

УДК 546.49:551.463.8(262.5)

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ РТУТИ ВО ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ ПЕНЫ И ВОДЫ ЧЁРНОГО МОРЯ*

© 2020 г. А. П. Стецюк

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Российская Федерация

E-mail: alex-ra-777@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2020; после доработки 26.06.2020;
принята к публикации 21.09.2020; опубликована онлайн 30.09.2020.

Способность взвешенного вещества концентрировать ртуть может быть превалирующим фактором в очищении водной толщи Чёрного моря. В результате седиментации взвешенные частицы выносят загрязнения из поверхностного слоя воды и в итоге могут депонировать их в донных осадках, участвуя таким образом в процессах самоочищения морской акватории. Взвешенное вещество как дисперсная фаза водной среды, рассматриваемой в качестве гетерогенной дисперсной системы, может быть более насыщено ртутью, чем сама вода как дисперсионная среда. В данной работе определён вклад растворённой и взвешенной форм ртути в её общее содержание и оценена концентрирующая способность взвешенного вещества в отношении ртути, обуславливающая биогеохимическое самоочищение вод от ртути. Все пробы воды разделяли на фильтрат и взвесь путём их фильтрации через нуклеопоровые фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Измерения содержания ртути проводили на анализаторе «Хиранума-1» методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Концентрацию растворённой ртути в воде определяли в пересчёте на литр, а во взвешенном веществе — на литр и на грамм сухой массы. Выявлено превалирование растворённой формы ртути независимо от сезона года с варьированием её процентного содержания в диапазоне 66,3–85,8 % от общей (суммарной) концентрации ртути. Средняя концентрация взвешенной формы составила 14,2–33,7 % от её общего содержания. При этом значения концентрации взвешенного вещества ($m_{\text{взв}}$) варьировали от 0,1 до 15,0 мг·л⁻¹ за весь исследованный период, а коэффициент накопления ртути взвешенным веществом ($K_{\text{нвзв}}$) изменялся в диапазоне от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^7$. Определён значительный вклад взвешенной формы ртути в её общее содержание в морской пене, образованной в штормовую погоду. Так, при концентрации взвешенного вещества в морской воде 9,6 мг·л⁻¹ концентрация растворённой формы ртути имела значение 55 нг·л⁻¹, а взвешенной — 20 нг·л⁻¹. В морской пене концентрация взвешенного осадочного вещества составила 895,2 мг·л⁻¹, а концентрация ртути достигла 200 нг·л⁻¹ в растворённой форме и 260 нг·л⁻¹ — во взвешенной. Содержание общей (суммарной) ртути в морской пене при этом превышало предельно допустимую концентрацию (100 нг·л⁻¹) для морской воды. В данном случае $K_{\text{нвзв}}$ для морской воды был равен $3,8 \cdot 10^4$, а для пены — $1,5 \cdot 10^3$. Такое распределение ртути в морской взвеси, пене и воде, а также полученные значения коэффициента накопления свидетельствуют о большой важности взвешенного вещества в самоочищении морской акватории. При низком содержании ртути в воде концентрирующая способность взвешенного вещества, характеризуемая относительно высокими значениями его коэффициента накопления ртути, становится весьма значимым фактором в седиментационном самоочищении вод от ртути, однако при повышении загрязнения вод ртутью влияние этого фактора снижается.

Ключевые слова: ртуть, взвешенное вещество, морская пена, Чёрное море

* Материалы статьи были представлены на Чтениях памяти академика Г. Г. Поликарпова «Радиоэкология: успехи и перспективы» (Севастополь, ИнБИОМ, 2019 г.).

Ртуть относится к веществам первого класса опасности и является одним из наиболее экологически значимых загрязнителей Чёрного моря [14]. Как известно, при концентрации ртути $0,1 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ подавляется жизнедеятельность одноклеточных водорослей [12]. При содержании ртути $0,018 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ биохимические процессы самоочищения в водах тормозятся, а при $2,0 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ они прекращаются [1 ; 4].

Ртуть может поступать в окружающую среду из различных природных и антропогенных источников. Основными природными её источниками можно назвать вулканическую деятельность, дегазацию земной коры, а также испарение с водной поверхности с последующим ветровым переносом. Так, поступление ртути в Чёрное море только с водами р. Дунай оценивается в $48,7\text{--}58,9 \text{ т}\cdot\text{год}^{-1}$ [16], а во всю акваторию моря из других источников — в $80 \text{ т}\cdot\text{год}^{-1}$ [17]. К антропогенным источникам поступления ртути в Чёрное море можно отнести промышленные и коммунальные стоки, судоремонтные предприятия, морской транспорт.

Согласно литературным данным, преобладающим фактором в седиментационном очищении вод является концентрирующая способность взвесей [2 ; 10]. За счёт сорбции содержание ртути во взвешенном веществе может быть значительным. В результате седиментации взвешенные частицы выносят загрязнения из поверхностного слоя водной толщи и в итоге могут депонировать их в донных осадках, участвуя таким образом в процессах самоочищения морской акватории. Во время штормовой погоды (в основном на мелководье шельфа и побережья) происходит перемешивание верхнего слоя донных отложений с придонным слоем воды; вследствие биогеохимического цикла, загрязнения поступают обратно в водную толщу. При этом поверхностная вода прибрежной акватории интенсивно наполняется взвешенным осадочным веществом и поэтому является качественно новым удобным объектом исследования процессов самоочищения морской среды от ртути. Рассеянное осадочное вещество, как практически все биотические и абиотические компоненты морских экосистем, может быть более насыщено ртутью, чем вода, рассматриваемая как дисперсионная среда.

