

Концентрирование ртути взвешенным веществом поверхностной морской воды Азово-Черноморского бассейна

Стецюк А. П., Егоров В. Н.

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Севастополь, Россия
alex-ra-777@mail.ru, egorov.ibss@yandex.ru

Исследовано содержание ртути в воде и во взвешенном веществе Чёрного и Азовского морей. Получено, что в 2020 году концентрация общей формы ртути в воде не превышала предельно допустимых значений ($100 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$) и в Чёрном море изменялась в пределах от 12 до $65 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$, а в Азовском от 22 до $59 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$. Варьирование коэффициентов накопления ртути взвесями составило от $14,5 \times 10^3$ до $1666,7 \times 10^3$ единиц в Чёрном море и от $14,5 \times 10^3$ до $272,7 \times 10^3$ в Азовском море. Концентрирующая способность взвесей была максимальной в Чёрном море, на выходе из Керченского пролива, что может свидетельствовать о повышенной антропогенной нагрузке на данную акваторию в изученный период времени. Определена тенденция насыщения взвесей ртутью в Чёрном море с повышением её концентрации в водной среде, и тренд снижения содержания ртути во взвесах Азовского моря по мере возрастания ртутного загрязнения вод. Установлено, что в условиях кардинального различия тенденций изменения концентрации ртути во взвесах Чёрного и Азовского морей, параметры аппроксимирующих экспоненциальных зависимостей между коэффициентами накопления и концентрацией ртути в воде для Чёрного и Азовского морей статистически достоверно не отличались, а объединённая выборка данных по обоим морям удовлетворительно описывалась как экспоненциальной, так и степенной функциями. Полученные результаты в целом свидетельствовали о снижении концентрирующей способности взвесей при увеличении концентрации ртути в воде. Пул ртути на взвешенном веществе варьировал от 3 до 29 % для Чёрного моря и от 6 до 55 % – для Азовского.

Ключевые слова: ртуть, взвешенное вещество, коэффициенты накопления, Чёрное море, Азовское море.

ВВЕДЕНИЕ

Важным параметром концентрирования загрязняющих веществ является взвешенное вещество, состоящее как из природных, так и антропогенных компонентов, имеющих различное происхождение: биогенное, терригенное, хемогенное, вулканогенное, космогенное. Основная масса взвешенного вещества образуется автохтонно за счёт первичной продукции фитопланктона, синтезирующейся в верхнем фотическом водном слое (Витюк, 1983). В приповерхностных горизонтах водной толщи Чёрного моря – в зоне максимального фотосинтеза, происходит заметное концентрирование ртути организмами планктонного сообщества, что характеризуется повышением скорости поглощения ^{203}Hg как мелкими ($0,4\text{--}1,2 \text{ мкм}$), так и более крупными (более $1,2 \text{ мкм}$) фракциями взвешенного вещества (Костова и др., 2000). Интенсивное связывание ртути с твердыми взвешенными частицами приводит к тому, что фактор концентрирования составляет величину порядка $1,3\text{--}1,8 \times 10^5$, то есть доля ртути, связанной с взвешенными частицами (размером менее $0,45 \text{ мкм}$), в 10 тыс. раз больше, чем растворенная доля (Нильсон, 1998). Чрезвычайное обогащение взвеси ртутью может свидетельствовать об очень сильном загрязнении акватории. Поэтому выявление особенностей концентрирования ртути взвешенным веществом представляет интерес для оценки экологического состояния различных акваторий.

Цель настоящей работы – исследовать распределение и способность взвесей концентрировать ртуть в поверхностных водах Чёрного и Азовского морей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Экспедиционные исследования были выполнены в 2020 году. Пробы были отобраны как в прибрежной, так и в глубоководной акваториях Чёрного и Азовского морей в ходе рейсов 113 и 114 НИС «Профессор Водяницкий». Карта отбора проб выполнена с помощью программы «Гидролог» (Belokopytov, 1998) и представлена на рисунке 1.

