

Самоочистительная способность экосистем Севастопольской бухты в отношении неорганических форм азота и фосфора в период с 2012 по 2020 год

И. В. Мезенцева¹, Е. Е. Совга^{2*}, Т. В. Хмара²

¹ Севастопольское отделение Государственного океанографического института
им. Н. Н. Зубова, Севастополь, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: science-mhi@mail.ru

Аннотация

На основе сводной базы океанографических данных МГИ РАН и СО ФГБУ ГОИН за 2012–2020 гг. выполнены оценки самоочистительной способности экосистем Севастопольской бухты в отношении биогенных элементов – азота и фосфора, рассчитанные балансовым методом по величине ассимиляционной емкости и ее удельной величине. Оценены средние и максимальные концентрации неорганических форм фосфора (PO_4) и азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) за указанный период, а также значения средней и максимальной скорости и времени удаления этих биогенных элементов из экосистем бухты. Показаны изменения в процентном соотношении форм неорганического азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) в акватории всех частей Севастопольской бухты за два периода (1998–2012 гг. и 2012–2020 гг.). Эти изменения в большей степени отразились на содержании восстановленной формы азота аммония, которое за последние годы увеличилось в экосистемах всей бухты. Изменения самоочистительной способности экосистем бухты проявились в разбросе данных об ассимиляционной емкости исследуемых экосистем в отношении биогенных элементов. При этом наиболее низкая самоочистительная способность наблюдается в экосистеме восточной части бухты. Оценены возможные причины наблюдаемой ситуации, которые связаны с изменениями ветрового режима над акваторией бухты в последнее десятилетие и формирующейся под его влиянием системой поверхностных течений. Методом математического моделирования рассчитаны поверхностные течения в бухте при преобладающих ветрах восточных направлений. Показано, что увеличение периодичности действия таких ветров способствует усилению вентиляции вод Южной бухты и более интенсивному поступлению загрязняющих веществ в западном направлении. Проанализированы причины ухудшения самоочистительной способности восточной части бухты в отношении всех неорганических форм азота и фосфатов в последнее десятилетие. Показано, что изменения самоочистительной способности экосистем всей акватории Севастопольской бухты связаны с ростом рекреационной нагрузки на побережье бухты.

© Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: Севастопольская бухта, биогенные элементы, биогенный азот, биогенный фосфор, экосистема, самоочищение, самоочистительная способность, ассимиляционная емкость, поверхностные течения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ по теме № 0827-2020-0004 «Прибрежные исследования».

Для цитирования: Мезенцева И. В., Совга Е. Е., Хмара Т. В. Самоочистительная способность экосистем Севастопольской бухты в отношении неорганических форм азота и фосфора в период с 2012 по 2020 год // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 4. С. 101–115. EDN MQUMMV.

Self-Purification Capacity of Sevastopol Bay Ecosystems in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen and Phosphorus from 2012 to 2020

I. V. Mezentseva¹, E. E. Sovga^{2*}, T. V. Khmara²

¹ *Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

* e-mail: science-mhi@mail.ru

Abstract

The paper uses the 2012–2020 joint oceanographic database of MHI RAS and SB FSBI SOI to estimate the self-purification capacity of Sevastopol Bay ecosystems in relation to biogenic nitrogen and phosphorus. The assimilation capacity and its specific value were calculated using the balance method. The paper estimates the average and maximum concentrations of inorganic phosphorus (PO₄) and nitrogen (NO₂, NO₃, NH₄), as well as the average and maximum rates and time of removal of these nutrients from the bay ecosystems. The paper shows changes in the percentage of forms of inorganic nitrogen (NO₂, NO₃, NH₄) in the water area of all parts of Sevastopol Bay for two periods (1998–2012 and 2012–2020). These changes had a greater impact on the content of the reduced form of ammonium nitrogen which has increased in all ecosystems of the bay in recent years. Changes in the self-purification capacity of the bay ecosystems were manifested as a spread of data on the assimilation capacity of the study ecosystems in relation to nutrients. At the same time, the lowest self-purification capacity was observed for the ecosystem of the eastern part of the bay. The paper assesses possible causes of the observed situation, which are associated with changes in the wind regime over the bay water area in the last decade and the resulting formation of the system of surface currents. The surface currents in the bay under prevailing easterly winds were calculated using the computational modeling method. The paper shows that an increase in the frequency of such winds contributes to increased ventilation of the waters of Yuzhnaya Bay and a more intense input of pollutants in the westerly direction. The paper analyzes the reasons for deterioration in the self-purification ability of the eastern part of the bay in the last decade in relation to all inorganic forms of nitrogen and phosphates. It was shown that changes in the self-purification ability of ecosystems throughout the Sevastopol Bay waters were associated with an increase in the recreational load on the bay coast.

Keywords: Sevastopol Bay, biogenic nitrogen, biogenic phosphorus, ecosystem, self-purification ability, assimilation capacity, surface currents

Acknowledgements: The study was performed under state assignment of MHI RAS on topic no. 0827-2020-0004 “Coastal research”.

