

УДК 550.47:628.357(262.5)

**БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЕДИМЕНТАЦИОННОГО САМООЧИЩЕНИЯ
СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ
ОТ РАДИОНУКЛИДОВ, РТУТИ
И ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ**

© 2018 г. В. Н. Егоров, С. Б. Гулин, Л. В. Малахова, Н. Ю. Мирзоева,
В. Н. Поповичев, Н. Н. Терещенко, **Г. Е. Лазоренко**,
О. В. Плотыцина, Т. В. Малахова, В. Ю. Проскурнин,
И. Г. Сидоров, А. П. Стецюк, Л. В. Гулина, Ю. Г. Марченко

Институт морских биологических исследований имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

E-mail: egorov.ibss@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.11.2017; после доработки 20.04.2018;
принята к публикации 27.04.2018; опубликована онлайн 29.06.2018.

Работа посвящена изучению характеристик седиментационного самоочищения вод Севастопольской бухты от радиоактивных и консервативных химических загрязняющих веществ. На примере распределения ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, $\Sigma\text{ПХБ}_5$ и $\Sigma\text{ДДТ}$ в поверхностном слое донных осадков в различных акваториях бухты показано, что характеризуемая коэффициентом накопления концентрирующая способность живого и косного вещества в отношении контаминантов является одним из значимых факторов реализации биогеохимического механизма самоочищения вод. Воздействие седиментационных процессов направлено на поддержание радионуклидного и химического гомеостаза морских экосистем по принципу Ле Шателье — Брауна. Установлено, что в современных условиях приоритетными загрязнителями воды и донных отложений Севастопольской бухты являются Hg, $\Sigma\text{ПХБ}_5$ и $\Sigma\text{ДДТ}$.

Ключевые слова: Севастопольская бухта, донные отложения, ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, хлорорганические загрязнители, биоседиментация, радионуклидный и химический гомеостаз, принцип Ле Шателье — Брауна

Севастопольская бухта относится к акваториям повышенного экологического риска [8, 9], который обусловлен интенсивной техногенной деятельностью на побережье, сбросами в её акваторию значительного количества сточных вод [15], поступлением загрязняющих веществ со стоком реки Чёрной [14] и ограничением её водообмена с внешним рейдом в результате строительства защитных молов. Из-за воздействия перечисленных факторов концентрация многих загрязняющих веществ в воде и донных отложениях бухты существенно превысила фоновые уровни. В сложившихся условиях для сохранения экологически безопасного состояния Севастопольской бухты необходимо нормировать антропогенную нагрузку на её акваторию, которая лимитируется воздействием биогеохимических механизмов самоочищения её вод. По современным представлениям, элиминация консервативных загрязняющих веществ из водной среды обеспечивается седиментационными процессами их депонирования в толще донных отложений в составе биогенных и терригенных взвесей [6].

Целью настоящей работы было изучение характеристик концентрирования ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, полихлорбифенилов и ДДТ и его метаболитов в седиментационных потоках и влияния этих потоков на интенсивность депонирования загрязняющих веществ в поверхностном слое донных отложений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в Севастопольской бухте и в сравнительном плане на шельфе крымского побережья, а также в западной халистатической зоне Чёрного моря в 2001–2011 гг. [6]. Батиметрическая карта Севастопольской бухты с отмеченными на ней источниками сброса сточных вод (•) показана на рис. 1.



Рис. 1. Батиметрическая карта Севастопольской бухты [19]. Цифрами от 1 до 5 обозначены номера боксов. Чёрными точками показаны места сброса сточных вод [15]

Fig. 1. Bathymetric map of the Sevastopol Bay [19]. Numbers 1–5 indicate the box numbers. Black points show places of sewage discharge [15]

Районирование акваторий бухты сделано с учетом её морфологических характеристик, а также гидрологических и гидрохимических исследований [7, 19]. На карте сплошными линиями ограничены боксы акватории бухты с различными гидродинамическими и гидрохимическими условиями. Морфометрические характеристики боксов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические характеристики Севастопольской бухты и её боксов [19]

Table 1. Morphometric characteristics of the Sevastopol Bay and its boxes [19]

Номер бокса	Максимальная длина, м	Средняя глубина, м	Площадь поверхности, м ²	Объём, м ³
1	2600	12,0	2 831 750	33 825 650
2	2500	12,8	806 900	10 235 990
3	2100	13,1	1 748 870	22 802 850
4	2200	8,7	1 487 970	12 935 640
5	600	4,7	322 130	1 512 410
Для бухты	7500	11,3	7 197 620	81 312 540

Заборные работы в акватории бухты выполняли, регистрируя координаты станций GPS-навигатором Garmin GPS 12XL, а глубину — эхолотом JRS 48. Для измерения ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po использовали общепринятые методики [10, 11, 17, 20, 22]. Ртуть и хлорорганические

соединения (далее — ХОС) в донных отложениях определяли атомно-абсорбционным методом холодного пара и газохроматографическим методом соответственно [21]. Первичную продукцию определяли радиоуглеродным методом, скорость осадконакопления рассчитывали с применением радиотрассерных технологий [1, 2, 3, 12]. Оценки интенсивности общего и биогенного осадконакопления в различных акваториях Севастопольской бухты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Скорость осадконакопления, общий седиментационный и биогенный потоки в различных акваториях Севастопольской бухты [4]

Table 2. Sedimentation rate, total and biogenic sedimentation fluxes in different areas of the Sevastopol Bay [4]

Район бухты	Координаты	Глубина, м	Скорость осадконакопления, мм·год ⁻¹	Удельный седиментационный поток / поток биогенного материала, г·м ⁻² ·год ⁻¹
Инкерман	44°36.4' с. ш. 33°36.0' в. д.	4	9,3	<u>7094</u> 2298
Голландия	44°37.3' с. ш. 33°33.7' в. д.	15	3,3	<u>1727</u> 200
Павловский мыс	44°37.1' с. ш. 33°32.1' в. д.	15	2,4	<u>607</u> 110
Константиновский равелин	44°37.5' с. ш. 33°31.3' в. д.	13	4,6	<u>3253</u> 1521
Внешняя акватория Севастопольской бухты	44°37.1' с. ш. 33°28.9' в. д.	22	2,3	<u>664</u> 482

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение концентрации ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po и Hg в поверхностном слое донных отложений различных акваторий бухты показано на рис. 2, а загрязнение бухты суммой пяти конгенеров полихлорированных бифенилов ($\Sigma\text{ПХБ}_5$) и суммой ДДТ с метаболитами ($\Sigma\text{ДДТ}$) — на рис. 3.