Целью данной работы было определить вклад растворённой и взвешенной форм ртути в её общее содержание, концентрирующую способность взвешенного вещества в отношении ртути, а также рассчитать процент извлечения ртути взвесью для оценки вклада взвешенной формы ртути в общую (суммарную) концентрацию в системе взвесь — вода. Для этого был проведён анализ массива данных по содержанию ртути в акватории Чёрного моря с 2011 по 2017 г. и исследовано содержание ртути в морской пене в 2018 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для выявления вклада растворённой и взвешенной форм ртути в общую использованы опубликованные и не опубликованные ранее данные по содержанию её в Чёрном море за период 2011–2017 гг. [9 ; 10]. Станции отбора проб показаны на рис. 1. Вода для исследования отобрана во время рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (№ 70, 72, 79, 80, 88, 90, 92, 93, 96, 99, 100), а также в бухтах Севастополя. В штормовую погоду в 2018 г. были отобраны пробы воды и пены с поверхностного слоя Чёрного моря ($44^{\circ}39.167'N$, $31^{\circ}50.445'E$).

Все пробы воды разделяли путём фильтрации через предварительно взвешенные нуклеопоровые фильтры с диаметром пор $0,45 \text{ мкм}$ на две части — фильтрат и взвесь на фильтрах. Далее взвесь высушивали в естественных условиях и снова взвешивали на микроаналитических весах Sartorius с погрешностью измерения $0,1 \text{ мг}$. По разнице масс фильтров после и до фильтрации вычисляли сухую массу взвешенного вещества. Затем фильтр с сухой взвесью подвергали обработке по ГОСТ 26927. Измерения концентрации ртути проводили методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии на анализаторе «Хиранума-1». Для калибровки отбора использовали аттестационные стандартные образцы раствора ионов ртути ГСО 7879-2001.

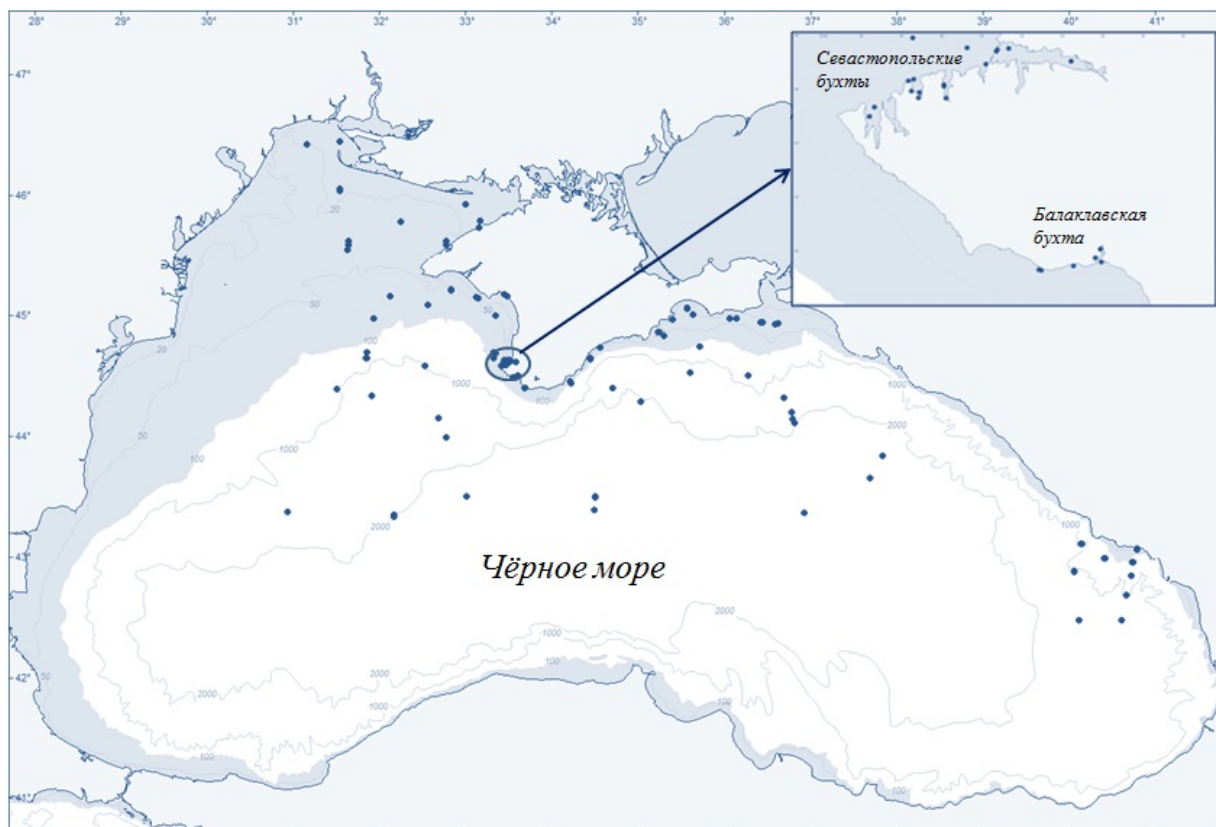


Рис. 1. Карта отбора проб в Чёрном море [13]

Fig. 1. Map of sampling in the Black Sea [13]

Анализ серии градуировочных растворов с концентрацией ртути 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 мкг·л⁻¹ (по 10 повторов каждая) показал воспроизводимость результатов с относительной ошибкой, не превышающей 2 %.

Концентрацию растворённой формы ртути в воде определяли в пересчёте на литр, а во взвешенном веществе — на литр и на грамм сухой массы.

Для характеристики концентрирующей способности взвешенного вещества рассчитывали коэффициент накопления ртути ($K_{H_{B3B}}$) [7]:

$$K_{H_{B3B}} = \frac{1000 \cdot C_{B3B}}{C_w}, \quad (1)$$

где C_{B3B} — удельная концентрация ртути во взвешенном веществе, нг·г⁻¹;

C_w — концентрация растворённой формы ртути в воде, нг·л⁻¹.