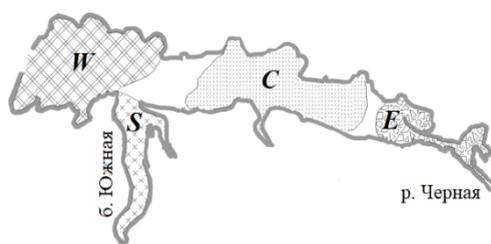
For citation: Mezentseva, I.V., Sovga, E.E. and Khmara, T.V., 2023. Self-Purification Capacity of Sevastopol Bay Ecosystems in Relation to Inorganic Forms of Nitrogen and Phosphorus from 2012 to 2020. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 101–115.

Введение

Севастопольская бухта является одним из градообразующих факторов Севастополя и служит индикатором экологического здоровья региона. Бухта представляет собой полузамкнутую акваторию эстуарного типа длиной около 7 км, максимальной шириной до 1 км, с площадью зеркала более 7 км². Водобмен в бухте затруднен, кроме того, она постоянно испытывает активное антропогенное воздействие. Систематические исследования качества вод Севастопольской бухты начаты в 1975 г. после введения в действие программы Общегосударственной службы наблюдения и контроля окружающей среды [1]. Результаты гидролого-гидрохимических исследований Севастопольской бухты¹⁾ неоднократно рассматривались в литературе (например, [2, 3]). В этих работах показано, что в зависимости от локализации источников загрязнения, рельефа дна и гидрометеорологических условий в Севастопольской бухте образуются как относительно чистые зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения (например, Южная бухта). В соответствии с уровнем загрязнения акватория бухты была разделена на четыре района [3] (рис. 1).

Экологическое благополучие экосистем морских мелководных акваторий, независимо от проводимых природоохранных мероприятий, определяется в первую очередь их самоочистительной способностью, интенсивность которой зависит от целого ряда взаимно обусловленных факторов. Оценить способность экосистем мелководных акваторий к самоочищению можно, рассчитав их ассимиляционную емкость (АЕ) по отношению к приоритетному загрязняющему веществу (ЗВ) или комплексу ЗВ.

Севастопольская бухта – водный объект со сложными географическими и гидролого-гидрохимическими характеристиками. Это подразумевает наличие источников пресных вод и зон их смешения с морскими водами, а также неоднородность антропогенной нагрузки. Поэтому акваторию необходимо районировать и рассчитывать способность к самоочищению (АЕ экосистемы) для каждого выделенного района.



Р и с. 1. Районирование Севастопольской бухты по видам антропогенного воздействия: *W* – западный район, *E* – восточный район, *C* – центральный район и *S* – южный район (по работе [3])

F i g. 1. Zoning of Sevastopol Bay according to the anthropogenic influence level: *W* – western area, *E* – eastern area, *C* – central area and *S* – southern area (from work [3])

¹⁾ Атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты / С. К. Коновалов [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 320 с.

В статье анализируется способность к самоочищению восточной, центральной, западной частей бухты и Южной бухты, а также акватории всей Севастопольской бухты. Самоочистительной способности экосистемы Севастопольской бухты в отношении всех форм неорганического азота и неорганического фосфора посвящено несколько работ [4–7]. В них изучается экосистема всей бухты либо отдельных ее частей (западной, центральной, восточной и Южной бухты) с привлечением расчетных данных по гидродинамике вод бухты. Так, в работе [4] сравнивали самоочистительные способности экосистем западной части бухты, граничащей с открытым морем, в отношении всех форм неорганического азота и южной, наиболее загрязненной ее части. В работе [5] приведены оценки самоочистительной способности экосистем всех частей Севастопольской бухты в отношении восстановленных форм азота (нитриты и аммоний). В работе [6] сравнивается самоочистительная способность экосистем бухты в отношении всех неорганических форм азота и приведены индексы трофности исследуемых экосистем. В работе [7] изучена самоочистительная способность экосистем Южной бухты и восточной части Севастопольской бухты, находящейся под влиянием стока р. Черной в периоды паводка и межени, по отношению к фосфатам при изменении гидродинамического режима бухты. Общим для работ [4–7] является то обстоятельство, что самоочистительная способность экосистем Севастопольской бухты была рассчитана на основе базы океанографических данных МГИ РАН за 1998–2012 гг.

Сезонная динамика вод в отдельных частях Севастопольской бухты рассчитана при использовании гидротермодинамического блока численной трехмерной нестационарной модели *MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment)* [8]. Полученные результаты для восточной части бухты и Южной бухты представлены в работе [7], а для центральной части бухты – в работе [5].

Цель исследования – рассчитать самоочистительную способность экосистем всех частей Севастопольской бухты в отношении неорганического азота и фосфора с использованием базы данных МГИ РАН и СО ФГБУ ГОИН за 2012–2020 гг. с учетом изменения гидрометеоситуации в последнее десятилетие.

Материалы и методы исследования

Использована сводная база архивных материалов МГИ РАН и СО ФГБУ ГОИН за 2012–2020 гг., включающая 8277 определений содержания фосфатов, нитритов, нитратов и аммония. Для оценки АЕ выделенных районов Севастопольской бухты были отобраны 5567 значений концентрации указанных показателей (табл. 1).

При расчете АЕ экосистем выделенных районов Севастопольской бухты использовался балансовый метод [9]. При указанном методе наиболее сложным является расчет интегрального времени пребывания ЗВ в исследуемой экосистеме. Это время в значительной степени определяется физико-химическими свойствами конкретного ЗВ, гидродинамическими параметрами акватории и комплексом процессов (физических, химических, микробиологических), отвечающих за деструкцию ЗВ или его вынос за пределы исследуемой акватории.