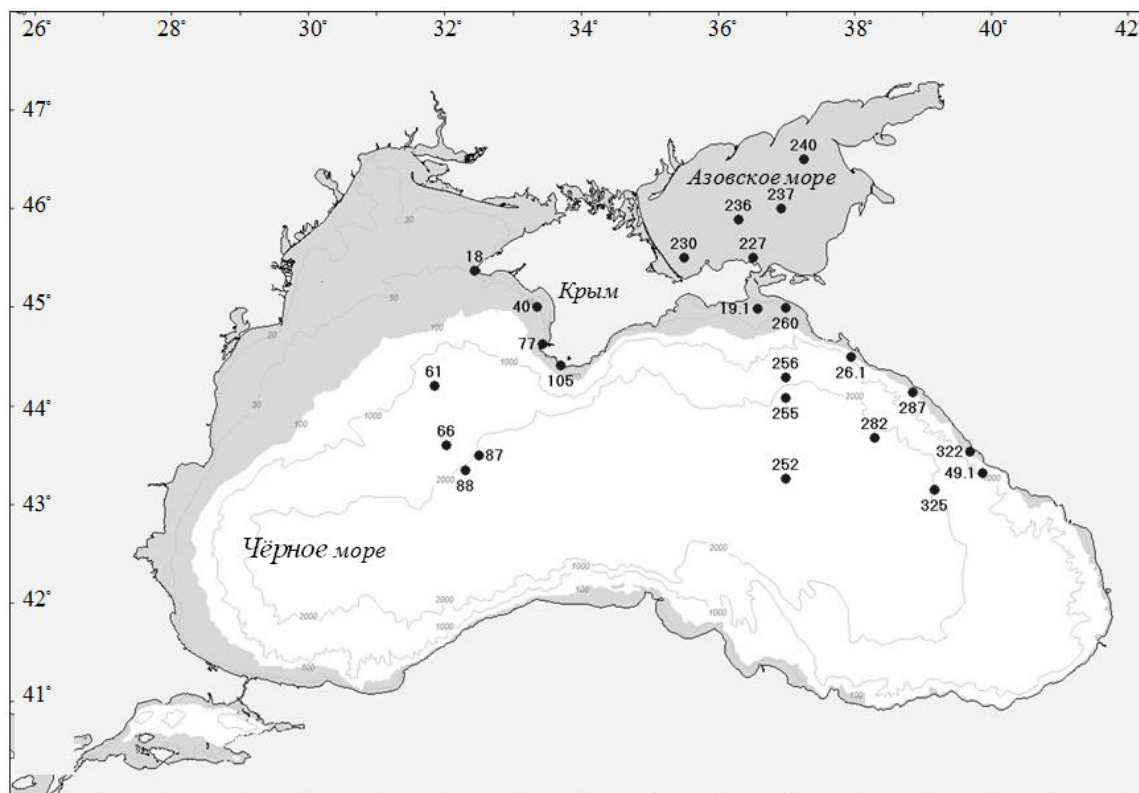


Рис. 1. Карта отбора проб с указанием расположения станций

Воду для исследования отбирали с поверхностного горизонта Чёрного и Азовского морей. Пробы объёмом 1 литр фильтровали через предварительно взвешенный ядерный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Растворённую форму ртути определяли в фильтрате, а во взвеси на фильтре – взвешенную. После предварительной подготовки по методике (Стецюк, Поповичев, 2022), проводили измерения концентрации ртути на анализаторе Hiranuma-1 методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Калибровали прибор с помощью стандартных образцов раствора ионов ртути (II) ГСО 7879–2001. После проведения «холостой калибровки» без добавления ртути, была проведена калибровка с использованием серии растворов с различной концентрацией ртути. Также проводился эксперимент для оценки влияния матрицы с использованием метода стандартных добавок при разных диапазонах концентраций ртути. В результате была получена относительная погрешность измерений 6,8 % с пределом обнаружения, рассчитанным по градуировочному графику – 2,7 нг×л⁻¹. Средняя относительная ошибка для концентрации взвешенной формы ртути (нг×г⁻¹) с учетом относительных погрешностей концентраций ртути и взвешенного вещества составила 24 %. Процент извлечения относительно аттестованного значения в референсном образце СДПС-1 составил 23 %. Концентрация растворённой формы ртути в морской воде определялась на литр, а во взвесах – на грамм сухой массы. За окончательный результат принято среднеарифметическое значение результатов двух параллельных определений.

Для расчёта коэффициента накопления ртути взвешенным веществом (K_n) применяли формулу (Поликарпов, Егоров, 1986):

$$K_n = 1000 C_{sed}/C_w \quad (1)$$

где: C_{sed} – удельная концентрация ртути во взвешенном веществе, $нг \times г^{-1}$ сухой массы;
 C_w – концентрация растворенной формы ртути в воде, $нг \times л^{-1}$.

Ряды наблюдений аппроксимировались стандартными линейной, экспоненциальной и степенной функциями. Статистическая значимость их параметров оценивалась коэффициентом детерминации R^2 .