Зависимость процента извлечения ртути взвешенным веществом из водной среды от коэффициентов накопления ($K_{H_{B3B}}$) и концентрации взвеси $10^{-6}B$ рассчитывали по формуле [6]:

$$A_1 = \frac{K_{H_{B3B}}}{K_{H_{B3B}} + \frac{1}{10^{-6}B}} (\%), \quad (2)$$

где $B = \frac{P_1}{P_2}$;

P_1 — масса сухой взвеси;

P_2 — масса воды, равная 10^6 г;

$10^{-6}B$ — концентрация взвеси в водной среде в частях на 1 млн, мг·л⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные за 2011–2017 гг. проанализированы по сезонам и глубине. Для каждой группы данных рассчитаны средние значения концентраций различных форм ртути в $\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$ (рис. 2). Максимальная среднегодовая концентрация общей формы ртути зафиксирована в 2014 г., а минимальная — в 2012 г. в весенний период (рис. 2А). Результаты показали превалирование растворённой формы ртути (рис. 2В) с варьированием её процентного содержания в диапазоне 66,3–85,8 % от общей концентрации ртути. Средняя концентрация взвешенной формы составила 14,2–33,7 % от концентрации её общей формы.

При этом значения концентрации сухой массы взвешенного вещества варьировали от 0,1 до 15,0 $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ за весь исследованный период.

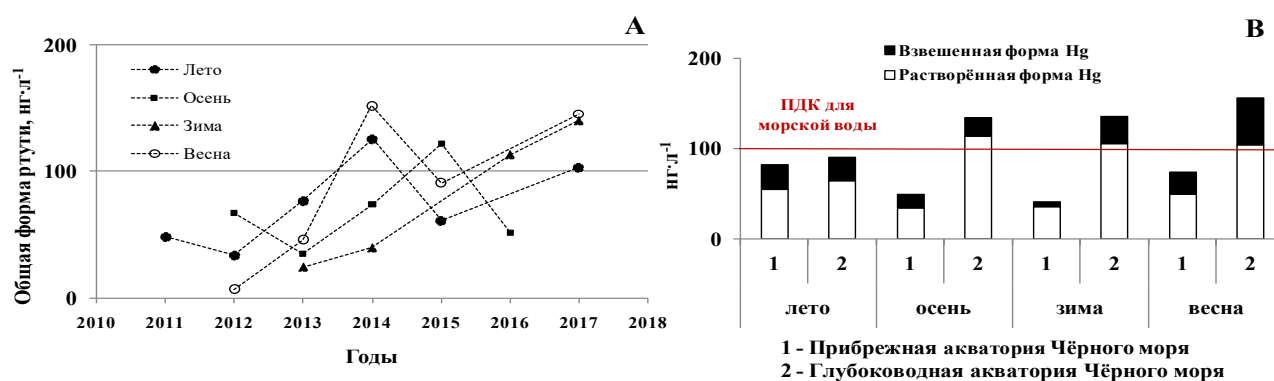


Рис. 2. А — среднегодовое содержание общей формы ртути в акватории Чёрного моря в 2011–2017 гг.; В — средние значения концентраций растворённой и взвешенной форм ртути в разные сезоны года

Fig. 2. А – average annual concentration of total form of mercury in the Black Sea in 2011–2017; В – average concentrations of dissolved and suspended forms of mercury during different seasons

На рис. 2В показано, что летом как в прибрежных, так и в глубоководных акваториях Чёрного моря средние значения содержания растворённой и взвешенной форм ртути примерно равны и суммарно не превышают ПДК для морской воды ($100 \text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$). В другие сезоны года для прибрежных акваторий Чёрного моря среднее содержание ртути сравнительно ниже, а для глубоководных — значительно выше. Из рис. 2В видно, что весной средние значения содержания растворённой и взвешенной форм ртути как в прибрежных, так и в глубоководных акваториях выше, чем осенью и зимой. Также заметен возросший вклад взвешенной формы ртути в её общее содержание, что свидетельствует об активизации аккумулялирующей способности взвеси в отношении ртути. Скорее всего, это обусловлено увеличением весной способности к первичной продукции биотической компоненты взвеси (в частности, фитопланктона) как следствие возрастающего влияния двух факторов — тепла и света. Повышенное содержание в глубоководных акваториях Чёрного моря растворённой формы ртути в эти три относительно низкотемпературных сезона (осень, зима, весна) по сравнению с концентрацией в прибрежных акваториях связано, вероятно, с низкой аккумулялирующей способностью взвеси в отношении ртути и с соответствующей пониженной элиминирующей способностью взвеси транспортировать ртуть седиментационным путём из поверхностного слоя в сторону дна, так как ранее описано закономерно уменьшающееся содержание тотальной взвеси поверхностной воды в акваториях Чёрного и Азовского морей вблизи Крымского полуострова от прибрежных акваторий в сторону открытых глубоководных [8].

Превалирование в летний сезон значений взвешенной и растворённой форм ртути и для прибрежных, и для глубоководных районов Чёрного моря над содержанием ртути в прибрежных акваториях для относительно низкотемпературных сезонов (осень, зима, весна) связано, скорее всего, с возрастанием способности к первичной продукции биотической компоненты взвеси (в основном фитопланктона) [3] и с соответствующим ростом её элиминирующей способности выводить аккумулируемую ею ртуть из поверхностного слоя в сторону донных отложений.

В табл. 1 представлены средние значения для всей выборки данных, а также диапазоны варьирования удельной сухой массы взвешенного вещества в разные периоды. Минимальное содержание взвешенного вещества отмечено в летний ($0,99 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) и зимний ($0,60 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) сезоны в глубоководной части Чёрного моря. Максимальные средние значения концентрации взвешенного вещества ($m_{\text{взв}}$) зарегистрированы в зимний ($2,96 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) и весенний ($3,90 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) периоды в прибрежной акватории Крыма.