Т а б л и ц а 1. Концентрация неорганических соединений фосфора и азота в разных частях Севастопольской бухты (по базе данных МГИ РАН и СО ФГБУ ГОИН) в 2012–2020 гг.

Table 1. Concentration of inorganic phosphorus and nitrogen compounds in different parts of Sevastopol Bay (according to database of MHI RAS and Sevastopol Branch of SOI) in 2012–2020

Соединения / Compounds	Среднее содержание за период, мкМ/л / Mean content for the period, μM/L	Диапазон концентрации, мкМ/л / Concentration range, μM/L	Стандартное отклонение / Standard deviation	Количество определений / Number of determinations
Фосфаты / Phosphates	0.10	0–3.65	0.082	1520
Нитриты / Nitrites	0.24	0–7.67	0.711	1354
Нитраты / Nitrates	5.70	0–67.28	1.765	1355
Аммоний / Ammonium	1.40	0–40.66	1.021	1338

Итоговые формулы для оценки среднего значения \bar{A}_{mi} и среднеквадратичного отклонения $\sqrt{D[A_{mi}]}$ АЕ морской экосистемы (m) по отношению к i -му ЗВ выглядят следующим образом:

$$AE_{mi} = \bar{A}_{mi} \pm \sqrt{D[A_{mi}]},$$

$$\bar{A}_{mi} = \frac{Q_m \cdot C_{thri}}{C_{maxi}} \cdot \bar{v}_i, \quad D[A_{mi}] = \left(\frac{Q_m \cdot C_{thri}}{C_{maxi}} \right)^2 \cdot D[v_i],$$

где Q_m – объем воды в расчетной области; C_{thri} – пороговая концентрация ЗВ; C_{maxi} – максимальная в экосистеме концентрация ЗВ; v_i – скорость удаления ЗВ из экосистемы, среднее значение \bar{v}_i и дисперсия $D[v_i]$ которой определяются по оригинальному алгоритму [10].

Результаты и обсуждение

Сравнение относительно новых данных за 2012–2022 гг. с материалами ранее опубликованных исследований (1998–2012 гг.) показало значительное изменение содержания биогенных форм азота и фосфора в водах выделенных районов Севастопольской бухты. В табл. 2 представлены средние и максимальные значения концентрации неорганических соединений фосфора и азота в разных частях бухты в 2012–2020 гг.

Так, за исследуемый период 2012–2020 гг. среднее содержание **фосфатов** либо осталось без изменений (восточная часть бухты), либо уменьшилось на 0.02–0.06 мкМ/л (во всех остальных акваториях). Максимальные значения концентрации значительно выросли в восточной части (в 2.6 раза) и незначительно снизились в остальных частях бухты.

Т а б л и ц а 2. Содержание (мкМ/л) неорганических соединений фосфора и азота в разных частях Севастопольской бухты в 2012–2020 гг.

T a b l e 2. Content ($\mu\text{M/L}$) of inorganic phosphorus and nitrogen compounds in different parts of Sevastopol Bay in 2012–2020

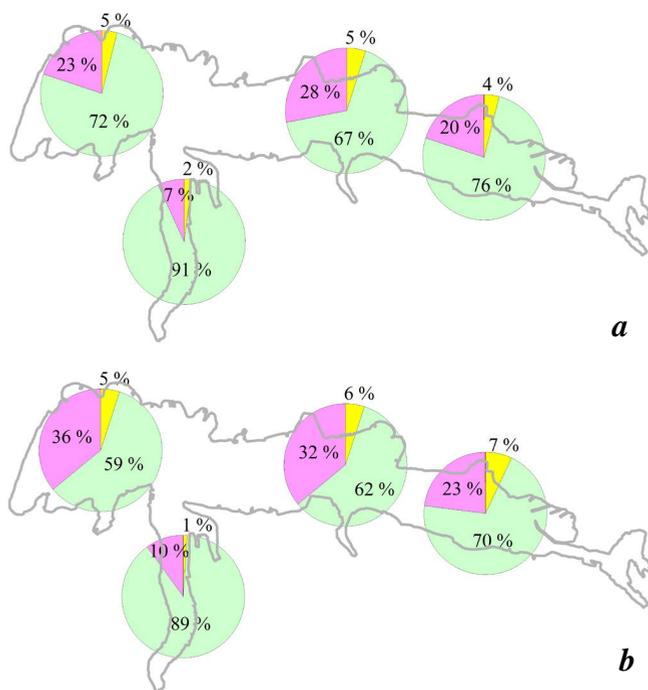
Район / Area	Фосфаты (PO_4^{3-}) / Phosphates		Нитриты (NO_2^-) / Nitrites		Нитраты (NO_3^-) / Nitrates		Аммоний (NH_4^+) / Ammonium	
	Среднее / Mean	Максимум / Max	Среднее / Mean	Максимум / Max	Среднее / Mean	Максимум / Max	Среднее / Mean	Максимум / Max
Южная бухта / Yuzhnaya Bay	0.10	0.95	0.23	2.54	14.79	286.40	1.59	16.02
Восточная часть / Eastern part	0.15	3.65	0.30	7.06	3.71	67.28	2.25	40.66
Центральная часть / Central part	0.07	0.66	0.19	5.18	2.08	14.67	1.05	9.94
Западная часть / Western part	0.07	0.77	0.23	7.67	2.22	8.29	0.72	9.09

Содержание **нитритов** возросло во всех частях бухты: максимальная концентрация в восточной части составила 7.06 мкМ/л, в западной – 7.67 мкМ/л.

