

РАЗДЕЛ 3. ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.423:504.4.054

ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.

Буфетова М. В.

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
(МГРИ), Москва, Российская Федерация
E-mail: mbufetova@mail.ru*

Оценены потоки Hg, Pb, Cd, Cu и Zn в открытую часть Азовского моря и Таганрогский залив с атмосферными осадками, речными водами Дона и Кубани, а также в результате водообмена через Должанский и Керченский проливы. Результаты показали, что атмосферные осадки являются значимым источником поступления Cu, Zn и Hg. В Таганрогском заливе речной сток Дона играет ключевую роль в поставке Cu и Zn. Поступление Pb и Cd превалирует из Азовского моря, в то время как Hg, Zn и Cu в более значимых объемах поступают из Таганрогского залива. Азовское море может являться источником загрязнения вод Черного моря Pb, Cd и Zn. В отношении переноса Cu наблюдается сопоставимая интенсивность для обеих морей. Hg наиболее загрязнены черноморские воды. Анализ данных показал, что в течение исследуемого периода фиксировались превышения значений предельного пула Pb и Cu в открытой части Азовского моря.

Ключевые слова: Азовское море, ртуть, свинец, кадмий, медь, цинк, потоки тяжелых металлов, пул.

ВВЕДЕНИЕ

Азовское море имеет высокий экономический и рекреационный потенциал, обладает статусом рыбохозяйственного водоема высшей категории, поэтому исследование загрязнения этого водного объекта представляется актуальной задачей [1].

К числу значимых в экологическом отношении загрязняющих веществ, поступающих в акваторию Азовского моря, относятся тяжелые металлы. В отличие от большинства органических соединений, которые со временем разлагаются, тяжелые металлы, обладая консервативностью, не разрушаются, а мигрируют между компонентами морской экосистемы. Одними из приоритетных металлов для экологического мониторинга акватории Азовского моря являются ртуть, кадмий, свинец, медь и цинк, которые имеют токсикологический лимитирующий показатель вредности.

Водный баланс является важнейшим комплексным режимобразующим фактором Азовского моря. Наряду с климатическими условиями он определяет основные особенности гидрологического и гидрохимического режимов морей. Наиболее полно многолетние исследования водного баланса Азовского моря были выполнены Севастопольским отделением ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова» (СО ФГБУ «ГОИН»), Азово-Черноморским филиалом («АзНИИРХ») ФГБНУ «ВНИРО» и ФГБУН «Федеральный

ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.

исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН) [2, 3, 4, 5, 6]. С 1980-х годов в океанологической науке была проведена большая аналитическая, исследовательская и практическая работа по уточнению данных, в том числе и в области водного баланса Азовского моря, который играет важную роль в формировании закономерностей потоков тяжелых металлов в экосистеме. Цель работы заключалась в оценке потоков тяжелых металлов (Hg, Pb, Cd, Cu, Zn) в открытую часть Азовского моря и Таганрогский залив с главными составляющими водного баланса — атмосферными осадками, речным стоком Дона и Кубани, а также в результате водообмена через Должанский и Керченский проливы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Источниками данных для модели водного баланса Азовского моря за период с 2019 г. по 2023 г., послужили Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО 4) и общедоступная база данных ВНИИГМИ-МЦД 5 [7]. Также использовалась информация о температуре и относительной влажности воздуха, скорости ветра, величине атмосферных осадков, температуре воды и уровне моря, данные о ежедневных расходах воды на гидростоях станица Раздорская (р. Дон), хутор Тиховский и хутор Зайцево Колено (р. Кубань), с. Слободка (рукав Протока) [7]. Наибольшую долю приходной части водного баланса Азовского моря образуют материковый сток и приток воды из Черного моря. В расходной части преобладают сток азовской воды в Черное море и испарение с поверхности. Главные составляющие водного баланса Азовского моря приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Главные элементы водного баланса Азовского моря (км³)

Год	приток речных вод Дона	приток речных вод Кубани	осадки на акваторию	испарение	приток воды из Черного моря	отток воды в Черное море	изменение объема моря
2019	15,2	11,0	20,6	35,1	35,5	50,3	5,2
2020	9,7	10,1	20,0	36,5	40,8	44,1	5,5
2021	11,5	6,5	19,9	36,9	36,7	45,3	-7,6
2022	12,5	12,8	19,2	35,8	39,2	48,8	-0,9
2023	19,5	12,3	18,1	36,3	38,3	48,2	3,7
μ	13,7	10,5	19,6	36,1	38,1	47,3	1,2

μ — среднее значение.

Составлено автором по [6, 7].

В работе были использованы данные о концентрации Hg, Pb, Cd, Cu и Zn в воде Азовского моря, устьях р.Дон и р.Кубань 2019–2023 гг., предоставленные автору филиалом «Азовморинформцентр» ФГБВУ «Центррегионводхоз» в рамках сотрудничества с кафедрой экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе

(МГРИ). Для анализа распределения ртути в воде Азовского моря использовались данные за 2019–2023 гг., предоставленные Государственным океанографическим институтом им. Н. Н. Зубова (ГОИН).