Таблица 1. Средние значения концентрации взвеси и концентрации ртути во взвеси в акватории Чёрного моря в период 2011–2017 гг. (в скобках указаны диапазоны варьирования)

Table 1. Average values of suspension concentration and specific mercury concentration in suspension from Black Sea water area in 2011–2017 (figures in brackets indicate ranges of variation)

Сезон года	Район исследования	Концентрация взвеси ($m_{\text{взв}}$), $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	Удельная концентрация ртути во взвеси ($C_{\text{взв}}$), $\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы
Лето	Прибрежная акватория Крыма	1,75 (0,3–10)	30197 (408–500000)
	Глубоководная часть Чёрного моря	0,99 (0,1–3,1)	53038 (4839–320000)
Осень	Прибрежная акватория Крыма	1,67 (0,6–7)	9625 (614–30769)
	Глубоководная часть Чёрного моря	1,08 (0,2–3)	23353 (1447–100000)
Зима	Прибрежная акватория Крыма	2,96 (0,5–14,7)	5144 (314–41667)
	Глубоководная часть Чёрного моря	0,60 (0,1–3,4)	131317 (3333–1100000)
Весна	Прибрежная акватория Крыма	3,90 (0,5–15)	17375 (825–85000)
	Глубоководная часть Чёрного моря	1,62 (0,5–3,6)	10831 (2861–26400)

С учётом массы взвеси ($\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) и содержания в ней ртути ($\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$) рассчитана концентрация ртути во взвешенном веществе ($\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$) (см. табл. 1). Содержание ртути во взвеси было минимальным ($314 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$) в зимний период в прибрежной акватории Крыма. Наибольшее значение ($1\,100\,000 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$) зафиксировано зимой в глубоководной части Чёрного моря. Рассчитанный по формуле (1) коэффициент накопления ртути взвешенным веществом ($K_{\text{нвзв}}$) изменялся в диапазоне от $n\cdot 10^3$ до $n\cdot 10^7$.

На рис. 3 представлено графическое изображение изменения коэффициента накопления ртути взвесями ($K_{\text{нвзв}}$) в зависимости от её концентрации в воде (C_w) для разных сезонов и акваторий. На графике (рис. 3D) видно, что в весенний период в прибрежной части Чёрного моря значения $K_{\text{нвзв}}$ менялись с увеличением C_w со статистической достоверностью $R^2 = 0,73$.

В глубоководной части Чёрного моря в этот же сезон зависимости $K_{н\text{взв}}$ от C_w имели низкий коэффициент достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,04$). Летом величины R^2 составили 0,01 для прибрежной части Чёрного моря и 0,32 — для глубоководной (рис. 3А). Осенью тот же параметр имел значение 0,64 для прибрежной акватории и 0,25 — для глубоководной (рис. 3В). В зимний период $R^2 = 0,01$ для глубоководной части Чёрного моря и $R^2 = 0,50$ — для прибрежной (рис. 3С). В итоге наиболее достоверные тренды были определены для прибрежной акватории, за исключением летнего сезона.

Полученные зависимости (рис. 3) имели низкий коэффициент детерминации летом в прибрежной части (рис. 3А), а зимой (рис. 3С) и весной (рис. 3D) — в глубоководной. Это свидетельствует как о различной репрезентативности данных, так и о разнице в способности взвесей аккумулировать ртуть из прибрежных и глубоководных акваторий в разные сезоны года. В целом по аппроксимирующей зависимости в остальных случаях можно сказать, что с повышением концентрации растворённой формы ртути в воде (C_w) концентрирующая способность взвешенных веществ снижается.

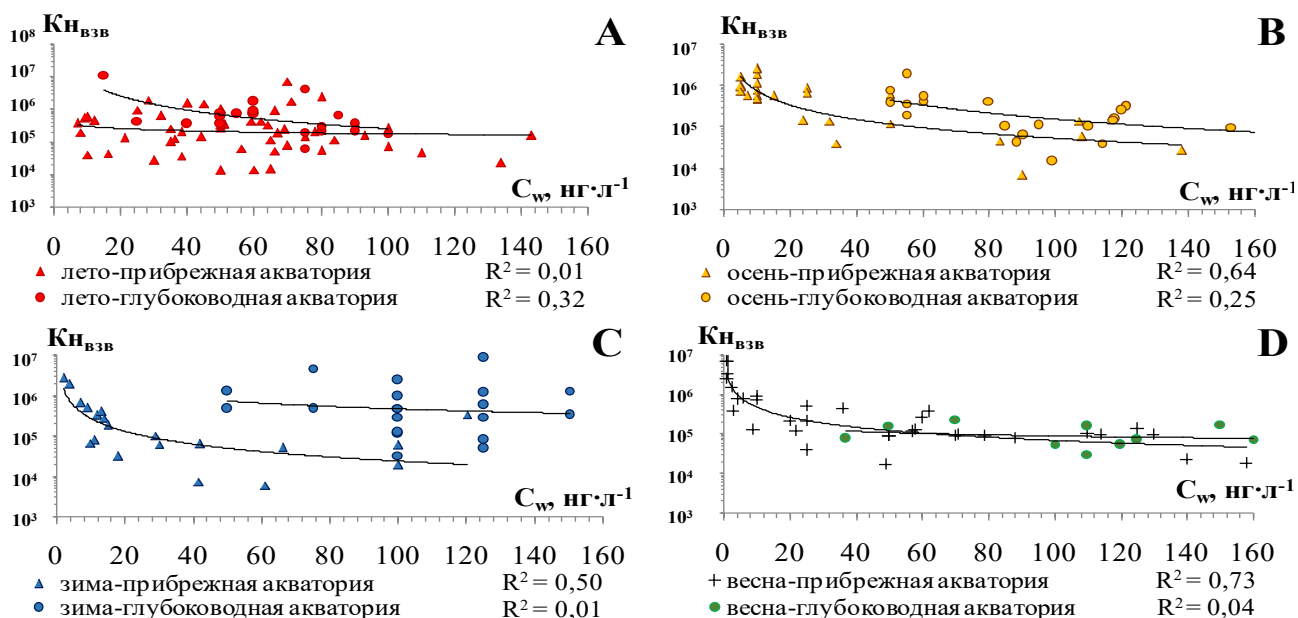


Рис. 3. Зависимость коэффициента накопления ($K_{н\text{взв}}$) ртути взвешенным веществом от концентрации растворённой формы ртути в воде (C_w , $нг·л^{-1}$) в разные сезоны года (А — лето; В — осень; С — зима; D — весна) и в разных акваториях