Снижение среднего и максимального содержания **нитратов** в 1.1 и 1.6 раза (до 2.22 и 8.29 мкМ/л соответственно) отмечено в водах более чистой западной части Севастопольской бухты. В остальных выделенных акваториях наблюдается увеличение концентрации. В центральной части максимальное значение составило 14.7 мкМ/л, в восточной части – 67.3 мкМ/л, а в Южной бухте – 286.4 мкМ/л.

В водах экосистем всех частей Севастопольской бухты среднее содержание **аммония** выросло на 0.15–1.20 мкМ/л, а максимальное снизилось в 1.5 раза в центральной части бухты и незначительно изменилось в западной (сократилось до 9.09 мкМ/л). При этом в Южной бухте максимальные значения этого показателя выросли вдвое (до 16.02 мкМ/л), а в восточной части – в восемь раз (до 40.66 мкМ/л).

Показано (рис. 2), что в последнее десятилетие во всех частях Севастопольской бухты изменилось процентное соотношение различных форм неорганического азота. Это в большей степени касается содержания восстановленной формы азота – аммония. В последние годы во всех акваториях бухты наблюдается увеличение его содержания, причем самый большой рост (с 23 до 36 %) отмечен в западной части бухты. По-видимому, сказывается расположение в этой части бухты пляжа Хрустального и рост рекреационной нагрузки на акваторию. Одновременно происходит уменьшение содержания нитратов (рис. 2). В западной части бухты их содержание снизилось с 72 до 59 %. Самые незначительные изменения содержания неорганических форм азота наблюдаются в акватории Южной бухты.



Р и с. 2. Распределение долей содержания форм минерального азота в выделенных районах Севастопольской бухты в 1998–2012 гг. (а) [6] и в 2012–2020 гг. (б). Желтый цвет – NO₂; зеленый – NO₃; розовый – NH₄

F i g. 2. Distribution of content shares for mineral forms of nitrogen in the Sevastopol Bay in 1998–2012 (a) [6] and 2012–2020 (b). Yellow color – NO₂; green – NO₃; pink – NH₄

Сравнительный анализ скорости и времени удаления неорганических форм азота и фосфора в экосистеме Севастопольской бухты в 2012–2020 гг. и предыдущий период 1998–2012 гг. показал разнонаправленность тенденций изменений этих параметров в акваториях выделенных районов. Так, время удаления **фосфатов** из экосистем всех частей бухты в последние годы уменьшилось, но по-прежнему остается максимальным в восточной части Севастопольской бухты (табл. 3). Очевидно, что сокращение времени присутствия фосфатов обусловлено увеличением средней скорости элиминации повсеместно за исключением Южной бухты, где эта скорость снизилась с 0.007 до 0.005 мкМ/(л·сут). Максимальная расчетная скорость удаления фосфатов (0.039 мкМ/(л·сут)) фиксировалась в центральной части бухты, в то время как в остальных районах скорость удаления не превышала 0.023–0.024 мкМ/(л·сут).

В восточной и центральной частях Севастопольской бухты отмечено увеличение средней скорости удаления **нитритов** в 2.3–2.5 раза. Максимальные значения показателя определены для восточной и западной частей бухты (0.085 и 0.097 мкМ/(л·сут) соответственно). В центральной части скорость удаления снизилась с 0.126 мкМ/(л·сут) в 1998–2012 гг. до 0.062 мкМ/(л·сут) в 2012–2020 гг. Время удаления нитритов сократилось для всех частей бухты, кроме западной, для которой наблюдается увеличение времени нахождения нитритов в экосистеме при относительно стабильной скорости элиминации.

Т а б л и ц а 3. Скорость v_i (мкМ/(л·сут)) и время t_y (сут) удаления форм неорганических фосфора и азота из разных частей Севастопольской бухты в 2012–2020 гг.

Т а б л и ц а 3. Rate v_i ($\mu\text{M}/(\text{L}\cdot\text{day})$) and time (day) of removal of inorganic phosphorus and nitrogen from different parts of Sevastopol Bay in 2012–2020

Район / Area	Фосфаты (PO_4^{3-}) / Phosphates		Нитриты (NO_2^-) / Nitrites		Нитраты (NO_3^-) / Nitrates		Аммоний (NH_4^+) / Ammonium	
	v_i	t_y	v_i	t_y	v_i	t_y	v_i	t_y
Южная бухта / Yuzhnaya Bay	0.005	18–22	0.006	33–37	0.536	22–28	0.033	49–53
Восточная часть / Eastern part	0.005	30–38	0.010	25–29	0.051	63–72	0.029	76–81
Центральная часть / Central part	0.008	9–15	0.007	24–27	0.048	40–43	0.031	34–42
Западная часть / Western part	0.006	13–22	0.013	15–18	0.037	58–61	0.036	20–29

Для **нитратов** наблюдается четкая закономерность – даже небольшое увеличение скорости их удаления из Южной бухты и центральной части Севастопольской бухты сокращает время элиминации. И наоборот, при существенном уменьшении скорости удаления нитратов из акватории восточной и западной частей бухты (в 2.7 и 7.5 раза соответственно) время их удаления значительно увеличивается (в 2.3 и 7.4 раза соответственно). Максимальная скорость удаления (2.098 мкМ/(л·сут)), как и в предыдущий период, отмечена в Южной бухте, а в остальных районах она не превышала 0.396 мкМ/(л·сут).