Потоки тяжелых металлов оценивали по формуле:

$$P_i = W \times C_{wi}, \quad (1)$$

где: P_i — поток i тяжелого металла, т/год; W — объем стока, км³/год; C_{wi} — средняя концентрация i тяжелого металла в воде, мкг/л.

Пул (запас) тяжелого металла в водной толще моря, в растворенной форме (P_v , т) оценивался как:

$$P_v = C_{wi} \times V, \quad (2)$$

где: C_{wi} — средняя концентрация i металла в воде (мкг/л); V — объем водного объекта (км³).

Процентный вклад источника (B) тяжелого металла, поступающего в Азовское море, определялся выражением:

$$B = P_{TM}/P_v \times 100 \%, \quad (3)$$

где P_{TM} — поступление растворенной формы тяжелого металла, т; P_v — пул растворенной формы тяжелого металла в воде, т.

В работе были выделены два района: Таганрогский залив и открытая акватория Азовского моря (собственно море), что связано с их морфометрическими и гидрологическими особенностями.

Предельно допустимые концентрации изучаемых тяжелых металлов в водной среде отражены в табл. 2.

Таблица 2.

Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в воде [8]

Характеристика	Металл				
	Pb	Zn	Cu	Cd	Hg
Класс опасности	3	3	3	2	1
Предельно допустимая концентрация для морских вод мкг/л	10.0	50.0	5.0	10.0	0.1
Предельно допустимая концентрация для вод водных объектов рыбохозяйственного значения (р/х), мкг/л	6.0	10.0	1.0	0.5	0.01

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поступление тяжелых металлов с атмосферными осадками. За последние десять лет отсутствуют систематические данные о наличии тяжелых металлов в атмосферных осадках над Азовским морем. Наиболее обширный массив данных о концентрациях тяжелых металлов в атмосферных осадках над акваторией Азовского моря был получен в период с 1996 по 2005 годы, и представлен в исследовании [9]. Так, содержание ртути в пробах дождевой воды варьировалось в пределах от 0,06 до 0,60 мкг/л, со средним показателем 0,24 мкг/л. Уровень свинца в атмосферных осадках колебался от менее 0,40 до 48 мкг/л, при этом среднее значение достигало 5,3 мкг/л. Концентрация кадмия, зафиксированная в дождевой воде, находилась в

**ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.**

диапазоне от 8 до 14 мкг/л, а средняя концентрация составляла 0,37 мкг/л. Содержание меди в атмосферных осадках изменялось от 4,2 до 13 мкг/л, со средним значением 8,3 мкг/л. Что касается цинка, его концентрация в атмосферных осадках, собранных над Азовским морем в период с 1996 по 2005 год, показывала колебания от 3 до 240 мкг/л, а среднее значение равнялось 31,0 мкг/л [9].

Для оценки потока ртути, свинца, кадмия, меди с жидкими атмосферными осадками на акваторию Азовского моря с 2019 по 2023 год в работе использовались данные приведенные в [10]. При анализе загрязнения атмосферного воздуха, представленного в [10] учитывались усредненные значения концентраций, полученные на станциях комплексного мониторинга фона содержания веществ в воздухе. Измерения проводились в центральной части европейской России и охватывали месячные, сезонные и годовые периоды с января по декабрь каждого года.

Значения цинка в [10] не приводятся. Для вычисления объема цинка, переносимого с атмосферными осадками, использовалась средняя концентрация, взятая из монографии [9] и равная 87,0 мкг/л.

Атмосферные осадки из общего уравнения водного баланса Азовского моря за 2019–2023 гг. в среднем составляют 19,6 км³/год на площадь всего моря (38000 км²) или 0,00048 км³/км²/год. Зная площади открытой части моря (собственно моря) (33400 км²) и Таганрогского залива (5600 км²) получаем, что на зеркало Таганрогского залива может выпасть 2,8 км³/год осадков, на зеркало собственно моря — 17 км³/год. Учитывая эти данные, а также среднегодовую концентрацию тяжелых металлов в атмосферных осадках можно получить примерные потоки металлов на поверхность акватории собственно моря и Таганрогского залива (табл. 3).

Таблица 3.

Поток тяжелых металлов с атмосферными осадками на акваторию Таганрогского залива и собственно моря в 2019–2023 гг., т/год

Год	Hg			Pb			Cd			Cu			Zn		
	Концентрация в атм. осадках*	Таганрогский залив	Собственно море	Концентрация в атм. осадках*	Таганрогский залив	Собственно море	Концентрация в атм. осадках*	Таганрогский залив	Собственно море	Концентрация в атм. осадках*	Таганрогский залив	Собственно море	Концентрация в атм. осадках [9]	Таганрогский залив	Собственно море
	мкг/л	т/год		мкг/л	т/год		мкг/л	т/год		мкг/л	т/год		мкг/л	т/год	
2019	0,30	0,8	4,8	0,5	1,4	8,0	0,07	0,2	1,1	1,5	4,1	24,0	87,0	240	1392
2020	0,12	0,3	1,9	0,4	1,1	6,4	0,06	0,2	1,0	1,7	4,6	27,2			
2021	0,10	0,3	1,6	0,4	1,1	6,4	0,06	0,2	1,0	1,5	4,1	24,0			
2022	0,06	0,2	1,0	0,5	1,4	8,0	0,06	0,2	1,0	3,1	8,4	49,6			
2023	0,10	0,3	1,6	0,9	2,4	14,4	0,04	0,1	0,6	4,1	11,1	65,6			
μ	0,14	0,4	2,2	0,5	1,5	8,6	0,1	0,2	0,9	2,4	6,5	38,1	87,0	240	1392