Пул ртути во взвеси (Π_{sed} , %) – процент извлечения взвесью из морской среды, рассчитывали по формуле (Поликарпов, 1964; Егоров, 2012):

$$\Pi_{sed}(\%) = \frac{m_{уд} K_n}{(m_{уд} K_n + 1)} \times 100 \quad (2)$$

где $m_{уд}$ – удельная масса сухого взвешенного вещества морской воды в частях на 1 млн (например, $г \times м^{-3}$ или $мг \times л^{-1}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений и расчетные данные способности взвесей Чёрного и Азовского морей концентрировать ртуть представлены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты районов и глубин станций, концентрация ртути в воде
(C_w – растворённая форма), во взвешенном веществе (C_{sed} – взвешенная форма),
коэффициенты накопления и пул Hg на взвесьях в морской воде

№ рейса	№ станции	Дата отбора	Координаты		Глубина станции, м	C_w , $нг \times л^{-1}$	$m_{уд}$, $мг \times л^{-1}$	C_{sed} , $нг \times г^{-1}$ сухой массы	$K_n \times 10^3$	Пул Hg на взвеси, Π_{sed} (%)
			с. ш.	в. д.						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
113	18	26.06.2020	45°22.205	32°26.273	45	40	8,6	581	14,5	11
	40	27.06.2020	45°00.178	33°20.763	30	20	1,8	1667	83,3	13
	61	24.06.2020	44°12.377	31°50.473	1301	30	2,8	1429	47,6	12
	77	27.06.2020	44°37.839	33°25.671	75	30	1,6	1875	62,5	9
	87	05.06.2020	43°30.027	32°29.959	2070	30	1,9	1579	52,6	9
	105	06.06.2020	44°24.524	33°41.979	51	40	0,7	5714	142,9	9
	19.1	15.06.2020	44°58.889	36°34.465	30	15	0,2	25000	1666,7	25
	252	19.06.2020	43°15.399	36°58.998	2147	25	2,1	952	38,1	7
	256	19.06.2020	44°17.230	36°59.700	1950	10	0,8	5000	500,0	29

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
113	260	19.06.2020	44°59.555	36°59.515	25	25	3,1	968	38,7	11
	26.1	20.06.2020	44°29.924	37°56.477	727	30	0,6	1667	55,6	3
	282	21.06.2020	43°40.396	38°17.420	2100	45	0,3	6667	148,1	4
	227*	18.06.2020	45°30.131	36°30.715	12	50	2,6	1154	23,1	6
	230*	17.06.2020	45°29.960	35°30.464	10	45	2,7	1481	32,9	8
	236*	17.06.2020	45°53.286	36°17.896	12	30	2,2	1364	45,5	9
	240*	17.06.2020	46°30.064	37°15.030	10,5	55	5,0	800	14,5	7
114	19.1	24.09.2020	44°58.214	36°33.390	30	60	0,5	10000	166,7	8
	26.1	30.09.2020	44°30.094	37°56.304	660	35	0,7	7143	204,1	13
	322	02.10.2020	43°31.747	39°41.214	77	40	0,8	3750	93,8	7
	325	03.10.2020	43°08.698	39°09.740	1950	20	0,7	5714	285,7	17
	40	08.10.2020	45°00.235	33°20.701	30	20	1,0	2000	100,0	9
	49.1	02.10.2020	43°18.820	39°52.629	1020	15	1,3	2308	153,8	17
	66	16.09.2020	43°36.023	32°01.405	1945	25	2,2	2273	90,9	17
	77	07.10.2020	44°38.097	33°25.895	70	30	1,5	2000	66,7	9
	88	17.09.2020	43°20.658	32°18.322	2050	20	1,8	2778	138,9	20
	105	19.09.2020	44°24.623	33°41.886	49	10	1,1	1818	181,8	17
	227*	27.09.2020	45°30.035	36°30.667	10	30	4,2	1667	55,6	19
	230*	27.09.2020	45°29.924	35°30.35	9	20	2,6	3846	192,3	33
	237*	27.09.2020	46°00.135	36°54.975	10	10	4,4	2727	272,7	55
	240*	28.09.2020	46°30.093	37°15.006	10	26	2,7	1481	57,0	13
	255	04.10.2020	44°04.800	36°59.452	2090	30	1,2	2500	83,3	9
	260	29.09.2020	44°59.644	36°59.957	24	20	1,0	5000	250,0	20
	282	03.10.2020	43°40.414	38°17.340	1870	10	1,1	3636	363,6	29
287	01.10.2020	44°08.300	38°50.733	117	15	1,1	5455	363,6	29	
Средние значения для Черного моря						26,5	1,6	4210,5	207,4	14,0
Средние значения для Азовского моря						33,3	3,3	1815	86,7	18,8

Примечание к таблице. Номера станций в Азовском море отмечены звездочкой (*).