За исследуемый период во всех частях акватории Севастопольской бухты, как показано выше, возросло содержание **аммония**. Средняя скорость его удаления снизилась втрое в акватории Южной бухты и в 5.8 раза – в западной, наиболее чистой части Севастопольской бухты. Максимальная скорость удаления во всех выделенных районах не превышала 0.181 мкМ/(л·сут) по сравнению с максимумом 0.940 мкМ/(л·сут), отмеченным в предыдущий расчетный период (1998–2012 гг., западная часть бухты [5]). Падение скорости удаления аммония обусловило увеличение времени, требуемого для самоочищения экосистем. Так, время пребывания аммония в водах бухты Южной и в восточной части Севастопольской бухты возросло в 2.8 и 2.3 раза соответственно. А для акватории западной части бухты расчетное время возросло более чем в восемь раз.

Особый интерес представляет информация по уточнению способности экосистем всех частей Севастопольской бухты к самоочищению по величине АЕ за последнее десятилетие (табл. 4), в частности по ее удельной, то есть рассчитанной на фиксированную единицу объема (в нашем случае на 1 л), величине ($\text{AE}_{\text{уд.}}$), которая позволяет нивелировать различия в объеме разных частей акватории Севастопольской бухты.

Т а б л и ц а 4. Характеристики способности выделенных акваторий Севастопольской бухты к самоочищению $AE_{уд}$ (мкМ/(л·сут)) и АЕ акватории (т/год) в 2012–2020 гг.

Table 4. Characteristics of capacity of the study water areas of Sevastopol Bay to self-purification AC_{spec} ($\mu\text{M}/(\text{L}\cdot\text{day})$) and AC of water area (t/year) in 2012–2020

Район / Area	Фосфаты (PO_4^{3-}) / Phosphates		Нитриты (NO_2^-) / Nitrites		Нитраты (NO_3^-) / Nitrates		Аммоний (NH_4^+) / Ammonium	
	$AE_{уд}$ / AC_{spec}	АЕ / AC	$AE_{уд}$ / AC_{spec}	АЕ / AC	$AE_{уд}$ / AC_{spec}	АЕ / AC	$AE_{уд}$ / AC_{spec}	АЕ / AC
Южная бухта / Yuzhnaaya Bay	0.0076	0.89	0.0046	0.24	1.524	79.86	0.389	20.39
Восточная часть / Eastern part	0.0017	0.25	0.0029	0.19	0.565	37.37	0.142	9.41
Центральная часть / Central part	0.0111	2.89	0.0026	0.30	2.315	269.75	0.519	60.43
Западная часть / Western part	0.0070	2.69	0.0034	0.58	3.003	519.04	0.571	98.69

В рассматриваемый период 2012–2020 гг. в отношении **фосфатов** минимальное значение $AE_{уд}$ наблюдается в восточной части бухты – 0.0017 мкМ/(л·сут). Согласно расчетной АЕ этой акватории, без ущерба для экосистемы может поступать до 0.25 тонн фосфора в год. В предыдущий расчетный период 1998–2012 гг. это значение составляло 0.64 тонны фосфора в год, то есть порог допустимого уровня снизился в 2.6 раза [7]. Для экосистемы Южной бухты значение показателя составляет 0.0076 мкМ/сут или 0.89 т/год, что указывает на незначительное снижение границы допустимого уровня (0.93 т для 1998–2012 гг. [7]). Близким значением $AE_{уд}$ характеризуется и западная часть бухты. Повышенная способность центральной части к самоочищению нивелируется разницей между объемами ее акватории и акватории западной части, поэтому значения АЕ этих частей близки по значению (2.89 и 2.69 тонн фосфатов в год соответственно). Для сравнения: в 1998–2012 гг. разница была значительнее – 1.17 и 2.00 тонн фосфатов в год [7], что указывает на улучшение ситуации в настоящее время.

В отношении **нитритов** важно отметить существенное снижение способности к самоочищению западной части Севастопольской бухты. Так, в сравнении с предыдущим расчетным периодом (1998–2012 гг.) $AE_{уд}$ снизилась в 14.3 раза, что повлекло снижение в 12.6 раза АЕ указанной акватории (7.38 и 0.58 тонны нитритов в год соответственно). Для экосистемы центральной и восточной частей бухты также выявлено снижение АЕ, но не столь резкое – до 0.30 и 0.19 тонны нитритов в год соответственно против 0.48 и 0.39 тонны нитритов в год в предыдущий период [6]. В южной части бухты не наблюдается изменений за два периода: $AE_{уд}$ 0.005 мкМ/(л·сут), АЕ акватории 0.24–0.25 т/год.

Величина $AE_{уд.}$ в отношении **нитратов** в экосистеме восточной части бухты в сравнении с предыдущим расчетным периодом существенно не изменилась. В последнее десятилетие экосистема этого района характеризуется самой слабой способностью к самоочищению. Способность экосистемы Южной бухты к самоочищению возросла более чем вдвое, достигнув предела по удалению нитратов в 79.86 т/год. Еще более изменилась AE центральной части Севастопольской бухты, достигнув значения почти 270 т нитратов в год, $AE_{уд.}$ в сравнении с предыдущим расчетным периодом возросла с 0.614 до 2.315 мкМ/(л·сут). Как и в случае нитритов, в граничащей с открытым морем западной части бухты наблюдается снижение способности к самоочищению, которое составило 519 тонн нитратов в год за последнее десятилетие, против 882 тонн в год за 1998–2012 гг. [6].

