 70-79. DOI: 10.31857/S0869780922020060.
- Чаплыгин В.А., Ершова Т.С., Зайцев В.Ф. 2016. Содержание ртути в мышцах гидробионтов Каспийского моря // Вестник АГТУ. № 2. С. 108-112.
- Щекочихина Е.В. 2011. Инженерно-геологические особенности сарматских глин краевых прогибов юга Русской платформы. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Волгоград: ИАиС ВолгГТУ. 23 с.
- Эйрих С.С. 2024. Ртуть в воде и донных отложениях р. Иртыш: проблемы и достоверность её определения и оценок загрязнения // Известия Алтайского отд. РГО. № 3 (74). С. 71-99. DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17406
- Янин Е.П. 2006. Эмиссия ртути в атмосферу при сжигании каменного угля в России // Ресурсосберегающие технологии. № 3. С. 3-14.
- Boszke L., Glosinska G., Siepak J. 2002. Some aspects of speciation of mercury in a water environment // Pol. J. Environ. Stud. V. 11 (4). P. 285-298.
- Jeziarska B., Lugowska K., Witeska M. 2009. The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review) // Fish. Physiol. Biochem. 35. P. 625-640. DOI: 10.1007/s10695-008-9284-4
- Kidd K., Batchelar K. 2011. Mercury // Fish Physiology. 31. Part B. P. 237-295. DOI: 10.1016/S1546-5098(11)31027-8.
- Ren Z.H., Cao L., Huang W., Liu J.H., Cui W.T., Dou S.Z. 2019. Toxicity test assay of waterborne methylmercury on the Japanese Flounder (*Paralichthys olivaceus*) at embryonic-larval stages // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 102. P. 770-777. DOI: 10.1007/s00128-019-02619-9.
- Schindler J.E., Alberts J.J. 1977. Behavior of mercury, chromium, and cadmium in aquatic systems. Washington, DC, US Environmental Protection Agency. P. 1-61.

REFERENCES

- Volgina T.N., Novikov V.T., Enkova A.Yu. 2009. One of the ways to solve the problem of destruction of organometallic pesticides // Modern science-intensive technologies. No. 3. P. 55-56. (In Russ.)
- Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I. 2018. Bioaccumulation of mercury in freshwater fish tissues // Human Ecology. Vol. 25, No. 11. P. 23-31. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-11-23-31. (In Russ.)
- Gorgola L.G., Barabashin T.O. 2021. Assessment of the degree of accumulation of heavy metals by the Don River in the period from 2019 to 2021 // Actual problems of ecology