Fig. 3. Dependence of change of the accumulation coefficient of mercury in suspended matter ($K_{н\text{взв}}$) on concentration of dissolved form of mercury in water (C_w , $нг·л^{-1}$) during different seasons (A – summer; B – autumn; C – winter; and D – spring) and in different water areas

С помощью формулы (2) была рассчитана зависимость процентной величины извлечения ртути взвешенным веществом из морской среды от коэффициента накопления (рис. 4).

Согласно рис. 4, процентная величина извлечения ртути взвесью изменяется с увеличением $K_{н\text{взв}}$ с практически одинаковой статистической достоверностью для разных сезонов и районов Чёрного моря, за исключением весеннего периода в глубоководной акватории. По полученным данным, при значениях $K_{н\text{взв}} > 10^6$ практически всю ртуть извлекает взвешенное вещество морской воды, что свидетельствует о его высокой концентрирующей способности.

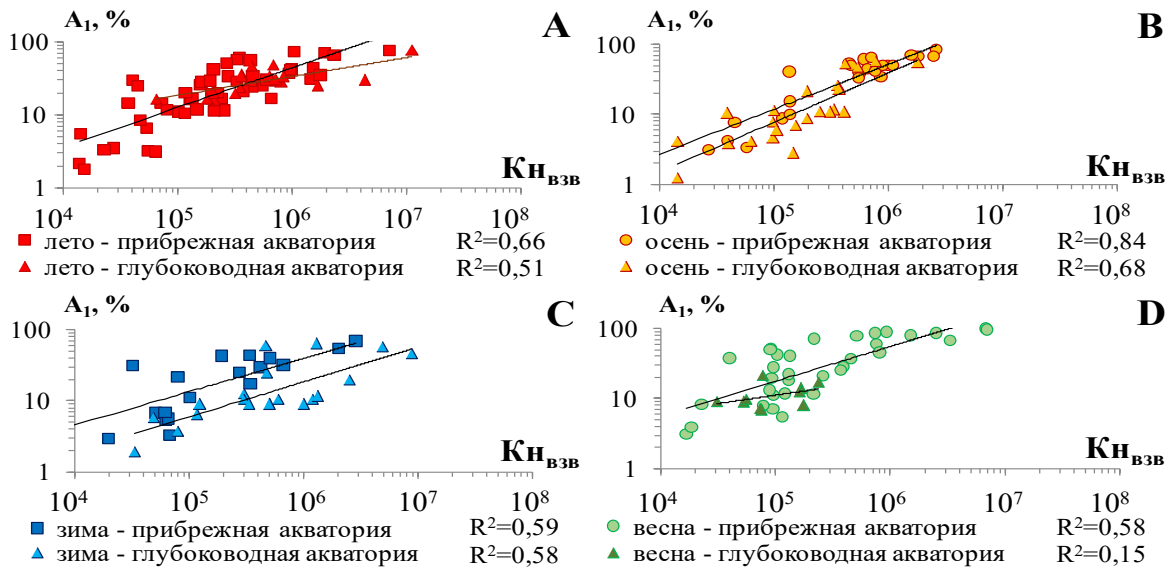


Рис. 4. Зависимость процентного извлечения ртути взвешенным веществом ($A_1, \%$) от коэффициента накопления ($K_{H_{B3B}}$) в разные сезоны года (А — лето; В — осень; С — зима; D — весна) и в разных акваториях

Fig. 4. Dependence of the percentage of mercury accumulation by suspended matter ($A_1, \%$) on the accumulation coefficient ($K_{H_{B3B}}$) during different seasons (A – summer; B – autumn; C – winter; and D – spring) and in different water areas

Зависимость процентного извлечения ртути взвесью от C_w для разных сезонов и акваторий в основном имела слабо выраженные тренды (рис. 5), за исключением весеннего периода в глубоководной зоне ($R^2 = 0,83$) (рис. 5D). При этом во всех случаях отмечено уменьшение доли взвешенной формы ртути с увеличением концентрации её растворённой формы в воде, что полностью соответствует функциональной зависимости, выраженной формулой (2).