В отношении **аммония** минимальное значение $AE_{уд.}$ наблюдается в экосистеме восточной части бухты – 0.142 мкМ/(л·сут), что соответствует AE акватории 9.41 тонны аммония в год. Высокие значения $AE_{уд.}$ отмечены для экосистем западной и центральной частей бухты – 0.571 и 0.519 мкМ/(л·сут) соответственно, что соответствует AE акватории 98.69 и 60.43 т/год. Для сравнения: по данным 1998–2012 гг., эти значения составили для Южной бухты 6.90 тонны аммония в год, для восточной части бухты – 8.36 т, для центральной – 9.33 т, а для западной – 93.40 т [5]. Таким образом, для акваторий восточной и западной частей бухты изменения самоочистительной способности в отношении аммония незначительны. Однако, несмотря на значительное увеличение концентрации аммония в центральной части бухты, самоочистительная способность ее экосистемы улучшилась. По-видимому, существенную роль могли сыграть соответствующие гидрометеороусловия и гидродинамика вод в бухте. Чуть менее значимое усиление самоочистительной способности имеет место в Южной бухте, где $AE_{уд.}$ возросла с 0.132 до 0.389 мкМ/(л·сут).

Таким образом, наблюдается большой разброс данных по AE экосистемы в отношении как конкретного биогенного элемента, так и каждой отдельной части акватории Севастопольской бухты. Распределение концентрации биогенных элементов между различными частями Севастопольской бухты несколько не соответствует изменениям величины AE . Это обусловлено комплексностью AE , которая определяется процессами разной природы.

Представленная в табл. 4 информация позволяет оценить современную ситуацию для каждой конкретной акватории в отношении всех биогенных элементов по величине их удельной ассимиляционной емкости.

Таким образом, полученные результаты позволили оценить по величине AE общее состояние экосистем Севастопольской бухты:

– **Южная бухта.** В отношении фосфатов – незначительное уменьшение $AE_{уд.}$; в отношении нитратов и аммония – увеличение $AE_{уд.}$, в отношении нитритов – без изменений. В целом ситуация улучшилась.

– **Центральная часть бухты.** В отношении фосфатов – существенное увеличение $AE_{уд.}$; в отношении нитратов и аммония – существенное увеличение; в отношении нитритов – уменьшение. В целом ситуация существенно улучшилась.

– **Восточная часть бухты.** В отношении фосфатов – уменьшение $AE_{уд.}$; в отношении нитратов – незначительное уменьшение; в отношении аммония – незначительное увеличение; в отношении нитритов – существенное уменьшение. В целом ситуация ухудшилась.

– **Западная часть бухты.** В отношении фосфатов – увеличение $AE_{уд.}$; в отношении нитратов – существенное уменьшение; в отношении аммония и нитритов – уменьшение. В целом ситуация, как и в восточной части, за последнее время ухудшилась.

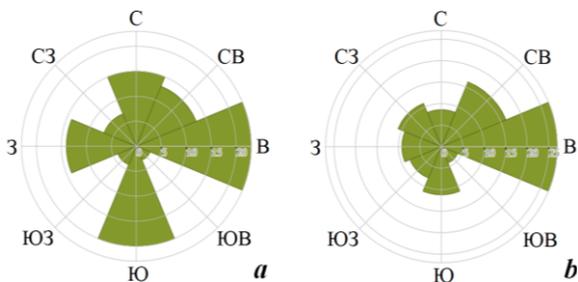
Для объяснения причин возникновения такой ситуации необходимо рассмотреть изменения гидрометеоситуации в последнее десятилетие.

Из-за вытянутой в зональном направлении ориентации бухты, окруженной высокими берегами, преобладающими направлениями ветров являются восточное (23.1 %) и южное (19.6 %) [11]. Изменения повторяемости ветров по направлениям за два периода (1998–2012 гг. [11] и 2012–2020²⁾ гг.) представлены на рис. 3.

Из рис. 3, *b* следует, что в современный период продолжительность восточных ветров увеличилась до 35 %, и по сравнению с предыдущим десятилетием существенно уменьшилась доля южных ветров (рис. 3, *a*). Как известно из данных работы [7], именно южные ветра затрудняют водообмен Южной бухты с акваторией всей Севастопольской бухты. Для установления причин различий в величине $AE_{уд.}$ в экосистемах различных частей бухты рассмотрим особенности их гидродинамической ситуации, полученные расчетным путем с использованием гидротермодинамического блока численной трехмерной нестационарной модели *MECCA* [8] при преобладающих ветрах восточных направлений (рис. 3, *b*). Результаты расчета течений, полученные для акватории Севастопольской бухты, представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наблюдающееся в последнее десятилетие увеличение периодичности действия ветров восточных направлений способствует усилению вентиляции вод Южной бухты и их переносу в западную часть бухты. Бухта Южная характеризуется затрудненным водообменом с прилегающей акваторией. В воды бухты поступают рекордные объемы бытовых и ливневых стоков, в ее акватории располагаются причалы.