- and nature management. SFU Coll. Papers / K.S. Kazeev ed. Rostov-on-Don, Taganrog: SFU Publish. P. 24. (In Russ.)
- Gorgola L.G., Barabashin T.O., Korablina I.V. 2023. Assessment of mercury accumulation in the water of the lower reaches of the Don River for the purposes of aquaculture and artificial reproduction of aquatic organisms // Modern aspects in fisheries science and genomic technologies in aquaculture and fisheries. Mat. of the IV Scient. school-conf. of young scientists and specialists. Moscow region, Anosino vil., November 30 – December 4, 2023. Moscow: VNIRO Publish. P. 25. (In Russ.)
- Gorgola L.G., Barabashin T.O., Korablina I.V., Petrenko A.A., Slepukhina E.A. 2023. Assessment of the accumulation of heavy metals (Hg, Cd, Pb) in the organs and tissues of fish of the lower reaches of the river. The Don in the summer of 2023 // Current issues of aquatic and coastal ecosystems: a collection of materials of the All-Russ. conf. dedicated to the 90th anniversary of the birth of O.G. Mironov. Sevastopol, October 2-5, 2023. Sevastopol: IBSS Publish. P. 88-90. (In Russ.)
- Gorgola L.G., Korablina I.V., Barabashin T.O. 2022. Comparative assessment of the accumulation of cadmium and mercury in the fish of the Veselovsky reservoir and the lower reaches of the Don River // Modern problems and prospects for the development of the fisheries complex. Proc. of the X Inter. Scient. and Pract. Conf. of Young Scientists and specialists. Moscow, November 10-11, 2022. Moscow: VNIRO Publish. P. 268-271. (In Russ.)
- Gremyachikh V.A., Lozhkina R.A., Komov V.T. 2019. Spatial and temporal variability of mercury content in the river perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) of the Rybinsk reservoir at the turn of the XX-XXI centuries // Transformation of ecosystems. No. 2 (2). P. 85-95. DOI: 10.15407/fsu2015.03.018. (In Russ.)
- Gritsinyak I.I., Yanovich D.A., Bekh V.V. 2015. The influence of nonessential elements (mercury, arsenic) on the body of salmonid fish (review) // Fisheries Science of Ukraine. No. 3(33). P. 18-33. DOI: 10.15407/fsu2015.03.018. (In Russ.)
- Israel Yu.A., Tsyban A.V. 1993. Review of the ecological state of the seas of the Russian Federation and certain areas of the World Ocean in 1992. Moscow: Hydrometeoizdat. 173 p. (In Russ.)
- Korotkova L.I., Korablina I.V., Barabashin T.O. 2019. Accumulation of priority pollutants in the fish of the Sea of Azov over the last decade // Aquatic bioresources and habitat. V. 2. No. 3. P. 20-32. (In Russ.)
- Kosenko Yu.V., Korablina I.V., Gorgola L.G., Baskakova T.E., Elfimova N.S. 2024. Habitat conditions of aquatic bioresources in the waters of the Lower Don (2015-2024) // Aquatic bioresources and habitat. Vol. 7. No. 4. P. 40-53. DOI: 10.47921/2619-1024_2024_7_4_40. (In Russ.)
- Kulik Ya.S., Kosenko Yu.V., Korablina I.V., Trushkov A.V., Baskakova T.E., Dolzhanov P.B., Alekseeva N.V. 2025. Characteristics of the habitat conditions of aquatic bioresources in the Mius River in 2024 // Water resources and habitat. V. 8. No. 1. P. 26-40. DOI:10.47921/2619-1024_2025_8_1_26. (In Russ.)
- Lvova O.A., Krygina N.V. 2020. Mercury content in various components of the Volga-Caspian ecosystem (water, bottom sediments, hydrobionts) // Proc. Intern. scient. and pract. Conf. «Ecology and Nature Management». Magas, October 21-23, 2020 Magas.: KEP LLC. P. 264-271. (In Russ.)
- Mikhailenko A.V. 2020. Mercury pollution of water bodies as a factor of sustainable development of the urbanized area of the South-West of the Rostov region // Ecology of the 21st CENTURY: synthesis of education and science. Proc. of the VI Intern. Scient. and Pract. Conf. Chelyabinsk, May 18-21, 2020. Chelyabinsk: SUSU Publish. P. 215-217. (In Russ.)
- Mikhailenko A.V., Ruban D.A. 2019. Mercury pollution of water bodies as a factor of sustainable development of the urbanized area of the South-West of the Rostov region // Environmental problems of industrial cities. Proc. of the 9th Intern. Scient. and Pract. Conf. Saratov, April 10-12, 2019 / E.I. Tikhomirova ed. Saratov: Yuri Gagarin SSTU. P. 70-74. (In Russ.)
- Moore J.V., Ramamoorthy S. 1987. Heavy metals in natural waters. Moscow: Mir. 286 p. (In Russ.) (Moore J.W., Ramamoorthy S. 1984. Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment. Springer-Verlag: New York-Berlin-Heidelberg-Nokyo. 286 p.)
- Nguyen Thi Thuy Nhung. 2024. Features of mercury migration and transformation in the aquatic ecosystem of the estuarine region of the Krasnaya River (Vietnam). PhD Abstr. in biology. Makhachkala: DagFRC RAS. 24 p. (In Russ.)
- Nemova N.N., Lysenko L.A., Meshcheryakova O.V., Komov V.T. 2014. Mercury in fish: a biochemical indication // Biosphere. V. 6. No. 2. P. 176-185 (In Russ.)
- Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Kharlamova M.N. 2023. Mercury content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Trudy VNIRO. V. 191. P. 112-123. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-112-123. (In Russ.)
- Pavlenko L.F., Korablina I.V., Barabashin T.O., Ekik V.S. 2022. Priority toxicants in the elements of the Lower Don ecosystem // Water resources. V. 49, No. 3. P. 298-304. DOI: 10.31857/S0321059622030117. (In Russ.)
- Perevoznikov M.A., Bogdanova E.A. 1999. Heavy metals in freshwater ecosystems. Saint Petersburg: GOSNIORH Publish. 228 p. (In Russ.)
- Popov P.A., Androsova N.V., Popov V.A. 2019. The nature of mercury accumulation in the fish of the Ob River // Russian Journal of Applied Ecology. No. 4 (20). P. 51-56. (In Russ.)
- Reshetnyak O.S. 2022. Long-term variability of mercury compounds in Russian river ecosystems according to monitoring data // Geoecology. Engineering Geology, hydrogeology, geocryology. No. 2. P. 70-79. DOI: 10.31857/S0869780922020060. (In Russ.)
- Chaplygin V.A., Ershova T.S., Zaitsev V.F. 2016. Mercury content in the muscles of hydrobionts of the Caspian Sea // Bulletin of the AGTU. No. 2. P. 108-112 (In Russ.)
- Shchekochikhina E.V. 2011. Engineering and geological features of the Sarmatian clays of the marginal troughs of

- the southern Russian platform: PhD abstr. in geology and mineralogy. Volgograd: VolgSTU 23 p. (In Russ.)
- Eirikh S. Since 2024. Mercury in water and bottom sediments of the Irtysh River: problems and reliability of its definition and pollution estimates // Proceedings of the Altai branch of the RGS. No. 3 (74). P. 71-99. DOI: 10.24412/2410-1192-2024-17406 (In Russ.)
- Yanin E.P. 2006. Mercury emissions into the atmosphere from coal burning in Russia // Resource-saving technologies. No. 3. P. 3-14. (In Russ.)
- Boszke L., Glosinska G., Siepak J. 2002. Some aspects of speciation of mercury in a water environment // Pol. J. Environ. Stud. V. 11 (4). P. 285-298.
- Jezierska B., Ługowska K., Witeska M. 2009. The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review) // Fish. Physiol. Biochem. 35. P. 625-640. DOI: 10.1007/s10695-008-9284-4
- Kidd K., Batchelar K. 2011. Mercury // Fish Rhysiology. 31. Part B.P. 237-295. DOI: 10.1016/S1546-5098(11)31027-8.
- Ren Z.H., Cao L., Huang W., Liu J.H., Cui W.T., Dou S.Z. 2019. Toxicity test assay of waterborne methylmercury on the Japanese Flounder (*Paralichthys olivaceus*) at embryonic-larval stages // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 102. P. 770-777. DOI: 10.1007/s00128-019-02619-9.
- Schindler J.E., Alberts J.J. 1977. Behavior of mercury, chromium, and cadmium in aquatic systems. Washington, DC, US Environmental Protection Agency. P. 1-61.

Поступила в редакцию 18.04.2025 г.
Принята после рецензии 02.06.2025 г.