В целом, представленные в таблице 1 результаты наблюдений и расчётов характеристик концентрирующей способности взвешенного вещества в отношении ртути показали следующее. За исследуемый период времени, удельная масса взвешенного вещества в морской воде ($m_{уд}$) варьировала в пределах 0,2–8,6 мг×л⁻¹, концентрация ртути во взвеси морской воды (C_{sed}) изменялась от 581 до 25000 нг×г⁻¹ сухой массы. Среднее значение $m_{уд}$ в Чёрном море составило 1,6 мг×л⁻¹, в Азовском море – 3,3 мг×л⁻¹. Средняя концентрация взвешенной ртути в нг×л⁻¹ также была ниже в Чёрном море, чем в Азовском. Следует отметить, что максимальная концентрация ртути во взвеси (25000 нг×г⁻¹) была определена на станции 19.1, находящейся в Черноморской зоне Керченского пролива. Очевидно, что на

концентрационные характеристики взвеси в этом районе влияли воды как Чёрного, так и Азовского моря. Поэтому при анализе концентрационных характеристик взвесей отдельно Чёрного и Азовского морей полученные на ст. 19.1 данные не учитывались. Коэффициенты накопления варьировали в пределах от $14,5 \times 10^3$ до $1666,7 \times 10^3$, а средние значения коэффициентов накопления ртути в Чёрном море имели значение $207,4 \times 10^3$, а в Азовском море $86,7 \times 10^3$ (табл. 1).

Согласно проведённым ранее исследованиям (Стецюк, 2020; Стецюк, 2022), в период 2011–2019 годов, среднегодовая максимальная концентрация ртути была обнаружена в 2017 году и была равна $123,9 \text{ нг} \times \text{л}^{-1}$, что незначительно превышало ПДК. В течение 2017–2020 годов концентрация ртути в Чёрном море постепенно снижалась. По литературным данным, среднее значение ртути в Азовском море за период 1986–2010 годов составляло $0,26 \text{ мкг} \times \text{л}^{-1}$ (2,6 ПДК) (Буфетова, 2015). Распределение ртути в Азовском море было более варибельным, чем других тяжелых металлов в период с 1991 по 2015 год (Матишов и др., 2017), и часто превышало ПДК. В 2002 году превышение нормы для ртути в водной среде наблюдалось практически на всей исследуемой акватории, и в это время был зафиксирован абсолютный максимум – 2,1 ПДК (Петренко и др., 2015).

На рисунке 2 представлены концентрации общей формы ртути (сумма растворённой и взвешенной) в акватории Чёрного и Азовского морей.

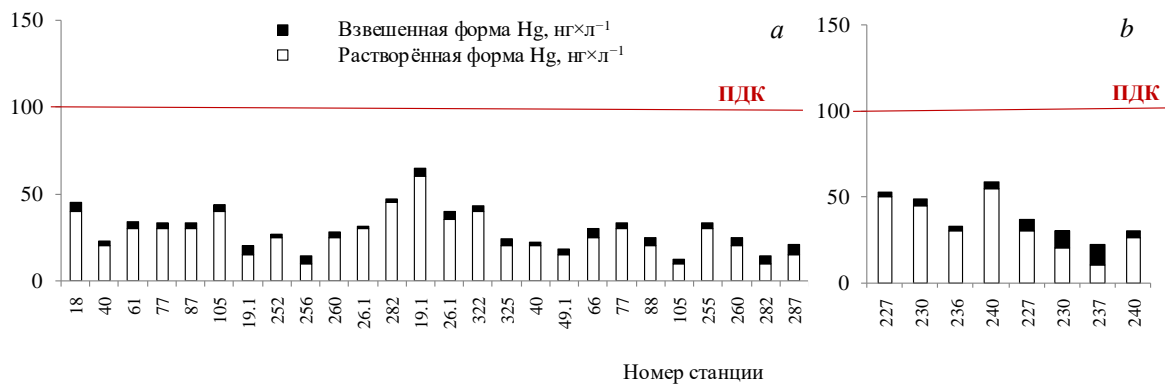


Рис. 2. Концентрация ртути в поверхностной акватории: Чёрного (a) и Азовского морей (b)

ПДК – предельно-допустимая концентрация.

Представленные на рисунке 2 данные показали, что ни на одной станции предельно-допустимая концентрация ртути (ПДК) не была превышена. В Чёрном море на всех станциях, превалировала растворённая форма ртути (рис. 2a). В Азовском море лишь на одной станции, концентрация взвешенной формы ртути незначительно преобладала над растворённой (рис. 2b).

Концентрационные характеристики взвесей в отношении ртути показаны на рисунке 3.