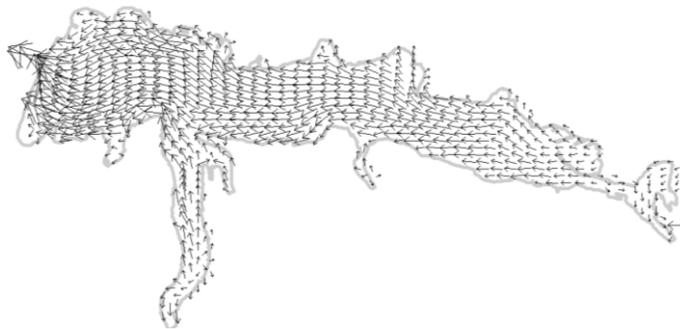
При преобладании над акваторией бухты северных и северо-восточных ветров формируется поверхностное дрейфовое течение, направленное вдоль оси бухты на запад. Это способствует более интенсивному поступлению вод в Южную бухту как в поверхностном, так и в придонном слое. Северный и северо-западный ветер вызывает нагонный эффект и соответствующий компенсационный подъем вод с придонных горизонтов к поверхности срединной части Южной бухты [7].



Р и с. 3. Роза ветров в акватории Севастополя в 1998–2012 гг. (*a*) и 2012–2020 гг. (*b*)

Fig. 3. Wind rose for the Sevastopol water area in 1998–2012 (*a*) and 2012–2020 (*b*)

²⁾ URL: https://гp5.ru/Архив_погоды_в_Севастополе (дата обращения: 30.11.2023).



Р и с. 4. Схема поверхностных течений в акватории Севастопольской бухты при восточном ветре скоростью 5–10 см/с

F i g. 4. Map of surface currents in Sevastopol Bay under an easterly wind of 5–10 cm/s

Остановимся на особенностях динамического режима в центральной части бухты как возможной причине увеличения самоочистительной способности ее экосистемы в последнее десятилетие. В силу расположения центральной части бухты течения здесь определяются в основном ветром. Под воздействием восточного ветра в поверхностном слое вод формируется прямой поток западного направления, который также сохраняется при северном и южном ветрах и способствует переносу загрязнений в западную часть бухты (рис. 4).

Согласно данным работы [5], в центральной части Севастопольской бухты находятся два встречных потока – один с востока на запад со стороны р. Черной и второй со стороны открытой части моря. Это способствует формированию в центральной части бухты буферной зоны, в которой как бы «замыкаются» разнонаправленные потоки, несущие загрязнение. Это объясняется ориентацией и морфометрическими характеристиками бухты, а также поступлением с востока речных вод, создающих уклон водной поверхности и обуславливающих стоковые течения.

В восточную часть Севастопольской бухты поступают воды р. Черной, основная часть стока (до 80 %) которой приходится на зимний и весенний периоды. Во время половодья при слабых ветрах стоковые течения, обусловленные поступлением вод р. Черной, становятся преобладающими. Ухудшение самоочистительной способности этой части бухты в последнее десятилетие связано с увеличением потока биогенных азота и фосфора со стоком р. Черной. Этот поток особенно усиливается в условиях формирования зимне-весенних паводков, когда распресненные поверхностные воды паводка распространяются вплоть до района Нефтегавани. В водах паводка наблюдается повышенное содержание кремния, нитратов, аммония и фосфора, которые попадают в воды реки и бухты из бытовых стоков в нижнем течении реки, а также из сбросов сточных вод населенных пунктов и предприятий, расположенных в водоохранной зоне. Более подробная информация о влиянии режимов конкретного зимне-весеннего паводка и летней межени р. Черной в 2015 г. на самоочистительную способность восточной части бухты представлена в работе [12].

Для этой части акватории Севастопольской бухты существенное значение имеют и особенности строения дна. Более продолжительное удаление фосфатов в восточной части Севастопольской бухты (табл. 3), наблюдаемое нами в последнее десятилетие, может свидетельствовать о накоплении их в донных грунтах и повышении риска вторичного загрязнения акватории. Так, в работе [13] приведены полученные в экспедиции МГИ РАН сведения об искусственном углублении дна (глубины 19–20 м) в районе плавучего дока, расположенного у южного берега восточной части Севастопольской бухты. В результате этого углубления дна в восточной части бухты возникли восстановительные условия, при которых вследствие гипоксии фосфор, накопленный в донных отложениях, может повторно поступать в придонный слой воды [7]. Это также способствует окислению органического вещества за счет нитратов с образованием аммония и нитритов.

В последнее время наблюдается некоторое уменьшение самоочистительной способности экосистемы западной части бухты, особенно в отношении неорганических форм азота (табл. 4). Это связано как с гидродинамическим режимом (рис. 4), согласно которому перенос ЗВ, включая биогенные элементы, осуществляется в западном направлении, так и с увеличением количества источников поступления биогенных элементов в результате увеличения рекреационной нагрузки на побережье бухты.

Заключение

На основе сводной базы архивных материалов МГИ РАН и СО ФГБУ ГОИН за 2012–2020 гг. балансовым методом рассчитана величина ассимиляционной емкости АЕ экосистем Севастопольской бухты в отношении биогенных форм азота и фосфора и ее удельная составляющая $AE_{уд}$, которая позволяет учесть различия в объеме исследуемых частей бухты.