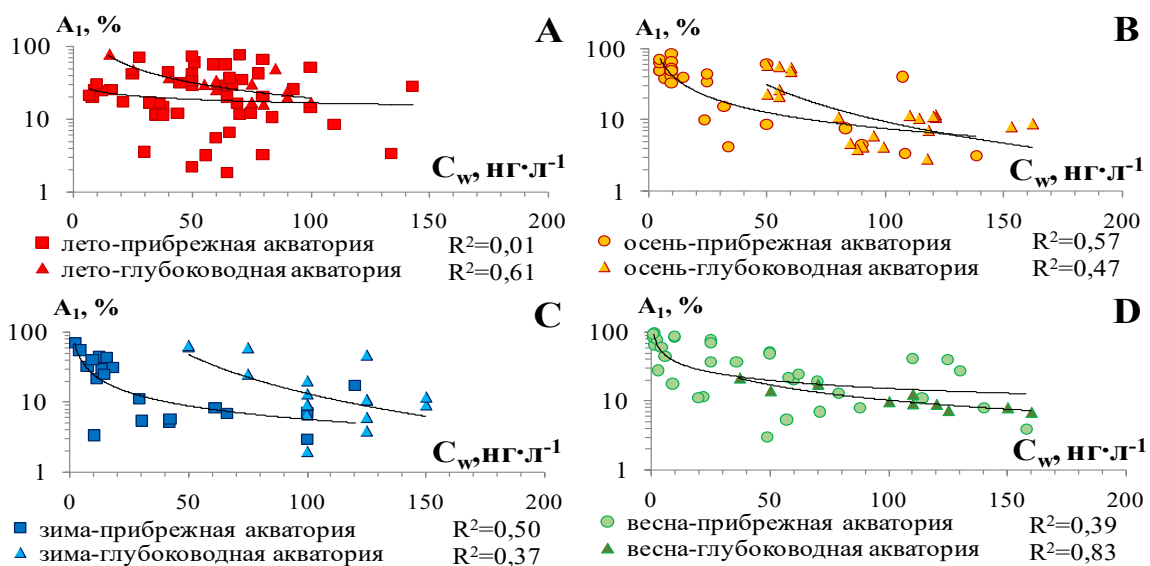


Рис. 5. Зависимость процентного извлечения ртути взвешенным веществом ($A_1, \%$) от концентрации растворённой формы ртути ($C_w, \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) в разные сезоны года (А — лето; В — осень; С — зима; D — весна) и в разных акваториях

Fig. 5. Dependence of the percentage of mercury accumulation by suspended matter ($A_1, \%$) on dissolved form of mercury ($C_w, \text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) during different seasons (A – summer; B – autumn; C – winter; and D – spring) and in different water areas

Ранее при изучении механизма образования пены на поверхности морской воды было установлено, что органическое вещество морской воды переходит из растворённого состояния в пену и во взвесь, поскольку обрывки оболочек разрушающихся пузырьков пены превращаются в диспергированные частицы [11].

В данной работе исследовано влияние штормового взмучивания на соотношение и величину различных форм ртути в воде. В штормовую погоду концентрация взвешенного осадочного вещества в морской воде составила $9,6 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, а в морской пене — $895,2 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (рис. 6).

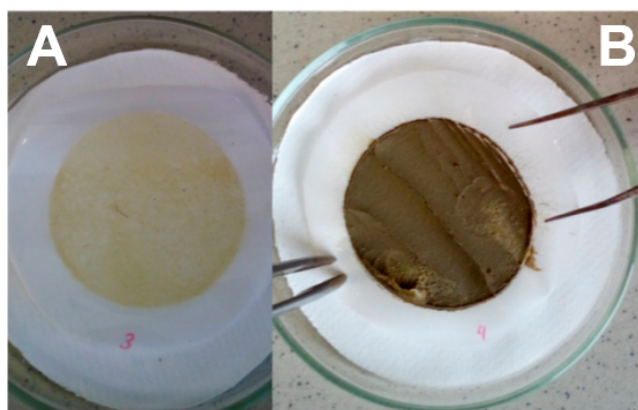


Рис. 6. А — взвесь, полученная из морской воды; В — взвесь, полученная из морской пены

Fig. 6. А – suspended matter obtained from seawater; В – suspended matter obtained from sea foam

Концентрация растворённой формы ртути в морской воде составила $55 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$, а в морской пене достигла $200 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$, превысив ПДК ($100 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$) [5]. Значения для взвешенной формы ртути были равны $20 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$ в морской воде и $260 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$ — в морской пене (рис. 7). Концентрация общей (суммарной) ртути в морской пене при этом превышала не только ПДК для морской воды, но и нормативы для донных осадков ($300 \text{ нг}\cdot\text{л}^{-1}$) [15]. Концентрация ртути во взвешенном осадочном веществе составила $2083 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы для взвеси, полученной из морской воды, и $290 \text{ нг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы — для взвеси из морской пены. Коэффициент накопления ртути взвешенным веществом ($K_{\text{нвзв}}$) для морской воды был равен $3,8 \cdot 10^4$, а для пены — $1,5 \cdot 10^3$. Такое распределение ртути в морской пене и воде, а также полученные значения $K_{\text{нвзв}}$ могут свидетельствовать о высокой концентрирующей способности морских осадочных взвесей и об их важности в самоочищении морской акватории.

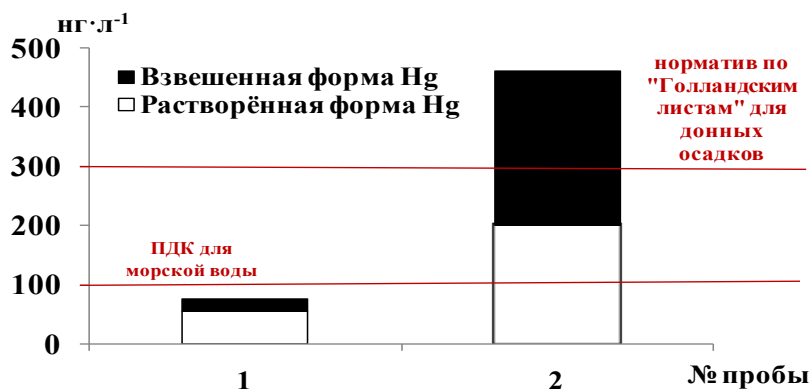


Рис. 7. Проба 1 — общее содержание ртути в морской воде, $\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$; проба 2 — общее содержание ртути в морской пене, $\text{нг}\cdot\text{л}^{-1}$

Fig. 7. Sample 1 – concentration of total mercury in seawater, $\text{нг}\cdot\text{L}^{-1}$; sample 2 – concentration of total mercury in sea foam, $\text{нг}\cdot\text{L}^{-1}$