Полученные по результатам наблюдений (рис. 2 и 3) характеристики седиментационного депонирования радионуклидов в донные отложения севастопольских бухт представлены в табл. 3. В первой графе перечислены номера боксов, обозначающих акватории Севастопольской бухты. Во второй графе даны оценки удельных седиментационных потоков в её акваториях. Следует отметить, что профили вертикального распределения ^{137}Cs в Южной бухте методически не могли использоваться для геохронологических целей, так как структура залегания грунтов по всей площади её дна нарушена якорными постановками. Поэтому осадконакопление в Южной бухте было определено как среднее значение данных по скоростям седиментации в боксах 1, 3 и 4 Севастопольской бухты.

Оценки концентраций загрязняющих веществ в поверхностном слое донных отложений ($C_{\text{до}}$) даны в графах 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 табл. 3, а удельные потоки их депонирования ($\Pi_{\text{уд}}$) в пределах выделенных акваторий отображены в графах 4, 7, 10, 13, 16, 19 и 22. Очевидно, что содержание загрязняющих веществ в поверхностном слое донных отложений определяется концентрацией ($C_{\text{сед}}$) и потоком ($v_{\text{сед}}$) поступления в них седиментов. Поскольку эти параметры для боксов различны, концентрация контаминантов в седиментационном потоке ($C_{\text{сед}}$) может отличаться от их концентрации в поверхностном слое донных осадков. Результаты расчёта концентрации загрязнителей ($C_{\text{сед}}$) в поступающих в донные осадки седиментационных потоках представлены в графах 5, 8, 11, 14, 17, 20 и 23 табл. 3. Графически зависимости между удельным седиментационным потоком ($v_{\text{сед}}$) и удельным потоком депонирования загрязняющих веществ ($\Pi_{\text{уд}}$) показаны на рис. 4.

Таблица 3. Характеристики седиментационного депонирования загрязняющих веществ в донных осадках Севастопольской бухты
Table 3. Characteristics of pollutants sedimentation deposition in Sevastopol Bay bottom sediments

Номер бокса	$V_{сед}^*, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	^{90}Sr			^{137}Cs			$^{239,240}\text{Pu}$			^{210}Po			Hg			$\Sigma\text{ПХБ}_5$			$\Sigma\text{ДДТ}$		
		$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$	$C_{до}^{**}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухой массы	$\Pi_{уд}^{***}, \text{Бк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	$C_{сед}^{****}, \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1,93	1,5	2,9	1,5	67,5	130	67,5	0,46	0,89	0,46	30,5	58,9	30,5	493	951	493	83	160	83	22	42	22
2	0,61	6,2	3,76	6,2	98,7	59,8	98,7	0,53	0,32	0,53	40,3	24,4	40,3	1546	937	1546	844	511	844	90	54	90
3	1,17	1,4	1,64	1,4	75	87,8	75	0,49	0,57	0,49	50,2	58,7	50,2	837	979	837	725	848	725	120	140	120
4	1,73	1,4	2,42	1,4	142,4	246	142,4	0,32	0,55	0,32	24,7	42,7	24,7	948	1640	948	360	623	360	91	157	91
5	7,09	1,3	9,22	1,3	94,1	667	94,1	0,3	2,13	0,3	20,7	146,8	20,7	720	5105	720	118	837	118	21	149	21
Среднее для бухты	2,51	2,36	3,99	2,4	95,5	238	95,5	0,42	0,89	0,42	33,3	66,3	33,3	909	1922	909	426	596	426	69	109	69

Примечание. * — удельный седиментационный поток; ** — концентрация загрязняющих веществ в донных осадках; *** — удельный поток поступления загрязняющих веществ в донные осадки; **** — концентрация загрязняющих веществ в седиментационном потоке

Note. * — specific sedimentation flux; ** — pollutant concentration in the bottom sediments; *** — specific flux of pollutant input to the bottom sediments; **** — pollutant concentration in the sedimentation flux