Оценены средние и максимальные концентрации неорганических форм фосфора (PO_4) и азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) за указанный период, получены значения средней и максимальной скоростей удаления указанных биогенных элементов из экосистем бухты и рассчитано время их удаления из экосистем бухты.

Приведены результаты сравнения изменения процентного соотношения форм неорганического азота (NO_2 , NO_3 , NH_4) в акватории всех частей Севастопольской бухты за два периода (1998–2012 гг. и 2012–2020 гг.). Эти изменения в большей степени отразились на содержании восстановленной формы азота аммония. В последние годы наблюдается увеличение ее содержания во всех акваториях бухты, причем наибольший рост наблюдается в акватории западной части бухты – с 23 до 36 %. Средняя и максимальная концентрация нитритов (NO_2) в экосистемах всех частей бухты только увеличивается. При этом максимальное значение концентрации отмечено в восточной и западной частях бухты (7.07 и 7.67 мкМ/л соответственно).

Показано, что за последнее десятилетие произошли определенные изменения самоочистительной способности экосистем бухты, которые проявились в большом разбросе данных о величине ассимиляционной емкости исследуемых экосистем в отношении как конкретного биогенного элемента, так и экосистемы каждой отдельной части акватории бухты. Для всех исследуемых акваторий Севастопольской бухты в некоторых случаях наблюдалось улучшение самоочистительной способности, а в некоторых – ухудшение.

Так, самоочистительная способность экосистемы Южной бухты улучшилась в отношении нитратов и аммония и ухудшилась в отношении фосфатов.

Для центральной части бухты отмечено увеличение самоочистительной способности в отношении фосфатов, нитратов и аммония, уменьшение только в отношении нитритов. В целом ситуация существенно улучшилась.

Для экосистемы восточной части бухты, находящейся под влиянием стока р. Черной, в последнее десятилетие наблюдается уменьшение самоочистительной способности в отношении фосфатов и всех форм азота, а значит, и ухудшение состояния экосистемы.

Для экосистемы западной части бухты отмечено уменьшение самоочистительной способности в отношении всех неорганических форм азота и незначительное увеличение в отношении фосфатов. В целом, как и в восточной части бухты, состояние экосистемы ухудшилось.

Показано, что полученные в работе данные о состоянии экосистем Севастопольской бухты могут быть связаны с изменениями в последнее десятилетие ветрового режима над акваторией и формирующейся под его влиянием системой поверхностных течений в акватории бухты. Кроме того, современное состояние экосистем бухты связано с увеличением количества источников поступления биогенных элементов в результате роста рекреационной нагрузки на побережье бухты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV : Черное море. Вып. 3 : Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябинина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 230 с.
2. Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент (Черное море, наблюдения 2004–2005 гг.) / А. С. Лопухин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 74–109. EDN YMTPTQ.
3. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 10.11.2023).
4. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Котельянец Е. А.* Ассимиляционная емкость экосистем морских мелководных акваторий с различным уровнем антропогенной нагрузки как метод оценки их самоочистительной способности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 4. С. 38–51. EDN ZXHLNF. doi:10.21513/0207-2564-2017-4-38-51
5. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Природно-климатические и антропогенные факторы, определяющие самоочистительную способность морских мелководных экосистем в отношении восстановленных форм азота // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон моря. 2021. № 3. С. 23–36. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-23-36
6. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слечук К. А.* Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76

7. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Хмара Т. В.* Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 110–123. EDN AWWRHN. doi:10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt
8. *Иванов В. А., Тучковенко Ю. С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
9. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Москва : Гидрометеоиздат, 1989. 528 с.
10. *Sovga E., Mezentseva I., Verzhvetskaia L.* Assimilation Capacity of the Ecosystem of Sevastopol Bay // *Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST' 2015, 6–10 October 2015. Varna, Bulgaria. Varna, 2015. Vol. 1. P. 317–326.*
11. *Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н., Липченко М. М.* Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2003. Вып. 9. С. 13–28. EDN ZREIKZ.
12. *Совга Е. Е., Хмара Т. В.* Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. № 1. С. 31–40. EDN AWWRHN. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-31-40
13. *Кондратьев С. И., Видничук А. В.* Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 107–121. EDN EDXBJU. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121

Поступила 21.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.09.2023 г.; принята к публикации 11.10.2023 г.; опубликована 20.12.2023 г.

Об авторах:

Мезенцева Ирина Владимировна, старший научный сотрудник, Севастопольское отделение Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова (299011, Россия, Севастополь, ул. Советская, 61), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9771-0380**, mez-irina@mail.ru

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0670-4573**, **SPIN-код: 8675-2443**, **ResearcherID: A-9774-2018**, esovga@mhi-ras.ru

Хмара Татьяна Викторовна, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, xmara@mhi-ras.ru

Заявленный вклад авторов:

Мезенцева Ирина Владимировна – проведение расчета ассимиляционной емкости экосистем частей Севастопольской бухты, анализ результатов расчета

Совга Елена Евгеньевна – постановка задачи исследования, анализ методов расчета ассимиляционной емкости, сопоставление величин ассимиляционной емкости экосистем различных частей Севастопольской бухты, формирование статьи

Хмара Татьяна Викторовна – проведение расчетов, обсуждение результатов исследования, представление данных в тексте и их анализ, редактирование рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.