По результатам аппроксимации представленного рисунке 3a ряда наблюдений линейными функциями получено следующее. Для Чёрного моря зависимость между C_{sed} и C_w при $R^2=0,159$ имела вид:

$$C_{\text{sed}} = 1254,08 + 78,70 C_w \quad (3)$$

Для Азовского моря при $R^2=0,565$:

$$C_{\text{sed}} = 3413,12 - 48,06 C_w \quad (4)$$

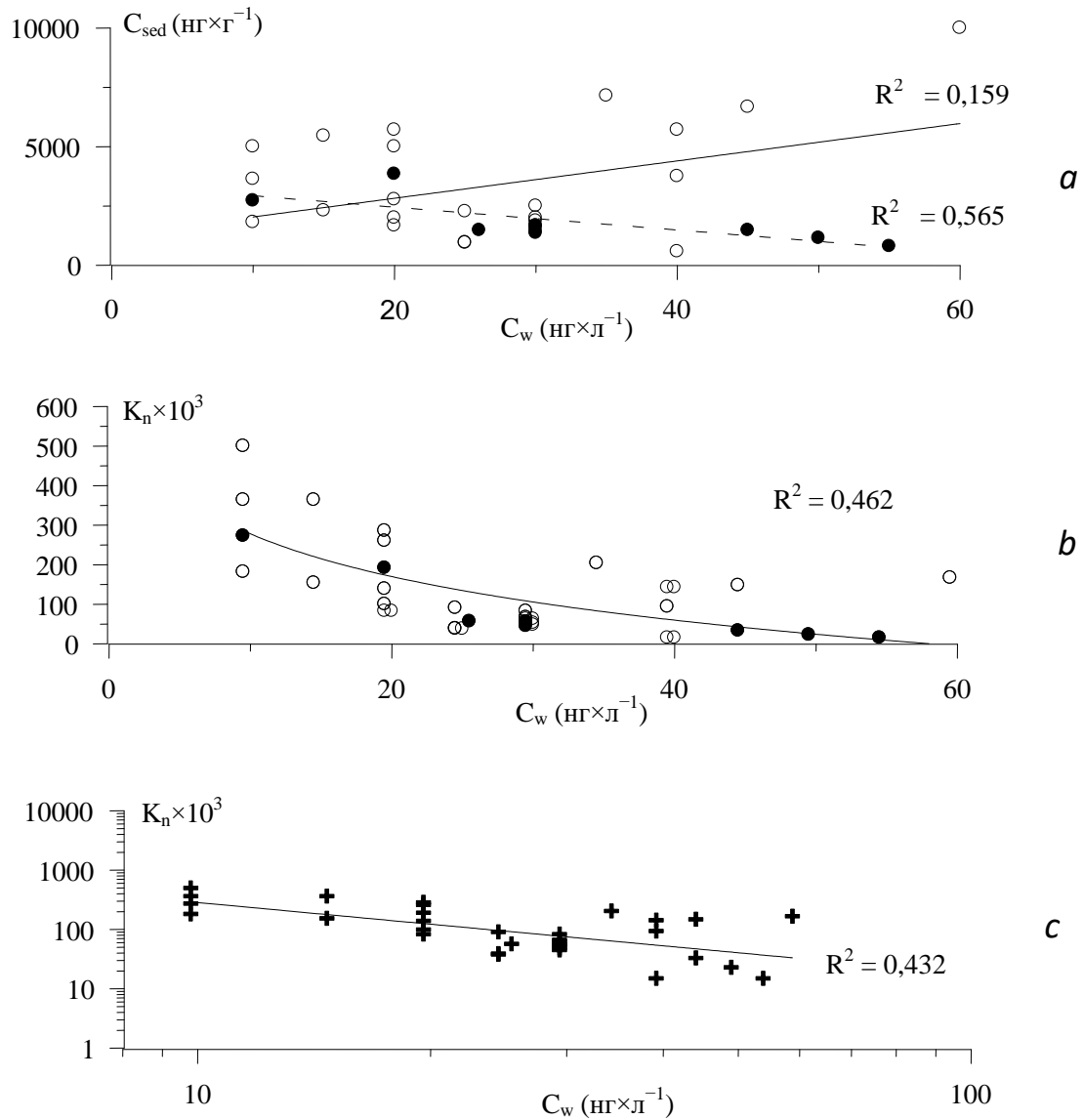


Рис. 3. Концентрационные характеристики взвесей в отношении ртути
a – изменение концентрации ртути во взвесах C_{sed} от концентрации ртути в воде (C_w) Черного (o) и Азовского (•) морей; *b* – изменение коэффициентов накопления (K_n) ртути взвесьями Черного (o) и Азовского (•) морей; *c* – объединенная выборка изменения коэффициентов накопления (K_n) ртути от C_w в логарифмическом масштабе (+).

Сравнение соотношений (3) и (4) показало, что зависимости изменения содержания ртути во взвесах в Чёрном и в Азовском морях кардинально различались. В Чёрном море наблюдалась тенденция насыщения ртутью взвесей при повышении её концентрации в водной среде, а в Азовском море – снижение. В соответствии с этим, отличались и тренды изменения экотоксикологической опасности в регионах.