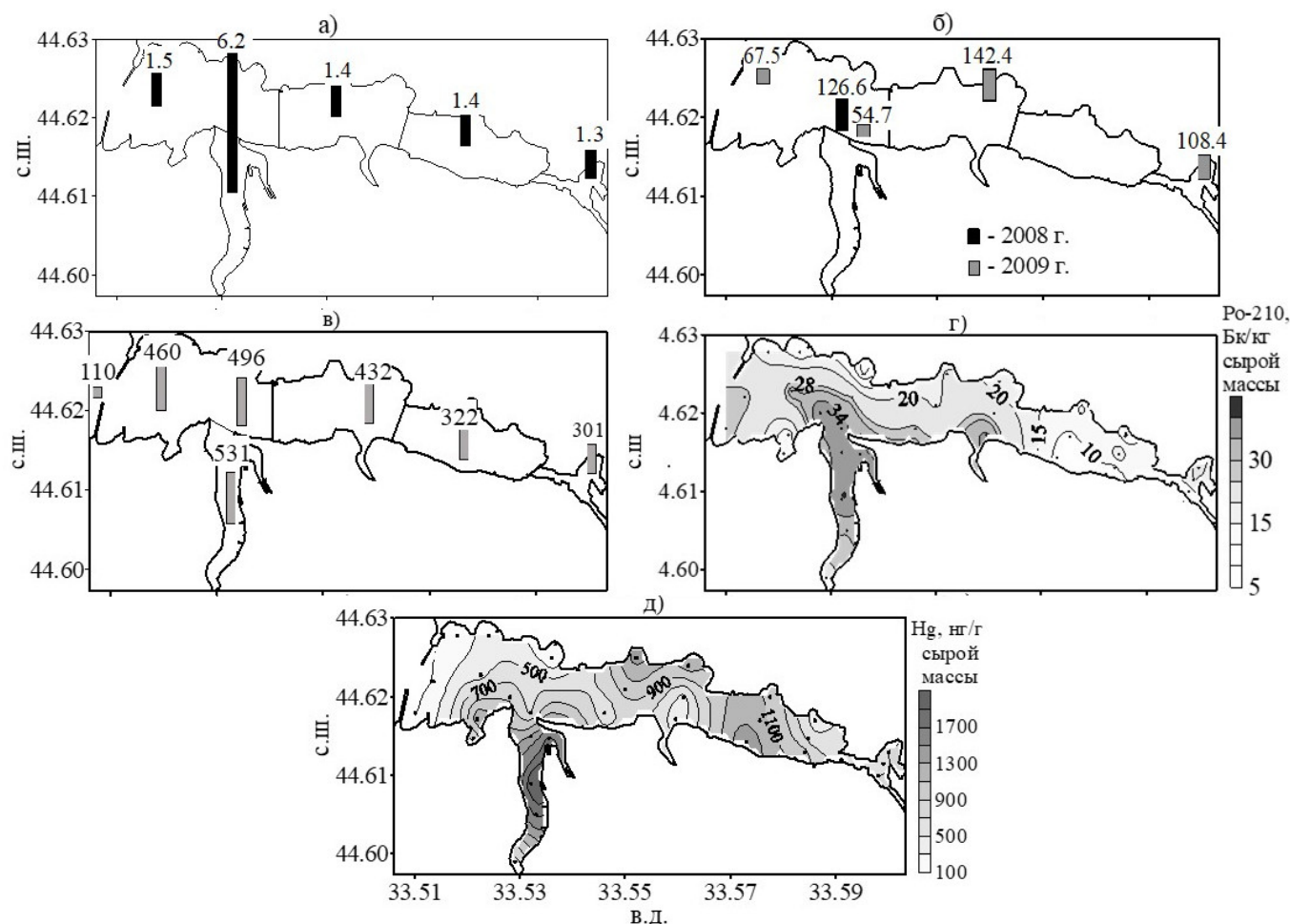


Рис. 2. Распределение в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений Севастопольской бухты: а) ^{90}Sr (Бк·кг⁻¹ сухой массы) в 2008–2010 гг.; б) ^{137}Cs (Бк·кг⁻¹ сухой массы) в период 2008–2009 гг.; в) $^{239,240}\text{Pu}$ (мБк·кг⁻¹ сухой массы) в 2009–2011 гг.; г) ^{210}Po (Бк·кг⁻¹ сухой массы) в 2003 г.; д) общей ртути (нг·г⁻¹ сухой массы) в 2001 г.

Fig. 2. Distribution of: а) ^{90}Sr (Bq·kg⁻¹ dry weight) in 2008–2010; б) ^{137}Cs (Bq·kg⁻¹ dry weight) during 2008–2009; в) $^{239,240}\text{Pu}$ (mBq·kg⁻¹ dry weight) in 2009–2011; г) ^{210}Po (Bq·kg⁻¹ dry weight) in 2003; д) total Hg (ng·g⁻¹ dry weight) in 2001 – in the surface (0–5 cm) layer of bottom sediments in Sevastopol Bay

По рис. 4 видно, что потоки поступления загрязняющих веществ в донные отложения ($\Pi_{\text{уд}}$) возрастали с увеличением скорости седиментации $v_{\text{сед}}$. Это означает, что всякое повышение $v_{\text{сед}}$ и $C_{\text{сед}}$ всегда приводило к росту интенсивности их депонирования в толще донных осадков ($\Pi_{\text{уд}}$). Поэтому представленные на рис. 4 материалы свидетельствуют, что основные биогеохимические механизмы депонирования загрязняющих веществ в донных отложениях связаны с иницирующими седиментацию первично-продукционными процессами, с потоками поступления аллохтонных взвесей в акватории, а также с концентрирующей способностью седиментов в отношении контаминантов.

В соответствии с теоретическими представлениями [5], зависимость потока депонирования загрязняющих веществ в поверхностном слое донных отложений ($\Pi_{\text{уд}}$) от $v_{\text{сед}}$ описывается соотношением:

$$\Pi_{\text{уд}} = v_{\text{сед}} \cdot C_{\text{сед}}, \quad (1)$$

или

$$\Pi_{\text{уд}} = (a \cdot b \cdot P + \Pi_{\text{ал}}) \cdot C_{\text{сед}}, \quad (2)$$

или

$$\Pi_{\text{уд}} = (a \cdot b \cdot P + \Pi_{\text{ал}}) \cdot K_{\text{н}} \cdot C_{\text{w}}, \quad (3)$$

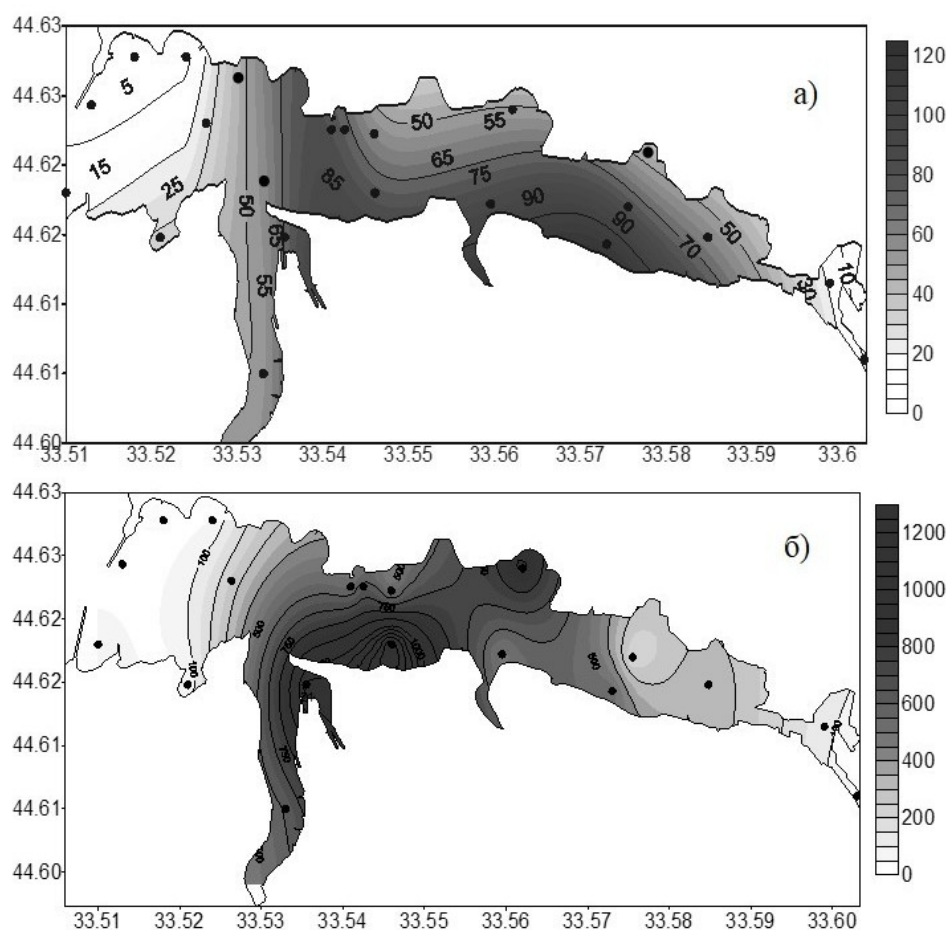


Рис. 3. Распределение ΣDDT (а) и ΣPCB_5 (б), ($\text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$ сухой массы) в поверхностном слое донных осадков б. Севастопольской в 2006–2011 гг. Обозначение: ● — место отбора проб. Средняя концентрация ΣDDT — $(64 \pm 10) \text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$, ΣPCB_5 — $(402 \pm 45) \text{нг}\cdot\text{г}^{-1}$