*Примечание: составлено автором по [10]

Поступление тяжелых металлов с речным стоком Дона и Кубани. Как отмечено в Ежегоднике качества поверхностных вод «важным источником поступления химических веществ природного и антропогенного происхождения в моря России является речной сток. Крупные реки собирают взвешенное и растворенное вещество с огромных водосборных площадей и транспортируют их вниз по течению, вплоть до замыкающих створов. Сток растворенных веществ – важнейший геохимический фактор, интегрально отражающий многообразные процессы миграции и трансформации веществ в различных ландшафтах водосборного бассейна реки. Поэтому количественная оценка выноса химических веществ, в том числе загрязняющих, как результирующей величины взаимодействия ландшафта и речного стока, представляет несомненный интерес как с позиции комплексной оценки состояния речного бассейна, так и оценки приходной части баланса химических веществ в морях» [11, с. 373].

Для расчета потока тяжелых металлов с речными водами Дона и Кубани концентрация Pb, Cd, Cu, Zn взята по результатам отбора проб воды в точке наблюдения «Восточный район Таганрогского залива, устье р. Дон» (средняя соленость 0,43 ‰) и в точке наблюдения «Кубано-Темрюкский район, устье р. Кубань» (средняя соленость 0,60 ‰). Для оценки потока ртути с речными водами использовались данные о концентрации ртути в устьевой области р. Дон и в устьевой области р. Кубань. Расчет потока всех указанных выше тяжелых металлов проводился по значениям для растворенной формы.

Концентрация растворенных форм исследуемых тяжелых металлов и рассчитанный их поток с речными водами Дона и Кубани в 2019–2023 гг. по (1) приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4.

Поток тяжелых металлов в Таганрогский залив с водами р. Дон в 2019–2023 гг.

Год	Среднегодовая концентрация в воде, мкг/л					Речной сток р.Дон, км ³ /год	Поток, т/год				
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2019	0,02	0,2	0,12	7,2	26	15,1	0,30	2,3	1,8	108,7	392,6
2020	0,02	0,1	0,14	8,3	28,1	9,7	0,19	1,0	1,4	80,5	272,6
2021	0,02	0,1	0,11	7,8	8,3	10,7	0,21	1,1	1,2	83,5	88,8
2022	0,02	0,1	0,12	6,8	9,1	12,4	0,25	1,2	1,5	84,3	112,8
2023	0,01	0,1	0,11	5,1	7,6	19,4	0,19	1,9	2,1	98,9	147,4
μ	0,02	0,1	0,1	7,0	15,8	13,5	0,2	1,5	1,6	91,2	202,8

Анализ переноса тяжелых металлов речными водами Дона и Кубани выявил схожие объемы их поступления в Азовское море. При этом, в водах Дона и Кубани средняя концентрация меди и цинка за 2019–2023 гг. превышала ПДКр.х.

**ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.**

Таблица 5.

Поток тяжелых металлов в Азовское море с водами р. Кубань в 2019–2023 гг.

Год	Концентрация в воде, мкг/л					Речной сток р.Кубань, км ³ /год	Поток, т/год				
	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2019	0,01	0,4	0,10	7,0	21,1	11,0	0,11	4,4	1,1	76,8	231,6
2020	0,01	0,1	0,11	7,1	32,2	10,1	0,10	1,0	1,1	71,8	325,7
2021	0,02	0,3	0,10	8,0	25,2	6,5	0,13	1,9	0,6	51,8	163,3
2022	0,01	0,4	0,08	9,0	28,0	12,8	0,13	5,1	1,0	115,1	358,0
2023	0,02	0,3	0,05	8,1	35,0	12,3	0,25	3,7	0,6	99,4	429,5
μ	0,01	0,3	0,09	7,8	28,3	10,5	0,1	3,2	0,9	83,0	301,6

Поступление тяжелых металлов в результате водообмена через Должанский пролив. Исследования водообмена через пролив между Таганрогским заливом и открытой частью Азовского моря активизировались в связи с усилением осолонения моря и необходимостью определения оценки его влияния на режим вод залива. Из-за отсутствия достаточного количества натуральных наблюдений косвенными способами определялись только средние многолетние величины годового выноса вод в море и годовой приток вод в залив. Учитывая многолетние данные о стоке р. Дон и ветровой активности на прибрежных станциях Азовского моря авторами [12] было выбрано три года с разными условиями формирования водообмена: маловодный (1972 г.), многоводный (1979 г.) и год, когда сток приблизительно был равен среднему многолетнему значению (1980 г.). В Таблице 6 представлены суммарные значения составляющих водообмена через Должанский пролив и суммарный сток р. Дон за характерные годы.