Аппроксимация результатов, представленных на рисунке 3*b* наблюдений экспоненциальными функциями, позволила установить, что для Чёрного моря зависимость между K_n и C_w при $R^2=0,374$ имела вид:

$$K_n = 651,21 - 156,96 \times \log(C_w) \quad (5)$$

Для Азовского при $R^2=0,565$:

$$K_n = 615,51 - 156,18 \times \log(C_w) \quad (6)$$

Сравнение расчетных данных показало, что различие параметров уравнений (5) и (6) составляет менее 0,5 и 5,8 %. В целом, сравнение графических материалов (рис. 3b) и расчётных данных показало, что с учетом погрешности измерений эти зависимости практически не различались. Это позволило со статистической обеспеченностью, характеризуемой коэффициентом дискриминации $R^2=0,462$, получить обобщённую зависимость изменения коэффициента накопления ртути взвесями от изменения её концентрации в воде Чёрного и Азовского морей, представленную на рисунке 3b:

$$K_n = 658,00 - 161,51 \times \log(C_w) \quad (7)$$

Следует отметить, что учтённый через коэффициенты накопления фактор концентрирующей способности взвесей, а также донных отложений, широко используется для оценки и прогноза потоков биогеохимического самоочищения морской воды. В этих работах связи между C_{sed} , K_n и C_w исследуются в виде уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха, которые сводятся к степенным функциям (Егоров и др., 2018; Стецюк, Егоров, 2018; Egorov, 2021; Егоров и др., 2023). Представленный на рисунке 3c график показал, что выраженные через K_n ряды наблюдений с коэффициентом дискриминации ($R^2=0,432$) аппроксимируются степенной функцией вида:

$$K_n = 4708 C_w^{-1,21} \quad (8)$$

Сравнение показало, что в пределах природной variability распределения выборок из генеральных рядов распределения ртути в воде и взвесях, использование зависимостей (7) при ($R^2=0,565$) и (8) при ($R^2=0,432$) практически инвариантно.

Таким образом, на примере Чёрного и Азовского морей проявилась закономерность, заключающаяся в том, что исследование зависимостей изменения концентраций ртути во взвесях и водной среде может отражать экотоксикологические тренды акваторий. Те же данные, выраженные в коэффициентах накопления, могут одновременно использоваться для оценки предельно допустимого загрязнения взвесей $C_{пдк}=K_n$ (ПДК), для прогнозирования изменения их концентрирующей функции с изменением ртутного загрязнения вод, а также для изучения влияния взвешенного вещества в самоочищении морской среды.

Расчеты пулов представлены в последней графе таблицы 1. Они показали, что пул ртути во взвесях Чёрного моря варьировал в пределах 3–29 % и в среднем составлял 14,0 %, а Азовского, соответственно 6–55 % и 18,8 %.

Анализ литературных данных показал, что за период 2012–2017 годов зависимость изменения пула ртути во взвесях (Π_{sed}) от изменения ртутного загрязнения вод (C_w) имела слабо выраженный спадающий тренд ($R^2=0,183$) для весеннего сезона в акватории шельфа (Стецюк, Егоров, 2018).

По результатам наблюдений 2011–2017 годов было выявлено, что зависимость Π_{sed} от C_w для разных сезонов и акваторий в основном имела слабо выраженные спадающие тренды, за исключением весеннего периода в глубоководной зоне ($R^2=0,85$) (Стецюк, 2020). В тот же сезон, в период 2018–2019 годов, зависимость изменения пула ртути во взвесях мелководной акватории шельфа от концентрации растворённой ртути в воде имела достаточно достоверно выраженный тренд уменьшения процентного пула ртути во взвесях с увеличением концентрации ртути в воде с $R^2=0,85$, а в глубоководной акватории аналогичный тренд имел менее выраженную зависимость ($R^2=0,24$) (Стецюк, Поповичев, 2022). В летний период 2011–2017 годов, R^2 составил 0,01 для прибрежной акватории и 0,61 – для глубоководной. Осенью, для прибрежной акватории $R^2=0,57$ и 0,47 – для глубоководной (Стецюк, 2020). В период 2018–2019 годов, зависимости изменения Π_{sed} от C_w в летне-осенний период имели слабо выраженные тренды, составившие $R^2=0,17$ для прибрежной акватории и $R^2=0,09$ для

глубоководной акватории летом; $R^2=0,25$ для прибрежной акватории и $R^2=0,17$ для глубоководной акватории осенью. В 2020 году, зависимость изменения пула ртути на взвесьях с увеличением концентрации ртути в воде имеет более выраженный тренд для Азовского моря ($R^2=0,889$) и менее выраженный для Чёрного моря ($R^2=0,571$) в летне-осенний период (рис. 4).