Fig. 3. Distribution of ΣDDT (a) and ΣPCB_5 (б), ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight) in the surface layer of bottom sediments in the Sevastopol Bay, in 2006–2011. Symbol: ● – sampling location. The average concentration of ΣDDT was $(64 \pm 10) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, of ΣPCB_5 — $(402 \pm 45) \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

где P — удельная первичная продукция ($\text{кгС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$);

а и б — параметры, учитывающие, соответственно, пересчёт первичной продукции (P) из углеродных единиц в сухую массу взвесей (а), а также часть первичной продукции (б), элиминируемую из водной среды и поступающую в виде седиментов в поверхностный слой донных осадков;

$P_{\text{ал}}$ — удельный поток аллохтонных осадков ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$);

C_w — концентрация загрязнителя в водной среде;

K_n — осреднённый коэффициент накопления загрязнителя седиментами, определяемый как отношение концентрации загрязнителя в седиментах в его концентрации в водной среде (в перерасчёте на сухую массу) [16].

Из соотношений (1–3) видно, что интенсивность потока ($P_{\text{уд}}$) в первую очередь определяется изменениями концентрации загрязняющих веществ в акватории (C_w), первичной продукцией (P), поступлением аллохтонных взвесей ($P_{\text{ал}}$) и концентрирующей способностью (K_n) биогенных и терригенных взвесей. Антропогенные воздействия приводят, как правило, к возрастанию концентрации загрязнителей в воде, а также к общему повышению трофности вод, связанной с увеличением потока поступления в акватории биогенных элементов и терригенного материала с береговым стоком. В целом антропогенные воздействия увеличивают $P_{\text{уд}}$. Естественно, что этот поток уменьшает

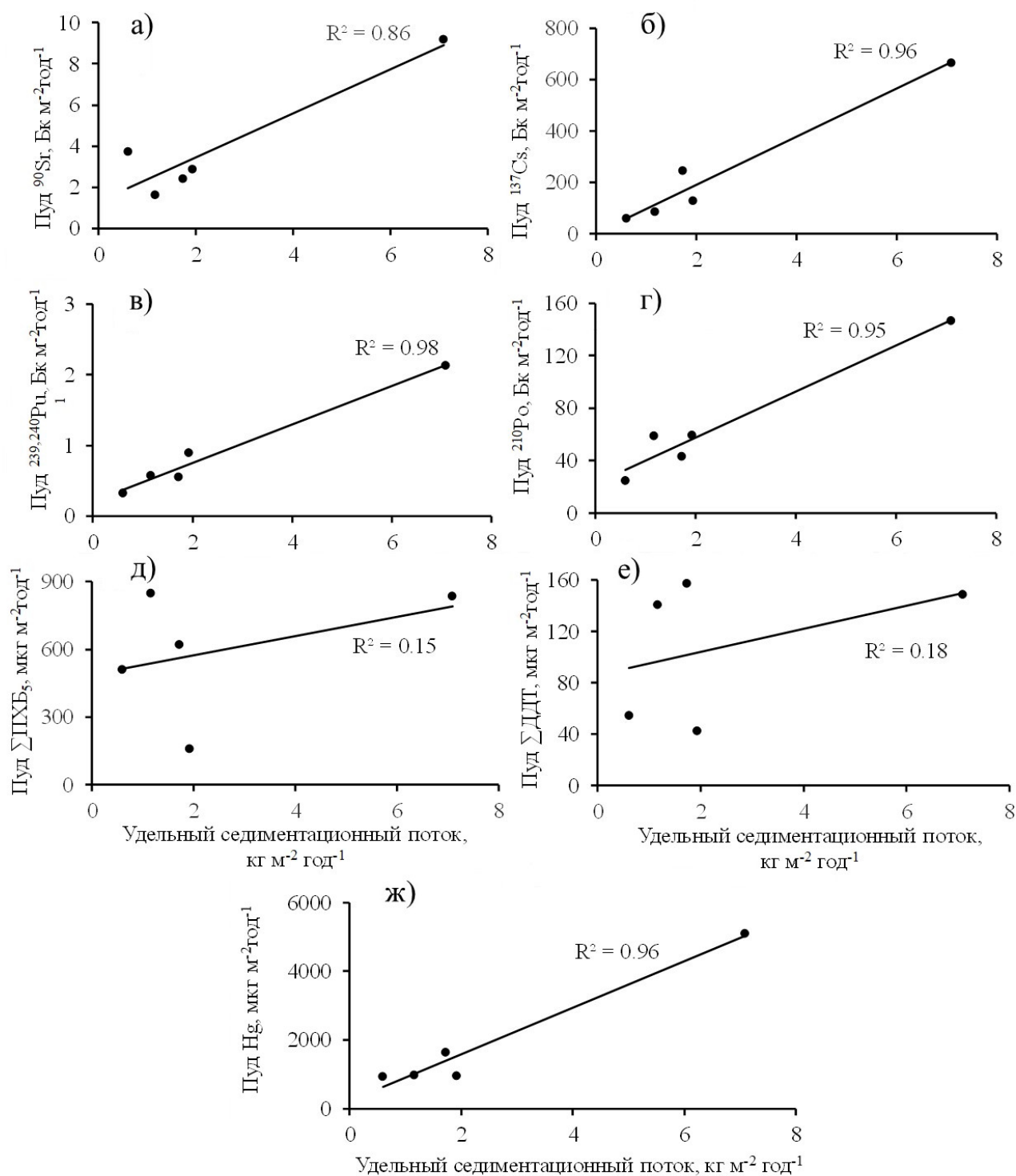


Рис. 4. Зависимость удельных потоков депонирования ⁹⁰Sr (а), ¹³⁷Cs (б), ^{239,240}Pu (в), ²¹⁰Po (г), ΣПХБ₅ (д), ΣДДТ (е) и ртути (ж) в донные отложения от соответствующих удельных седиментационных потоков (кг·м⁻²·год⁻¹)

Fig. 4. Dependence of ⁹⁰Sr (а), ¹³⁷Cs (б), ^{239,240}Pu (в), ²¹⁰Po (г), ΣPCB₅ (д), ΣDDT (е) and mercury (ж) specific deposition fluxes into the bottom sediments on the corresponding specific sedimentation fluxes (kg·m⁻²·y⁻¹)

содержание загрязняющих веществ в водной среде, то есть его влияние направлено на компенсацию вызвавших его причин. Поэтому соотношения (1–3) демонстрируют проявление в природных условиях принципа Ле Шателье — Брауна [18], воздействие которого направлено в сторону стабилизации экологического состояния морских экосистем под влиянием факторов загрязнения и гиперэвтрофикации вод.