Таблица 6.

Составляющие водообмена через Должанский пролив и сток р. Дон (км³) за характерные годы по [12]

Составляющие, сток р. Дон	1972 г.	1979 г.	1980 г.
Из залива	177	212	188
В залив	169	176	176
Результирующий	8,0	36,0	12,0
Сток р. Дон	7,9	38,5	21,3

Используя среднегодовые концентрации исследуемых металлов в воде открытой части моря и Таганрогского залива, а также учитывая средние величины водообмена через Должанский пролив (по 1980 г.) возможно оценить потоки тяжелых металлов за период 2019–2023 гг. (табл. 7, 8).

Таблица 7.

Поток тяжелых металлов из собственно моря в Таганрогский залив в 2019–2023 гг.

Год	Сток из собственно моря в Таганрогский залив, км ³ /год	Среднегодовые концентрации в воде собственно моря, мкг/л					Поток из собственно моря в Таганрогский залив, т/год				
		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2019	176	0,01	3,8	0,4	4,7	18,4	1,8	203,7	21,4	251,9	986,2
2020	176	0,01	5,7	0,4	10,3	15,2	1,8	307,2	21,6	555,2	819,3
2021	176	0,02	3,5	0,4	9,0	22,8	3,5	188,3	21,5	484,2	1226,6
2022	176	0,01	14,4	0,6	10,1	22,7	1,8	779,0	32,5	546,4	1228,1
2023	176	0,02	13,1	0,9	8,4	25,6	3,5	700,9	48,2	449,4	1369,6
μ	176	0,01	8,1	0,5	8,5	20,9	2,5	435,8	29,0	457,4	1126,0

Таблица 8.

Поток тяжелых металлов из Таганрогского залива в открытую часть моря в 2019–2023 гг.

Год	Сток из Таганрогского залива в собственно море, км ³ /год	Среднегодовые концентрации в воде Таганрогского залива, мкг/л					Поток из Таганрогского залива в собственно море, т/год				
		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2019	188	0,02	3,8	0,27	2,6	15,6	3,8	714,4	50,8	488,8	2932,8
2020	188	0,03	1,0	0,3	9,4	12,9	5,6	188,0	56,4	1767,2	2425,2
2021	188	0,02	4,0	0,4	3,9	4,0	3,8	752,0	75,2	733,2	752,0
2022	188	0,02	2,7	0,2	6,3	4,9	3,8	507,6	37,6	1184,4	921,2
2023	188	0,02	3,5	0,2	5,5	6,1	3,8	658,0	37,6	1034,0	1146,8
μ	188	0,02	3	0,3	5,5	8,7	4,2	564,0	51,5	1041,5	1635,6

Анализ таблиц 7 и 8 демонстрирует, что в воде открытой части моря наблюдается более высокая средняя концентрация тяжелых металлов. Однако, ввиду более значительного объема ежегодного стока вод из Таганрогского залива в море – залив выступает источником загрязнения для собственно моря по всем исследуемым металлам.

Поступление тяжелых металлов в результате водообмена через Керченский пролив. Для оценки потоков Pb, Cd, Cu и Zn через Керченский пролив использовались

**ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.**

данные о их концентрации в воде Керченского предпроливья со стороны Азовского моря. Соленость азовоморских вод в отобранных пробах находилась в пределах 14 ‰, черноморских до 18 ‰, температура воды была практически одинакова, содержание растворимого кислорода в черноморских водах выше, но для обеих водных масс находилась в пределах ПДК для летнего периода – не менее 6,0 мг/л. Значения Hg в азовоморских водах Керченского предпроливья взяты из [13]. Результаты оценки потоков тяжелых металлов из Азовского моря в Черное через Керченский пролив показаны в табл. 9.

Таблица 9.

Поток тяжелых металлов из Азовского моря в Черное море в 2019–2023 гг.

Год	Сток из Азовского моря в Черное море, км ³ /год	Среднегодовые концентрации в воде Азовского моря, мкг/л					Поток из Азовского моря в Черное море, т/год				
		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2019	50,3	0,01	3,8	0,4	4,7	18,4	0,5	191,1	22,1	236,4	925,5
2020	44,1	0,01	5,7	0,4	10,3	15,2	0,4	251,4	15,9	454,2	670,3
2021	45,3	0,02	3,5	0,4	9,0	22,8	0,9	158,6	20,4	407,7	1032,8
2022	48,8	0,01	14,4	0,6	10,1	22,7	0,5	702,7	29,3	492,9	1107,8
2023	48,2	0,02	13,1	0,9	8,4	25,6	1,0	631,4	43,4	404,9	1233,9
μ	47,3	0,01	8,1	0,5	8,5	20,9	0,7	387,0	26,2	399,2	994,1

Содержание тяжелых металлов в водах Керченского предпроливья со стороны Черного моря обсуждается в работах [14, 15, 16, 17]. Обобщенные данные о концентрации тяжелых металлов приведены в табл. 10.

Таблица 10.