Заключение. В акватории Чёрного моря превалирует растворённая форма ртути независимо от сезона года; её процентное содержание варьирует в диапазоне 66,3–85,8 % от общей концентрации ртути. Коэффициент накопления ртути взвешенным веществом изменялся в пределах от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^7$; при его значениях $> 10^6$ практически вся ртуть переходила во взвесь. При низких концентрациях ртути в воде концентрирующая способность взвесей, в силу относительно высоких значений $K_{н\text{взв}}$, является значимым фактором седиментационного самоочищения вод, однако при повышении загрязнения вод ртутью её влияние снижается. При этом содержание взвешенной формы ртути вносит достаточно весомый вклад в общую её концентрацию, особенно в морской пене. Перераспределение осадочного взвешенного вещества в пену может служить источником ремобилизации ртути в морскую воду. Именно поэтому пределы изменения коэффициента накопления могут быть определяющими показателями в самоочищении морской среды; их можно использовать при решении задач лимитирования поступления ртути в акваторию Чёрного моря, что позволит своевременно выявить вероятность экологической опасности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Молекулярно-биологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации АААА-А18-118020890090-2).

Благодарность. Автор признательна за отбор проб сотрудникам отдела радиационной и химической биологии ИнБЮМ Поповичеву В. Н., Сидорову И. Г., Проскурнину В. Ю. и Параскиву А. А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Герлах С. А. *Загрязнение морей: диагноз и терапия*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 263 с. [Gerlakh S. A. *Zagryaznenie morei: diagnost i terapiya*. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1985, 263 p. (in Russ.)]
2. Егоров В. Н., Гулин С. Б., Игнатов Е. И., Поповичев В. Н., Малахова Л. В., Плотицына О. В., Стецюк А. П., Артемов Ю. Г. Биогеохимические и геоэкологические аспекты загрязнения ртутью Чёрного моря // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты* : сб. тр. II Международ. симп., Новосибирск, 21–25 сентября 2015 г. Новосибирск : ИНХ СО РАН, 2015. С. 145–150. [Egorov V. N., Gulina S. B., Ignatov E. I., Popovichev V. N., Malakhova L. V., Plotitsyna O. V., Stetsyuk A. P., Artemov Yu. G. Biogeokhimiicheskie i geoekologicheskie aspekty zagryazneniya rtut'yu Chernogo morya. In: *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimiicheskie aspekty* : sb. tr. II Mezhdunar. simp., Novosibirsk, 21–25 Sept. 2015. Novosibirsk : INKh SO RAN, 2015, pp. 145–150. (in Russ.)]
3. Егоров В. Н., Поповичев В. Н., Гулин С. Б., Бобко Н. И., Родионова Н. Ю., Царина Т. В., Марченко Ю. Г. Влияние первичной продукции фитопланктона на оборот биогенных элементов в прибрежной акватории г. Севастополя (Чёрное море) // *Биология моря*. 2018. Т. 44, вып. 3. С. 207–214. [Egorov V. N., Popovichev V. N., Gulina S. B., Bobko N. I., Rodionova N. Yu., Tsarina T. V., Marchenko Yu. G. The influence of phytoplankton primary production on the cycle of biogenic elements in the coastal waters off Sevastopol, Black Sea. *Biologiya morya*, 2018, vol. 44, iss. 3, pp. 207–214. (in Russ.)]. <http://doi.org/10.1134/S1063074018030057>
4. Лапердина Т. Г. *Определение ртути в природных водах*. Новосибирск : Наука, 2000. 222 с. [Laperdina T. G. *Opredelenie rtuti v prirodnnykh vodakh*. Novosibirsk : Nauka, 2000, 222 p. (in Russ.)]
5. *Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения* : приказ Министерства сельского хозяйства РФ № 552 от 13.12.2016 [Электронный ресурс]. [*Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya* : prikaz Ministerstva sel'skogo