Следует обратить внимание на тот факт, что на рис. 4 корреляционные отношения между $P_{уд}$ и $v_{сед}$ для ^{90}Sr (а), ^{137}Cs (б), $^{239,240}Pu$ (в), ^{210}Po (г) и ртути (ж) имеют высокую статистическую значимость ($R^2 = 0,86–0,98$). Это свидетельствует, что они с достаточной степенью адекватности могут быть описаны соотношениями (1–3). В то же время зависимости между скоростью осадконакопления ($v_{сед}$) и поступлением хлорорганических соединений в донные отложения $\Sigma ПХБ_5$ (рис. 4д) и $\Sigma ДДТ$ (рис. 4е) отягощены повышенной степенью вариабельности ($R^2 = 0,15–0,18$). Этот феномен может найти объяснение, поскольку хлорорганические соединения поступают в морскую среду в составе седиментационного материала, который не десорбирует ХОС в водной среде, а непосредственно депонирует их в толще донных осадков [9]. С учётом отмеченного обстоятельства следует ожидать, что седиментационные потоки ХОС могут быть теоретически отражены только соотношениями (1) и (2).

Рассмотрение соотношений (1–3) в целом привело к обоснованию двух следствий.

1. Впервые стало очевидным, что концентрирующая способность живого вещества, как и сорбирующая способность косного, является одним из самых значимых факторов биогеохимического механизма самоочищения вод. Это позволило интерпретировать такой параметр, как коэффициент накопления (K_n), не только для характеристики радиоэкологических процессов [16] и решения санитарно-гигиенических проблем, но и как важный показатель интенсивности биогеохимических циклов оборота загрязняющих веществ в морской среде.
2. Соотношения (1–3) позволяют определять потоки самоочищения акваторий в результате воздействия биогеохимических процессов по принципу Ле Шателье — Брауна при реализации гомеостаза морских экосистем, а также могут использоваться для оценивания относительной экологической опасности загрязнения вод, особенно для контаминантов, не имеющих нормативных показателей ПДК.

Следствие 2 может быть обосновано на базе следующих соображений. Из соотношений (1–3) вытекает, что величина потока депонирования загрязняющих веществ в толще донных отложений зависит от скорости осадконакопления ($v_{сед}$) и концентрации контаминантов ($C_{сед}$) в седиментационном потоке. Эти параметры определяются, в свою очередь, вкладом первичной продукции ($a \cdot b \cdot P$) и терригенных процессов ($P_{ал}$) в седиментогенез, а также концентрацией загрязняющих веществ (C_w) и коэффициентов их концентрирования или сорбции (K_n) взвесями. Обычно акватории с антропогенным прессом характеризуются гиперэвтрофикацией вод и повышением в них концентрации загрязняющих веществ. Поэтому данным районам должны соответствовать более высокие потоки седиментационной элиминации загрязняющих веществ из водной среды, чем таковые в экологически более благоприятных или «условно чистых» зонах.

Для проверки адекватности выдвинутой гипотезы нами использованы представленные в табл. 3 данные для Севастопольской бухты и материалы исследований потоков самоочищения вод в условно чистых акваториях Чёрного моря [6]. Результаты сравнительных расчётов сведены в табл. 4.

Из представленных в табл. 4 данных следует, что отношения концентраций различных загрязняющих веществ в седиментационных потоках в Севастопольской бухте и в условно чистых акваториях Чёрного моря значительно различаются.

Графическая интерпретация содержащихся в табл. 4 данных представлена на рис. 5.

Видно (рис. 5), что интенсивность биоседиментационных процессов элиминации ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}Pu$ и ^{210}Po из вод Севастопольской бухты лишь незначительно превышает или равна таковой в условно чистых районах Чёрного моря. В то же время соотношение концентраций ртути ($C_{сед2}/C_{сед1}$) в седиментационных потоках бухты в 17,70 раза, а соотношение потоков самоочищения

Таблица 4. Характеристики относительного седиментационного самоочищения вод в Севастопольской бухте**Table 4.** Characteristics of relative sedimentational self-purification in Sevastopol Bay water

Радионуклид	Условно чистая зона [6]			Севастопольская бухта (средние для бухты)		Отношение показателей самоочищения вод	
	Район	$C_{\text{сед1}}^*$, Бк·кг ⁻¹	$P_{\text{уд1}}^{**}$, Бк·м ⁻² ·год ⁻¹	$C_{\text{сед2}}^{***}$, Бк·кг ⁻¹	$P_{\text{уд2}}^{****}$, Бк·м ⁻² ·год ⁻¹	$C_{\text{сед2}}/C_{\text{сед1}}$	$P_{\text{уд2}}/P_{\text{уд1}}$
Радионуклиды							
⁹⁰ Sr	Внешний рейд Севастополя	1,92	4,30	2,36	3,98	1,23	0,93
¹³⁷ Cs	То же	64,76	43,00	96,00	238,00	1,48	5,53
^{239,240} Pu	Мыс Херсонес	0,22	0,48	0,42	0,89	1,91	1,85
²¹⁰ Po	Карадаг	38,71	86,90	33,30	66,00	0,86	0,76
Ртуть и хлорорганические соединения							
Загрязняющее вещество	Район	$C_{\text{сед1}}$, мкг·кг ⁻¹	$P_{\text{уд1}}$, мкг·м ⁻² ·год ⁻¹	$C_{\text{сед2}}$, мкг·кг ⁻¹	$P_{\text{уд2}}$, мкг·м ⁻² ·год ⁻¹	$C_{\text{сед2}}/C_{\text{сед1}}$	$P_{\text{уд2}}/P_{\text{уд1}}$
Hg	Западная халиста- тическая зона Чёрного моря	51,43	3,60	909,00	1922,00	17,70	533,00
СПХБ	Карадаг	1,07	2,40	426,00	596,00	398,00	248,00
ΣДДТ	То же	0,76	1,70	69,00	109,00	91,00	64,00