Концентрация тяжелых металлов в воде северо-восточной части Черного моря в 2000–2020 гг., мкг/л

Период времени	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Источник
2000–2019	$\frac{<0.01-2.4}{0.11}$	$\frac{<0.4-62.0}{0.69}$	$\frac{<0.1-2.0}{0.18}$	$\frac{<1.0-125.0}{1.9}$	$\frac{<2.0-886}{6.2}$	[14]
2019–2020	-	$\frac{0.09-24.3}{4.6}$	$\frac{0.2-2.5}{0.7}$	$\frac{0.4-2.7}{0.7}$	$\frac{0.2-19.4}{3.0}$	[15]
2020	-	$\frac{0.05-0.2}{0.1}$	$\frac{0.007-0.15}{0.05}$	$\frac{0.5-2.3}{1.1}$	$\frac{4.0-32.5}{12.0}$	[16]
2020	$\frac{0.015-0.06}{0.026}$	-	-	-	-	[17]
Интервал средних значений	0.026–0.11	0.1–4.6	0.05–0.7	0.7–22.2	3.0–12.0	

*Примечание: в числителе диапазон значений, в знаменателе – среднее значение. «-» — определения не производились

Оценка потоков тяжелых металлов из Черного моря в Азовское проводилась с учетом минимальной и максимальной средней концентрации металлов в воде Черного моря, результаты оценки показаны в табл. 11.

Таблица 11.

Поток тяжелых металлов из Черного моря в Азовское море в 2000–2020 гг.

Период	Сток из Черного моря в Азовское море, км ³ /год	Среднегодовые концентрации в воде Черного моря, мкг/л					Поток из Черного моря в Азовское море, т/год				
		Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn
2000–2020	38,0	0.026 -0.11	0.1- 4.6	0.05- 0.7	0.7- 22.2	3.0- 12.0	1.0- 4.2	3.8- 174.8	2.0- 2.6	26.6- 843.6	114.0 - 456.0

Из таблиц 9 и 11 видно, что Азовское море может являться источником загрязнения вод Черного моря свинцом, кадмием и цинком. Существуют разногласия в оценке содержания меди. Если исходить из наивысших показателей концентрации меди в черноморской воде, то перенос этого элемента в Азовское море окажется более значительным. Однако, если ориентироваться на наименьшие значения, ситуация может быть обратной. Тем не менее, анализ многолетних данных по концентрации меди в обоих морях демонстрирует, что уровни содержания меди практически идентичны. Ртутью наиболее загрязнены черноморские воды.

Необходимо отметить, что описанные выше потоки тяжелых металлов с компонентами водного баланса представляют собой лишь общую концептуальную схему, а реальные распределения металлов в конкретные моменты времени из-за гидрологических особенностей, характерных для исследуемых акваторий могут от нее отличаться.

Зная концентрацию загрязняющего вещества в водной среде и располагая информацией об объеме этой среды, можно определить общий запас (или пул) этого загрязнителя. В контексте данного исследования под «пулом» тяжелого металла подразумевается среда, способная накапливать или терять металл с течением времени. В качестве такой среды может выступать определенный объем воды, в частности, водная масса Таганрогского залива (25 км³) или собственно моря (231 км³) [18].

Пул исследуемых тяжелых металлов в растворенной форме (П_в) в собственно море и Таганрогском заливе в 2010–2023 г., рассчитанный по (2) представлен в табл. 12.

ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.

Таблица 12.

Пул тяжелых металлов (растворенная форма) в воде Азовского моря 2010–2023 гг.

Год	Пул металла в воде, т									
	Hg		Pb		Cd		Cu		Zn	
	Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив
2019	4,2	0,6	877,8	95,0	101,6	6,8	1085,7	65,0	4250,4	390,0
2020	3,9	0,6	1316,7	25,0	83,2	7,5	2379,3	235,0	3511,2	322,5
2021	4,6	0,6	808,5	100,0	104,0	10,0	2079,0	105,0	5271,9	99,4
2022	4,6	0,6	3326,4	67,5	138,6	5,0	2333,1	157,5	5240,1	122,6
2023	4,6	0,6	3026,1	87,5	207,9	5,0	1940,4	137,5	5911,2	152,1
μ	4,4	0,6	1871,1	75,0	127,1	6,9	1963,5	140,0	4837,0	217,3

В табл. 13 представлены результаты расчетов по (2) предельного пула тяжелых металлов в воде собственно моря и Таганрогского залива при условии достижения микроэлементами ПДК_в ($C_v = \text{ПДК}_v$). В этом контексте, под предельным пулом подразумевается ассимиляционная емкость акваторий Азовского моря в отношении рассматриваемых металлов.

Таблица 13.

Предельный пул тяжелых металлов (растворенная форма) в воде Азовского моря

Предельный пул металла в воде, т/год									
Hg		Pb		Cd		Cu		Zn	
Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив	Море	Залив
23,1	2,5	2310	250	2310	250	1155	125	11550	1250

Сравнение таблиц 12 и 13 показывает превышение предельного пула свинца и меди в акватории собственно моря в разные годы. Например, в 2023 г. предельный пул свинца в открытой части моря был превышен на 31 %, по меди – на 68 %. Среднее значение пула меди за 2010–2023 гг. превышает предельный пул на 36,5 %. По другим металлам сохраняется потенциал для дальнейшего накопления в пределах допустимых значений.