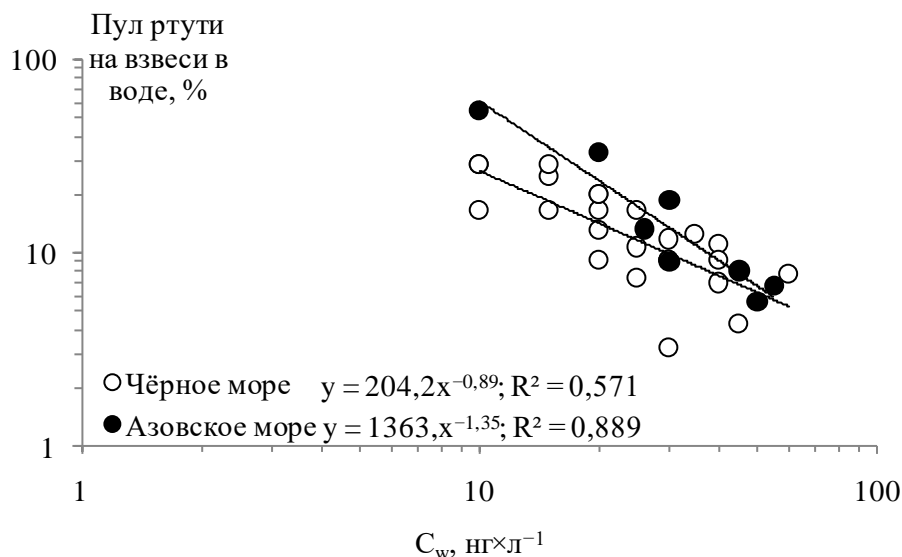


Рис. 4. Зависимость изменения пула ртути во взвесьях от изменения концентрации ртути в воде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удельное содержание ртути в воде Чёрного моря варьировало в диапазоне $10\text{--}60 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$, а в воде Азовского $10\text{--}55 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$ со средними значениями, соответственно $26,5$ и $33,3 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$. Концентрация ртути во взвесьях Чёрного моря лежала в пределах $1,0\text{--}6,0 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$ со средним значением $3,6 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$, а Азовского моря, соответственно $3,0\text{--}12,0 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$ и в среднем $5,9 \text{нг}\times\text{л}^{-1}$. Тенденции изменения концентрации ртути во взвесьях Чёрного и Азовского морей кардинально различались. В Чёрном море наблюдался процесс насыщения взвесей ртутью, а в Азовском – тренд снижения концентрации ртути во взвесьях.

Коэффициенты накопления ртути взвесьями Чёрного моря изменялись в пределах от $14,5\times 10^3$ до $1666,7\times 10^3$ (в среднем $207,4\times 10^3$), а Азовского – от $14,5\times 10^3$ до $272,7\times 10^3$ единиц (в среднем $86,7\times 10^3$). Параметры аппроксимирующих экспоненциальных зависимостей между K_n и C_w для Чёрного и Азовского морей статистически достоверно не отличались, а объединенная выборка данных по обоим морям с достаточно значимой степенью статистической значимости ($R^2=0,432$) описывалась также степенной функцией. В период 2018–2019 годов зависимости изменения Π_{sed} от C_w в летне-осенний период имели слабо выраженные тренды, составившие $R^2=0,17$ для прибрежной акватории и $R^2=0,09$ для глубоководной акватории летом; $R^2=0,25$ для прибрежной акватории и $R^2=0,17$ для глубоководной акватории осенью. Пул ртути во взвесьях Чёрного моря варьировал в пределах $3\text{--}29\%$ и в среднем составлял $14,0\%$, а Азовского, соответственно $6\text{--}55\%$ и $18,8\%$.

Работа выполнена по теме государственного задания «Изучение биогеохимических закономерностей радиозкологических и хемозкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (проект 124030100127-7).

Проведенные исследования были выполнены в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН».