Примечание. * — концентрация загрязняющих веществ в седиментационном потоке условно чистых зон; ** — удельный поток загрязняющих веществ в поверхностный слой донных отложений условно чистых зон; *** — средняя концентрация загрязняющих веществ в седиментационном потоке Севастопольской бухты; **** — средний удельный поток загрязняющих веществ в поверхностный слой донных отложений Севастопольской бухты

Note. * – pollutant concentration in sedimentation flux in conditionally clean areas; ** – specific flux of pollutants into the upper layer of bottom sediment in conditionally clean areas; *** – average pollutant concentration in sedimentation flux in the Sevastopol Bay; **** – average specific pollutant flux into the upper bottom sediment layer in the Sevastopol Bay

вод ($P_{\text{до2}}/P_{\text{до1}}$) — соответственно в 533,00 раза выше, чем в условно чистых акваториях. Аналогично для СПХБ величины $C_{\text{сед2}}/C_{\text{сед1}}$ и $P_{\text{до2}}/P_{\text{до1}}$ выше в 398,00 и 248,00 раз соответственно, а для ΣДДТ — в 91,00 и в 64,00 раза по сравнению с показателями условно чистых зон Чёрного моря. Так как в Севастопольской бухте концентрации ртути, СПХБ и ΣДДТ в донных осадках значительно выше, чем в условно чистых районах Чёрного моря, то очевидно, что отличие соотношений $C_{\text{сед2}}/C_{\text{сед1}}$ и $P_{\text{до2}}/P_{\text{до1}}$ может быть индикатором относительной экологической значимости различных загрязняющих веществ. То есть в Севастопольской бухте наиболее экологически значимо её загрязнение ртутью, а также СПХБ и ΣДДТ.

Из данных (табл. 4) видно, что в районах, подверженных антропогенному прессу, повышается как концентрация загрязняющих веществ в седиментационных потоках, так и интенсивность их депонирования в донные отложения, что подтверждает достоверность гипотезы о функционировании биогеохимических процессов в соответствии с принципом Ле Шателье — Брауна. Также данные табл. 4 иллюстрируют возможность ранжировать акватории по относительной экологической опасности загрязнения вод.

Следует отметить, что определение потоков биогеохимического самоочищения вод связано с влиянием концентрационных характеристик седиментов в зависимости от изменения содержания контаминантов в водной среде. Из литературных данных известно, что коэффициенты накопления радионуклидов (К) живым и косным веществом морской среды могут достигать 10^5 – 10^6 единиц [16]. В условиях гиперэвтрофикации вод, при удельной массе живого и косного вещества свыше $10 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, пул радионуклидов в нём может превышать 50 % от общего их содержания в водной среде, а коэффициенты накопления радионуклидов гидробионтами в широком диапазоне (вплоть до 10^{-6} – 10^{-4} моль·л⁻¹)

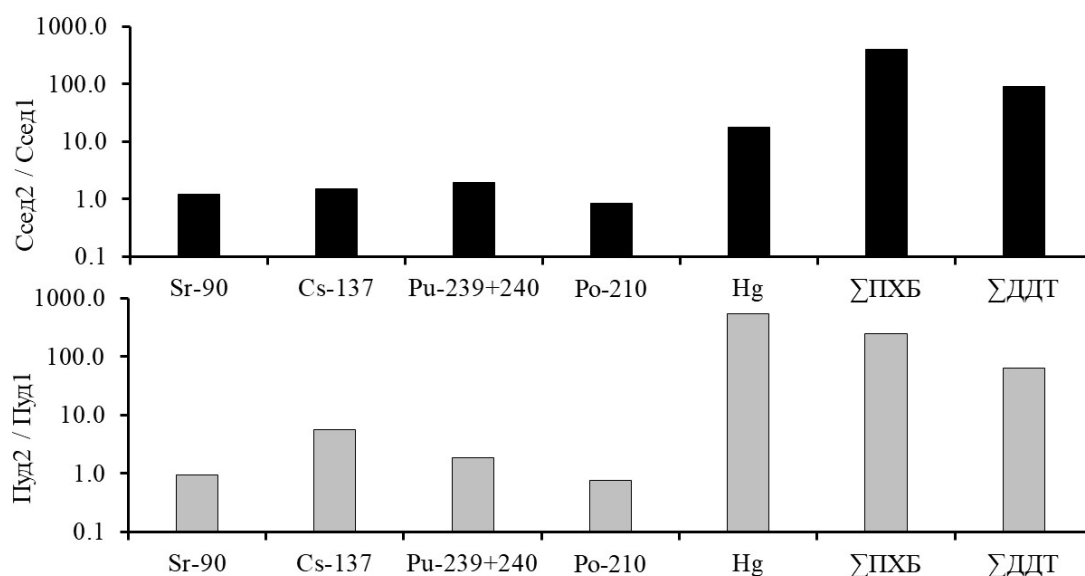


Рис. 5. Гистограммы распределения отношений C_{sed2}/C_{sed1} и $P_{уд2}/P_{уд1}$ для загрязняющих веществ из Севастопольской бухты и условно чистых районов Чёрного моря

Fig. 4. Histograms of C_{sed2}/C_{sed1} and F_{sp2}/F_{sp1} ratio distribution for pollutants of Sevastopol Bay and conditionally clean areas of the Black Sea

не зависят от изменений концентраций их изотопных носителей в воде [16]. Отсюда следует, что концентрирующая способность седиментов линейно связана с концентрацией радионуклидов в воде. Исследования показали, что для тяжёлых металлов зависимости между K_n и C_w описываются уравнениями Фрейндлиха или Ленгмюра [13]. В обоих случаях они отражают влияние фактора сорбционного насыщения, связанного со снижением коэффициентов накопления загрязнителей седиментами.