ВЫВОДЫ

Результаты показали, что атмосферные осадки являются значимым источником поступления ртути и цинка в акваторию Азовского моря (58% и 28%, соответственно). В случае со свинцом, кадмием и медью их доля не превышает 5%. В Таганрогском заливе речной сток Дона играет ключевую роль в поставке меди (65%) и цинка (93%), его вклад в поступление ртути и кадмия оценивается как умеренный — 33% и 23% соответственно. Уровень свинца, привносимого водами р. Дон, составляет всего 2%. Влияние реки Кубань на загрязнение собственно моря всеми рассмотренными металлами не превышает 10%.

Водообмен через Должанский пролив характеризуется приблизительно равными потоками тяжелых металлов в обоих направлениях. Тем не менее,

поступление свинца и кадмия превалирует из Азовского моря, в то время как ртуть, цинк и медь в более значимых объемах поступают со стороны Таганрогского залива. Исследование показывает, что Азовское море может являться источником загрязнения вод Черного моря свинцом, кадмием и цинком. В отношении переноса меди наблюдается сопоставимая интенсивность для обеих морей, хотя в некоторые периоды преобладает поступление из Черного моря, а в другие годы значительный вклад вносит Азовское море. Ртутью наиболее загрязнены черноморские воды.

Исследования показывают, что в последние годы в отношении меди превышена ассимиляционная емкость экосистемы Азовского моря.

Список литературы

1. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г.Г. Матишов, Ю.М. Гаргопа, С.В. Бердников, С.Л. Дженюк. Южн. науч. центр РАН. М.: Наука, 2006. 304 с.
2. Альтман, Э.Н. Исследование водообмена между Черным и Азовским морями. Сборник работ ЛЮМ ГОИН. 1972. Вып.11. С. 3–42.
3. Бронфман А.М. Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 270 с.
4. Ильин Ю.П., Симов В.Г., Репетин Л.Н. Проблемы и перспективы мониторинга водного баланса Черного и Азовского морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. №22. С. 171–181.
5. Бердников С.В., Герасюк В.С., Клещенков А.В., Кулыгин В.В., Лихтанская Н.В., Шевердяев И.В. Оценки влияния нагонных явлений на потенциал накопления соединений тяжелых металлов в почве дельты Дона в период маловодья (2007–2020 гг.) // Водные биоресурсы и среда обитания. 2024. Т. 7, № 4. С. 7–21. DOI: https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_7.
6. Piatinskii, M.M., Bitiutskii, D.G., Mirzoyan, A.V., Luzhniak, V.A., Belousov, V.N., Afanasyev, D.F., Zhukova, S.V., Kulba, S.N., Zhivoglyadova, L.A., Hrenkin, D.V., et al. The Long-Term Annual Datasets for Azov Sea Basin Ecosystems for 1925–2024 and Russian Sturgeon Occurrences in 2000–2024. *Data* 2025, 10, 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/data10050057>
7. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В. Причины стремительного роста солености воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 760–778.
8. Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» URL: <http://publication.pravo.gov.ru> (дата обращения 02.10.2025).
9. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко И.Ф., Темердашев З.А. Геосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства, 2007. 324 с.
10. Обзор фоновое состояние окружающей природной среды на территории стран СНГ / под редакцией Г. М. Черногаевой. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Институт глобального климата и экологии имени Ю.А. Израэля. Москва : Росгидромет, 2019–2023 гг. [Электронный ресурс]. URL: http://downloads.igce.ru/publications/obz_fon_2/of_2024.pdf (дата обращения: 04.10.2025).
11. Качество поверхностных вод Российской Федерации / Ежегодник. 2019–2023. Ростов-н/Д.: Изд-во Гидрохимического института Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Ежегодники о загрязнении окружающей среды (по компонентам). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/?ysclid=mgafwk7553452615881> (дата обращения: 04.04.2025).
12. Симов В.Г., Морозов В.И., Фомина И.Н., Мартынов Е.С. Водообмен Таганрогского залива с Азовским морем // Морской гидрофизический журнал. 2013. №4. С.73–82.

ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.

13. Буфетова М. В., Коршенко А.Н. Загрязнение вод Таганрогского и Темрюкского заливов Азовского моря ртутью в 1991–2023 гг. / Моря России: современные методы исследований и их практические применения: материалы VIII Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2024. С. 124–125.
14. Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Геворкян Ж.В., Евсеева А.И. Динамика распределения тяжёлых металлов в водной толще северо-восточной части Чёрного моря после 2000 г. // Труды ВНИРО. 2021. Т. 183. С. 96–112.
15. Завьялов И.Б., Осадчиев А.А., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Гончаренко И.В. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–386. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157421030199>.
16. Чужикова-Проскурнина О.Д. Проскурнин В.Ю., Терещенко Н.Н., Кобечинская В.Г. Тяжёлые металлы в прибрежных водах российского сектора Чёрного и Азовского морей // Экосистемы. 2022. № 31. С.111–122.
17. Стецюк А.П., Егоров В.Н. Концентрирование ртути взвешенным веществом поверхностной морской воды Азово-Черноморского бассейна // Экосистемы. 2024. Вып. 38. С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-38-7-16>.
18. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 237 с.