Список литературы

- Буфетова М. В. Загрязнение вод Азовского моря тяжелыми металлами // Юг России: экология, развитие. – 2015. – Т. 10, № 3. – С. 112–120.
- Витюк Д. М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. – Киев: Наук. думка, 1983. – 212 с.
- Егоров В. Н. Биогеохимические механизмы реализации компенсационного гомеостаза в черноморских экосистемах // Морской экологический журнал. – 2012. – Т. 11, № 4. – С. 5–17.
- Егоров В. Н., Гулин С. Б., Малахова Л. В., Мирзоева Н. Ю., Поповичев В. Н., Терещенко Н. Н., Лазоренко Г. Е., Плотицына О. В., Малахова Т. В., Проскурнин В. Ю., Сидоров И. Г., Стецюк А. П., Гулина Л. В. Нормирование качества вод севавтопольской бухты по потокам депонирования ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, ПХБ и ДДТ в донные отложения // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 188–195.
- Егоров В. Н., Мирзоева Н. Ю., Артёмов Ю. Г., Проскурнин В. Ю., Стецюк А. П., Марченко Ю. Г., Евтушенко Д. Б., Мосейченко И. Н., Чузикова-Проскурнина О. Д. Возможность реализации концепции устойчивого развития рекреационного побережья города Ялта в отношении биогенных элементов, радионуклидов, тяжёлых металлов и хлорорганических соединений (Крым, Чёрное море) // Морской биологический журнал. – 2023. – Т. 8, № 3. – С. 12–32. DOI: 10.21072/mbj.2023.08.3.02
- Костова С. К., Егоров В. Н., Поповичев В. Н. Экологические аспекты изучения загрязнения Черного моря ртутью // Чтения памяти Н. В. Тимофеева-Ресовского. – 2000. – С. 216–226.
- Матишов Г. Г., Буфетова М. В., Егоров В. Н. Нормирование потоков поступления тяжёлых металлов в Азовское море по оценкам интенсивности седиментационного самоочищения вод // Наука Юга России. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 44–58. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-44-58
- Нильссон А. Загрязнение Арктики. Доклад о состоянии окружающей среды Арктики. – СПб.: Гидрометеоздат, 1998. – VII [5]. – 188 с.
- Петренко О. А., Жугайло С. С., Авдеева Т. М. Результаты многолетних исследований уровня загрязнения морской среды Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – 2015. – Т. 53. – С. 4–18.
- Поликарпов Г. Г. Радиоэкология морских организмов. – М.: Атомиздат, 1964. – 295 с.
- Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. Морская динамическая радиохемозология. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
- Стецюк А. П. Концентрирование ртути во взвешенном веществе пены и воды Чёрного моря // Морской биологический журнал. – 2020. – Т. 5, № 3. – С. 74–84. <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.3.07>
- Стецюк А. П., Егоров В. Н. Способность морских взвесей концентрировать ртуть в зависимости от ее содержания в акваториях шельфа // Системы контроля окружающей среды. – 2018. – Вып. 13 (33). – С. 123–132. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-3-123-132>
- Стецюк А. П., Поповичев В. Н. Распределение ртути в поверхностной воде Черного моря и ее концентрирование во взвешенном веществе // Химия в интересах устойчивого развития. – 2022. – Т. 30, № 2. – С. 192–201. <https://doi.org/10.15372/KhUR2022373>
- Belokopytov V. N. «Oceanographer»: Applied software for oceanographic surveys // International Symposium on Information Technology in Oceanography (Goa, India, 12–16 October 1998). – Goa, India, 1998. – P. 79.
- Egorov V. N. Theory of Radioisotopic and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems. – Cham, Switzerland: Springer, 2021. – 320 p. DOI: 10.1007/978-3-030-80579-1

Stetsiuk A. P., Egorov V. N. Concentration of mercury in suspended matter in surface seawater of Azov-Black Sea basin // Ekosistemy. 2024. Iss. 38. P. 7–16.

The content of mercury in water and suspended matter in the Black Sea and the Sea of Azov was studied. The research established that in 2020 the concentration of total form of mercury in water did not exceed the maximum permissible values ($100 \text{ ng} \times \text{l}^{-1}$). In the Black Sea it varied from 12 to $65 \text{ ng} \times \text{l}^{-1}$, and in the Azov Sea from 22 to $59 \text{ ng} \times \text{l}^{-1}$. The variation in the coefficients of mercury accumulation in suspended matter was $(14.5\text{--}1666.7) \times 10^3$ units in the Black Sea and $(14.5\text{--}272.7) \times 10^3$ in the Sea of Azov. The maximum concentrating ability of suspended matter was observed in the Black Sea, at the outlet from the Kerch Strait, which may indicate an increased anthropogenic impact on this water area during the study period. Two trends were determined: the saturation of suspended matter with mercury in the Black Sea along with an increase in its concentration in the aquatic environment, and the decrease in mercury content in suspended matter in the Sea of Azov as the pollution of water with mercury increases. It was found that, given the radical difference in trends of changes in mercury concentrations in suspended matter in Black and Azov Seas, the parameters of the approximating exponential relationships between accumulation coefficients and mercury concentration in water for the Black Sea and the Sea of Azov were not statistically significantly different, and the combined dataset sample for both seas was adequately described both by exponential and power functions. The results obtained generally indicated a decrease in the concentrating ability of suspensions with increasing concentration of mercury in water. The mercury pool on suspended matter varied from 3 to 29 % for the Black Sea and from 6 to 55 % for the Sea of Azov.

Key words: mercury, suspended matter, accumulation coefficients, Black Sea, Sea of Azov.

*Поступила в редакцию 26.03.24
Принята к печати 11.04.24*