Выводы:

1. Концентрирующая способность живого вещества, как и сорбирующая способность косного, — один из самых значимых факторов реализации биогеохимического механизма самоочищения вод. Коэффициент накопления (K_n) не только характеризует радиоэкологические процессы, но и является важным показателем интенсивности биогеохимических циклов загрязняющих веществ в морской среде.
2. Воздействие седиментационных процессов в отношении кондиционирования радиоактивного и химического состава вод направлено на поддержание гомеостаза морских экосистем по принципу Ле Шателье — Брауна.
3. Сравнительные оценки концентрации контаминантов в седиментах и потоках их депонирования в толще донных осадков в акваториях с различным антропогенным прессом могут использоваться для определения относительной экологической опасности радиоактивного и химического загрязнения их вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гулин С. Б., Егоров В. Н., Стокозов Н. А., Мирзоева Н. Ю. Определение возраста донных отложений и оценка скорости осадконакопления в прибрежных и глубоководных акваториях Чёрного моря с использованием природных и антропогенных трассеров // *Радиоэкологический отклик Чёрного моря на черномыльскую аварию* / под ред. Г. Г. Поликарпова, В. Н. Егорова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 499–502. [Gulin S. B.,

- Egorov V. N., Stokozov N. A., Mirzoeva N. Yu. Opređenje vozrasta donnykh otlozhenii i otsenka skorosti osadkonakopleniya v pribrezhnykh i glubokovodnykh akvatoriyakh Chernogo morya s ispol'zovaniem prirodnykh i antropogennykh trasserov. In: *Radioekologicheskii otklik Chernogo morya na chernobyl'skuyu avariyu* / G. G. Polikarpov, V. N. Egorov (Eds). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, pp. 499–502. (in Russ.).
2. Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Коротков А. А. Геохронологическая оценка радиоактивного загрязнения Чёрного моря // *Чтения памяти Н. В. Тимофеева-Ресовского: 100-летию со дня рождения Н. В. Тимофеева-Ресовского посвящается*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 88–99. [Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N., Korotkov A. A. Geokhronologicheskaya otsenka radioaktivnogo zagryazneniya Chernogo morya. In: *Chteniya pamyati N. V. Timofeeva-Resovskogo: 100-letiyu so dnya rozhdeniya N. V. Timofeeva-Resovskogo posvyashchaetsya*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2000, pp. 88–99. (in Russ.).]
 3. Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Кривенко О. В., Стокозов Н. А., Жерко Н. В. Изучение сезонной динамики седиментационного выноса взвешенного вещества, биогенных элементов и загрязняющих веществ из поверхностного слоя воды Чёрного моря в период с 1992 по 1994 гг. // *Геохимия*. 1995. Т. 4, № 6. С. 863–873. [Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N., Krivenko O. V., Stokozov N. A., Zherko N. V. Study of seasonal dynamics of the suspended matter, nutrients and pollutants scavenging out of the Black-Sea surface from 1992 to 1994. *Geokhimiya*, 1995, vol. 4, no. 6, pp. 863–873. (in Russ.).]
 4. Гулин С. Б., Сидоров И. Г., Гулина Л. В. Биогенная седиментация в Черном море: радиотрассерное исследование // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 2. С. 19–25. [Gulin S. B., Sidorov I. G., Gulina L. V. Biogenic sedimentation in the Black Sea: radiotracer-derived study. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2013, vol. 12, no. 2, pp. 19–25. (in Russ.).]
 5. Егоров В. Н. Нормирование потоков антропогенного загрязнения черноморских регионов по биогеохимическим критериям // *Экология моря*. 2001. Вып. 57. С. 75–84. [Egorov V. N. Valuation of fluxes of anthropogenic pollution of the Black Sea, using biogeochemical criterions. *Ekologiya morya*, 2001, iss. 57, pp. 75–84. (in Russ.).]
 6. Егоров В. Н., Гулин С. Б., Поповичев В. Н., Мирзоева Н. Ю., Терещенко Н. Н., Лазоренко Г. Е., Малахова Л. В., Плотыцына О. В., Малахова Т. В., Проскурнин В. Ю., Сидоров И. Г., Гулина Л. В., Стецюк А. П., Марченко Ю. Г. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Чёрном море в отношении загрязняющих веществ // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 4. С. 5–26. [Egorov V. N., Gulin S. B., Popovichev V. N., Mirzoeva N. Yu., Tereshchenko N. N., Lazorenko G. E., Malakhova L. V., Plotitsyna O. V., Malakhova T. V., Proskurnin V. Yu., Sidorov I. G., Gulina L. V., Stetsyuk A. P., Marchenko Yu. G. Biogeochemical mechanisms of formations of critical zone concerning to pollutants in the Black Sea. *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2013, vol. 12, no. 4, pp. 5–26. (in Russ.).]
 7. Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н., Романов А. С., Игнатьева О. Г. *Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов*. Севастополь, 2006. 90 с. (Препринт / НАН Украины, Морской гидрофизический институт). [Ivanov V. A., Ovsyanyi E. I., Repetin L. N., Romanov A. S., Ignat'eva O. G. *Gidrologo-gidrokhimicheskii rezhim Sevastopol'skoi bukhty i ego izmeneniya pod vozdeistviem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov*. Sevastopol, 2006, 90 p. (Preprint / NAN Ukrainy, Morskoj gidrofizicheskii institut). (in Russ.).]
 8. Костова С. К., Егоров В. Н., Поповичев В. Н. Многолетние исследования загрязнения ртутью Севастопольских бухт (Чёрное море) // *Экология моря*. 2001. Вып. 56. С. 99–103. [Kostova S. K., Egorov V. N., Popovichev V. N. The long-term investigation of the mercury pollution in the Sevastopol Bay (the Black Sea). *Ekologiya morya*, 2001, iss. 56, pp. 99–103. (in Russ.).]
 9. Малахова Л. В. Распределение полихлорированных бифенилов в поверхностном слое