**THE INFLUX OF HEAVY METALS INTO THE AZOV SEA WITH WATER
BALANCE COMPONENTS IN 2019–2023**

Bufetova M. V.

Russian state geological prospecting University Sergo Ordzhonikidze (MGRI), Moscow, Russian Federation

E-mail: mbufetova@mail.ru

The Sea of Azov has a high economic and recreational potential, has the status of a fishery reservoir of the highest category, therefore, the study of pollution of this water body seems to be an urgent task. Environmentally significant pollutants entering the Azov Sea include heavy metals.

One of the priority metals for environmental monitoring of the Sea of Azov are mercury, cadmium, lead, copper and zinc, which have a toxicological limiting indicator of harmfulness.

Water balance is the most important complex regime-forming factor of the Sea of Azov. Along with geoclimatic conditions, it defines the main features of the hydrological and hydrochemical regimes of the seas.

The purpose of the work was to assess the flows of heavy metals (Hg, Pb, Cd, Cu, Zn) into the open part of the Sea of Azov and the Taganrog Bay with the main components of the water balance - atmospheric precipitation, river runoff, as a result of water exchange through the Dolzhansky and Kerch straits.

The results showed that precipitation is a significant source of mercury and zinc entering the Sea of Azov (58 and 28%, respectively). In the case of lead, cadmium and copper, their share does not exceed 5%. In the Taganrog Bay, the Don river flow plays a key role in the supply of copper (65%) and zinc (93%), its contribution to the supply of mercury and cadmium is estimated as moderate – 33% and 23%, respectively. The level of lead introduced by the waters of the Don River is only 2%. The influence of the Kuban River

on the pollution of the sea itself with all the metals considered does not exceed 10%. Water exchange through the Dolzhansky Strait is characterized by approximately equal flows of heavy metals in both directions. Nevertheless, the supply of lead and cadmium prevails from the Sea of Azov, while mercury, zinc and copper in more significant volumes come from the Taganrog Bay.

The study shows that the Sea of Azov can be a source of pollution of the Black Sea waters with lead, cadmium and zinc. There is controversy in the estimation of copper content. If we proceed from the highest indicators of copper concentration in the Black Sea water, then the transfer of this element to the Sea of Azov will be more significant. However, if you focus on the smallest values, the situation can be reversed. However, analysis of perennial data on copper concentrations in both seas demonstrates that copper levels are virtually identical. The Black Sea waters are most polluted with mercury. The Black Sea waters are most polluted with mercury.

It should be noted that the flows of heavy metals with components of the water balance described above are only a general conceptual scheme, and the real distributions of metals at specific points in time due to hydrological features characteristic of the studied waters may differ from it.

By knowing the concentration of the pollutant in the aqueous medium at a given time and having information about the volume of that medium, one can determine the total stock (or pool) of that pollutant. In the context of this study, a heavy metal "pool" means a medium capable of accumulating or losing metal over time. Such a medium can be a certain volume of water, in particular, the water mass of the Taganrog Bay (25 km^3) or the sea itself (231 km^3). The maximum pool of heavy metals in the water of the sea itself and the Taganrog Bay is calculated using the maximum permissible concentration of metals. In this context, the limit pool means the assimilation capacity of the waters of the Sea of Azov in relation to the metals in question. In this context, the limit pool means the assimilation capacity of the waters of the Sea of Azov in relation to the metals in question. The analysis shows the excess of the maximum pool of lead and copper in the water area of the sea itself in different years. For example, in 2023, the maximum lead pool in the open sea was exceeded by 31%, for copper — by 68%. The average copper pool for 2010–2023 exceeds the limit pool by 36.5%. For other metals, the potential for further accumulation remains within the permissible values. Thus, studies show that in recent years, the assimilation capacity of the ecosystem of the Sea of Azov has been exceeded in relation to copper.

Keywords: Sea of Azov, mercury, lead, cadmium, copper, zinc, heavy metal streams, pool.

References

1. Zakonomernosti e`kosistemny`x processov v Azovskom more / G.G. Matishov, Yu.M. Gargopa, S.V. Berdnikov, S.L. Dzhenyuk. Yuzhn. nauch. centr RAN. M. : Nauka, 2006. 304 s. (in Russian).
2. Al'tman, E.N. Issledovanie vodoobmena mezhdru Cherny`m i Azovskim moryami (Study of Water Exchange Between the Black and Azov Seas). Sbornik rabot LYuM GOIN. 1972. Vy`p.11. S. 3–42. (in Russian).
3. Bronfman A.M. Khlebnikov E.P. Azovskoe more. Osnovy` rekonstrukcii. L.: Gidrometeoizdat, 1985. 270 s. (in Russian).

ПОСТУПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АЗОВСКОЕ МОРЕ
С КОМПОНЕНТАМИ ВОДНОГО БАЛАНСА В 2019–2023 ГГ.