- khozyaistva RF No. 552 ot 13.12.2016 [Electronic resource]. URL: <http://www.pravo.gov.ru/> [accessed 10.12.2018]. (in Russ.)]
6. Поликарпов Г. Г. *Радиоэкология морских организмов*. Москва : Атомиздат, 1964. 295 с. [Polikarpov G. G. *Radioekologiya morskikh organizmov*. Moscow : Atomizdat, 1964, 295 p. (in Russ.)]
 7. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н. *Морская динамическая радиохемэкология*. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 176 с. [Polikarpov G. G., Egorov V. N. *Marine Dynamic Radiochemoecology*. Moscow : Energoatomizdat, 1986, 176 p. (in Russ.)]
 8. Поповичев В. Н., Стецюк А. П. Взвешенное вещество в акваториях Чёрного и Азовского морей вблизи Крымского полуострова (по материалам рейсов НИС «Профессор Водяницкий» в 2016–2017 гг.) // *Пищевые технологии: исследования, инновации, маркетинг* : материалы I Нац. науч.-практ. конф., Керчь, 1–3 октября 2018 г. Симферополь : Изд-во SololRich, 2018. С. 166–168. [Popovichev V. N., Stetsyuk A. P. Vzveshennoe veshchestvo v akvatoriyakh Chernogo i Azovskogo morei vblizi Krymskogo poluostrova (po materialam reisov NIS “Professor Vodyanitskii” v 2016–2017 gg.). In: *Pishchevye tekhnologii: issledovaniya, innovatsii, marketing* : materialy I Nats. nauch.-prakt. konf., Kerch, 1–3 Oct. 2018. Simferopol : Izd-vo SololRich, 2018, pp. 156–158. (in Russ.)]
 9. Стецюк А. П. Концентрация растворённой и взвешенной форм ртути в морской пене и воде // *Радиохемэкология: успехи и перспективы* : материалы чтений памяти акад. Г. Г. Поликарпова, Севастополь, 14–16 августа 2019 г. Севастополь : ФИЦ ИнБЮМ, 2019. С. 42. [Stetsyuk A. P. Kontsentratsiya rastvorennoi i vzveshennoi form rtuti v morskoi pene i vode. In: *Radiokhemoekologiya: uspekhi i perspektivy* : materialy chtenii pamyati akad. G. G. Polikarpova, Sevastopol, 14–16 Aug. 2019. Sevastopol : IBSS, 2019, p. 42. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/978-5-6042938-3-6>
 10. Стецюк А. П., Егоров В. Н. Способность морских взвесей концентрировать ртуть в зависимости от её содержания в акваториях шельфа // *Системы контроля окружающей среды*. 2018. Вып. 13 (33). С. 123–132. [Stetsiuk A. P., Egorov V. N. Marine suspensions ability to concentrate mercury depending on its contents in the shelf water area. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2018, iss. 13 (33), pp. 123–132. (in Russ.)]. <http://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-3-123-132>
 11. Скопинцев Б. А. Об органических поверхностно-активных веществах морской воды // *Метеорология и гидрология*. 1939. № 2. С. 75–79. [Skopintsev B. A. Ob organicheskikh poverkhnostno-aktivnykh veshchestvakh morskoi vody. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1939, no. 2, pp. 75–79. (in Russ.)]
 12. Трахтенберг И. М., Коршун М. И. Ртуть и её соединения // *Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп* : справ. изд. / ред.: В. А. Филов и др. Ленинград : Химия, 1988. С. 170–188. [Trakhtenberg I. M., Korshun M. I. Rtut’ i ee soedineniya. In: *Vrednye khimicheskie veshchestva. Neorganicheskie soedineniya elementov I–IV grupp* : sprav. izd. / V. A. Filov, etc. (Eds). Leningrad : Khimiya, 1988, pp. 170–188. (in Russ.)]
 13. Belokopytov V. N. “Oceanographer”: Applied software for oceanographic surveys. In: *International Symposium on Information Technology in Oceanography*, Goa, India, 12–16 Oct. 1998. Goa, 1998, p. 79.
 14. Mee L. D. The Black Sea in crisis: A need for concerted international action. *Ambio*, 1992, vol. 21, pp. 278–286.
 15. Neue Niederlandische Liste. In: *Altlasten Spektrum* 3/95.
 16. Polikarpov G. G., Egorov V. N., Kulebakina L. G., Svetasheva S. K. Contamination Hg dynamics of the Danube River ecosystem components. In: *Water Pollution Control in the Basin of the River Danube* : proc. intern. conf., Novi Sad, 20–23 June 1989. Yugoslavia, 1989, pp. 67–71.
 17. Zaitsev Yu. P. Impact of eutrophication on the Black Sea fauna. In: *Fisheries and Environment Studies in the Black Sea* / A. Kocatas, T. Koray, M. Kaya, O. F. Kara (Eds). Rome : FAO, 1993, pt. 2, pp. 63–86. (General Fisheries Council for Mediterranean. Studies and Review ; vol. 64).

MERCURY ACCUMULATION IN SUSPENDED MATTER OF FOAM AND WATER OF THE BLACK SEA*

A. P. Stetsiuk

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation

E-mail: alex-ra-777@mail.ru

The ability of suspended matter to concentrate mercury may be the prevailing factor in Black Sea purification. As a result of sedimentation, suspended particles transport pollution from the surface layer of the water column and, as a consequence, can deposit them in bottom sediments, thus participating in self-purification of marine area. Suspended matter, as a dispersed phase of an aqueous medium, considered as a heterogeneous dispersed system, can be more saturated with mercury than water itself, as a dispersion medium. In this work, contribution of dissolved and suspended forms of mercury to its total content was determined, and concentrating ability of suspended matter relative to mercury, which affects biogeochemical self-purification of waters from mercury, was estimated. All water samples were separated into filtrate and suspension by filtration through nucleopore filters with a pore diameter of 0.45 μm . Measurements of mercury concentration were carried out using a Hiranuma-1 analyzer by the method of atomic absorption spectrophotometry. Concentration of dissolved mercury in water was determined per liter, while in suspended matter – per liter and per gram of dry weight. Prevalence of dissolved form of mercury was revealed regardless of the season, with its percentage varying from 66.3 to 85.8 % of total mercury concentration. Average content of suspended form varied in the range of 14.2–33.7 % of its total form. Values of the dry weight of suspended matter (m_{ss}) varied from 0.1 to 15.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ over the entire period studied, and an accumulation coefficient of mercury in suspended matter (K_{ss}) varied from $n\cdot 10^3$ to $n\cdot 10^7$. Significant contribution of suspended form of mercury in sea foam to its total content in stormy weather was established. With dry weight of suspended matter in seawater reaching 9.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the concentration of dissolved form of mercury reached 55 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, and the concentration of suspended one reached 20 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. In sea foam, the concentration of suspended sedimentary matter was of 895.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; mercury concentration reached 200 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in dissolved form and 260 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in suspended one. Total mercury concentration in sea foam in this case exceeded the threshold limit value (100 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) for seawater. The accumulation coefficient of mercury in suspended matter (K_{ss}) was $3.8\cdot 10^4$ for seawater and $1.5\cdot 10^3$ for foam. Such distribution of mercury in sea suspension, foam, and water, as well as K_{ss} values obtained, may indicate high significance of suspended matter in self-purification of marine area. At a low mercury content in water, the concentrating ability of suspended matter, characterized by relatively high values of its mercury accumulation coefficient, becomes a very significant factor in the sedimentation self-purification of waters from mercury; however, with an increase in water pollution with mercury, the effect of this factor decreases.

Keywords: mercury, suspended matter, sea foam, Black Sea

*The materials of the article were presented at the Readings in memory of Academician G. G. Polikarpov “Radiochemoecology: Progress and Prospects” (Sevastopol, IBSS, 2019).