- донных осадков Севастопольской бухты (Чёрное море) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 268–272. [Malakhova L. V. Raspredelenie polikhlorirovannykh bifenilov v poverkhnostnom sloe donnykh osadkov Sevastopol'skoi bukhty (Chernoe more). In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2005, iss. 12, pp. 268–272. (in Russ.)].
10. *Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды* / под ред. А. Н. Мареев, А. С. Зыковой. Москва : МЗ СССР, 1980. 356 с. [*Metodicheskie rekomendatsii po sanitarnomu kontrolyu za sodержaniem radioaktivnykh veshchestv v ob'ektakh vneshnei sredy* / A. N. Marei, A. S. Zyкова (Eds). Moscow: MZ SSSR, 1980, 356 p. (in Russ.)].
 11. Мирзоева Н. Ю. Динамика содержания и перераспределения ^{90}Sr в донных отложениях водоемов Украины после аварии на ЧАЭС // *Системы контроля окружающей среды (Средства, информационные технологии и мониторинг)* : сб. науч. тр. Севастополь, 2010. С. 359–361. [Mirzoeva N. Yu. Dinamika sodержaniya i pereraspredeleniya ^{90}Sr v donnykh otlozheniyakh vodoemov Ukrainy posle avarii na ChAES. In: *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy (Sredstva, informatsionnye tekhnologii i monitoring)*: sb. nauch. tr. Sevastopol, 2010, pp. 359–361. (in Russ.)].
 12. Мирзоева Н. Ю., Гулин С. Б., Архипова С. И., Коркишко Н. Ф., Мигаль Л. В., Мосейченко И. Н., Сидоров И. Г. Потоки миграции и депонирования послеаварийных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в различных районах Чёрного моря (элементы биогеохимических циклов) // *Наукoвi праці: науково-методичний журнал. Техногенна безпека*. 2013. Т. 210, № 198. С. 45–51. [Mirzoeva N. Yu., Gulin S. B., Arkhipova S. I., Korkishko N. F., Migal' L. V., Moseichenko I. N., Sidorov I. G. Potoki migratsii i deponirovaniya posleavariinykh radionuklidov ^{90}Sr i ^{137}Cs v razlichnykh raionakh Chernogo morya (elementy biogeokhimicheskikh tsiklov). *Naukovi pratsi: nauково-metodichnii zhurnal. Tekhnogenna bezpeka*, 2013, vol. 210, no. 198, pp. 45–51. (in Russ.)].
 13. Несмеянов А. Н. *Радиохимия*. Москва : Химия, 1978. 560 с. [Nesmeyanov A. N. *Radiokhimiya*. Moscow: Khimiya, 1978, 560 p. (in Russ.)].
 14. Овсяный Е. И., Артеменко В. М., Романов А. С., Орехова Н. А. Сток реки Чёрной, как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 57–65. [Ovsyanyi E. I., Artemenko V. M., Romanov A. S., Orekhova N. A. Stok reki Chernoi, kak faktor formirovaniya vodno-solevogo rezhima i ekologicheskogo sostoyaniya Sevastopol'skoi bukhty. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2007, iss. 15, pp. 57–65. (in Russ.)].
 15. Овсяный Е. И., Романов А. С., Миньковская Р. Я., Красновид И. И., Озюменко Б. А., Цымбал И. М. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152. [Ovsyanyi E. I., Romanov A. S., Min'kovskaya R. Ya., Krasnovid I. I., Ozyumenko B. A., Tsybmal I. M. Osnovnye istochniki zagryazneniya morskoi sredy Sevastopol'skogo regiona. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2001, iss. 2, pp. 138–152. (in Russ.)].
 16. Поликарпов Г. Г. *Радиоэкология морских организмов*. Москва : Атомиздат, 1964. 295 с. [Polikarpov G. G. *Radioekologiya morskikh organizmov*. Moscow: Atomizdat, 1964, 295 p. (in Russ.)].
 17. *Радиоэкологический отклик Чёрного моря на черновыльскую аварию* / под ред. Г. Г. Поликарпова, В. Н. Егорова. Севастополь : ЭКОСИ-

- Гидрофизика, 2008. 667 с. [*Radioekologicheskii otklik Chernogo morya na chernobyl'skuyu avariyu* / G. G. Polikarpov, V. N. Egorov (Eds). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, 667 p. (in Russ.)].
18. Реймерс Н. Ф. *Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы)*. Москва : Журнал «Россия Молодая», 1994. 367 с. [Reimers N. F. *Ekologiya (teorii, zakony, pravila, printsipy i gipotezy)*. Moscow: Zhurnal "Rossiya Molodaya", 1994, 367 p. (in Russ.)].
 19. Стокозов Н. А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 198–208. [Stokozov N. A. Morfometricheskie kharakteristiki Sevastopol'skoi i Balaklavskoi bukht. In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2010, iss. 23, pp. 198–208. (in Russ.)].
 20. Терещенко Н. Н. Методика определения трансурановых элементов плутония и америция в объектах окружающей среды // *Радиоэкологический отклик Черног моря на черновильскую аварию* / под ред. Г. Г. Поликарпова, В. Н. Егорова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 70–75. [Tereshchenko N. N. Metodika opredeleniya transuranovykh elementov plutoniya i ameritsiya v ob"ektakh okruzhayushchei sredy. In: *Radioekologicheskii otklik Chernogo morya na chernobyl'skuyu avariyu* / G. G. Polikarpov, V. N. Egorov (Eds). Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, pp. 70–75 (in Russ.)].
 21. *Унифицированные методы мониторинга фонового загрязнения природной среды*. Москва : Гидрометеиздат, 1986. 180 с. [Unifitsirovanye metody monitoringa fonovogo zagryazneniya prirodnoi sredy. Moscow: Gidrometeoizdat, 1986, 180 p. (in Russ.)].
 22. Chen Q., Aarkrog A., Nielsen S. P., Dahlgaard H. *Procedures for determination of $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{237}Np , $^{234,238}\text{U}$, $^{228,230,232}\text{Th}$, ^{99}Tc , ^{210}Pb - ^{210}Po in environmental materials* / Risø National Laboratory (Roskilde). Roskilde, Denmark: Pitney Bowes Management Services, A/S, 2001, 34 p. (Riso-R-1263(EN)).

BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SEVASTOPOL BAY SEDIMENTATION SELF-PURIFICATION FROM RADIONUCLIDES, MERCURY AND CHLOROGENIC CONTAMINANTS

V. N. Egorov, S. B. Gulin, L. V. Malakhova, N. Yu. Mirzoyeva,
V. N. Popovichev, N. N. Tereshchenko, G. E. Lazorenko,
O. V. Plotitsyna, T. V. Malakhova, V. Yu. Proskurnin, I. G. Sidorov,
A. P. Stetsyuk, L. V. Gulina, Yu. G. Marchenko

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: egorov.ibss@yandex.ru

The work is focused on the study of characteristics of sedimentational self-purification from radioactive and conservative chemical pollutants in Sevastopol Bay waters. Using data on the distribution of ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, ΣPCB_5 , and ΣDDT in the surface (0–5 cm) layer of bottom sediments in different areas of the bay, it is shown that the concentrating ability of living and inert matter concerning contaminants (characterized by the concentration coefficient) is one of the major parameters in realization of biogeochemical mechanism of water self-purification. The effect of sedimentation processes is aimed at maintaining the radionuclides and chemical homeostasis of marine ecosystems by the Le Chatelier – Brown principle. Hg, ΣPCB_5 and ΣDDT are shown to be the main pollutants of Sevastopol Bay waters at present.

Keywords: Sevastopol Bay, bottom sediments, ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Po , Hg, organochlorine contaminants, biosedimentation, radionuclide and chemical homeostasis, Le Chatelier – Brown principle