4. Il'in Yu.P., Simov V.G., Repetin L.N. Problemy i perspektivy monitoringa vodnogo balansa Chernogo i Azovskogo morej // *E`kologicheskaya bezopasnost` pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. 2010, 22. 171–181. (in Russian).
5. Berdnikov S.V., Gerasyuk V.S., Kleshhenkov A.V., Kulygin V.V., Lixtanskaya N.V., Sheverdyayev I.V. Ocenki vliyaniya nagonny`x yavlenij na potencial nakopleniya soedinenij tyazhely`x metallov v pochve del'ty` Dona v period malovod`ya (2007–2020 gg.) // *Vodny`e bioresursy` i sreda obitaniya*. 2024, 7 (4). 7–21. DOI: https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_4_7. EDN: PGPLKL. (in Russian).
6. Piatinskii, M.M., Bitiutskii, D.G., Mirzoyan, A.V., Luzhniak, V.A., Belousov, V.N., Afanasyev, D.F., Zhukova, S.V., Kulba, S.N., Zhivoglyadova, L.A., Hrenkin, D.V., et al. The Long-Term Annual Datasets for Azov Sea Basin Ecosystems for 1925–2024 and Russian Sturgeon Occurrences in 2000–2024. *Data* 2025, 10, 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/data10050057>
7. Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V. Prichiny` stremitel'nogo rosta solenosti vody` Azovskogo morya v XXI veke // *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2023. 39 (6). 760–778. (in Russian).
8. Prikaz Federal'nogo agentstva po rybolovstvu ot 26.05.2025 № 296 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody` vodny`x ob`ektov ryboxozhaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimy`x koncentracij zagryaznyayushhix veshhestv v vodax vodny`x ob`ektov ryboxozhaystvennogo znacheniya». [Elektronnyy resurs]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru> (data obrashheniya 02.10.2025). (in Russian).
9. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko I.F., Temerdashev Z.A. Geosistema Azovskogo morya: antropogennoe zagryaznenie. Krasnodar: Azovskij nauchno-issledovatel'skij institut rybnogo khozaystva, 2007. 324 s. (in Russian).
10. Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushhej prirodnoj sredy` na territorii stran SNG / pod redakciej G. M. Chernogaevoy. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushhej sredy`, Institut global'nogo klimata i e`kologii imeni Yu. A. Izrae'lya. Moskva : Rosgidromet, 2010–2023 gg. [Elektronnyy resurs]. URL: http://downloads.igce.ru/publications/obz_fon_2/of_2024.pdf (data obrashheniya: 04.10.2025). (in Russian).
11. Kachestvo poverxnostny`x vod Rossijskoj Federacii / Ezhegodnik. 2010–2023. Rostov-n/D.: Izdvo Gidroximicheskogo instituta Federal'noj sluzhby` po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushhej sredy`. Ezhegodniki o zagryaznenii okruzhayushhej sredy` (po komponentam). [Elektronnyy resurs]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/ezhegodniki/?ysclid=mgafwk7553452615881> (data obrashheniya: 04.04.2025). (in Russian).
12. Simov V.G., Morozov V.I., Fomina I.N., Marty`nov E.S. Vodoobmen Taganrofskogo zaliva s Azovskim morem // *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2013. 4. 73–82. (in Russian).
13. Bufetova M. V., Korshenko A.N. Zagryaznenie vod Taganrofskogo i Temryukskogo zalivov Azovskogo morya rtut`yu v 1991–2023 gg. / *Morya Rossii: sovremennye metody` issledovanij i ix prakticheskie primeneniya : materialy` VIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii*. Sevastopol`, 2024. 124–125. (in Russian).
14. Korablina I.V., Barabashin T.O., Gevorkyan Zh.V., Evseeva A.I. Dinamika raspredeleniya tyazhyoly`x metallov v vodnoj tolshhe severo-vostochnoj chasti Chyornogo morya posle 2000 g. // *Trudy` VNIRO*, 2021. 183. 96–112. (in Russian).
15. Zav`yalov I.B., Osadchiev A.A., Zav`yalov P.O., Kremenezkij V.V., Goncharenko I.V. Issledovanie vodoobmena v Kerchenskom prolive po istoricheskim dannym i dannym kontaktny`x izmerenij 2019 g. // *Okeanologiya*, 2021. 61 (3). 377–386. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157421030199>. (in Russian).

16. Chuzhikova-Proskurnina O.D. Proskurnin V.Yu., Tereshhenko N.N., Kobchinskaya V.G. Tyazhyolye metally v pribrezhnykh vodax rossijskogo sektora Chyornogo i Azovskogo morej // *E`kosistemy*, 2022. 31. 111–122. (in Russian).
17. Steczyuk A.P., Egorov V.N. Koncentrirovaniye rtuti vzveshenny`m veshhestvom poverkhnostnoj morskoy vody` Azovo-Chernomorskogo bassejna // *E`kosistemy*, 2024. 38. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.29039/2413-1733-2024-38-7-16>. (in Russian).
18. *Gidrometeorologiya i gidroximiya morej SSSR. T. V. Azovskoe more*. L.: Gidrometeoizdat. 1991. 237 s. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.10.2025 г.